



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

VLIV VODÍKU NA VLASTNOSTI MATERIÁLŮ POUŽÍVANÝCH V TURBODMYCHADLECH

THE EFFECT OF HYDROGEN ON THE PROPERTIES OF MATERIALS USED IN TURBOCHARGERS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Nela Hrdličková

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Libor Pantělejev, Ph.D.

BRNO 2025

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Energetický ústav
Studentka:	Nela Hrdličková
Studijní program:	Energetika
Studijní obor:	bez specializace
Vedoucí práce:	doc. Ing. Libor Pantělejev, Ph.D.
Akademický rok:	2024/25

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 bakalářské práce:

Vliv vodíku na vlastnosti materiálů používaných v turbodmychadlech

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V rámci bakalářské práce bude v části teoretické zpracována rešerše stran vlivu vodíku na vlastnosti materiálů používaných v turbodmychadlech plánovaných pro užití paliv s obsahem vodíku. Experimentální část práce bude zaměřena na hodnocení vlastností vybraného materiálu vystaveného působení plynného vodíku v podmínkách simulujících reálný provoz turbodmychadla (teplota a tlak). Na základě získaných výsledků pak bude uvažována aplikace ochranných bariér vytvářených pomocí technologie Cold Spray.

Cíle bakalářské práce:

- 1) Zpracovat literární rešerši se zaměřením na turbodmychadla pro použití paliv s obsahem vodíku, případně pro syntetická paliva.
- 2) Provést experimenty pro určení vlivu plynného vodíku na materiál používaný pro výrobu konkrétní komponenty turbodmychadla, vč. mechanických zkoušek a hodnocení mechanismu porušení.
- 3) Na základě dosažených výsledků diskutovat možnosti aplikace ochranných vrstev pomocí technologie CS (bariérová ochrana).

Seznam doporučené literatury:

GANGLOFF, R. P a SOMERDAY, Brian P. Gaseous hydrogen embrittlement of materials in energy technologies. Volume 1, The problem, its characterisation and effects on particular alloy classes. Oxford: Woodhead Publishing, 2012. ISBN 978-0-85709-389-9.

GANGLOFF, R. P a SOMERDAY, Brian P. Gaseous hydrogen embrittlement of materials in energy technologies. Volume 2, Mechanisms, modelling and future developments. Oxford: Woodhead Publishing, 2012. ISBN 978-0-85709-537-4.

MATSUNAGA, Hisao; YAMABE, Junichiro; TAKAKUWA, Osamu; OGAWA, Yuhei a MATSUOKA, Saburo. Hydrogen gas embrittlement: mechanisms, mechanics, and design. Amsterdam: Elsevier, 2024. ISBN 978-0-12-824358-9.

LIU, Zhongzhi; GUO, Zhiwei; RAO, Xiang; XU, Yicong; SHENG, Chenxing, et al. A comprehensive review on the material performance affected by gaseous alternative fuels in internal combustion engines. Engineering failure analysis. 2022, Vol. 139, p. 106507. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2022.106507

BAO, Ling-zhi; SUN, Bai-gang; LUO, Qing-he; LI, Jin-cheng; QIAN, Ding-chao et al. Development of a turbocharged direct-injection hydrogen engine to achieve clean, efficient, and high-power performance. Fuel. 2022, Vol. 324, p. 124713. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.124713

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2024/25

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá vlivem plynného vodíku na vlastnosti litiny s kuličkovým grafitem (EN-GJS 400-15), která se běžně používá při výrobě komponent turbodmychadel pro spalovací motory. Cílem práce je zhodnotit chování tohoto materiálu při vystavení vodíkovému prostředí za zvýšené teploty a tlaku, které simulují reálný provozní stav zařízení. Součástí této práce je literární rešerše zahrnující konstrukční varianty turbodmychadel, vliv kvality a složení paliv na jejich provoz a materiály využívané pro jejich klíčové komponenty. Dále se práce věnuje vlivu vodíku z hlediska jeho pronikání do materiálu a modelům vodíkového zkrěhnutí. Experimentální část se soustředí na hodnocení vlastností tří skupin vzorků připravených z reálného kusu vložky turbodmychadla na základě provedených mechanických zkoušek, fraktografické a metalografické analýzy.

Klíčová slova

vodík, turbodmychadlo, litina s kuličkovým grafitem

ABSTRACT

This bachelor's thesis investigates the influence of gaseous hydrogen on the properties of spheroidal graphite cast iron (EN-GJS 400-15), a material commonly used in the production of turbocharger components for internal combustion engines. The goal of the thesis is to evaluate the behavior of this material when exposed to a hydrogen environment under elevated temperature and pressure conditions that simulate real operating states. The thesis includes a literature review covering turbocharger design variants, the impact of fuel quality and composition on their operation, and the materials used for their key components. Furthermore, it explores hydrogen's effect in terms of its penetration into materials and models of hydrogen embrittlement. The experimental part focuses on evaluating the properties of three groups of samples prepared from a turbocharger insert. These samples were tested using mechanical testing, as well as fractographic and metallographic analysis.

Key words

hydrogen, turbocharger, ductile cast iron

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HRDLIČKOVÁ, Nela. *Vliv vodíku na vlastnosti materiálů používaných v turbodmychadlech*. Online, bakalářská práce. Libor PANTĚLEJEV (vedoucí práce). Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2025. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/166031>. [cit. 23-05-2025].

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Vliv vodíku na vlastnosti materiálů používaných v turbodmychadlech** vypracovala samostatně dle pokynů vedoucího práce s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

.....
23. 5. 2025

.....
Nela Hrdličková

PODĚKOVÁNÍ

Tato práce byla vytvořena v rámci studia možností bariérových ochran proti vlivu prostředí vodíku a podpořena projektem NCK MESTEC2 – NCK Mechatroniky a chytrých technologií pro strojírenství 2 – projekt TAČR (2023–2025, TN02000010).

Mé poděkování patří především doc. Ing. Liboru Pantělejevovi, Ph.D., za odborné vedení práce, cenné rady a připomínky, které mi poskytl během vypracování této bakalářské práce, a také za jeho vstřícnost a ochotu s jakou byl vždy připraven konzultovat mé dotazy.

OBSAH

ÚVOD	10
TEORETICKÁ ČÁST	11
1 Turbodmychadla.....	11
1.2 Konstrukce	12
1.2.1 Turbínová skříň a turbínové kolo	12
1.2.2 Kompresorová skříň a kolo kompresoru	13
1.3 Základní typy.....	13
1.3.1 Twin turbo	13
1.3.2 Twin scroll.....	14
1.3.3 Turbodmychadlo s proměnnou geometrií lopatek.....	14
1.3.4 Elektrická turbodmychadla.....	15
1.4 Kvalita paliv	15
1.4.1 HFO (heavy fuel oil)	15
1.4.2 MDO (marine diesel oil)	16
1.4.3 Biopaliva	17
1.4.4 Plyn.....	17
1.5 Materiály používané v turbodmychadlech	18
1.5.1 Hliníkové slitiny (Al slitiny)	18
1.5.2 Niklové superslitiny (Ni-superslitiny).....	19
2 Vodík.....	20
2.1 Vliv vodíku na vlastnosti materiálů	20
2.2 Vodíková křehkost	21
2.2.1 Teorie vnitřního pnutí.....	22
2.2.2 Beachemova teorie interakce vodík-plastická deformace	22
2.3 Pronikání vodíku do oceli	23
2.4 Potlačení vodíkové křehkosti	24
2.5 Příměsi prvků	25
2.6 Výroba vodíku.....	26
2.7 Vodík v dopravě	27
EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	28
3 Experimentální techniky.....	28
3.1 Vzorkový materiál.....	28
3.2 Experimenty za zvýšené teploty.....	28
3.3 Zkouška tahem	29
3.4 Fraktografická analýza	29

3.5	Metalografická analýza	29
3.5.1	Příprava vzorku	30
6.5.2	Světelná mikroskopie	31
4	Výsledky.....	32
4.1	Zkouška tahem	32
4.1.1	Smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$	32
4.1.2	Mez pevnosti v tahu R_m	32
4.1.3	Tažnost materiálu A_5	33
4.1.4	Kontrakce materiálu Z	33
4.2	Fraktografická analýza	33
4.3	Metalografická analýza	41
4.4	Diskuse výsledků.....	44
	ZÁVĚR	45
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	46
	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	49
	SEZNAM OBRÁZKŮ	50
	SEZNAM TABULEK	51

ÚVOD

Současný způsob zajišťování světové poptávky energií je založený primárně na fosilních palivech. Tento přístup je však z dlouhodobého hlediska neudržitelný, protože zásoby fosilních paliv se neustále ztenčují, jejich těžba je náročnější a nákladnější, což může představovat riziko pro ekonomickou i energetickou bezpečnost. Kromě toho spalování fosilních paliv významně zatěžuje životní prostředí. Vlivem spalování těchto paliv se každoročně do atmosféry vypouští desítky milionů tun oxidu uhličitého, což přispívá ke globálnímu oteplování a lokálnímu znečištění naší planety. V důsledku těchto faktorů roste tlak na hledání čistějších a udržitelnějších energetických zdrojů a jednou z nejperspektivnějších možností se ukázal být vodík [1].

Při spalování vodíku vzniká pouze vodní pára, čímž je zcela eliminována produkce oxidu uhličitého a díky tomu vodík umožňuje snížení emisí skleníkových plynů a celkovou dekarbonizaci dopravy, průmyslu a energetiky. Ačkoliv je dnes nejčastěji spojován s využitím v palivových článcích, stále větší pozornost se věnuje i jeho aplikaci ve spalovacích motorech, a to buď jako příměsi ke konvenčním palivům, nebo jako samostatného paliva. Hlavní výhodou tohoto přístupu je možnost využití současné infrastruktury a výrobních technologií, a přitom výrazné snížení emisní zátěže [1, 2].

Vodík však přináší i nové technologické výzvy, především v oblasti interakce s materiály, které nebyly původně navrženy pro dlouhodobý kontakt s vodíkem. Jeho vysoká reaktivita a schopnost pronikat do kovových struktur může nepříznivě ovlivnit mikrostrukturu a mechanické vlastnosti některých technických materiálů. To je obzvlášť významné v případě součástí vystavených extrémním podmínkám, jako jsou například turbodmychadla spalovacích motorů. Pokud motor spaluje směs s vodíkem, nebo dokonce čistý vodík, mění se podmínky ve výfukovém potrubí: teplota, chemické složení i proudění plynů. A právě tyto změny mohou mít zásadní vliv na životnost materiálů, ze kterých je turbodmychadlo vyrobeno [1, 2].

Tato bakalářská práce se proto zaměřuje na stanovení vlivu plynného vodíku na vlastnosti litiny s kuličkovým grafitem, která je jedním z materiálů používaných při výrobě součástí turbodmychadla. V rámci práce budou sledovány změny mikrostruktury a mechanických vlastností po vystavení materiálu simulovaným provozním podmínkám a současně budou posouzeny možnosti preventivní ochrany těchto materiálů. Výsledky by mohly přispět k lepšímu pochopení chování materiálů ve vodíkovém prostředí a k bezpečnějšímu využití vodíku ve spalovacích motorech.

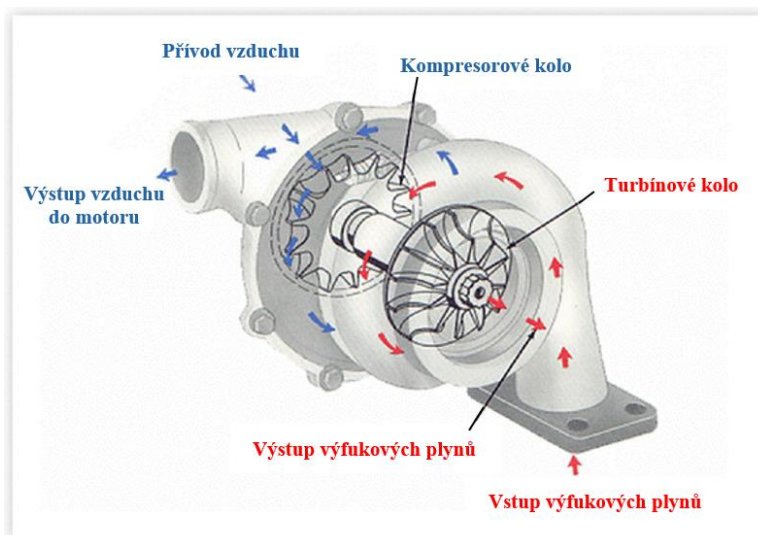
TEORETICKÁ ČÁST

1 Turbodmychadla

Turbodmychadlo je zařízení, využívané pro zvýšení účinnosti a snížení spotřeby paliva a emisí spalovacího motoru. Skládá se ze dvou oběžných kol vzájemně propojených hřídelí. První ze dvou oběžných kol – turbína je roztáčena pomocí výfukových plynů, zatímco druhé oběžné kolo (kompresorové) saje ze sání čerstvý vzduch a stlačuje ho na menší objem, čímž zároveň zvyšuje jeho tlak. Díky stlačení vnášíme do spalovací komory vzduch nebo směs vzduch-palivo s tlakem vyšším, než je atmosférický. To nám umožňuje přivádět i větší množství paliva a získat tak vyšší výkon na jeden cyklus motoru. Turbodmychadla jsou považována za zařízení šetrná k životnímu prostředí, a to právě díky využívání energie výfukových plynů.

Turbodmychadla mají ale i svoji nevýhodu. Dostávají se do problémů v nižších otáčkách motoru, kdy na turbínu dmychadla nepřichází dostatek výfukových plynů a turbína tak není dostatečně roztáčena. To má za následek menší točivý moment a snížení výkonu motoru. Tento nepříznivý jev se, ale dá zdárně kompenzovat pomocí kompresoru. Ve chvíli, kdy motor sníží otáčky, automaticky se připojí kompresor, zvýší točivý moment a tím odstraní slabou akceleraci. Přívod plnicího vzduchu buď do kompresoru nebo do turbínové části je řízen přepínáním regulační klapky [3].

Kompresor se také skládá ze dvou částí: kola kompresoru a skříně kompresoru. Způsob působení kompresoru je opačný než u turbíny. Kompresorové kolo je k turbíně připevněno hřídelí a jak turbína otáčí kompresorovým kolem, vysokorychlostní rotace nasává vzduch a stlačuje jej. Skříň kompresoru pak převádí vysokorychlostní nízkotlaký proud vzduchu na nízko rychlostní vysokotlaký proud vzduchu. Stlačený vzduch je následně tlačěn do motoru, což motoru umožňuje spálit více paliva a produkovat tak vyšší výkon [4].



Obrázek 1: Konstrukce turbodmychadla a proudění plynů (převzato a upraveno dle [5])

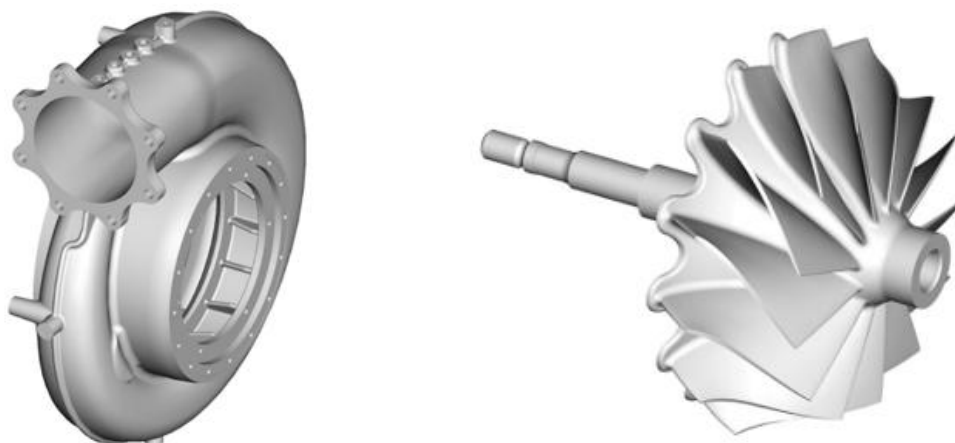
1.2 Konstrukce

Základními částmi turbodmychadla jsou turbínová a kompresorová skříň, které jsou vzájemně propojeny společnou hřídelí s oběžnými koly (viz obr. 1). Turbínová část je napojena na výfukové potrubí motoru a obsahuje turbínové kolo, jež je roztáčeno, jak bylo uvedeno výše, proudem výfukových plynů. Tento rotační pohyb se prostřednictvím hřídele přenáší na kompresorové kolo umístěné v kompresorové skříni, která je spojena se sacím potrubím. Tento systém je navržen tak, aby minimalizoval tření a odolával vysokým otáčkám. Typické naftové turbodmychadlo se točí rychlostí v rozmezí 100 000 ot./min až 250 000 ot./min. Hřídel spojující obě kola je uložena v ložiskovém systému obsahujícím radiální a axiální ložiska. Pro zajištění optimálního provozu a dlouhé životnosti je turbodmychadlo vybaveno systémem mazání, který zajišťuje přívod oleje k ložiskům a dalším pohyblivým částem [6, 7].

1.2.1 Turbínová skříň a turbínové kolo

Jedná se o vstupní část turbodmychadla. Úkolem skříně je shromažďovat a vést výfukové plyny na kolo turbíny. Energie z výfukových plynů otáčí turbínovým kolem a plyn odchází výfukem volně do okolí. Tvar a velikost skříně jsou navrženy s ohledem na optimalizaci proudění plynů a dosažení požadovaných výkonových parametrů turbodmychadla. Turbínová skříň musí odolávat extrémním teplotám i značným mechanickým namáháním, proto se k její výrobě nejčastěji používá tvárná litina legovaná prvky jako je křemík a molybden, které zvyšují teplotní odolnost a pevnost materiálu. Turbínová skříň nemá aktivní chlazení, proto je kladen důraz na tepelnou izolaci krytem, která brání přehřívání okolních komponent. Model turbínové skříně a turbínového kola je zobrazen na obr. 2.

Turbínové kolo je roztáčeno energií spalin, která se pomocí hřídele přenáší na kolo kompresoru. Spaliny dosahují vysokých teplot, a proto na turbínová kola volíme kvalitní materiály. Nejčastěji se jedná o žárupevné oceli, či slitiny na bázi niklu, které si i při velmi vysokých teplotách zachovávají potřebnou pevnost a tvarovou stálost. V některých případech se lopatky turbíny povrchově upravují ochrannými povlaky pro zvýšení odolnosti vůči korozi a oxidaci. [8]

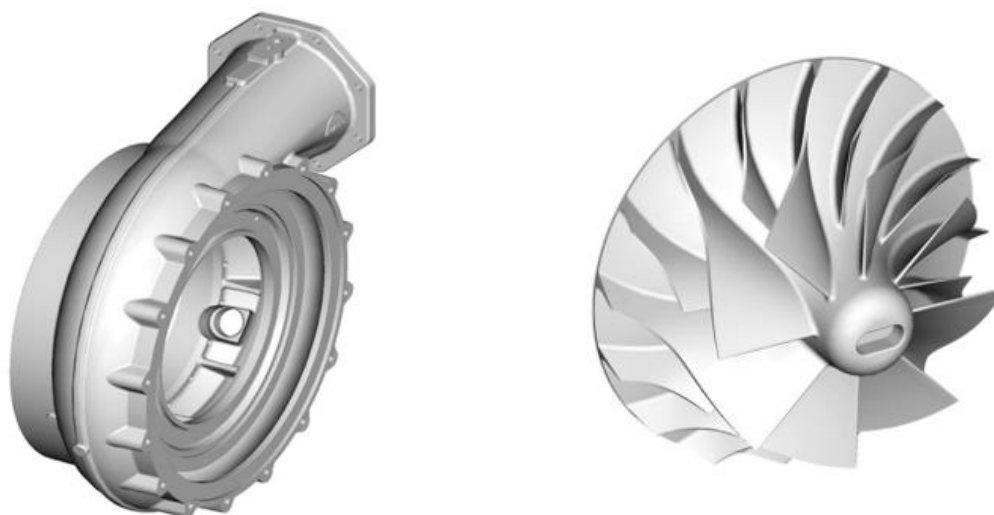


Obrázek 2: Turbínová skříň a turbínové kolo [8]

1.2.2 Kompresorová skříň a kolo kompresoru

Skříň kompresoru slouží k usměrnění nasávaného vzduchu do kompresorového kola a následnému vedení stlačeného vzduchu do sacího potrubí motoru. Její konstrukce (viz obr. 3) musí odolávat vysokým tlakům a teplotám, které během komprese vzduchu vznikají. Pro výrobu skříní kompresorů se běžně používá tvárná litina, která nabízí nejen vysokou pevnost a odolnost vůči teplotním změnám, ale i schopnost tlumit vibrace a hluk, což přispívá k celkovému snížení hlučnosti turbodmychadla. V některých případech, zejména u aplikací vyžadujících nižší hmotnost, se využívají hliníkové slitiny, které poskytují dobrý poměr mezi pevností a hmotností [8].

Kompresorová kola jsou jednou z nejvíce mechanicky zatěžovaných částí turbodmychadla, a proto je výběr vhodného materiálu zcela zásadní. Nejběžněji se pro jejich výrobu používají slitiny hliníku. Kola se vyrábějí buď přesným litím nebo frézováním z kovaného hliníkového polotovaru [8]. Hliník jako konstrukční materiál umožňuje vysokou dynamickou odezvu rotoru a zároveň minimalizuje setrvačné síly při vysokých otáčkách. V oblasti paty lopatek dosahuje mechanické napětí až 10 MPa, přičemž průřezová plocha lopatek nepřesahuje 500 mm². Z toho vyplývá, že každá jednotlivá lopatka může být namáhána silou až 5,6 tuny. Aby bylo možné takové zatížení bezpečně přenést, používají se slitiny hliníku, které prošly procesem precipitačního vytvrzení, čímž se výrazně zvýší jejich mez kluzu a pevnost v tahu [6].



Obrázek 3: Kompresorová skříň a kompresorové kolo [8]

1.3 Základní typy

1.3.1 Twin turbo

Jak už název sám napovídá tento typ využívá uspořádání dvou samostatných turbodmychadel, takže práci, kterou by běžně dělalo jedno turbo rozdělíme mezi dvě turbodmychadla. Nejběžnějším uspořádáním twin turb je uspořádání paralelní. Princip fungování je založen na tom, že máme dvě stejně velká samostatná turbodmychadla pro dvě samostatné řady válců

motoru. Turbína každého ze dvou daných turbodmychadel saje vzduch ze sání, žene ho přes mezichladič, škrtící klapku do sacího potrubí a tímto potrubím až do válců motoru.

Výhody: individuální fungování turbodmychadel, velký výkon

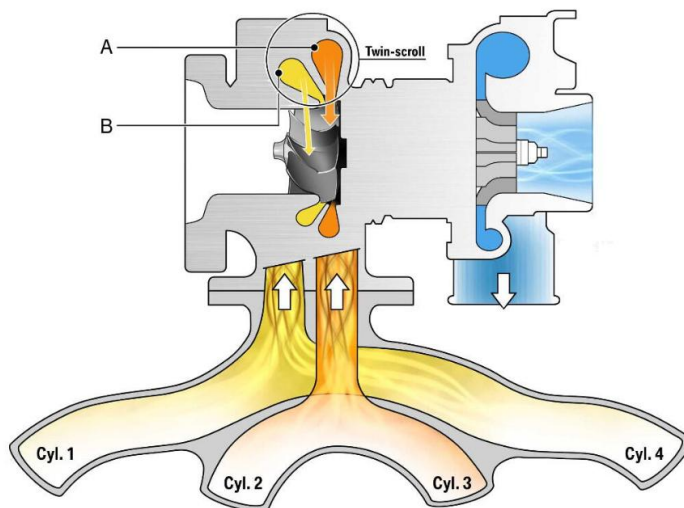
Nevýhody: v případě poruchy se často musí měnit obě turbodmychadla, vysoká cena [9]

1.3.2 Twin scroll

U tohoto typu může být název lehce zavádějící, protože se nám v něm sice vyskytuje slovo twin, ale ve skutečnosti se pod kapotou ukrývá turbodmychadlo jen jedno. Twin scroll je speciální tím, že na turbínové kolo vedou dva kanály přívodu výfukových plynů (viz obr. 4). Ke každému z těchto kanálů vedou svody tak, aby podtlak neubíral energii výfukovým plynům, které zrovna začínají vycházet z jiného válce. U čtyřválcového motoru jsou výfukové svody řešeny tak, že ty z 1. a 4. válce vedou do jednoho kanálu, zatímco svody z druhého a zároveň i třetího válce jsou spojeny s druhým kanálem. Dva kanály znamenají více přiváděné energie na lopatky turbíny, turbína se točí rychleji a generuje tím vyšší otáčky a zároveň více tlaku na druhé straně turbodmychadla.

Výhody: větší otáčky turbíny, vyšší výkon a účinnost

Nevýhody: technicky náročné, vysoká cena, vhodné jen pro určité typy motorů [10]



Obrázek 4: Twin-scroll turbo [6]

1.3.3 Turbodmychadlo s proměnnou geometrií lopatek

Turbodmychadlo využívá lopatky, které se automaticky přivírají a otvírají v závislosti na otáčkách motoru. Podstatou těchto lopatek je maximalizovat vztlak v celém rozsahu otáček. Při nízkých otáčkách se lopatky přivřou, tím se zmenší prostor kudy proudí výfukové plyny a dojde k nárůstu rychlosti proudění plynů na turbínu. Turbodmychadlo se tedy roztáčí rychleji, což má za následek menší prodlevu a větší tlak v nízkých otáčkách. Opačně je tomu u vysokých otáček motoru, kdy na turbo přichází více výfukových plynů. Proto když se motor dostane

do vysokých otáček lopatky se otevřou a vytvoří větší prostor pro průchod plynů. Lopatky jsou pohyblivě uloženy v prstenci vně turbíny, kde je v závislosti na poloze lopatek měněn úhel vtoku výfukových plynů. Regulace otáček prostřednictvím pohyblivých lopatek se uplatňuje téměř výhradně u vznětových motorů.

Výhody: malá hmotnost turbodmychadla, vysoký výkon, široký rozsah otáček

Nevýhody: vysoká cena, vysoké nároky na materiál lopatek [11]

1.3.4 Elektrická turbodmychadla

Elektrická turbodmychadla jsou využívána hlavně pro svoji vysokou účinnost a rychlé najetí do provozu. Tyto turbodmychadla jsou poháněna elektromotorem a elektrickým kompresorem, což umožňuje okamžité zvýšení výkonu a eliminuje prodlevu turba. Po sešlápnutí pedálu motor aktivuje kompresor, který bez jakékoli prodlevy tlačí studený vzduch do motoru. Jakmile je turbokompresor roztočený dostatečně rychle, motor a kompresor se automaticky vypnou, aby nedocházelo k zbytečnému vybíjení baterie. Turbodmychadlo se i po vypnutí motoru chvíli točí vlivem výfukových plynů a setrvačnosti. Elektrická turbodmychadla jsou vhodná pro vysoce výkonné a nákladní automobily.

Výhody: eliminace výkonové prodlevy, malé provozní náklady

Nevýhody: vysoká náklady a spotřeba paliva [12]

1.4 Kvalita paliv

Volba správného motorového paliva výrazně ovlivňuje výsledné složení a kvalitu výfukových plynů. Je proto důležité přistupovat k výběru paliva pro daný motor s velkou rozvahou. Nevhodně zvolené palivo nebo mixování více druhů paliv může vést ke snížení kvality a zanechávat ve výfukových plynech nečistoty. Tyto nečistoty pak mohou při průchodu turbodmychadlem působit abrazivně-erozivně či korozivně na jeho komponenty a tím zkracovat jejich životnost. V následujícím textu si proto představíme nejčastěji používané druhy motorových paliv a jejich charakteristiky.

1.4.1 HFO (heavy fuel oil)

Těžké topné oleje stejné viskozity mohou mít různé vlastnosti, kvalita oleje totiž závisí především na kvalitě ropy a použitém způsobu rafinace. Obecně se těžký topný olej skládá ze směsi destilátů a zbytkového oleje, které nám zůstávají produktem po moderních rafinérských procesech jako např. katalytické krakování nebo *visbreaking*. Tyto procesy musí být přísně kontrolovány, protože mají velký vliv na zapalovací a spalovací vlastnosti oleje a s tím související provozní vlastnosti motoru. Aby se palivo mohlo použít v provozu musí splňovat některou z mezinárodních specifikací. Mezní hodnoty pro těžké topné oleje jsou uvedeny v následující tabulce [8].

Tabulka 1: Specifikace těžkého topného oleje [8]

Viscosity (at 50 °C)	mm ² /s (cSt)	max.	700	Viscosity/injection viscosity
Viscosity (at 100 °C)		max.	55	Viscosity/injection viscosity
Density (at 15 °C)	g/ml	max.	1.010	Heavy fuel oil conditioning
Flash point	°C	min.	60	Flash point (ASTM D 93)
Carbon residue (Conradson)	% by weight	max.	20	Combustion properties
Sulfur content	% by weight	max.	5 or statutory specifications	Sulfuric acid corrosion
Ash content	% by weight	max.	0.15	Heavy fuel oil conditioning
Vanadium content	mg/kg	max.	450	Heavy fuel oil conditioning
Water content	% by vol.	max.	0.5	Heavy fuel oil conditioning
Sediment (potential)	% by weight	max.	0.1	
Aluminum and silicon content (total)	mg/kg	max.	60	Heavy fuel oil conditioning
Acid value	mg KOH/g	max.	2.5	

Provozní výkon motoru značně ovlivňuje i sklon oleje tvořit usazeniny. Špatně zvolený topný olej zvyšuje šanci na usazeniny ve spalovací komoře, plynových kanálech nebo systému výfukových plynů. Další značné problémy způsobují v motorech nevhodně zvolené příměsi. Špatně zvolená příměs způsobuje nepříznivé vlastnosti spalování, abrazivní a korozivní účinky a v neposlední řadě i nepříznivé účinky na životní prostředí. Zvláště nepřipustná je příměs motorových mazacích olejů, protože působí jako emulgační činidla, což má za následek, že voda, nečistoty a jemné částice katalyzátoru se přepravují jako jemná suspenze a brání tak potřebnému čištění paliva. To může způsobovat nadměrné opotřebení, které vede až k poškození motoru a součástí turbodmychadla. Za další nepřipustné příměsi pokládáme například uhelný dehtový olej, rozpouštědla, polymery, chemický odpad atd [8].

1.4.2 MDO (marine diesel oil)

Marine diesel oil neboli lodní nafta je nabízena jako těžký destilát nebo jako směs destilátů a malého množství oleje. MDO se vyrábí ze surové ropy bez obsahu organických kyselin. Má tmavě hnědou až černou barvu. Aby nám tento typ paliva neničil turbodmychadlo musíme hodnoty nečistot v době dodávky držet pod zadané limity viz Tabulka 2: Povolené obsahy nečistot v MDO. Definice charakteristických hodnot vycházejí ze specifikací ISO 8217–1996 [8].

Tabulka 2: Povolené obsahy nečistot v MDO [8]

	Test method	Characteristic value	
Total sediment content in % by weight	ISO CD 10307	0.10	0.10
Water content in % by vol.	ISO 3733	< 0.3	< 0.3
Sulfur content in % by weight	ISO 8754	< 2.0	< 2.0
Ash content in % by weight	ISO 6245	< 0.01	< 0.03
Carbon residue (MCR) in % by weight	ISO CD 10370	> 0.3	> 2.5
Cetane number	ISO 5165	> 35	> 35
Copper strip test	ISO 2160	< 1	< 1
Vanadium content in mg/kg	DIN 51790 T2	0	< 100
Aluminum and silicon content in mg/kg	ISO CD 10478	0	< 25

1.4.3 Biopaliva

Obecně se jedná o paliva vyrobená z biomasy, jako je bionafta, FAME (metylestery mastných kyselin), rostlinný olej, řepkový olej, palmový olej, olej na smažení atd. Surovinami pro jejich výrobu jsou nejrůznější druhy plodin cíleně pěstovaných k tomuto účelu. Jako motorová paliva lze použít transesterifikované rostlinné oleje (bionafta, FAME), která podléhají normě EN 14214, nebo netransesterifikované rostlinné oleje, které musí splňovat specifikace uvedené v Tabulka 3: Specifikace biopaliva. Tato specifikace je založena pouze na zkušenostech, a proto je potřeba uvedené hodnoty vnímat jen jako doporučené [8].

Tabulka 3: Specifikace biopaliva [8]

Characteristics/properties	Characteristic value	Test method
Density at 15 °C	900 - 930 kg/m ³	DIN EN ISO 3675, EN ISO 12185
Flash point	> 60 °C	DIN EN 22719
Lower fuel value	> 35 MJ/kg (typically: 37 MJ/kg)	DIN 51900-3
Viscosity/50 °C	< 40 cSt (corresponds to viscosity/40 °C < 60 cSt)	DIN EN ISO 3104
Cetane number	> 40	FIA
Carbon residue	< 0.4%	DIN EN ISO 10370
Sediment content	< 200 ppm	DIN EN 12662
Oxidation resistance (110 °C)	> 5 h	ISO 6886
Ash content	< 0.01%	DIN EN ISO 6245
Water content	< 0.5%	EN ISO 12537

1.4.4 Plyn

Existují různé druhy plynů, které se vzájemně liší složením, úpravou a obsahem energie v závislosti na tom z jakého zdroje pochází. Při použití ve spalovacích motorech jsou kladeny vysoké nároky na kvalitu takového plynu. Plyn musí být do motoru přiváděn suchý a bez

nečistot (bez vody, oleje, kondenzátu). Pokud koncentrace nečistot v plynu překračuje 50 mg/Nm^3 před napájecí systém musí být umístěn plynový filtr. Při použití plyných paliv mají rozhodující význam specifikace uvedené v dokumentaci výrobce motoru, avšak obecný přehled uvádí níže uvedená tab. 4.

Tabulka 4: Požadavky na zemní plyn [8]

Fuel		Natural gas	
		Unit	Value
Hydrogen sulfide content (H_2S)	max.	mg/Nm^3	5
Total sulfur content	max.	mg/Nm^3	30
Hydrocarbon condensate		mg/Nm^3	Not permissible at engine inlet
Humidity content		%	Not permissible at engine inlet
Particle concentration	max.	mg/Nm^3	50
Particle size	max.	μm	10

Na základě výše uvedených důvodů je patrné, že volba a kvalita paliva významně ovlivňují provozní spolehlivost a životnost komponent spalovacích motorů, zejména turbodmychadel, která jsou vystavena vysokým teplotám a agresivnímu prostředí výfukových plynů. Navzdory technologickému pokroku v oblasti úpravy a filtrace konvenčních paliv přetrvávají problémy spojené s tvorbou usazenin, korozivními účinky a produkcí škodlivých emisí. Tyto faktory vedou k rostoucímu zájmu o alternativní paliva s nižším ekologickým dopadem. Mezi nimi je vodík vnímán jako perspektivní řešení, které by mohlo přispět nejen ke snížení emisní zátěže, ale také k omezení problémů způsobených spalováním tradičních paliv.

1.5 Materiály používané v turbodmychadlech

Téma materiálů používaných v turbodmychadlech je poměrně rozsáhlé a zahrnuje celou řadu různých slitin a kovů, které jsou voleny podle specifických požadavků na výkon, odolnost a dlouhou životnost jednotlivých komponent. Kvůli extrémním provozním podmínkám, zahrnujícím vysoké teploty, mechanické namáhání a vliv prostředí, je volba materiálů pro jednotlivé komponenty turbodmychadla zcela zásadní. Níže se omezíme na základní popis několika typických materiálů používaných v turbodmychadlech.

1.5.1 Hliníkové slitiny (Al slitiny)

Tyto slitiny se používají především pro výrobu kol kompresoru, která nejsou vystavena extrémním teplotám, nicméně vyžadují vysokou pevnost a nízkou hmotnost. Při správném návrhu může hliník ušetřit až 50 % ve srovnání s identickým ocelovým dílcem. Nejčastěji se používají slitiny typu Al-Si-Mg nebo Al-Cu, které kombinují dobrou mechanickou pevnost, dobrou tvárnost za studena a také odolnost proti korozi [13].

1.5.2 Niklové superslitiny (Ni-superslitiny)

Tento typ slitin bývá využíván pro výrobu lopatek, či turbínového kola, které musí být schopné odolávat extrémnímu mechanickému namáhání a vysokým teplotám, kdy za určitých okolností mohou tyto teploty dosahovat úrovní vyšších než 1100 °C. Mezi nejpoužívanější materiály patří Ni-superslitiny Mar-M247, René 80 nebo Inconel 713LC. Jedná se o materiály, které jsou charakteristické výbornou odolností vůči oxidaci, vykazující vysokou pevnost při zvýšených teplotách a odolnost proti creepovému namáhání [14].

1.5.3 Litina s kuličkovým grafitem (LKG)

Tento materiál je využíván zejména pro výrobu skříní turbodmychadel (kompresorová, turbínová i ložisková). Za LKG označujeme materiál, ve kterém se grafit vyskytuje ve formě kuliček. Tvar a velikost těchto kuliček výrazně ovlivňují výsledné mechanické vlastnosti litiny. Kulatý tvar grafitu dobře rozptyluje napětí a v kombinaci s vhodnou mikrostrukturou je klíčový pro dosažení vysoké pevnosti (až 900 MPa), pružnosti a tažnosti (až 25 %). Kovová matrice tvárných litin využívaných pro kritické aplikace jako jsou turbodmychadla bývá nejčastěji feritická. Chemické složení litiny s kuličkovým grafitem se obvykle pohybuje v rozmezí uvedeném v tab. 5 [15].

Tabulka 5: Chemické složení LKG [16]

Chemické složení [hm. %]					
C	Si	Mn	P	S	Mg
3,2–4	1,8–3	0,2–0,8	< 0,1	< 0,05	0,04–0,08

Litina s kuličkovým grafitem se vyrábí modifikací taveniny čistým hořčíkem nebo předslitinami na bázi Ni-Mg, Cu-Mg nebo Fe-Si-Mg v pánvi nebo přímo ve formě. Tvoření kuličkového grafitu je možné jen v taveninách s velmi nízkým obsahem síry (<0,08 %). Na průběh krystalizace litin s kuličkovým grafitem má výrazný vliv rychlost chladnutí. Při rychlém tuhnutí jsou kuličky grafitu malé. Přísada legujících prvků (nikl, měď, molybden) je u litin s kuličkovým grafitem užitečná jen tehdy, pokud se požaduje příznivá kombinace pevnosti a houževnatosti, které lze u nelegovaného materiálu dosáhnout jen obtížně. Působení legujících prvků má na mechanické vlastnosti základní struktury stejný význam jako tepelné zpracování [16].

Vysokolegované grafitické litiny, díky své odolnosti vůči vysokým teplotám a korozi, nacházejí v technickém odvětví široké uplatnění. V rámci turbodmychadel bývají z této litiny tvořeny turbínové skříně. Pro tyto účely se litina leguje niklem, který zajišťuje vysokou životnost i ve velmi náročných podmínkách (např. litiny s označením SiMo 4-0,5, SiMo 5-1) [15].

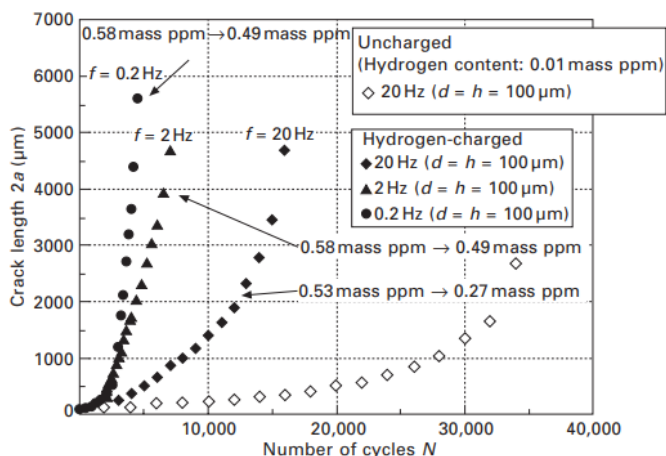
2 Vodík

Vodík je v poslední době velmi často skloňované slovo. O pozitivěch vodíku slyšíme ze všech stran, ale jak už to v životě bývá, každá věc má svůj rub a líc a ani u vodíku tomu není jinak. Vodík, jakožto nejmenší prvek ze všech se sice tváří nevinně, avšak i v nepatrném množství na úrovni jednotek ppm může v řadě materiálů vyvolat degradaci, kterou odborně nazýváme jako vodíková křehkost ocelí. Většina konstrukčních ocelí, a to jak uhlíkových, tak legovaných je během svého provozu vodíkové křehkosti vystavena. Pro zajištění bezpečnosti a spolehlivosti zařízení musí použité materiály být navrženy a vyrobeny tak, aby byly schopné tomuto druhu degradace co nejlépe odolávat.

Nepříznivý jev spojený s působením vodíku se však netýká pouze ocelí. Vodík může negativně ovlivnit i další materiály (např. slitiny niklu, titanu nebo hliníku). V závislosti na typu materiálu dochází k odlišným mechanismům degradace – může jít například o pokles houževnatosti, snížení meze pevnosti nebo vznik mikrotrhlin, které vedou k předčasnému porušení součásti. U ocelí je typickým příkladem právě zmíněná vodíková křehkost, která představuje zásadní riziko zejména v oblastech s vysokým mechanickým namáháním nebo za zvýšených teplot. Obecně lze říct, že vodík má schopnost narušovat mikrostrukturu materiálů, což vede k degradaci jejich mechanických vlastností a tím i ke zkrácení jejich životnosti. [17]

2.1 Vliv vodíku na vlastnosti materiálů

Přítomnost vodíku v materiálech, respektive jeho zvýšený obsah, má za následek celou řadu změn vlastností. Při použití vysokopevnostních ocelí je vliv vodíku kritický zejména v případě, že jejich pevnost v tahu přesahuje 1000 MPa [17]. Na obr. 5 je uvedena závislost délky trhliny a na počtu cyklů N pro případ únavového zatěžování (režim tah-tlak) s amplitudou $\sigma_a = 600$ MPa. Z uvedených dat je patrné, že rychlosti růstu únavových trhlin (da/dN) jsou výrazně vyšší pro vzorky vodíkované než v případě vzorků nevodíkovanych. Dalším důležitým zjištěním je, že rychlost šíření únavové trhliny (da/dN) se zvyšuje s klesající frekvencí zatěžování. Předpokládá se, že vodík má při nižší frekvenci zatěžování více času na difuzi a koncentraci na špičce trhliny [18].



Obrázek 5: Vliv vodíku na únavové chování martenzitické oceli SCM435 Cr-Mo [18]

Z praktického hlediska je pro nás nejpodstatnější informací, že přítomnost zvýšeného obsahu atomárního vodíku v materiálu vyvolává jeho degradaci, která se může projevat v poklesu mechanických vlastností (mez kluzu, mez pevnosti v tahu), ale také ve zvýšení náchylnosti ke křehkému porušení projevujícího se výskytem defektních typů lomů (interkrystalické porušení) [17]. Kvůli rozvoji vodíkové ekonomiky, kde se vodík stává primárním nosičem energie je nutné porozumět mechanismům takovéto vodíkem indukované degradaci a vyvíjet materiály, které budou schopny fungování v prostředí vodíku po dobu nejméně 15 let [18].

Z hlediska působení vodíku na litinu s kuličkovým grafitem, která patří mezi široce používané konstrukční materiály, je důležité zohlednit její citlivost na degradaci mechanických vlastností při vystavení vodíkovému prostředí. Degradace litiny se projevuje zejména snížením její tažnosti, mez kluzu a pevnost v tahu bývají ovlivněny jen mírně [19]. Množství vodíku pronikajícího do materiálu (atomární forma) úzce souvisí s její mikrostrukturou, konkrétně s velikostí kuliček grafitu. Bylo prokázáno, že při průměru grafitu menším než 13 μm je obsah vodíku v litině relativně nízký (okolo 10 ppm) a dále výrazně nenarůstá. Naopak při překročení této velikosti dochází k prudkému zvýšení koncentrace vodíku až na přibližně 60 ppm, což má za následek zhoršení mechanických vlastností [20]. Přítomný vodík zvyšuje náchylnost k interkrystalickému porušení a podporuje lokalizovanou plastickou deformaci, která může vést ke křehkému lomu. Tento jev je výraznější při nižších rychlostech deformace, kdy má vodík více času difundovat do kritických oblastí, (např. špice trhlin na rozhraní grafitu a kovové matrice) [19]. Z konstrukčního hlediska se proto jako vhodné návrhové kritérium jeví udržení průměrné velikosti grafitových kuliček pod 13 μm , což přispívá ke snížení absorpce vodíku a omezení náchylnosti litiny k vodíkovému zkřehnutí [20].

Největší objem produkovaných konstrukčních materiálů tvoří historicky oceli, proto byla největší pozornost ve smyslu vodíkové křehkosti věnována této skupině materiálů. Z toho důvodu budou v této práci dále popsány mechanismy ovlivňující chování materiálů vycházející z literárních zdrojů věnujících se zejména ocelím.

2.2 Vodíková křehkost

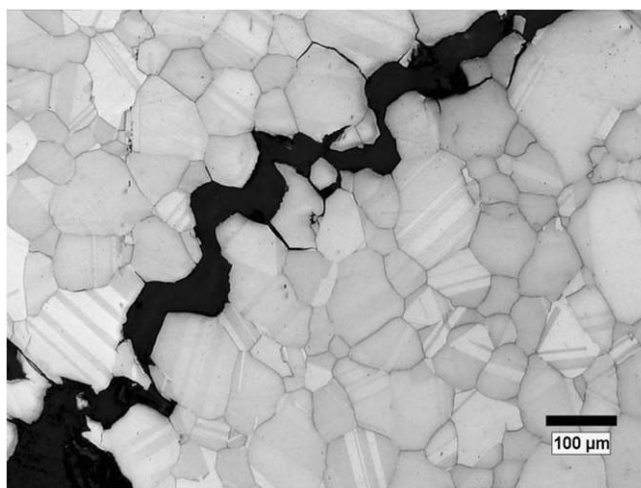
Jako už bylo jednou zmíněno na příkladu degradace ocelí vlivem působení vodíku se v praxi užívá termín vodíková křehkost. K degradaci vlivem vodíku může docházet v několika etapách životního cyklu materiálů.

První etapou se rozumí výroba oceli včetně jejího tepelného zpracování. O množství vodíku vneseného do oceli rozhoduje mnoho faktorů jako je vedení ocelářského procesu, tepelné zpracování, použitá pecní atmosféra, použité suroviny, jakost oceli atd. V této etapě vznikají defekty v podobě vloček nebo trhlin ve vycezeninách.

Druhá etapa představuje zvyšování obsahu vodíku během technologických operací nutných ke zhotovení finálních výrobků. Do těchto technologií spadá svařování, moření a galvanické pokovování. V druhé etapě vznikají defekty jako trhliny za studena, zbrzděné lomy atd.

Třetí etapa je nejdůležitější a zároveň nejnebezpečnější etapou, kdy se do materiálu může dostat zvýšený obsah vodíku. Jde o etapu, kdy se materiál uvádí do provozu, a to zejména v průmyslovém prostředí, které může působit jako zdroj vodíku nebo prostředí, kde je nutné

použití katodické protikorozní ochrany. Výsledný projev zvýšeného obsahu vodíku v materiálu je zachycen ve formě trhliny na obr. 6. [17]



Obrázek 6: Trhlina způsobená vodíkovou křehkostí po hranicích zrn slitiny Inconel 725 [20]

V průběhu let vznikl nespočet teorií popisujících příčinu degradace ocelí vlivem vodíku, nicméně dodnes nebyla nalezena univerzální teorie, která by dokázala úspěšně objasnit všechny případy vodíkové křehkosti. Často se však předpokládá, že mechanismy, které jsou základem jednotlivých teorií, se mohou uplatnit současně. Pro základní vhled do vodíkového křehnutí jsem vybrala pro mě nejsrozumitelnější teorie, kterými jsou Teorie vnitřního pnutí a Beachemova teorie interakce vodík-plastická deformace [17].

2.2.1 Teorie vnitřního pnutí

Tato teorie byla publikována Zapffem v roce 1940 a jde o nejstarší teorii vodíkové křehkosti. Zapffova teorie předpokládá shromažďování vodíku ve formě atomů, respektive protonů v určitých potenciálních místech, kde má nejvhodnější podmínky k rekombinaci na vodík molekulární. Za potenciální místa pro rekombinaci jsou považována rozhraní nekovových vměstků a kovové matrice nebo hranice zrn. Vznik molekulárního vodíku vyvolává tak velká vnitřní (tahová) napětí, že překročí mez kluzu nebo dokonce i mez pevnosti materiálu, což má za následek tvorbu trhlin. Tato teorie je dodnes považována za platnou ve všech případech, kde uvažujeme vznik trhlin vlivem vysokých napětí vyvolaných rekombinací vodíku za vzniku molekul. Rovněž se uplatňuje jako základní teorie pro popis vodíkem indukovaného praskání v prostředí sulfanů [17].

2.2.2 Beachemova teorie interakce vodík-plastická deformace

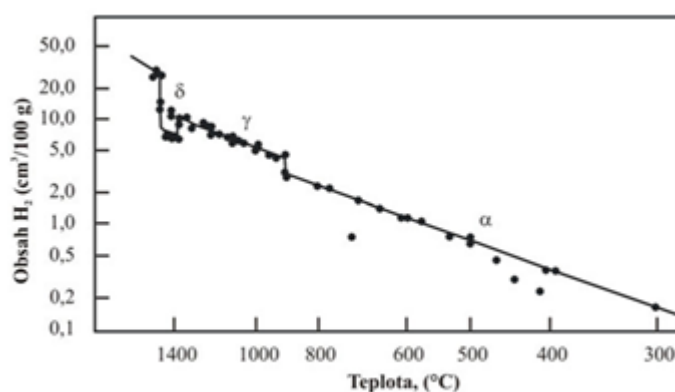
Jedná se o první všeobecně uznávanou teorii dnešní doby, která uvažuje interakci mezi vodíkem a dislokacemi a bere v úvahu i transport vodíku spolu s nimi. Datuje se rokem 1972, kdy Beachem přišel s myšlenkou, že vodík zvyšuje mobilitu dislokací a usnadňuje tak plastickou deformaci ocelí. Tuto myšlenku doložil krutovými zkouškami, při kterých odhalil, že dostatečné množství vodíku „rozpuštěného“ v materiálu před čelem existujících

trhlin usnadňuje mikroskopický deformační proces. Konstatoval, že vznik křehkých lomů za přítomnosti vodíku není důsledek omezení nebo vyčerpání plasticity oceli, ale jejich vznik zapříčiňují vysoké, silně lokalizované deformace před čelem existujících trhlin, a to i v případě interkrystalického porušení. Doslova uvádí, že vodík namísto blokování dislokací na místě dislokace odblokovává a umožňuje jejich multiplikaci i pohyb za sníženého napětí. Beachemova práce se dá považovat za průlomovou a od doby jejího vzniku přibývá prací, které potvrzují účinek vodíku na zvýšení plasticity oceli, alespoň v lokálním měřítku [17].

2.3 Pronikání vodíku do oceli

Při pronikání vodíku do oceli rozlišujeme dva případy, které závisí na povaze okolního prostředí, a to: pronikání vodíku do oceli v plynné atmosféře a pronikání vodíku do oceli v prostředí kapalném.

Jako první se zaměříme na pronikání vodíku do oceli v plynné atmosféře. V plynných prostředích je vodík schopný proniknout do oceli pouze v atomárním stavu a to tak, že se molekuly vodíku nejprve adsorbují na povrchu oceli a po dosažení určité koncentrace dochází k samotné vodíkové absorpci. Vodík proniklý do oceli, je zde přítomen především ve formě protonů, které se uchycují v intersticiálních polohách krystalové mřížky a interagují s vodivostním mrakem elektronů kovu. Pokud v oceli existují dutiny o dostatečném objemu, v nichž může dojít k rekombinaci atomů vodíku, nevylučuje se potom ani přítomnost vodíku ve formě molekul. Při pronikání vodíku do oceli uvažujeme platnost Sievertsova zákona, který popisuje rozpustnost plynů v kovech. Samotná rozpustnost vodíku v oceli závisí na dvou parametrech, a to na parciálním tlaku vodíku v okolním prostředí a na teplotě. Na obr. 7 je uveden příklad teplotní závislosti rozpustnosti vodíku v železe [21].



Obrázek 7: Teplotní závislost rozpustnosti vodíku v železe [21]

V plynném prostředí může být pronikání vodíku do oceli výrazně ovlivněno nejrůznějšími faktory, z nichž největší vliv má stav povrchu oceli, složení plynného prostředí, přítomnost příměsí, respektive nečistot. Příměsí v plynném prostředí modifikují vazebnou energii atomů vodíku adsorbovaného na povrchu oceli a ovlivňují hustotu míst, která jsou k dispozici pro adsorpci vodíku [21].

Druhým a z praktického hlediska mnohem zajímavějším způsobem pronikání vodíku do oceli je v prostředí kapalném. Hned na úvod si ale musíme říct, že označení kapalné prostředí není tak úplně přesné, protože do tohoto typu prostředí zahrnujeme i prostředí plynná v nichž je přítomný určitý podíl vlhkosti. Obecněji se tedy kapalným prostředím myslí takové prostředí, ve kterém se mohou uplatnit procesy elektrochemické koroze. Jako příklad jednoho z takových procesů si uvedeme tzv. vodíkovou depolarizaci, která způsobuje pronikání vodíku do oceli. Rovnici reakce můžeme zjednodušeně zapsat následovně:



Tento zápis rovnice však není úplně přesný. Při podrobnějším zkoumání se často namísto protonu H^+ uvažuje přítomnost vodíku ve vodném roztoku ve formě hydroxidového iontu H_3O^+ , což v prvotní fázi způsobuje redukci vodíku a jeho adsorpci na povrchu oceli, následně elektrochemickou rekombinaci vodíku a na závěr dochází k samotné absorpci vodíku do oceli. Rovnice popisující jednotlivé fáze je možné zapsat následovně:



H_{ads} zde představuje disociovaný atom vodíku adsorbovaný na povrchu materiálu a FeH_{abs} poukazuje na vodík, který už pronikl do materiálu. Průběh jednotlivých reakcí bude záviset na stavu materiálu, zejména na jeho povrchové úpravě a na vlastnostech elektrolytu. U elektrolytu je potřeba brát ohled na jeho pH a čistotu. Je totiž známo, že nečistoty zvyšují přepjetí vodíku a zpomalují tak jeho rekombinaci. To má za následek vyšší míru pronikání vodíku do oceli se všemi negativními důsledky. [21]

2.4 Potlačení vodíkové křehkosti

Při práci s vodíkovým prostředím hraje důležitou roli výběr vhodného materiálu. Za nejvhodnější materiály jsou považovány nízko pevnostní a vysoce odolné slitiny. Pro prevenci vzniku vodíkové křehkosti u vysokopevných materiálů je nezbytné znát zdroj vodíku a mechanismus, který má za následek navodíkování, resp. vznik vodíkové křehkosti v materiálu. Je také nutné dbát na volbu správné konstrukce součásti/dílce, tím je myšleno vyhnout se např. vrubům nebo ostrým hranám. Před dalším zpracováním materiálu, by mělo být odstraněno zbytkové napětí a lokální koncentrace napětí v materiálu [22].

Je-li vodík již v materiálu rozpouštěn, je jeho odstranění velmi obtížné. Z tohoto důvodu existují nejrůznější metody, které pomáhají předcházet vniknutí vodíku do materiálu. V jedné z takových metod se na materiál nanáší polopropustné povlaky, skrz které je možné vodík z materiálu odstraňovat. Galvanicky se vytvoří požadovaná tloušťka povlaku a poté se povlak usuší a v rozmezí teplot 210–240 °C tepelně zpracuje [23].

Pokud má být součást galvanicky pokovena, je vhodné je pokovit dvoustupňově. Nejprve pokovujeme na tloušťku povlaku 3-4 μm , dále pokračujeme tepelným zpracováním při teplotě v rozmezí 180–200 °C. Poté se povlak na součásti znovu pokoví na požadovanou tloušťku povlaku a na závěr může být aplikováno další tepelné zpracování s následným chromátováním [23].

V neposlední řadě stojí za zmínku výčet povrchových úprav, jež také mohou sloužit k potlačení vodíkové křehkosti [24]:

- Změna polarity při elektrolytickém odmašťování (z katodického na anodické), resp. zavedením reverzních zdrojů (zboží je střídavě anodou/katodou) ve správném poměru
- Náhrada elektrolytického odmašťování vícestupňovým odmašťováním
- Zkrácení technologické doby operace moření
- Použití kyanidových elektrolytů na místo kyselých elektrolytů v galvanotechnice
- Odstranění vodíku z povrchu materiálu při procesu povrchových úprav
- Odstranění koncentrace napětí v materiálu
- Použití vhodných inhibitorů (při moření, omílání)

2.5 Příměsi prvků

Příměsi jednotlivých prvků mohou mít, jak příznivý vliv na vodíkovou křehkost a potlačovat ji nebo naopak můžeme mít škodlivé prvky, které nám ještě zvýší účinek degradace působením vodíku. Mezi nejškodlivější prvky, které odolnost ocelí vůči vodíkové křehkosti snižují, jednoznačně řadíme síru a fosfor [17]. U obou prvků se záporně projevuje jejich schopnost segregace na hranicích zrn [18]. V případě fosforu je ještě nutné brát v úvahu i jeho schopnost zpevnit tuhý roztok α a skutečnost, že výrazně usnadňuje pronikání vodíku do oceli tím, že brzdí jeho rekombinaci. Z toho vyplývá, že pokud držíme obsahy obou těchto prvků na nízké úrovni, zajišťuje nám to vyšší odolnost vůči vodíkové křehkosti [17].

Mezi další prvky, které mají nepříznivý účinek na oceli řadíme uhlík a mangan. Zvýšený obsah těchto prvků způsobuje místní zvýšení kalitelnosti, kterou doprovází strukturní změny a lokální nárůst tvrdosti. Pokud jde o limitní hodnoty obsahu těchto dvou prvků, existuje jednoznačný údaj pouze pro mangan. Literatura uvádí, že v případě uhlíkových nebo nízkolegovaných ocelí by obsah manganu neměl překročit hodnotu 1,1 hm. %.

Vliv niklu coby legujícího prvku nemůžeme ve smyslu vodíkového zkřehnutí označit přímo jako škodlivý, protože to není sám nikl, který je zodpovědný za zhoršenou odolnost ocelí vůči vodíkové křehkosti, ale spíše za to může nevhodně zvolené a provedené tepelné zpracování. Nikl výrazným způsobem snižuje eutektoidní teplotu A_{c1} a zároveň má výrazný sklon k segregaci. V případě běžného tepelného zpracování zušlechtním, tedy kalením a vysokoteplotním popouštěním, může dojít v místech zvýšené koncentrace niklu k překročení teploty A_{c1} při popouštění, což má za následek přítomnost nepopuštěného martenzitu ve struktuře oceli. Právě přítomnost tohoto nepopuštěného martenzitu způsobuje vodíkové zkřehnutí, nikoli tedy samotný zvýšený obsah niklu.

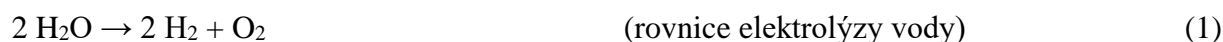
Na druhou stranu tu máme i několik prospěšných prvků, které nám odolnost ocelí vůči vodíkové křehkosti zvyšují. Tyto prvky nazýváme karbidotvorné a patří mezi ně chrom, vanad a molybden. Název karbidotvorné získaly proto, že mají schopnost vytvářet ve struktuře jemnou disperzi karbidů, které působí jako vodíkové pasti. Vodíkové pasti neboli místa s nejnižším chemickým vodíkovým potenciálem, jsou schopny k sobě poutat nezanedbatelné množství vodíku a tím klesá podíl vodíku v jiných potenciálně nebezpečných oblastech jako jsou např. oblasti s nekovovými vměstkami (typicky MnS). Příznivý účinek prvků se však projevuje jen při správně provedeném tepelném zpracování, nejčastěji se jedná o zušlechťování ocelí. Vůdčí příznivé působení zde připadá vanadu, kdy oceli legované vanadem vykazují jednoznačně nejvyšší odolnost vůči vodíkové křehkosti.

Další z prospěšných prvků zvyšujících odolnost vůči vodíkové křehkosti v prostředí sulfanu je měď. Příznivý účinek ochranného filmu sulfidu mědi vznikajícího na povrchu oceli se začíná ukazovat při obsahu mědi v rozmezí 0,25–0,35 hm.%, který snižuje množství vodíku, jenž může do oceli proniknout. Ochranný film se však rozpouští v prostředích s pH nižším než cca 4,5 a to znamená, že v těchto prostředích (pH < 4,5) se kladný vliv mědi na vodíkovou křehkost ocelí neprojevuje.

Uvedený výčet prvků není v žádném případě úplný, určitě bylo by možné diskutovat i vliv dalších prvků jako jsou titan, niob, arzén apod. [17]

2.6 Výroba vodíku

Atraktivita vodíku spočívá v množství metod použitelných na jeho výrobu. V současné době se 96 % veškeré světové výroby vodíku vyrábí z fosilních paliv procesem zvaným parní reforming zemního plynu. Jedná se o chemickou reakci metanu a vodní páry o teplotě 750–950 °C za vzniku vodíku a oxidu uhličitého. Takto vyrobený vodík se nazývá šedý. Výroba šedého vodíku však produkuje značné množství CO₂, proto existují i alternativní způsoby výroby vodíku jako je například reforming zemního plynu s CCU (Carbon Capture Utilization), pomocí kterého se vyrábí tzv. vodík modrý. Systém CCU zachytává emise a snižuje tak množství vypuštěného CO₂ až o 95 %. Celý proces je tím pádem dá označit za takřka bezemisní. Nejvhodnějším procesem, kterým je možné nahradit výrobu vodíku ze zemního plynu však stále zůstává výroba elektrolýzou vody, přičemž využitá elektřina pochází z obnovitelných zdrojů.



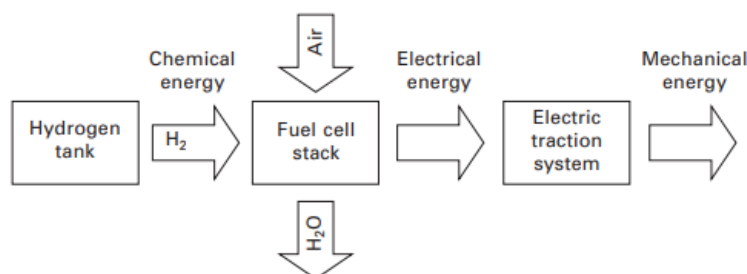
Pokud je vodík vyráběn tímto způsobem, nazýváme ho zeleným. Zelený vodík je naprosto bezemisní a má největší potenciál v omezení emisí skleníkových plynů. Díky zásobám vodíku ve vodě se dá považovat za téměř nevyčerpatelný a mohl by tak zajistit dlouhodobě udržitelný zdroj energie [25].

Vodík je energeticky velmi bohaté palivo (33 kWh/kg) a právě tento fakt z něj v současné době dělá největšího konkurenta bateriovým technologiím. Pro použití vodíku jako paliva ve spalovacích motorech musí být upravena konstrukce motoru, aby se zabránilo abnormálnímu spalování. V důsledku toho dojde ke zlepšení účinnosti motoru, výkonu

a snížení emisí NOx. V porovnání s běžnými automobily se spalovacím motorem mají palivové články nízké emise, avšak jejich nevýhodou jsou vyšší výrobní náklady na vytvoření dodatečného prostoru a váhy pro instalaci baterie či skladovací nádrže v případě použití vodíku jako paliva [25].

2.7 Vodík v dopravě

Evropská Unie si dala za cíl dekarbonizaci průmyslu, a to zejména těžké dopravy. Chtěla by toho dosáhnout nahrazením běžných spalovacích motorů, motory na vodík. Vodík je hlavním konkurentem bateriových elektromobilů. Zjednodušeně by se dalo říct, že auta na vodík jsou v podstatě elektromobily, které mají místo baterie soubor několika desítek paralelně spojených palivových článků s protonovou výměnnou membránou [25, 26]. Palivový článek pomocí jednoduché chemické reakce $4\text{H}^+ + \text{O}_2 + 4\text{e}^- = 2\text{H}_2\text{O}$ přeměňuje chemickou energii přiváděného paliva na elektrickou energii, kterou poté využívá k napájení trakčního systému. Schéma celého procesu znázorňuje obr. 8. Vodík je dodáván z palubní nádrže a mísí se se vzduchem, který je přiváděn jako zdroj kyslíku [26].



Obrázek 8: Schéma systému automobilového palivového článku [26]

Palivové články dosahují oproti tepelným strojům s vlastním generátorem elektrické energie výrazně vyšších účinností. To je dáno hlavně tím, že v palivových člancích je přeměna energie přímá, kdežto u tepelných strojů se přeměna děje přes mezistupně. V reálných podmínkách se účinnost pohybuje v rozmezí 35 % až 50 % a v laboratorních podmínkách může účinnost palivového článku dosahovat až 60 %. [25] Dříve se uvažovalo nad využíváním kapalného vodíku, ale vzhledem k jeho nízké provozní teplotě (-253 °C) se nepodařilo nijak uspokojivě vyřešit nárůst tepla, který způsobuje zvýšené odpařování kapalného vodíku, což nakonec působí nárůst tlaku a otevření ventilu pro odvětrávání vodíku. Tímto vzniká problém v podobě ztrát vodíku během doplňování. Vhodným řešením se stal stlačený vodík při úrovních tlaku 35–70 MPa, který poskytuje nejlepší celkový technický výkon, dostatečně vysokou objemovou hustotu skladování na systémové úrovni a vykazuje nejvyšší vyspělost pro automobilové aplikace [26].

EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Cílem experimentální části této bakalářské práce je stanovit vliv plynného vodíku na vlastnosti litiny s kuličkovým grafitem po jejím vystavení prostředí simulujícího reálné provozní podmínky turbodmychadla. Jak již bylo v této práci uvedeno, tento typ litiny se v automobilovém průmyslu využívá primárně pro výrobu skříní turbodmychadel a vložek kompresoru. Vzhledem k tomu, že tyto dílce jsou ve styku se spalinami je nezbytné prověřit její chování při působení vodíku, zejména za zvýšených teplot a tlaků, které jsou typické pro provozní režimy turbodmychadla. Záměrem této části práce je proto zhodnotit případné změny v mikrostruktuře a mechanických vlastnostech materiálu.

3 Experimentální techniky

3.1 Vzorkový materiál

Z hlediska zkušebních vzorků byl brán ohled na zadání této práce, přičemž byl zvolen materiál používaný mimo jiné na výrobu vložky kompresoru turbodmychadla. Jedná se o feriticko-perlitickou litinu s kuličkovým grafitem jakosti EN-GJS 400-15. Pro experiment byly z reálného kusu vložky kompresoru připraveny tři skupiny vzorků (viz tab. 6), ve formě tahových těles válcového tvaru. První skupinu tvořily vzorky v tzv. dodaném stavu, tedy vzorky bez tepelného nebo chemického ovlivnění, druhá skupina byla připravena pro žíhací experiment a třetí skupina byla připravena pro experimenty v plynném vodíku. Chemické složení testovaného materiálu je uvedeno v tab. 7.

Tabulka 6: Označení vzorků použité litiny

Skupiny vzorků	Označení			
Výchozí stav	1-1	1-2	1-3	-
Žíhaný stav	2-1	2-2	2-3	2-4
Vodíkováný stav	01	02	03	-

Tabulka 7: Chemické složení použité litiny (tavební analýza dodaná výrobcem)

Chemické složení [hm. %]								
C	Si	Mn	P	S	Cu	Mg	Cr	Ti
3,73	2,67	0,106	0,0290	0,0096	0,029	0,043	0,022	0,032

3.2 Experimenty za zvýšené teploty

Simulace reálného provozu (prostředí s obsahem vodíku) byla prováděna ve spolupráci s Ústavem fyziky materiálů AVČR. Experimenty byly realizovány v atmosféře čistého vodíku pomocí zařízení SETARAM PCT Pro při teplotě 300 °C, přetlaku 5 bar po dobu 168 hodin.

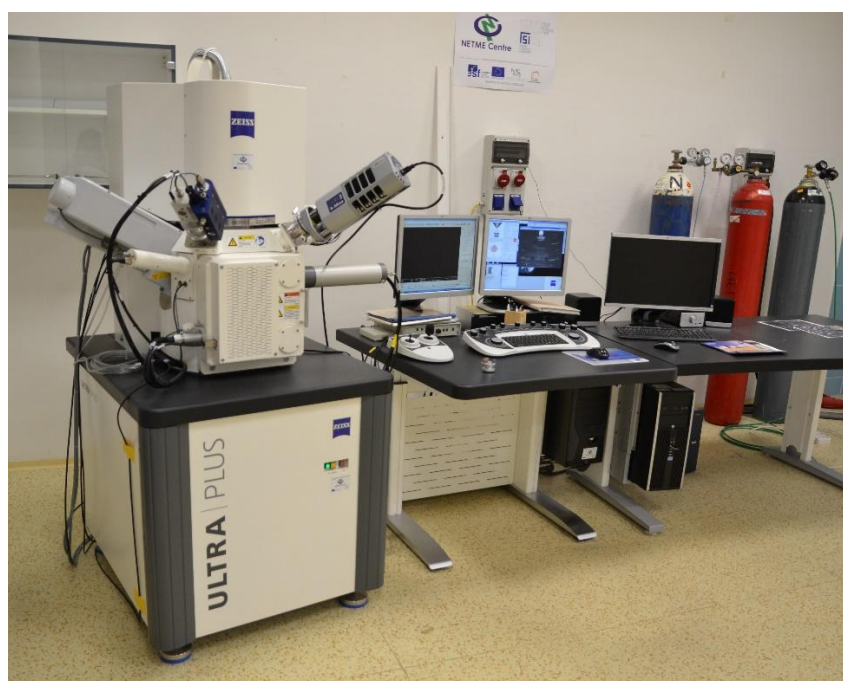
Z důvodu potřeby odlišit přímý vliv atmosféry čistého vodíku od vlivu teploty byl proveden žíhací experiment při teplotě 300 °C po dobu 168 hodin v inertní atmosféře (argon) experimentální žíhací trubkové peci (konstrukce ÚMVI).

3.3 Zkouška tahem

Pro určení mechanických vlastností sledovaných stavů byla provedena zkouška tahem při pokojové teplotě dle ČSN EN ISO 6892-1. Ze vzorkového materiálu byla vyrobena poměrná zkušební tělesa válcového tvaru dle DIN 50125 o rozměrech měrné části $\phi 6 \times 30$ mm (Form B). Testy byly prováděny na univerzálním zkušebním stroji Zwick/Roell Z250.

3.4 Fraktografická analýza

Po provedené zkoušce tahem byla na vybraných porušených vzorcích provedena fraktografická analýza pro posouzení případných změn v mechanismu porušování v reakci na odlišné způsoby zpracování. Fraktografická analýza byla realizována pomocí rastrovacího elektronového mikroskopu (SEM) Zeiss Ultra Plus (obr. 9).



Obrázek 9: Laboratoř elektronové mikroskopie s rastrovacím elektronovým mikroskopem (SEM) Zeiss Ultra Plus, kde byla prováděna fraktografická analýza

3.5 Metalografická analýza

Pro posouzení mikrostruktury testovaného materiálu byly připraveny metalografické vzorky lisováním za tepla a následně konvenčně broušením za mokra a leštěním diamantovými pastami. Mikrostruktura byla dokumentována v leptaném i neleptaném stavu pomocí metalografického mikroskopu Olympus GX51 při různých zvětšeních.

3.5.1 Příprava vzorku

Pro hlubší zkoumání bylo nutné ze všech vybraných vzorků vytvořit metalografické výbrusy. Po zkoušce tahem se z hlav zkušebních vzorků připravily řezy v podélném a příčném směru (orientace vztažena k podélné ose tahového vzorku). Dělení proběhlo na metalografické pile ATM Brillant 220 (obr. 10), pomocí řezného kotouče z materiálu Al_2O_3 (oxid hlinitý). Následně proběhlo lisování vzorků za tepla na modulárním metalografickém lisu značky ATM Opal X-Press (obr. 11). Lisování probíhalo po dobu 10 minut při konstantním tlaku 250 bar za teploty 180 °C za použití lisovacích hmot MultiFast Green a Dentacryl s následným ochlazováním. Zalisované metalografické vzorky o průměru 30 mm, byly následně podrobeny standardní přípravě, tedy broušení za mokra a leštění diamantovými pastami.



Obrázek 10: Dělení vzorku na metalografické pile ATM Brillant 220



Obrázek 11: modulární metalografický lis ATM Opal X-Press

Pro broušení bylo použito poloautomatické brusné zařízení Struers LaboForce-50 (obr.12) a sada brusných papírů různé drsnosti (obr.13). Proces broušení začínal použitím brusného papíru 600 s velikostí abrazivních částic 26 μm , a to po dobu šesti minut za stálého chlazení vodou. Následně byl po stejnou dobu použit brusný papír 800 (velikost částic 21 μm). Závěr broušení probíhal pomocí nejjemnějšího brusného papíru 1200 (velikost částic 15 μm), který odstranil zbytkové rýhy z předchozích fází přípravy.

Pro následné leštění byla použita diamantová pasta o zrnitosti 3 μm , finální leštění probíhalo s pastou o zrnitosti abraziva 0,7 μm . Leštění bylo realizováno opakovaně ve třiminutových cyklech, dokud nebylo dosaženo dokonalého povrchu zrcadlového lesku bez viditelných stop po předchozích operacích. Pro zajištění optimálních podmínek během leštění byl jako smáčedlo použit ethanol.



Obrázek 12: Proces broušení na zařízení Struers
Labo Force-50



Obrázek 13: Sada brusných papírů

6.5.2 Světelná mikroskopie

Po dokončení metalografické přípravy byly všechny vzorky podrobeny pozorování pomocí metalografického mikroskopu s cílem analyzovat jejich mikrostrukturu a posoudit případné změny způsobené předchozím zpracováním. K tomuto účelu byl využit metalografický mikroskop Olympus GX 51 vybavený kamerou Nikon, který umožňuje sledovat strukturu materiálu s vysokou přesností. Pozorování probíhalo ve světelném poli a také při zobrazení pomocí diferenciálního interferenčního kontrastu (DIC – Nomarski). Pro možnost posouzení případných změn mikrostruktury byl každý vzorek pozorován jak v příčném, tak v podélném řezu. Mikrostruktura byla dokumentována při různých zvětšeních, pro zachycení charakteristických detailů a znaků zkoumaných vzorků.

4 Výsledky

4.1 Zkouška tahem

Pro zjištění vlivu působení vodíku a zvýšené teploty na mechanické vlastnosti zkoumaného materiálu byly prováděny zkoušky tahem za pokojové teploty. V tab. 8 jsou uvedeny výsledky těchto zkoušek pro jednotlivé stavy zpracování (popis jednotlivých skupin viz tab. 6).

Tabulka 8: Mechanické vlastnosti zkoumaného materiálu

Označení vzorku	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_5 [%]	Z [%]
1-1	307	447	17,2	14,3
1-2	283	317	2,4	3,8
1-3	304	442	15,8	16,0
Průměr a sm. odch	$298 \pm 10,7$	$402 \pm 60,1$	$11,8 \pm 6,7$	$11,4 \pm 5,3$
01	312	436	9,2	11,0
02	312	450	21,6	20,5
03	305	405	6,6	8,2
Průměr a sm. odch	$310 \pm 3,3$	$430 \pm 18,8$	$12,5 \pm 6,5$	$13,2 \pm 5,3$
2-1	316	447	19,1	16,1
2-2	314	444	12,5	13,3
2-3	316	450	23,2	16,8
2-4	315	451	22,0	14,1
Průměr a sm. odch	$315 \pm 0,8$	$448 \pm 2,7$	$19,2 \pm 4,1$	$15,1 \pm 1,4$

4.1.1 Smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$

V rámci mechanických zkoušek byla stanovena smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$. Materiál ve výchozím stavu vykazoval větší rozptyl výsledků, kdy nejvyšší mez kluzu byla naměřena u vzorku (1-1) 307 MPa a nejnižší hodnotu 283 MPa vykazoval vzorek s označením (1-2). Střední hodnota meze kluzu pak byla $298 \pm 10,7$ MPa. Materiál ve stavu po vodíkování vykazoval střední hodnotu meze kluzu $310 \pm 3,3$ MPa a materiál vzorků žíhaných v argonu, vykazovaly malý rozptyl dosažených hodnot, přičemž střední hodnota byla $315 \pm 0,8$ MPa.

4.1.2 Mez pevnosti v tahu R_m

Mez pevnosti v tahu představuje maximální smluvní napětí, kdy u zkušebního tělesa dochází ke vzniku plastické nestability (krčku). U trojice vzorků ve výchozím stavu byla nejvyšší naměřená hodnota zaznamenána u vzorku označeného (1-1) a to 447 MPa. Střední hodnota pevnosti v tahu byla $402 \pm 60,1$ MPa. V případě litiny určené k vodíkování dosáhl nejvyšší hodnoty vzorek (02) s výsledkem 447 MPa, tedy velmi podobným. Střední hodnota ve stavu po vodíkování činila $430 \pm 18,8$ MPa. V poslední skupině vzorků, které prošly žíháním v argonové atmosféře, dosáhl nejlepšího výsledku vzorek (2-4), konkrétně 451 MPa. Střední hodnota pro tuto sadu vzorků byla $448 \pm 2,7$ MPa.

4.1.3 Tažnost materiálu As

Tažnost představuje schopnost materiálu plasticky se deformovat před porušením. U výchozího stavu byla nejvyšší tažnost naměřena u vzorku (1-1), kde dosáhla 17,2 %. Vzorek (1-2) vykazoval nejnižší hodnotu, pouhých 2,4 %. Průměrné prodloužení u této skupiny bylo $11,8 \pm 6,7$ %. U litiny určené k vodíkování se mezi jednotlivými vzorky výrazně lišila. Nejvyšší hodnoty dosáhl vzorek (02) s tažností 21,6 %, zatímco nejnižší hodnotu vykazoval vzorek (03) s tažností 6,6 %. Průměr této trojice vzorků činil $12,5 \pm 6,5$ %. Ve třetí sérii vzorků, které byly žíhány v atmosféře argonu, byly rozdíly v tažnosti o něco menší. Nejvyšší hodnotu zaznamenal vzorek (2-3) s tažností 23,2 %, nejnižší naopak vykazoval vzorek (2-2), a to 12,5 %. Průměrně se tažnost této skupiny pohybovala na úrovni $19,2 \pm 4,1$ %.

Nejvyšší tažnosti dosáhla skupina žíhaná v argonové atmosféře. Výrazné rozdíly u jednotlivých vzorků, zejména u materiálu ve výchozím stavu, naznačují možnou přítomnost vnitřních defektů případně rozdílnou mikrostrukturu, která bude podrobněji analyzována v následujících kapitolách.

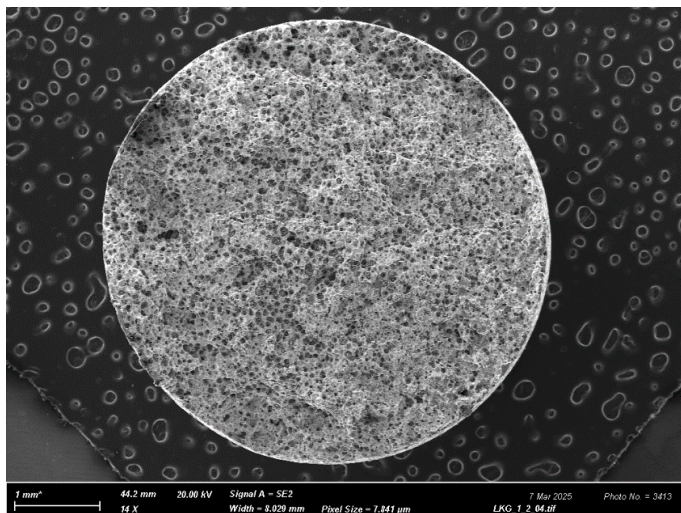
4.1.4 Kontrakce materiálu Z

Kontrakce materiálu představuje zmenšení příčného průřezu zkušební tělesa v místě přetržení. V případě surové litiny dosáhl nejvyššího zúžení průřezu vzorek (1-3) s hodnotou 16,0 %, zatímco nejmenší kontrakce byla naměřena u vzorku (1-2), pouhých 3,8 %. Průměr všech tří měření u této skupiny odpovídal $11,4 \pm 5,3$ %. U sady vzorků určených k vodíkování vykazoval největší kontrakci vzorek (02), a to 20,5 %. Nejnižší hodnotu zaznamenal vzorek (03) s kontrakcí 8,2 %. Průměrná hodnota této skupiny byla $13,2 \pm 5,3$ %. Tepelné zpracování v ochranné atmosféře argonu přineslo poměrně vyrovnané výsledky. Nejvyšší kontrakci 16,8 % vykazoval vzorek (2-3) a nejnižší hodnota připadla na vzorek (2-2) s 13,3 %. Průměrná kontrakce této skupiny dosáhla $15,1 \pm 1,4$ %.

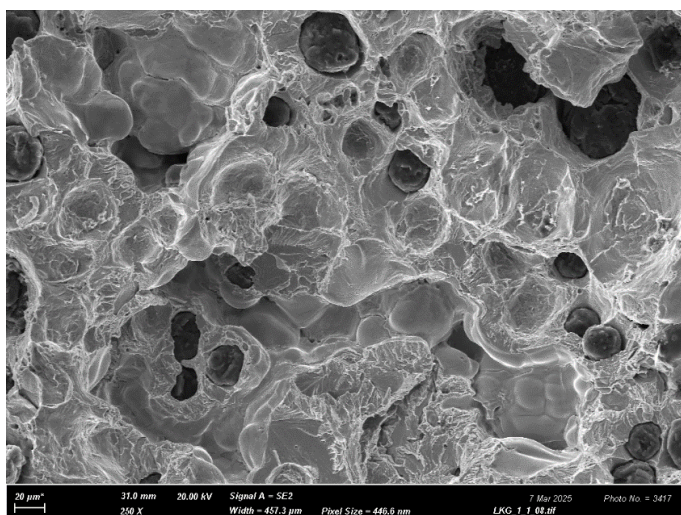
Při porovnání jednotlivých skupin vzorků je patrné, že nejvyšší míru kontrakce vykazují vzorky žíhané v argonu. Naopak nejnižší průměr vykazuje materiál ve výchozím stavu, kde i rozdíly mezi jednotlivými vzorky byly v tomto případě nejvýraznější.

4.2 Fraktografická analýza

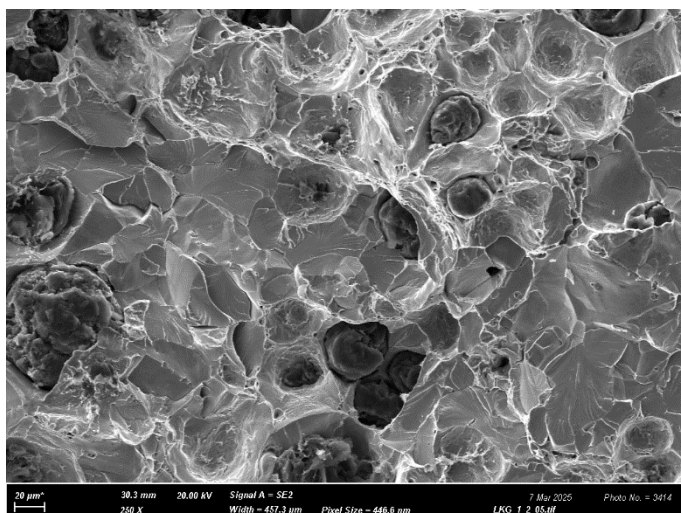
Pro posouzení případných změn mechanismu porušení byla u vybraných vzorků porušených při tahové zkoušce provedena fraktografická analýza. Z důvodu významné odlišnosti dosažených mechanických charakteristik byly pro fraktografickou analýzu vybrány vzorky 02, 03, 1-1, 1-2, 2-1, 2-2 a 2-4, které vykazovaly nejvyšší a nejnižší hodnoty dosažených mechanických vlastností (viz tab. 3.) Na obr. 13 až 33 jsou uvedeny lomové plochy analyzovaných vzorků. Lomové plochy všech vzorků mají reliéfní charakter, kdy na lomových plochách lze pozorovat mírně odlišné rozložení a četnost výskytu grafitických globulí (obr. 13, 16, 19, 22, 25, 28). Na lomových plochách analyzovaných vzorků, kromě vzorku s označením 2-4, bylo možno nalézt licí vady typu dutin (staženiny) různé velikosti. U vzorku 1-2 (obr. 16 až 18) a vzorku 03 (obr. 31 až 33) jsou i při malém zvětšení patrné rozsáhlé licí vady oslabující nosný průřez tahového vzorku. Lomová plocha vzorku 03 v oblasti licí vady vykazovala pokrytí povrchu výraznou uhlíkovo-oxidickou plenou (detail viz obr. 32 a 33.)



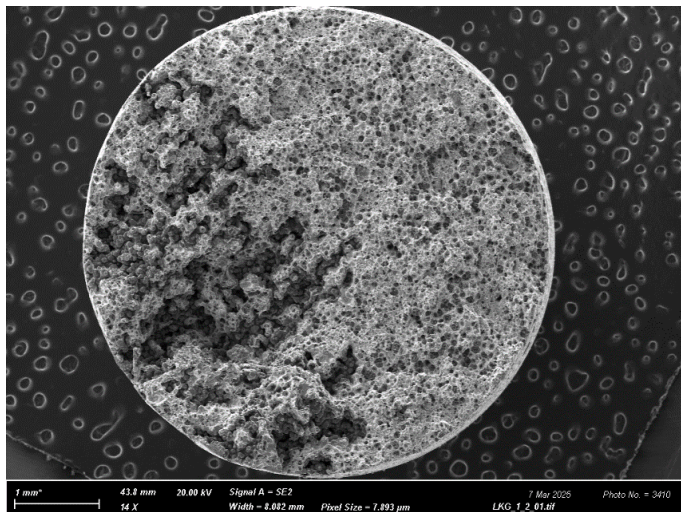
Obrázek 13: Lomová plocha vzorku LKG (I-1)



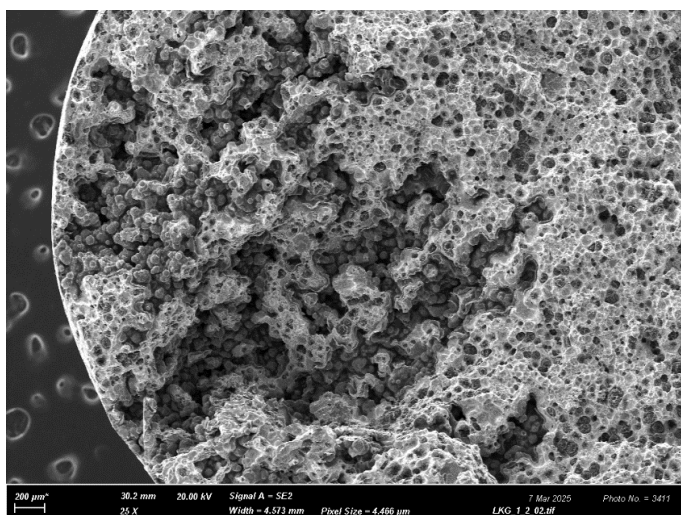
Obrázek 14: Detail lomové plochy vzorku LKG (I-1)



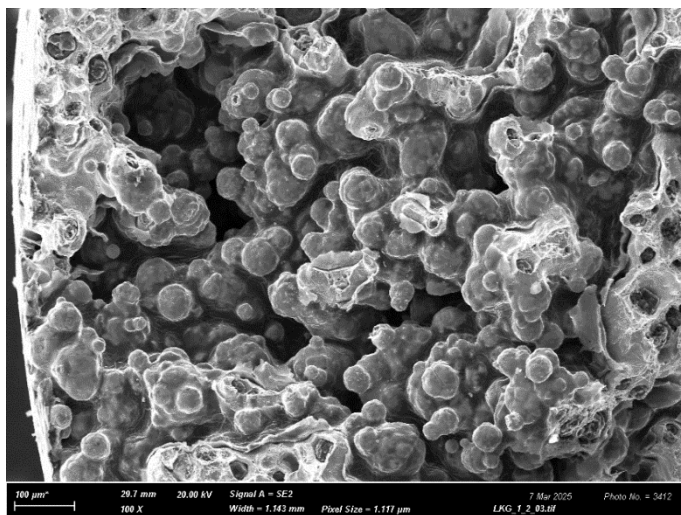
Obrázek 15: Detail lomové plochy vzorku LKG (I-1)



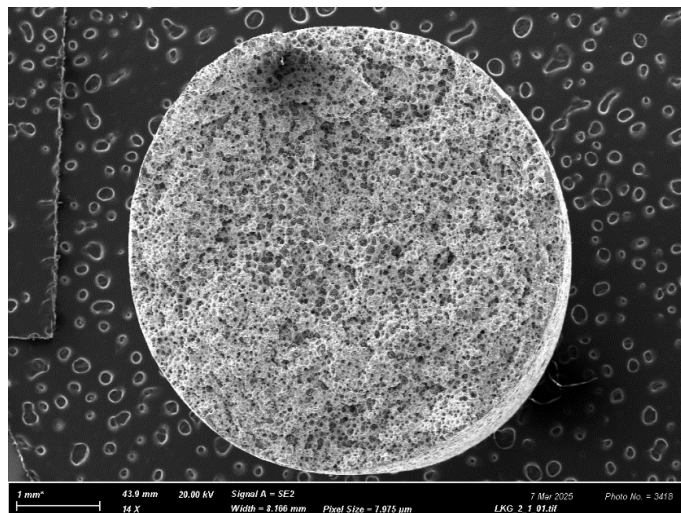
Obrázek 16: Lomová plocha vzorku LKG (1-2)



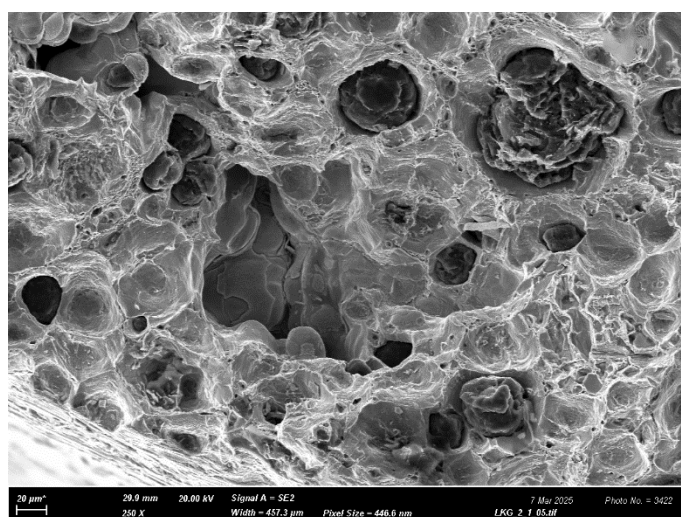
Obrázek 17: Detail lomové plochy vzorku LKG (1-2)



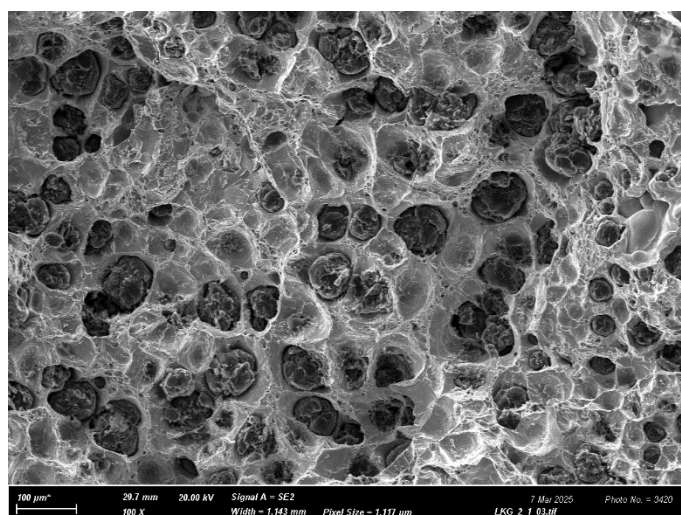
Obrázek 18: Detail lomové plochy vzorku LKG (1-2)



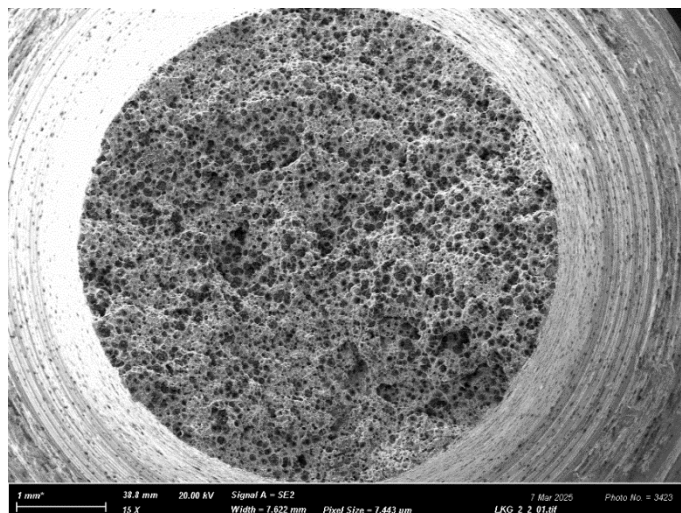
Obrázek 19: Lomová plocha vzorku LKG (2-1)



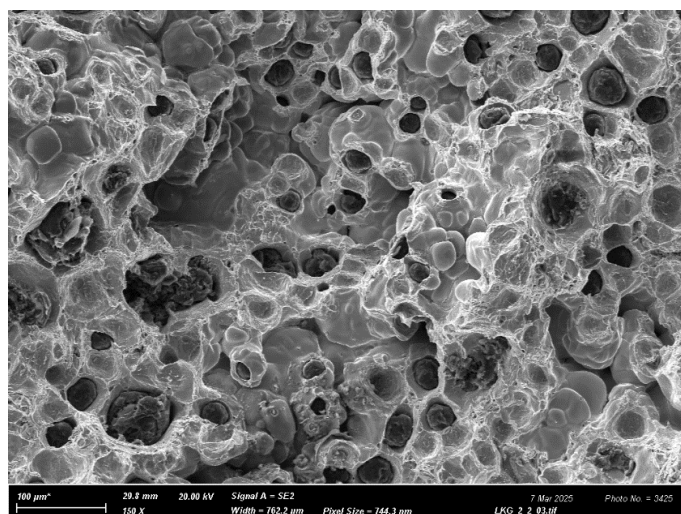
Obrázek 20: Detail lomové plochy vzorku LKG (2-1)



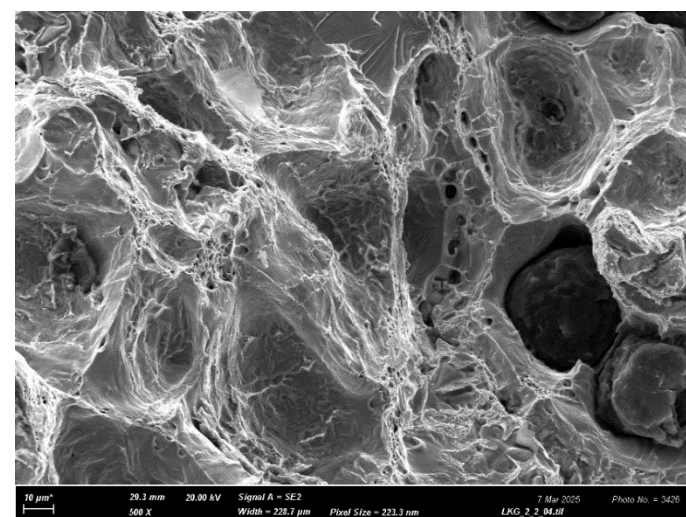
Obrázek 21: Detail lomové plochy vzorku LKG (2-1)



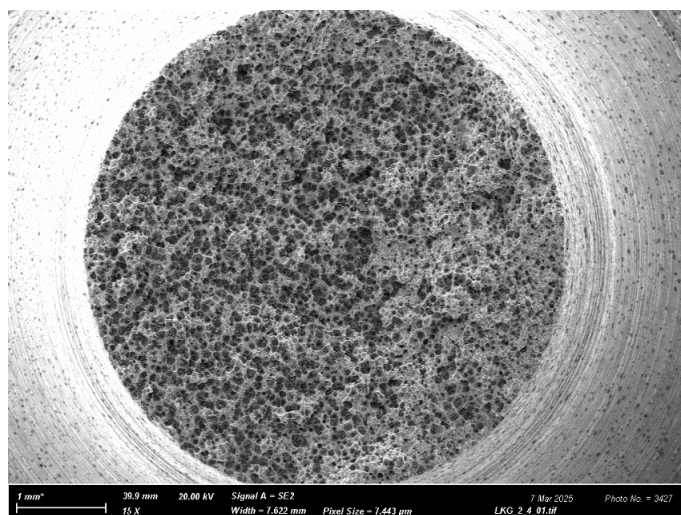
Obrázek 22: Lomová plocha vzorku LKG (2-2)



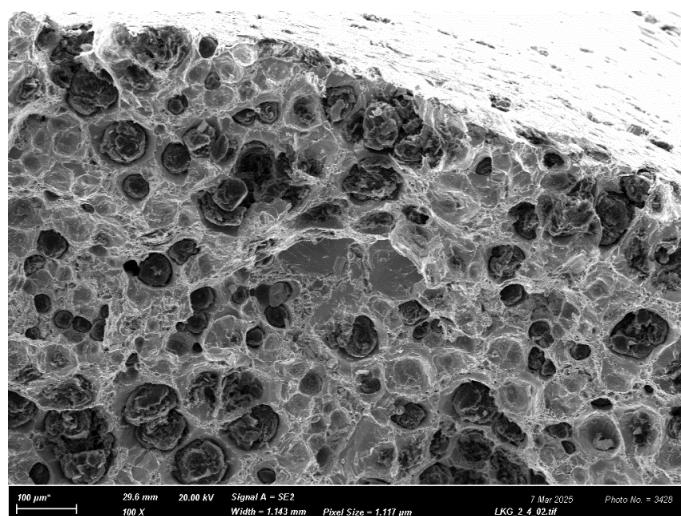
Obrázek 23: Detail lomové plochy vzorku LKG (2-2)



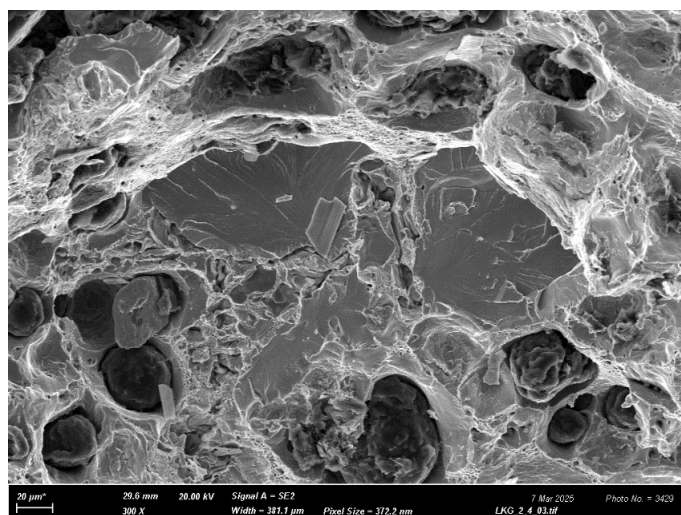
Obrázek 24: Detail lomové plochy vzorku LKG (2-2)



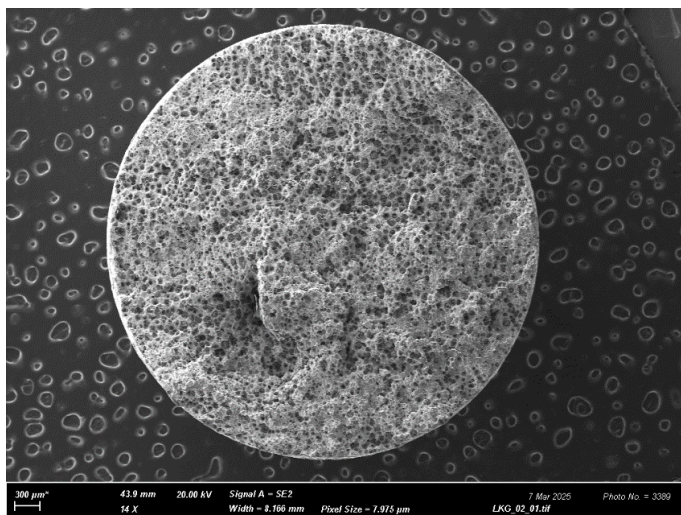
Obrázek 25: Lomová plocha vzorku LKG (2-4)



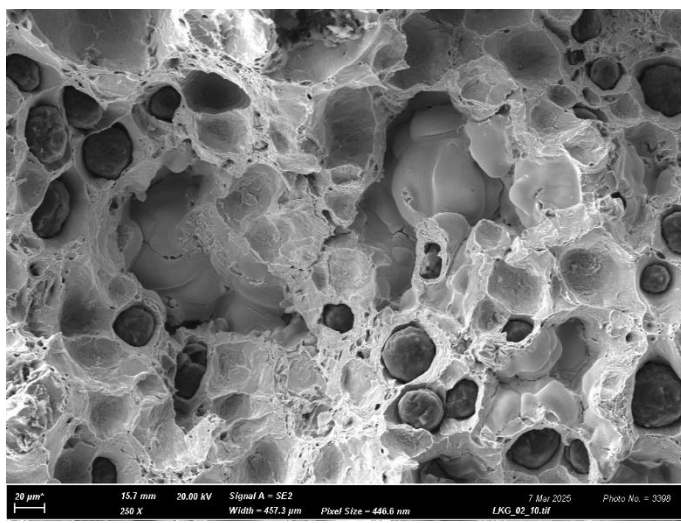
Obrázek 26: Detail lomové plochy vzorku LKG (2-4)



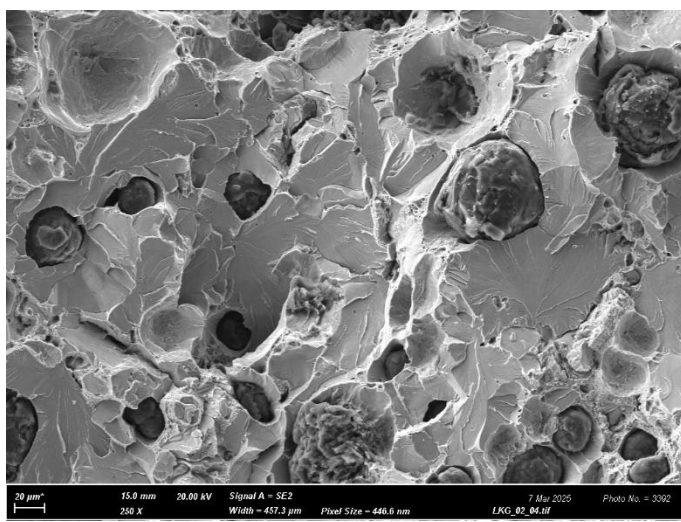
Obrázek 27 : Detail lomové plochy vzorku LKG (2-4)



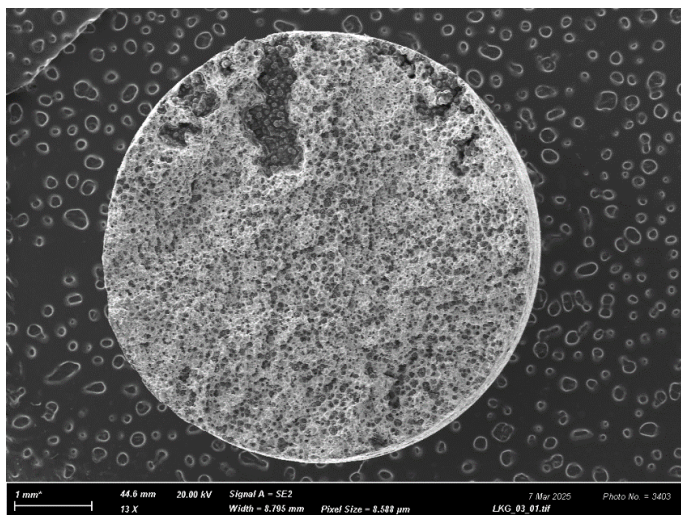
Obrázek 28: Lomová plocha vzorku LKG (02)



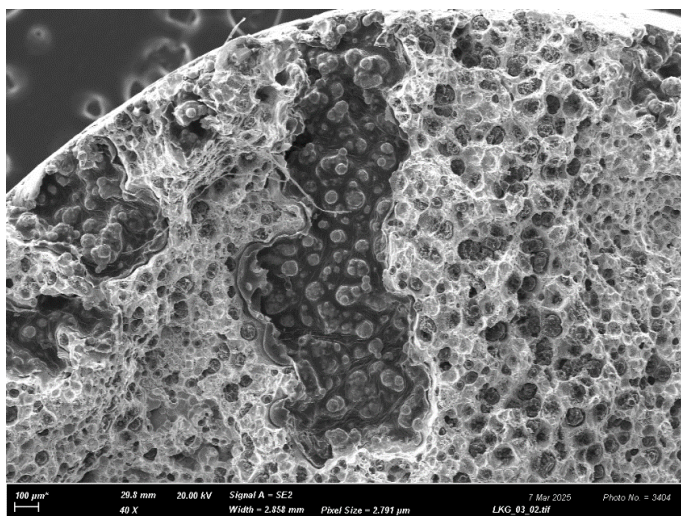
Obrázek 29: Detail lomové plochy vzorku LKG (02)



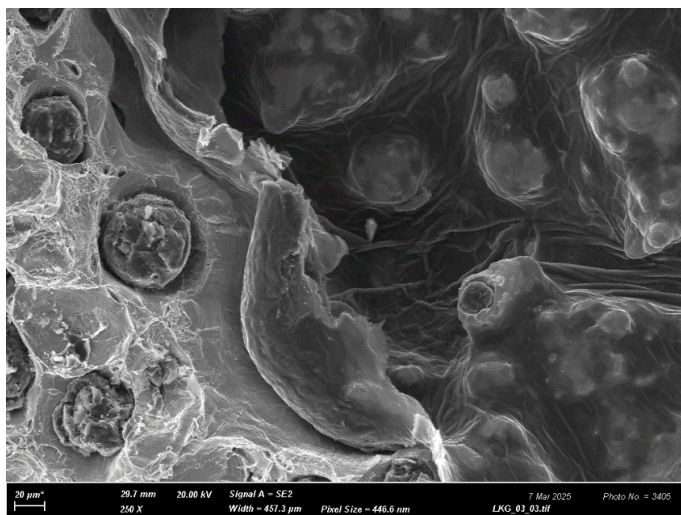
Obrázek 30: Detail lomové lící vady u vzorku LKG (02)



Obrázek 31: Lomová plocha vzorku LKG (03)



Obrázek 32: Detail lomové plochy vzorku LKG (03)



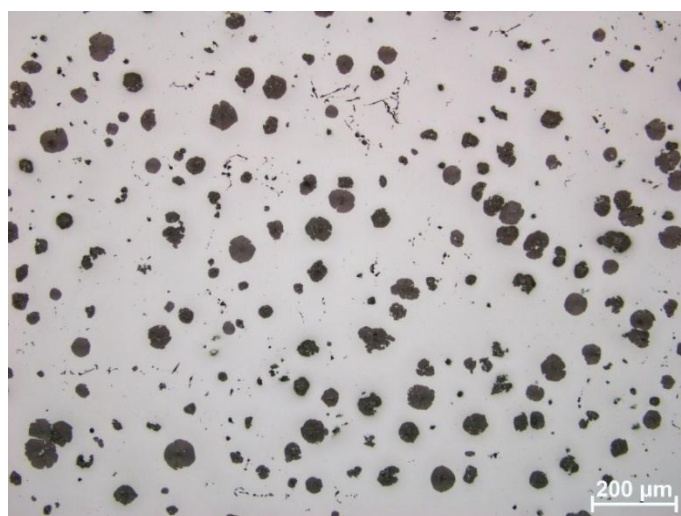
Obrázek 33: Detail lomové plochy vzorku LKG (03)

Charakter porušení matrice byl ve všech analyzovaných případech štěpného charakteru (příklad viz obr. 15, 27 a 30) s lokálním výskytem tvárného porušení krčků v okolí globulí grafitu s jemnou jamkovou morfologií (příklad viz obr. 21 a 24). Na lomových plochách zkoumaných vzorků nebyla nalezena přítomnost interkrystalického poškození, které by indikovalo oslabení hranic zrn, a to ani v případě vodíkových vzorků.

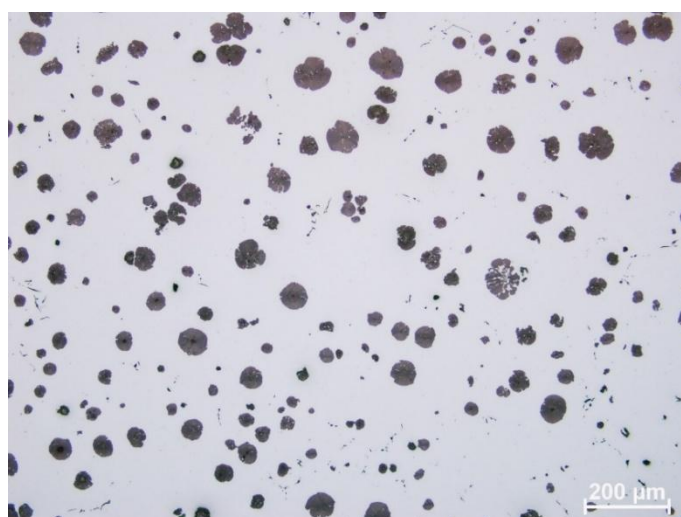
4.3 Metalografická analýza

Pro komplexní popis studovaného materiálu v jednotlivých stavech (dodaný, vodíkový a žíhaný stav), byla prováděna také metalografická analýza.

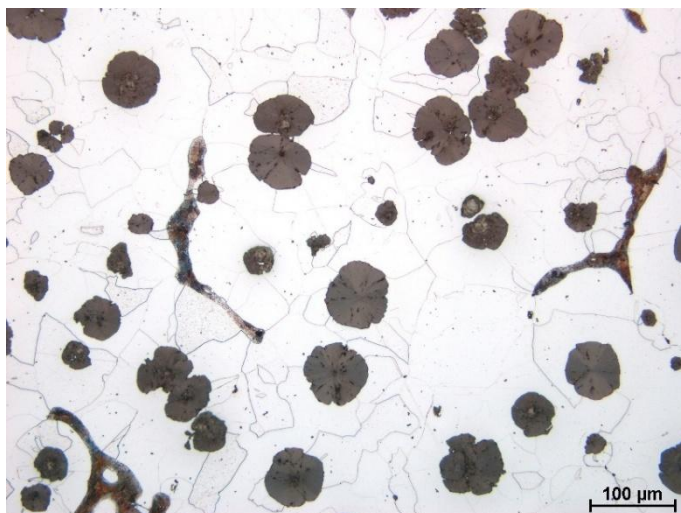
Na obr. 34 až 41 je uvedena mikrostruktura analyzovaných vzorků v neleptaném i leptaném stavu. Mikrostruktura vzorků je tvořena feritickými zrny různé velikosti, a dále malým množstvím perlitu. Velikost globulí grafitu není uniformní, ve struktuře se vyskytují malé, ale i velké globule, lokálně lze pozorovat i nedokonale zrnitý grafit svědčící o nedokonalé modifikaci litiny (příklad viz obr. 36 a 38).



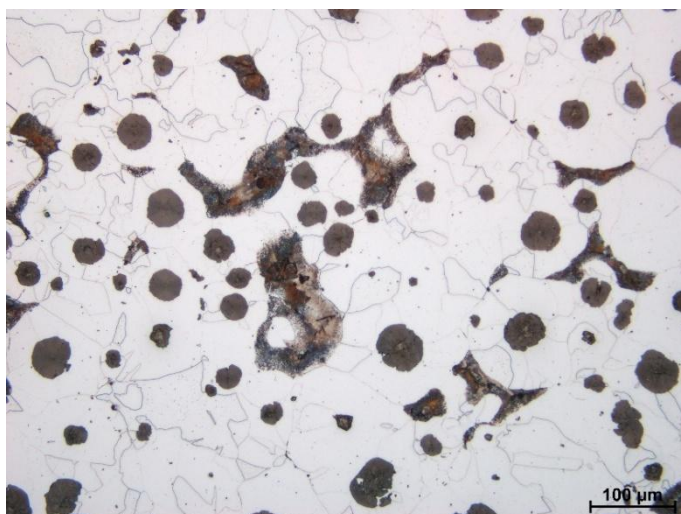
Obrázek 34: Mikrostruktura vzorku (1-1) v příčném řezu – neleptaný stav



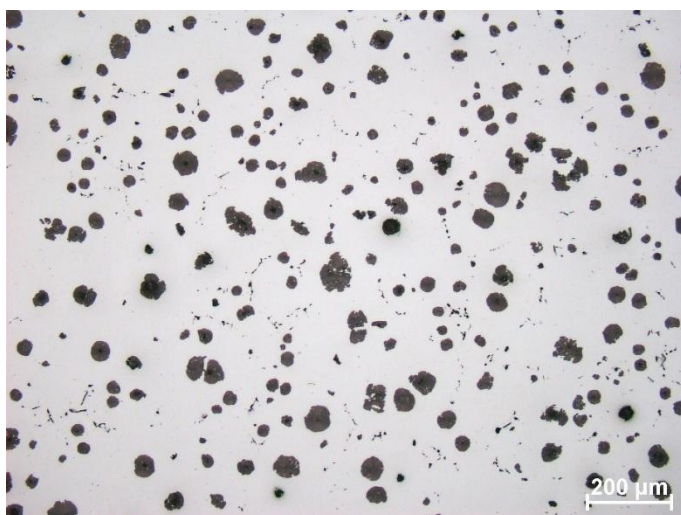
Obrázek 35: Mikrostruktura vzorku (1-1) v podélném řezu – neleptaný stav



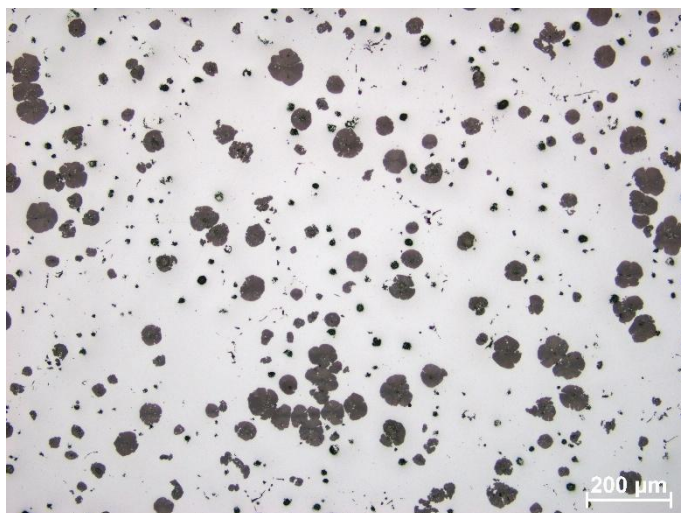
Obrázek 36: Mikrostruktura vzorku (1-1) v příčném řezu – leptaný stav



Obrázek 37: Mikrostruktura vzorku (1-1) v podélném řezu – leptaný stav



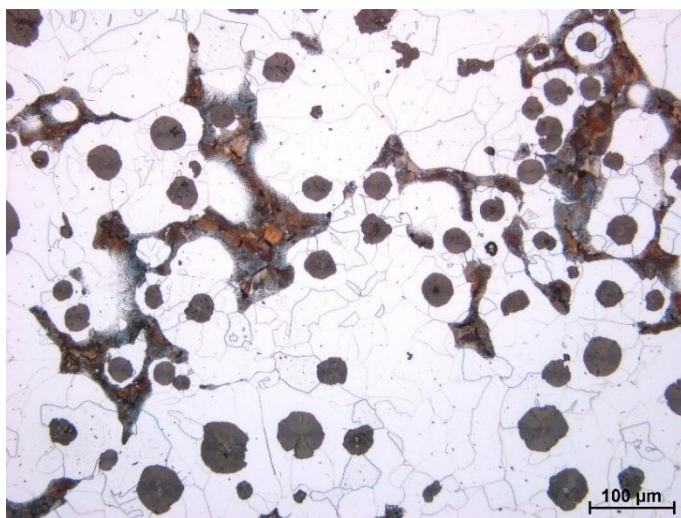
Obrázek 38: Mikrostruktura vzorku (2-1) v příčném řezu – neleptaný stav



Obrázek 39: Mikrostruktura vzorku (2-1) v podélném řezu – neleptaný stav



Obrázek 40: Mikrostruktura vzorku (02) v příčném řezu – neleptaný stav



Obrázek 41: Mikrostruktura vzorku (02) v příčném řezu – leptaný stav

Vliv teplotní expozice (300 °C), ani vliv prostředí plynného vodíku za zvýšené teploty a tlaku (300 °C/ 5 bar) na mikrostrukturu nebyl v rámci hodnocení mikrostruktury pozorován.

4.4 Diskuse výsledků

Z provedených mechanických zkoušek tahem vyplývá, že jednotlivé způsoby zpracování a stav materiálu EN-GJS 400-15 ovlivňují jeho mechanické vlastnosti, kdy významný vliv hraje také přítomnost licích defektů a nerovnoměrné rozložení částic grafitu. Nejnižších hodnot a největšího rozptylu výsledků dosáhly vzorky ve výchozím stavu, což lze spojovat právě s výskytem licích vad a nehomogenní mikrostrukturou. Naopak vzorky po žíhání v argonové atmosféře vykazovaly mírné navýšení a nižší rozptyl hodnot sledovaných charakteristik, což lze přičíst snížení vnitřního pnutí a homogenizaci mikrostruktury vlivem tepelného zpracování. Vzorky po expozici plynného vodíku dosahovaly srovnatelných nebo mírně vyšších hodnot než výchozí stav, avšak s menším rozptylem. Tyto rozdíly podporují hypotézu, že klíčovým faktorem ovlivňujícím výsledky není samotné působení vodíku či zvýšené teploty, ale spíše vnitřní defekty materiálu a nehomogenita mikrostruktury vlivem výroby odlitku.

Fraktografická analýza tento závěr potvrdila. Lomové plochy všech vzorků nesly znaky štěpného porušení s lokálními oblastmi tvárného poškození v okolí grafitických globulí. Absence interkrystalického lomu svědčí o tom, že vodík při použitých podmínkách expozice (300 °C/168 hod./5 bar) nepoškodil hranice zrn ani tak nezpůsobil vodíkové zkřehnutí. Klíčovým faktorem snižujícím mechanické vlastnosti byla tedy přítomnost licích vad (staženiny a pleny), které byly identifikovány zejména u vzorků s nižší tažností a pevností. Tyto vady významně oslabují nosný průřez, což je hlavní příčina snížení mechanické odolnosti.

Metalografická analýza ukázala, že plynný vodíku, ale i zvýšené teploty měli minimální vliv na mikrostrukturu. Mikrostruktura vzorků pro jednotlivé stavy je srovnatelná, složena z feritických zrn různé velikosti s perlitickými oblastmi a kuličkovým grafitem s nerovnoměrnou velikostí a tvarem globulí, což naznačuje nedokonalou modifikaci. Obecně lze konstatovat, že pro dosažení optimálních mechanických vlastností je zásadní minimalizace přítomnosti mikrostrukturních vad a licích defektů.

Na základě dosažených výsledků se ukázalo, že expozice plynného vodíku při teplotě 300 °C po dobu 168 hodin za tlaku 5 bar nevedla u sledovaného materiálu k rozvoji vodíkového zkřehnutí. Z tohoto důvodu nebude v rámci této práce dále diskutována vhodnost bariérové ochrany pomocí technologií Cold Spray, která by minimalizovala pronikání vodíku do struktury základního materiálu.

Pro komplexní posouzení vlivu prostředí vodíku na vlastnosti a mechanismus porušování studované slitiny bude na výsledky obsažené v této bakalářské práci navazovat výzkum vlivu atomárního vodíku, kdy materiál bude vystaven vlivu vodíku v prostředí elektrolytu.

ZÁVĚR

V rámci bakalářské práce byla testována litina EN-GJS 400-15 za účelem posouzení možnosti využití tohoto materiálu pro prostředí plynného vodíku. Byly provedeny mechanické zkoušky, mikrostrukturní a fraktografická analýza na vzorcích ve třech stavech: výchozím, po žíhání v argonové atmosféře (300 °C/168 hod.) a po expozici vodíku (300 °C/168 hod./5 bar). Na základě dosažených výsledků je možné stanovit tyto závěry:

1. Mechanické vlastnosti

Nejvyšší pevnosti v tahu i tažnosti dosahoval materiál vzorků podrobených žíhání, a to lze přičíst homogenní mikrostruktuře a snížení vnitřních napětí. Výchozí stav vykazoval nižší hodnoty mechanických vlastností s vyšším rozptylem v důsledku přítomnosti mikrostrukturních a výrobních vad. Vzorky po expozici v plynném vodíku dosahovaly obdobných hodnot jako vzorky ve výchozím stavu, což svědčí o minimálním vlivu vodíku za daných podmínek expozice.

2. Mikrostrukturní analýza

Mikrostruktura litiny byla tvořena feritickou maticí s perlitickými oblastmi a kuličkovým grafitem, kdy byla zjištěna přítomnost nedokonale zrnitého grafitu svědčící o nedokonalé modifikaci. Vliv plynného vodíku na mikrostrukturu nebylo možno prokázat, mikrostruktura všech vyšetřovaných vzorků byla srovnatelná.

3. Fraktografická analýza

Lomové plochy všech vzorků vykazovaly převážně štěpný charakter s lokálními oblastmi tvárného porušení v okolí grafitických globulí. U většiny vzorků byly identifikovány licí vady typu staženin, které výrazně oslabovaly nosný průřez a ovlivnily výsledné mechanické vlastnosti. Přítomnost interkrystalického poškození, a to ani v případě vodíkových vzorků nebyla zaznamenána. Lze tak uzavřít, že vliv plynného vodíku na lomové chování materiálu, pro dané podmínky expozice, je zanedbatelný.

4. Možnost nasazení v prostředí vodíku

Na základě provedených experimentů lze konstatovat, že sledovaná litina nevykazuje po působení plynného vodíku známky vodíkového zkřehnutí. Materiál si zachoval své vlastnosti a nebyly pozorovány defektní lomy ve smyslu oslabení hranic zrn, či jiné projevy degradace. Z tohoto hlediska se litina EN-GJS 400-15 jeví jako kandidát pro aplikace v prostředí obsahujícím vodík. Přestože výsledky nevykazují negativní dopad vodíku, pro úplné posouzení dlouhodobé odolnosti a vlivu jiných forem vodíku bude vhodné provést testování v prostředí, kdy materiál bude vystaven působení atomárního vodíku.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] FARSKÝ, Miroslav, RICHTER, Miroslav. *Vodík palivem budoucnosti. Vesmír*. 2001. roč. 80. č.10. s. 35–36. ISBN 1214-4029.
- [2] VERHELST, Sebastian a Thomas WALLNER. Hydrogen-fueled internal combustion engines. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2009, 35(6), 490–527. [cit. 2025-05-19]. ISSN 0360-1285. Dostupné z: doi:[10.1016/j.pecs.2009.08.001](https://doi.org/10.1016/j.pecs.2009.08.001).
- [3] LASÍK, Jindřich. *Kompresory a turbodmychadla*. Online. 2006. [cit. 2025-05-19]. Dostupné z: <https://www.autokaleidoskop.cz/Novinky/TSI-kombinace-kompresoru-a-turbodmychadla/>.
- [4] CUMMINS. *How a Turbocharger Works*. Online. 2025. [cit. 2025-05-19]. Dostupné z: <https://www.cummins.com/components/turbochargers/how-a-turbocharger-works>.
- [5] MAJEWSKI, W a JÄÄSKELÄINEN, Hannu. *Diesel Emissions and Their Control (2nd Edition)-3.3.2 Turbochargers*. Online. 2023. [cit. 2025-05-19]. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt013HBTA2/diesel-emissions-their/turbochargers>
- [6] MOREIRA, M.F. *Failure analysis in aluminium turbocharger wheels. Engineering Failure Analysis*. 2016, 61, 108–118. [cit. 2025-05-19]. ISSN 1350-6307. Dostupné z: doi.org/10.1016/j.engfailanal.2015.11.024
- [7] TURBOTEC. *Turbodmychadla*. Online. 2025. [cit. 2025-05-20]. Dostupné z: https://www.turbo-tec.eu/cz/nabidka/turbodmychadla/?utm_source=chatgpt.com.
- [8] MAN DIESEL & TURBO. *Project Guide TCR Turbocharger*. Augsburg: MAN Diesel & Turb. 2014. [cit. 2025-05-20].
- [9] ENGINEERING EXPLAINED. *How Twin Turbos Work*. Online, video. YouTube. 2014-07-24. [cit. 2025-05-20]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=3wFuR1x-Hes>
- [10] MOKŘÍŠ, Jakub. *Turbo twin-scroll*. Online. 2025. [cit. 2025-05-20]. Dostupné z: <https://www.portalridice.cz/clanek/turbo-twin-scroll-ma-lepsi-efektivitu-diky-promyslene-konstrukci>
- [11] ENGINEERIN EXPLAINED. *Variable Geometry Turbocharger*. Online, video. YouTube. 2014. [cit. 2025-05-20]. Dostupné z: <https://www.youtubecom/watch?v=hdjsNPcCLOs>
- [12] TURBOTURBOS. *What Is an Electric Turbocharge and How Does It Work*. Online. 2021. [cit.2025-05-20] Dostupné z: <https://turboturpos.com/blogs/news/what-is-an-electric-turbocharger-and-how-does-it-work>.

- [13] RAFAEL, Nunes; ADAMS, J.S; AMMONS, Mitchell; AVERY, Howard; BEAN, John. et al. *ASM Handbook. Volume 2, Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special- Purpose Materials*. Online. OH: ASM International, 1990. [cit. 2025- 05- 20]. Dostupné z: <https://tajhizkala.ir/doc/ASM/ASM%20Handbook%20Vol%202.pdf>.
- [14] SIMS, Chester; STOLOFF, Norman; HAGEL, William. *Superalloys II: High-Temperature Materials for Aerospace and Industrial Power*. New York: Wiley. 1987. 640 s. ISBN 978-0-471-01147-7.
- [15] SKOČOVSKÝ, Petr; PODRÁBSKÝ, Tomáš. *Grafitické liatiny*. Žilina: Edis, 2005. 212 s. ISBN 80-8070-390-6.
- [16] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2002. 392 s. ISBN 80-7204-248-3.
- [17] SOJKA, Jaroslav. *Odolnost ocelí vůči vodíkové křehkosti*. Ostrava: Poruba, 2007. 108 s. ISBN 978-80-248-1648-7.
- [18] GANGLOFF, R. P a SOMERDAY, Brian P. *Gaseous hydrogen embrittlement of materials in energy technologies. Volume 1, The problem, its characterisation and effect on particular alloy classes*. Oxford: Woodhead Publishing, 2012. [cit. 2025-05-20]. ISBN 978-0-08-101623-7.
- [19] MATSUO, T. The effect of pearlite on the hydrogen-induced ductility loss in ductile cast irons. *Journal of Physics: Conference Series*. 2017, vol. 843, č. 1, s. 012012. [cit. 2025-05-22]. ISSN 1742-6596. Dostupné z: doi.org/10.1088/1742-6596/843/1/012012.
- [20] YOSHIMOTO, Takuya, Takashi MATSUO a Tomohiro IKEDA. The effect of graphite size on hydrogen absorption and tensile properties of ferritic ductile cast iron. *Procedia Structural Integrity*. 2019, vol. 14, s. 18–25. [cit. 2025-05-22]. ISSN 2452-3216. Dostupné z: doi.org/10.1016/j.prostr.2019.05.004.
- [21] Ryš P.; Cenek M.; Mazanec K.; Hrbek A. *Nauka o materiálu I, Železo a jeho slitiny*. Praha: Academia, 1975, 542 s.
- [22] DWIVEDI, Sandeep Kumar a Manish VISHWAKARMA. *Hydrogen embrittlement in different materials: A review*. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018. 43(46), s. 21603–21616. [cit. 2025-05-22]. ISSN 0360-3199. Dostupné z: doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.09.201
- [23] HRDINOVÁ, Hana, Viktor KREIBICH, Jan KUDLÁČEK, Alena FALTÝNKOVÁ a Miroslav VALEŠ. *Vliv vodíku na povrchově upravený materiál*. Praha: TISK AS. 2016. ISBN 978-80-87583-15-9.
- [24] KREIBICH, Viktor a Petr HOLEČEK. *Vodík při procesu povrchových úprav*. Online. [cit. 2025-05-22]. Dostupné z: http://povrchari.cz/kestazeni/201001_povrchari.pdf.

- [25] Česká vodíková technologická platforma. *Ve zkratce*. Online. 2025 [cit. 2025-05-22]. Dostupné z: <https://www.hytep.cz/o-vodiku/ve-zkratce>
- [26] Redakce ESG. Vodík a jeho budoucnost v energetice a dopravě [online]. 2022. [cit. 2025-05-22]. Dostupné z: <https://www.esg-investice.cz/vodik-a-jeho-budoucnost-v-energetice-a-doprave/>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

<i>Symbol</i>	<i>Jednotka</i>	<i>Název</i>
A	[%]	Tažnost materiálu
R _{p0,2}	[MPa]	Smluvní mez kluzu
R _m	[MPa]	Mez pevnosti
Z	[%]	Kontrakce materiálu
HFO		Těžké topné oleje
MDO		Lodní nafta
FAME		Metylestery mastných kyselin
LKG		Litina s kuličkovým grafitem
CCU		Carbon Capture Utilitizaton

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Konstrukce turbodmychadla a proudění plynů (převzato a upraveno dle [5])	11
Obrázek 2: Turbínová skříň a turbínové kolo [8].....	12
Obrázek 3: Kompresorová skříň a kompresorové kolo [8]	13
Obrázek 4: Twin-scroll turbo [6].....	14
Obrázek 5: Vliv vodíku na únavové chování martenzitické oceli SCM435 Cr-Mo [18].....	20
Obrázek 6: Trhlina způsobená vodíkovou křehkostí po hranicích zrn slitiny Inconel 725 [20]	22
Obrázek 7: Teplotní závislost rozpustnosti vodíku v železe [21]	23
Obrázek 8: Schéma systému automobilového palivového článku [26]	27
Obrázek 9: Laboratoř elektronové mikroskopie s rastrovacím elektronovým mikroskopem (SEM) Zeiss Ultra Plus, kde byla prováděna fraktografická analýza	29
Obrázek 10: Dělení vzorku na metalografické pile ATM Brillant 220.....	30
Obrázek 11: modulární metalografický lis ATM Opal X-Press.....	30
Obrázek 12: Proces broušení na zařízení Struers Labo Force-50	31
Obrázek 13: Lomová plocha vzorku LKG (1-1).....	34
Obrázek 14: Detail lomové plochy vzorku LKG (1-1)	34
Obrázek 15: Detail lomové plochy vzorku LKG (1-1)	34
Obrázek 16: Lomová plocha vzorku LKG (1-2).....	35
Obrázek 17: Detail lomové plochy vzorku LKG (1-2)	35
Obrázek 18: Detail lomové plochy vzorku LKG (1-2)	35
Obrázek 19: Lomová plocha vzorku LKG (2-1).....	36
Obrázek 20: Detail lomové plochy vzorku LKG (2-1)	36
Obrázek 21: Detail lomové plochy vzorku LKG (2-1)	36
Obrázek 22: Lomová plocha vzorku LKG (2-2).....	37
Obrázek 23: Lomová plocha vzorku LKG (2-2).....	37
Obrázek 24: Detail lomové plochy vzorku LKG (2-2)	37
Obrázek 25: Lomová plocha vzorku LKG (2-4).....	38
Obrázek 26: Lomová plocha vzorku LKG (2-4).....	38
Obrázek 27 : Detail lomové plochy vzorku LKG (2-4) v oblasti transkrystalického štěpného porušení	38
Obrázek 28: Lomová plocha vzorku LKG (02)	39
Obrázek 29: Detail lomové plochy vzorku LKG (02).....	39
Obrázek 30: Detail lomové licí vady u vzorku LKG (02).....	39
Obrázek 31: Lomová plocha vzorku LKG (03)	40
Obrázek 32: Lomová plocha vzorku LKG (03)	40
Obrázek 33: Detail lomové plochy vzorku LKG (03) v oblasti transkrystalického štěpného porušení	40
Obrázek 34: Mikrostruktura vzorku (1-1) v příčném řezu – neleptaný stav	41
Obrázek 35: Mikrostruktura vzorku (1-1) v podélném řezu – neleptaný stav	41
Obrázek 36: Mikrostruktura vzorku (1-1) v příčném řezu – leptaný stav	42
Obrázek 37: Mikrostruktura vzorku (1-1) v podélném řezu – leptaný stav	42
Obrázek 38: Mikrostruktura vzorku (2-1) v příčném řezu – neleptaný stav	42
Obrázek 39: Mikrostruktura vzorku (2-1) v podélném řezu – neleptaný stav	43
Obrázek 40: Mikrostruktura vzorku (02) v příčném řezu – neleptaný stav	43
Obrázek 41: Mikrostruktura vzorku (02) v příčném řezu – leptaný stav	43

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Specifikace těžkého topného oleje [8]	16
Tabulka 2: Povolené obsahy nečistot v MDO [8]	17
Tabulka 3: Specifikace biopaliva [8].....	17
Tabulka 4: Požadavky na zemní plyn [8].....	18
Tabulka 5: Chemické složení LKG [16]	19
Tabulka 6: Označení vzorků použité litiny	28
Tabulka 7: Chemické složení použité litiny (tavební analýza dodaná výrobcem).....	28
Tabulka 8: Mechanické vlastnosti zkoumaného materiálu	32