



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

**Hliníkové pěny vyrobené slévárenskou
cestou pomocí práškových zpěňovadel**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

AUTOR: Bc. Michal Geyer

VEDOUcí PRÁCE: doc. Ing. Aleš Herman Ph.D.

STUDIJNÍ PROGRAM: N0715A270001 – Výrobní inženýrství

STUDIJNÍ OBOR: N071TVIN – Bez specializace

Praha 2023

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Geyer** Jméno: **Michal** Osobní číslo: **476115**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**
Studijní program: **Výrobní inženýrství**
Specializace: **Bez specializace**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Hliníkové pěny vyrobené slévárenskou cestou pomocí práškových zpěňovadel

Název diplomové práce anglicky:

Aluminium foam made by foundry technology with powder foaming agents

Pokyny pro vypracování:

1. Kovové pěny, vlastnosti, užití a charakteristika
2. Kovové materiály pro výrobu kovových pěn
3. Rešerše problematiky výroby kovových pěn slévárenskou cestou
4. Návrh experimentu - hliníkové pěny vyrobené slévárenskou cestou pomocí práškových zpěňovadel
5. Realizace a vyhodnocení experimentu
6. Závěr a zhodnocení

Seznam doporučené literatury:

RAJAK, Dipen Kumar a Manoj GUPTA. An Insight Into Metal Based Foams [online]. Singapore: Springer Singapore, 2020 [cit. 2023-03-06]. Advanced Structured Materials. ISBN 978-981-15-9068-9. Dostupné z: doi:10.1007/978-981-15-9069-6

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

doc. Ing. Aleš Herman, Ph.D. ústav strojírenské technologie FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **26.04.2023**

Termín odevzdání diplomové práce: **11.08.2023**

Platnost zadání diplomové práce: **31.12.2023**

doc. Ing. Aleš Herman, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Ladislav Kolářík, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Tímto prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Aleše Hermana Ph.D., a to pouze pomocí podkladů uvedených v seznamu použité literatury v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, vydaným ČVUT v Praze 1. 7. 2009.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne:

.....

Podpis autora

Poděkování

Rád bych poděkoval panu doc. Ing. Alešovi Hermanovi Ph.D. za poskytnutí potřebných materiálů a cenných rad a panu Ing. Vojtěchu Petrovi za veškerou asistenci ve fakultní slévárně. Dále také své manželce za veškerou podporu při vypracování této diplomové práce.

Anotace

Název diplomové práce:	Hliníkové pěny vyrobené slévárenskou cestou pomocí práškových zpěňovadel
Autor práce:	Bc. Michal Geyer
Vedoucí práce:	doc. Ing. Aleš Herman Ph.D.
Konzultant:	
Akademický rok:	2022/2023
Vysoká škola:	ČVUT v Praze, Fakulta strojní
Ústav:	12133 – Ústav strojírenské technologie
Vedoucí ústavu:	doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.
Rozsah práce:	97 stránek, 12 tabulek, 93 obrázků
Klíčová slova:	Kovová pěna, hliníková pěna, práškové zpěňovadlo, Výroba hliníkových pěn, Design of experiment

Abstrakt:

Tato diplomová práce se zabývá výrobou hliníkových pěn pomocí práškových zpěňovadel ve fakultní slévárně FS ČVUT. Pomocí úpravy metody Alporas na stabilizaci i zpěnění v jednom kroku pomocí uhličitanu vápenatého je hledán funkční výrobní postup, díky kterému jsou vyráběny hliníkové pěny s co nejmenším množstvím defektů. Po nalezení takového výrobního postupu je cílem použít metodiku DOE k vyhodnocení závislosti vybraných výrobních proměnných na mechanických vlastnostech. Výstupy DOE se následně použijí k nalezení optimálních hodnot pro výrobu hliníkových pěn se stanovenými vlastnostmi.

Annotation

Title of the final thesis:	Aluminium foam made by foundry technology with powder foaming agents
Author:	Bc. Michal Geyer
Supervisor:	doc. Ing. Aleš Herman Ph.D.
Consultant:	
Academic year:	2022/2023
University:	CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering
Department:	12133 – Department of Manufacturing Technology
Head of department:	doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.
Extent:	97 pages, 12 tables, 93 pictures
Keywords:	Metal foam, Aluminium foam, Powder foaming agent, Aluminium foam production, Design of experiment

Abstract:

This thesis focuses on the manufacturing of aluminium foams using powder foaming agents in the school foundry at FS CTU. By modifying the Alporas method for both stabilization and foaming in one step using calcium carbonate, a functional manufacturing process is investigated that produces aluminium foams with the least amount of defects. After finding such a manufacturing process, the aim is to use the DOE methodology to evaluate the relationships of selected manufacturing variables on mechanical properties. The DOE outputs are then used to find the optimum values for producing aluminium foams with the specified properties.

Obsah

1. Úvod a cíle práce.....	13
1.1 Historie	14
2. Kovové pěny, vlastnosti, užití a charakteristika.....	16
2.1 Vlastnosti kovových pěn	17
2.2 Použití kovových pěn	19
3. Kovové materiály pro výrobu kovových pěn	22
3.1 Základy hliníkových slitin	22
3.2 Rozdělení hliníkových slitin	24
3.2.1 Technicky čistý hliník.....	24
3.2.2 Tvářené slitiny hliníku	24
3.2.3 Slévárenské slitiny hliníku	27
3.3 Zkoumané hliníkové slitiny	27
4. Výroba kovových pěn slévárenskou cestou.....	29
4.1 Proces vzniku pěny pomocí zpěňovacího činidla	32
4.2 Výrobní metody slévárenskou cestou	33
4.2.1 Alporas.....	33
4.2.1 Formgrip/ Foamcarp	34
4.2.2 Cymat/Hydro	36
4.2.3 Gasar.....	37
5. Realizace a vyhodnocení experimentu	39
5.1 Průzkum vlivů hlavních faktorů	39
5.1.1 Vliv makrostruktury pórů	39
5.1.2 Vliv stabilizace	40
5.1.3 Vliv zpěňovacího činidla	42

5.2	Návrh experimentu hledání funkčního výrobního postupu	48
5.2.1	Volba výrobního procesu	48
5.2.1	Použité stroje a přístroje	52
5.2.2	Funkčnost výrobního procesu	57
5.3	Vyhodnocení experimentů hledání funkčního výrobního procesu	61
5.3.1	Typ míchadla a způsob míchání	61
5.3.2	Teplota.....	62
5.3.3	Způsob vkládání prášku	63
5.3.4	Doba pění	64
5.3.5	Způsob ochlazení.....	64
5.3.6	Výsledný způsob funkčního výrobního postupu	64
5.4	Design of experiment	66
5.4.1	Návrh experimentu pomocí DOE	68
5.4.1	Provedení DOE	69
5.4.2	Vyhodnocení DOE.....	75
6.	Závěr a zhodnocení	82
7.	Bibliografie	84
8.	Seznam tabulek.....	88
9.	Seznam obrázků	89
10.	Přílohy	93

Seznam zkratek

$\pm\sigma$	Směrodatná odchylka
ČVUT	České Vysoké Učení Technické
DOE	Design of experiment
GPZ	Guiner-Prestonovy zóny
kol.	Kolektiv
kpls	Kubická plošně středěná krystalová mřížka
SEM	Skenovací elektronová mikroskopie
ZAM	Hliníková slitina podobná EN AW 7075
α	Primární fáze technicky čistého hliníku
α_p	Přesycený tuhý roztok α
β	Minoritních fáze technicky čistého hliníku
β'	Přechodná precipitační fáze

Chemické prvky a sloučeniny

Ag	Stříbro
Al	Hliník
Al_2CaCu	Intermetalická fáze hliníku, vápníku a mědi (2:1:1)
Al_2CaSi_2	Intermetalická fáze hliníku, vápníku a křemíku (2:1:2)
Al_2CaZn_2	Intermetalická fáze hliníku, vápníku a zinku (2:1:2)
Al_2O_3	Oxid hlinitý
Al_3Ti	Intermetalická fáze hliníku s titanem (3:1)
Al_4C_3	Karbid hliníku

Al_4Ca	Intermetalická fáze hliníku s vápníkem (4:1)
$\text{Al}_m\text{Fe}_n\text{Si}$	Komplexní fáze v hliníkových slitinách
AlN	Nitrid hlinitý
Au	Zlato
Be	Beryllium
C	Uhlík
CaAl_2O_4	Hlinitan vápenatý
CaCO_3	Uhličitan vápenatý
CaF_2	Fluorid vápenatý
CaO	Oxid vápenatý
Co	Kobalt
CO	Oxid uhelnatý
Cr	Chrom
Cu	Měď
Fe	Železo
H	Vodík
Mg	Hořčík
MgH_2	Hydrid hořčíku
MgO	Oxid hořečnatý
Mn	Mangan
NaF	Fluorid sodný
Ni	Nikl
O	Kyslík

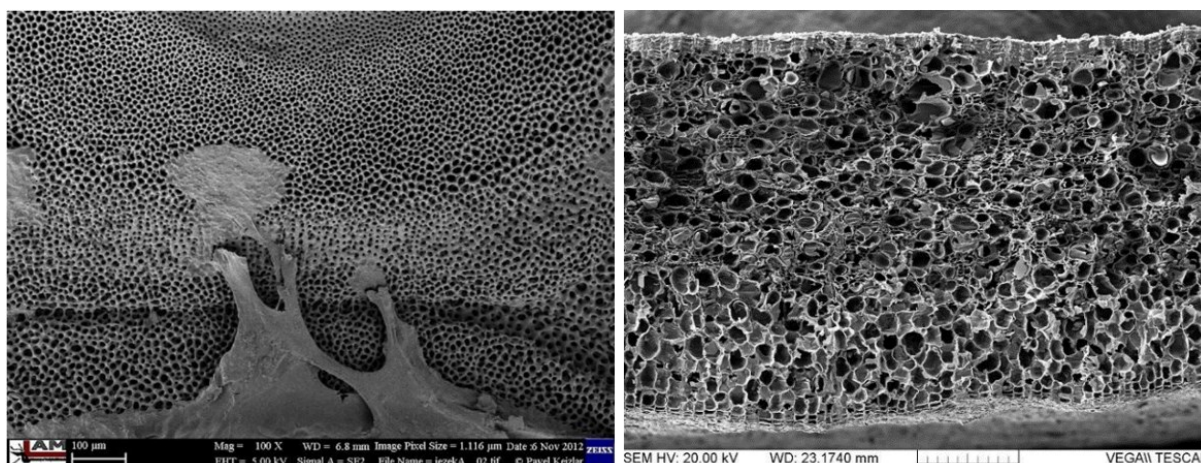
Sr	Stroncium
Si	Křemík
Si ₃ N ₄	Nitrid křemičitý
SiC _p	Karbid křemíku
Ta	Tantal
TiH ₂	Hydrid Titanu
Zn	Zinek
Zr	Zirkon
ZrH ₂	Hydrid zirkonu

Seznam použité symboliky

e	[%]	Poměrné prodloužení
E	[N/mm ²]	Youngův modul pružnosti
m_s	[g]	Hmotnost základního materiálu
P	[%]	Pórovitost
t_{mix}	[s]	Čas míchání
V_s	[mm ³]	Objem pěnového dílu
W_0	[mm ²]	Velikost průřezu zkušební vzorku
ρ	[g/cm ³]	Hustota
ρ_{rel}	[-]	Relativní hustota
ρ_s	[g/cm ³]	Hustota základního materiálu
σ	[N/mm ²]	Napětí
$\pm\sigma_p$	[%]	Poměrná směrodatná odchylka
σ_{pl}	[N/mm ²]	Hladina stabilního napětí

1. Úvod a cíle práce

Obecné označení pěny nesou materiály s celulární neboli pórovitou strukturou. Tyto materiály se vyskytují v podobě přírodních materiálů nebo jsou vyráběny uměle. Příkladem přirozeně se vyskytujících pórovitých materiálů je pemza, lidské kosti, dřevo, stébla trávy, korek a mnoho dalších (Obr. 1). Pórovité materiály jsou specifické svými jedinečnými vlastnostmi, jako je nízká hustota, vysoký poměr pevnosti ku hmotnosti, působivé strukturální, mechanické a tepelné vlastnosti. Tyto vlastnosti vedly k inspiraci inženýrů napodobení těchto struktur a k vývoji uměle vyrobených pórovitých materiálů, jako jsou polymerní pěny a kovové pěny. Polymerní pěny jsou všude přítomné a lze je vidět všude okolo nás například houbičky na nádobí, matrace, obaly, vytápění a spousty dalších. Kovové pěny nabízejí nové kombinace fyzikálních, mechanických, tepelných, elektrických a akustických vlastností a zároveň poskytují vysoký poměr tuhosti ku hmotnosti, propustnost plynů a vysokou tepelnou vodivost. Tyto materiály jsou ideální pro aplikace vyžadující lehké a tuhé konstrukce, účinnou absorpci energie, tepelný management a akustickou regulaci. [1]



Obr. 1 vlevo: Snímek vnějšího povrchu skeletu ježovky černé (zvětšeno 100x); vpravo: Snímek vnitřní struktury borky borovice lesní (zvětšeno 150x) [2]

Tato diplomová práce se zabývá výrobou hliníkových pěn ve školní slévárně strojní fakulty ČVUT. Konkrétně je zaměřena na výrobní metodu přímého zpěnění přidáním zpěňovačů uvolňujícího plyn do kovu a určení závislostí jednotlivých výrobních parametrů k dosažení optimálních vlastností pěny. V teoretické části jsou popsány kovové pěny a jejich obecné pojetí, charakter a využití. Dále jsou rozebrány jednotlivé výrobní metody s důrazem na metodu Alporas a jednotlivé parametry, které mohou ovlivňovat výslednou hliníkovou pěnu. V praktické části je detailně zaznamenána a probrána výroba hliníkových pěn metodou

zpěnění přidáním zpěňovadla na experimentech ve školní slévárně, tvorba grafů a závislosti jednotlivých výrobních parametrů na vlastnostech pěny a výsledné zhodnocení vlastností a výrobních postupů k dosažení pěny dle požadovaných vlastností.

1.1 Historie

1. pokusy o výrobu sahají až do 1. poloviny 20. století, od té doby výroba kovových pěn hodně pokročila, ale stále se jedná o produkt podléhající intenzivnímu výzkumu a teprve čeká na rozmach sériové výroby a komerčního použití. Historie je dlouhá, proto je v Tab. 1 sepsán souhrn nejdůležitějších historických milníků. [1]

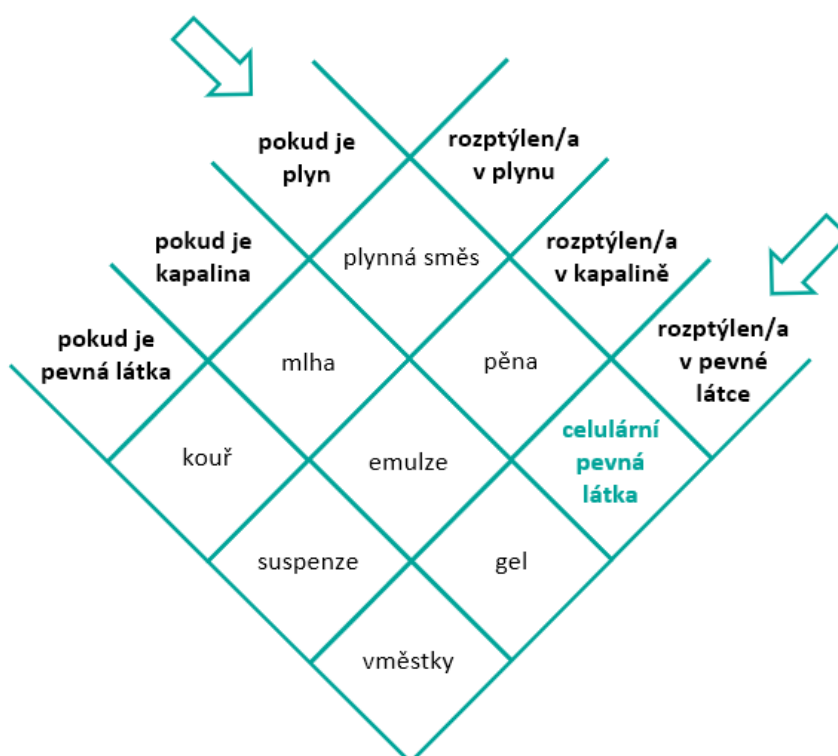
Tab. 1 Souhrn historických milníků kovových pěn [1]

Rok	Výzkumný pracovník	Zjištění
1943	Benjamin Sosnick	První pokus o výrobu kovové pěny z hliníku pomocí rtuťových par.
1950	Benjamin Sosnick	Odhali, že tekuté kovy lze oxidací taveniny nebo přidáním částic oxidu přeměnit na kovovou pěnu.
1951	Elliott	Vyvinul proces pění hliníku pro americké námořnictvo ve výzkumných laboratořích Bjorksten Research Laboratories (BRL).
1957	Stuart Fiedler	Návrh způsobu výroby kovové pěny sestávající ze slitiny a rozemletého hydridu kovu (hydridu titanu a zirkonia).
1971	Erb a kol.	Vytvořil metodu tvarování výrobků z pěnového kovu postupným lokálním drčením, která zvyšuje tažnost kovu v oblastech, kde dochází k drčení.
1972	Berry a kol.	Syntetizovaná buněčná strukturovaná kovová pěna tavením a přidáváním strusky
1974	Niebylski a kol.	Zveřejnění syntézy kvalitních olovnatozinkových pěn prostřednictvím patentu USA
1975	Thornton a kol.	Dospěl k závěru, že zvýšení odolnosti proti lomu při stlačování v případě pěn bude mít zásadní význam při využití dlouhého stlačování sloupů.
1976	Niebylski a kol.	Vylepšení procesu výroby kovové pěny vyztužené vlákny, jehož výsledkem je malá velikost pórů a rovnoměrnější délka.
1980	Kendall a kol.	Podal zprávu o syntéze měděných pěn s výjimečným potenciálem pro vakuové aplikace.
1983	Davies a kol.	Zhodnotil různé přístupy k tvorbě kovových pěn, navrhl, že nejdoporučovanější metodou je odlévání kovu kolem granulí, a identifikoval aplikace ve výfukových plynech benzínových motorů, v přídavných spalovačích a dalších zařízeních.
1984	Cocks	Vyvinutý materiál hyperbalistické ochrany pro výrobu kovových pěn pro aplikace spojené s vesmírem a raketami.
1986	Japanese engineers at Shinko Wire Co.	Vyvinul proces Alporas, který úspěšně vyráběl pěnový hliník pomocí procesu dávkového lití zpěněním pomocí zpěňovadel
1987	Marracino a kol.	Zavedeny nové neaktivní matrice pro objemové elektrody s použitím kovových pěn, které lze použít pro elektrolytické zpracování zředěných roztoků.
1990	Joachim Baumeister	Znovuobjevil starou cestu práškového kompaktního pění, kterou vyvinul Benjamin Allen v 50. letech 20. století.
1990	Jin a kol.	Popsal metodu výroby kovové pěny zachováním plynných bublin uvnitř roztaveného kovu po celou dobu pění, čímž vzniká kovová pěna s uzavřenými buňkami.

1991	Chen a kol.	Použití techniky holografické interferometrie pro zjištění elastických vlastností měděné pěny.
1992	Jin a kol.	Popsal novou metodu výroby stabilizované kovové pěny zadržováním plynných bublin v roztaveném kovu, aniž by bylo nutné používat směs uvolňující plyn nebo řízenou teplotu a dobu tání.
1994	Clancy a kol.	Vyvinul techniku výroby kovové pěny s nízkou hustotou duté koule degradací duté oxidové koule o průměru 2 mm do kovového stavu ve vodíkovém prostředí se složením NiO, Cu ₂ O a NiO-Cu ₂ O.
2005	Knott a kol.	Používá proces tlakového lití k výrobě kovových pěn, které lze snadno vyrobit tak, aby vyhovovaly poptávce průmyslu. Vynalezl také proces výroby kovové pěny se sníženou hmotností ve srovnání s běžnými materiály.
2006	Dobesberger a kol.	Vynalezl zařízení na výrobu kovové pěny se specifickými fyzikálními vlastnostmi.
2008	Kretz a kol.	Preferovaný proces lití pro výrobu lehkých kovových pěn s nízkým bodem tání
2009	Kattanek a kol.	nanášení vrstev roztaveného kovu na nekovový substrát s otevřenými póry za vzniku porézního kovového pěnového tělesa.
2010	Dunand a kol.	Přijatý proces spékání pro výrobu kovové pěny k vytvoření super elastických makroporézních materiálů NiTi a dalších porézních slitin/kovových pěn s velkou velikostí pórů 0,05-5 mm a pórovitostí v rozmezí 20-80 %.
2011	Campagna a kol.	Ohlášena kovová pěna používaná pro výměníky tepla jako žebra kondenzátoru
2012	Jung a kol.	Příprava hliníkových pěn s otevřenými buňkami potažených nanokrystalickým niklovým povlakem pomocí procesu elektro depozice pro zvýšení tuhosti, absorpce energie a tlumicí schopnosti.
2013	Klett a kol.	Vyvinul techniku přípravy kompozitní grafitové pěny s kovovou vazbou. Tato technika zahrnovala mletí, míchání a konsolidaci plniva s grafitem za účelem zlepšení jeho mechanických vlastností.
2013	Banhart a kol.	Zavedl práškovou metalurgickou metodu výroby kovové pěny sestávající z jednoho kovu a jedné kovové slitiny. K vytvoření rozměrově stabilního polotovaru bylo využito mechanického tlaku, teploty a tlaku plynu.
2014	Cochran a kol.	Popsal proces práškové metalurgie a odlévání pro výrobu syntaktické pěny, která se skládá z dutých kovových skořepin s pevnou kovovou pěnovou maticí. Tento proces vedl ke zlepšení vlastností, jako je pevnost a hustota.
2015	Babcsan a kol.	Nový způsob výroby kovové pěny s využitím podélných vln pro přizpůsobení velikosti bublin a zavádění bublinek plynu pomocí speciálních zařízení nebo ultrazvukových vln
2016	Reesink a kol.	Vyvinutý postup pro pórovité těleso s otevřenými buňkami pro výměník tepla s použitím termomagnetického materiálu a jakéhokoli vhodného organického pojiva
2017	Noraas a kol.	Použitá technika duální investiční pevné formy pro výrobu síťované kovové pěny
2018	Wood a kol.	Vyvinutá kombinace kovových pěn a uhlíkové pěny pro zvýšení přenosu tepla a zlepšení akustické absorpce. Vylepšená konstrukce povrchových chladičů pro turbostroje.
2019	Aronsson a kol.	Výroba hybridních kovových pěn procesem galvanického pokovování, při kterém se na povrchu kovové pěny vytvoří rovnoměrná vrstva pokovovacího materiálu.

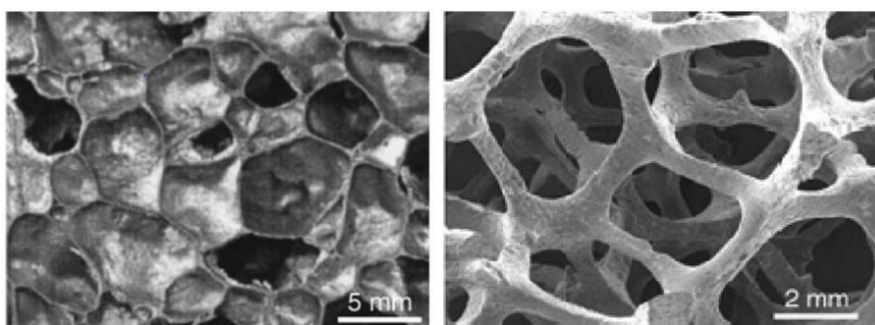
2. Kovové pěny, vlastnosti, užití a charakteristika

Kovová pěna je unikátní struktura, která vzniká ze základního kovového materiálu a obsahuje značné množství pórů vyplněných různými druhy plynů, případně jsou póry vyplněny jiným materiálem za vzniku tzv. syntaktické pěny. Pro snadnější pochopení může být použito vysvětlení pomocí disperze jedné fáze do fáze druhé. Toto vysvětlení se týká situace, kdy jsou obě fáze různých skupenství – mohou být například kapalina a plyn, nebo kapalina a tuhá látka. [3]



Obr. 2 Diagram vysvětlení pomocí disperze jedné fáze do druhé [3]

Póry v kovové pěně mohou být buď uzavřené, přičemž vzniká pěna s uzavřenými póry, nebo vzájemně propojené, čímž vzniká pěna s otevřenými póry. Jejich odlišnou strukturu lze pozorovat na Obr. 3



Obr. 3 Vlevo – struktura pěny s uzavřenými póry; vpravo – pěna s otevřenými póry [3]

2.1 Vlastnosti kovových pěn

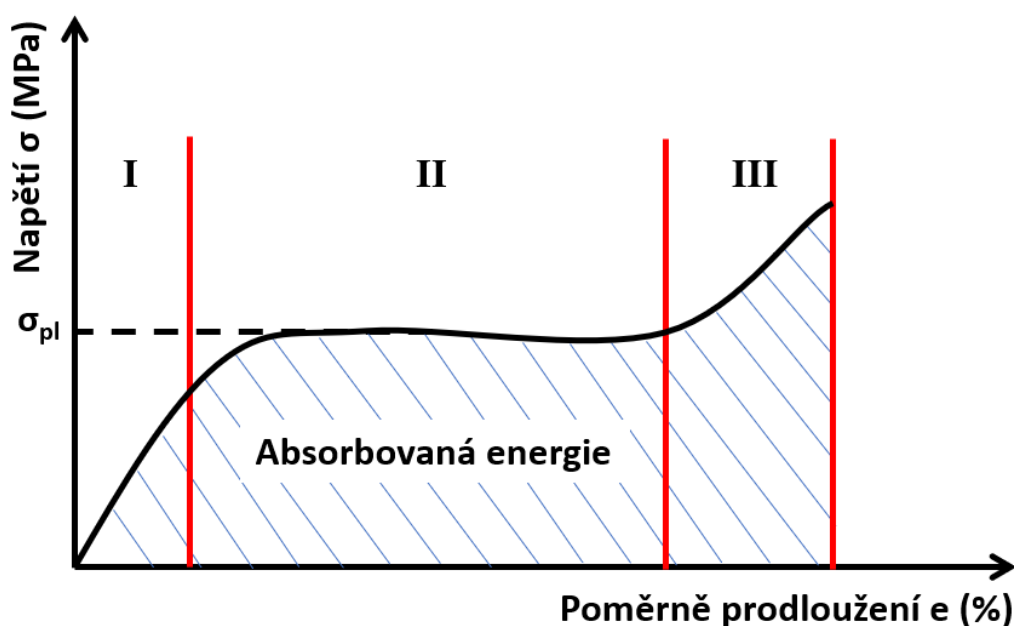
Nejcharakterističtějším rysem kovových pěn je jejich vysoká pórovitost, která diktuje většinu jejich vlastností. Kromě typu pórů a pórovitosti jsou vlastnosti ovlivněny strukturou, anizotropií a defekty pórů. Kovová pěna si navíc zachovává některé fyzikální a mechanické vlastnosti svého základního materiálu. Vlastnosti kovových pěn se charakterizují relativní hustotou ρ_{rel} (dle rovnice 2.1), což je poměr hustoty pěny ρ a hustoty základního materiálu ρ_s .

$$\rho_{rel} = \frac{\rho}{\rho_s} < 1 [-] \quad 2.1$$

nebo pórovitostí P , která je charakterizována jako poměr objemu pórů V k celkovému objemu pěnového dílu V_s vyjádřenou v procentech.

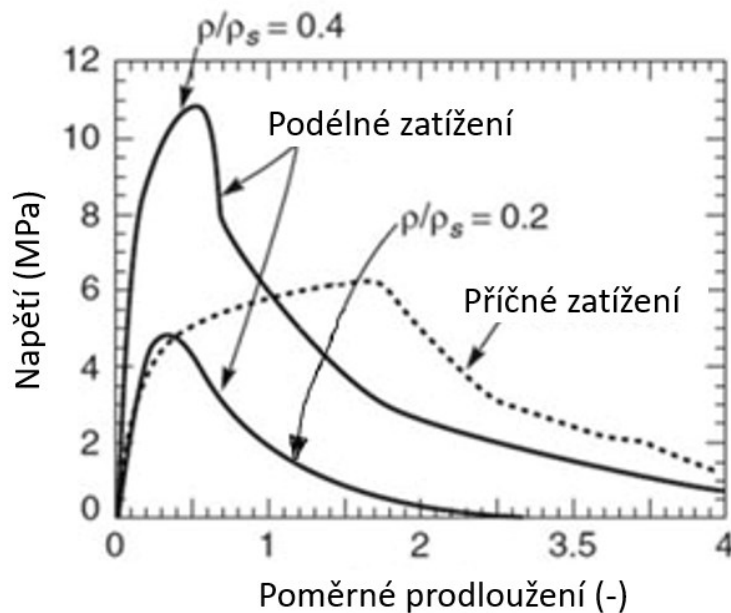
$$P = \frac{V}{V_s} \cdot 100 < 100 [\%] \quad 2.2$$

Mechanické vlastnosti jsou pro každé parametry a způsoby výroby různé. Kovové pěny s otevřenými póry běžně vykazují křivky odpovídající plastické deformaci, které jsou stejného tvaru a nijak extra se neliší kus od kusu při stejném výrobním procesu, protože otevřené póry se deformují zpravidla v ohybu. V pěnách s uzavřenými póry je oblast plastické deformace komplikovanější a může docházet k napětovým špičkám, protože plochy uzavřených pórů jsou namáhány tahem i tlakem a chovají se jako membrány. Diagram z tlakové zkoušky můžeme rozdělit do 3 oblastí (Obr. 4). [4]



Obr. 4 Teoretický průběh tlakové zkoušky kovových pěn [1]

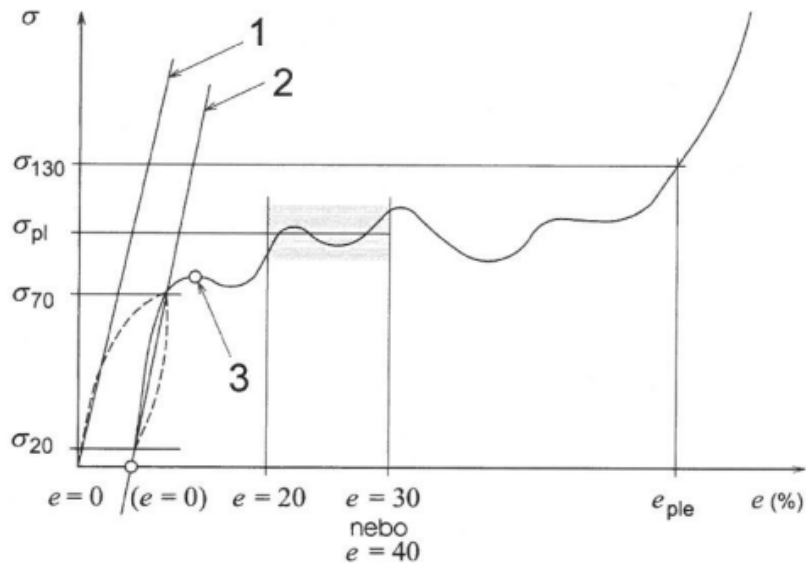
- I. Lineární elastická oblast, kde dochází k elastické deformaci stěn pórů.
- II. Oblast plastické deformace, v které dochází ke kolapsu stěn pórů což má za následek vyrovnání napětí, které je charakterizováno veličinou „Stabilní hladina napětí“ (σ_{pl}) do bodu, než dojde k překročení velikosti pórů.
- III. Oblast zhuštění rozpadlých pórů. Při zkoušce v tlaku se teoreticky mají chovat jako na Obr. 4 a při zkoušce v tahu podobně jako na Obr. 5



Obr. 5 Teoretický průběh tahové zkoušky kovových pěn pro podélné a příčné směry zatížení [1]

V kovových pěnách je obvykle docela velká anizotropie mechanických vlastností. To je ovlivněno nejvíce strukturou, která bývá mírně usměrněná z výroby. Takto lze dosáhnout anizotropie až 30 %. Také se liší modul v tlaku a v tahu a to tak, že Youngův modul pružnosti E v tahu je přibližně o 10 % větší (Obr. 5). [5]

Sklon křivky před deformací na mezi kluzu je nižší než Youngův modul pružnosti E , což znamená značnou mikroplasticitu při velmi nízkých napětích. Nad mezí kluzu kovové pěny tvrdnou až do maximální pevnosti v tahu. Youngův modul pružnosti E se určuje jiným způsobem, protože křivka elastického průběhu není lineární a její tvar je kus od kusu jiný. To je ovlivněno strukturou a defekty pórů. Proto se E určuje například zatížením do plastické oblasti a poté odlehčením a odečtením E z křivky odlehčení z plastické deformace (Obr. 6). [4] [6]



Legenda

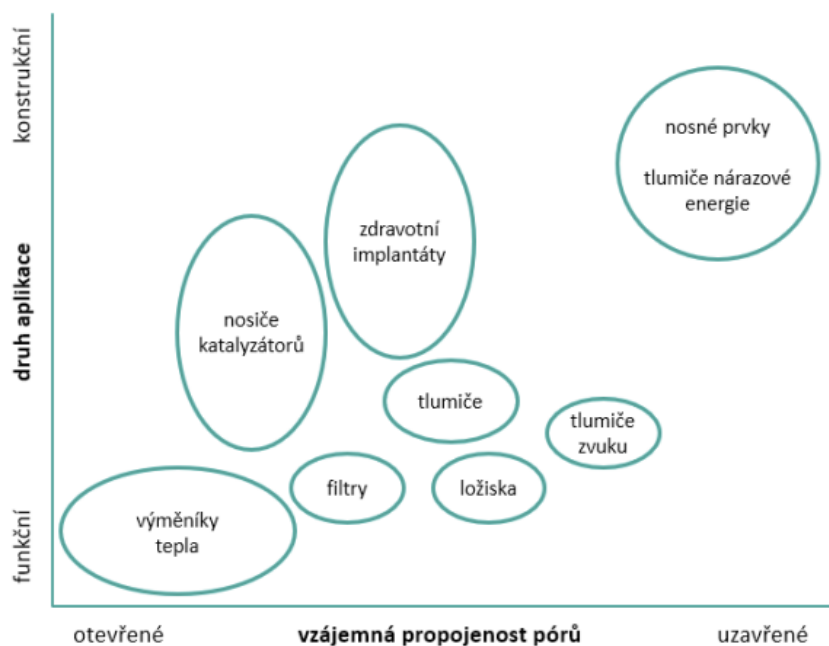
- 1 kvazi-elastický gradient
- 2 elastický gradient
- 3 první maximum pevnosti v tlaku

Obr. 6 Schématická ukázka průběhu napětí na stlačení z normy ČSN ISO 13314 [6]

2.2 Použití kovových pěn

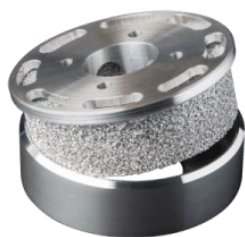
Kovové pěny jsou materiály, které mají plynové dutiny uvnitř materiálu, což způsobuje jejich nízkou měrnou hmotnost. Mezi další výhodné vlastnosti kovových pěn patří schopnost absorpce nárazové energie, tlumicí a izolační schopnosti a vysoká tepelná vodivost. Tyto vlastnosti umožňují využití kovových pěn v mnoha oblastech. Kovové pěny jsou vhodné zejména pro tzv. multifunkční aplikace, kdy se současně využívají alespoň dvě nebo více jejich předností. Další unikátní vlastností, z níž vyplývají i možnosti aplikace kovových pěn v oblasti medicíny, je také možnost dosažení struktury podobné lidské kosti. Pevnost, tuhost a absorpce energie jsou mnohem vyšší než u polymerních pěn. Jsou také mnohem stabilnější v agresivním prostředí oproti polymerním pěnám. Kovové pěny jsou navíc tepelně a elektricky vodivé a jejich mechanické vlastnosti jsou stálé i při vyšších teplotách. Na rozdíl od keramických materiálů mají schopnost se plasticky deformovat a absorbovat energii.

Parametrem, který výrazně ovlivňuje možnosti využití kovových pěn, je míra otevřenosti a vzájemné propojenosti jednotlivých pórů. Přibližnou závislost skupin použití v závislosti na stupni otevřenosti lze pozorovat na Obr. 7. Další body ke zvážení při určení použití jsou metalurgie, ekonomie, výrobní proces a funkční vhodnost k danému použití. [1]



Obr. 7 Závislost druhu aplikace na vzájemné propojenosti pórů [3]

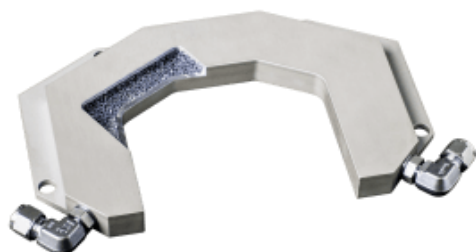
Kovové materiály s otevřenými póry díky své vysoké otevřenosti lze například používat pro průtokové aplikace jako jsou vzduchové odlučovače oleje (Obr. 8). Využití také najde s elektrickým a větrným stíněním, aby byly nahrávky čisté (Obr. 9). Také díky tepelné vodivosti a odolnosti vysokým teplotám jako výměníky tepla (Obr. 10) a například také jako nehořlavé tepelné štíty a omezovače hoření (Obr. 11) atd. [7]



Obr. 8 Vzduchové odlučovače oleje [7]



Obr. 9 Akustické použití [7]



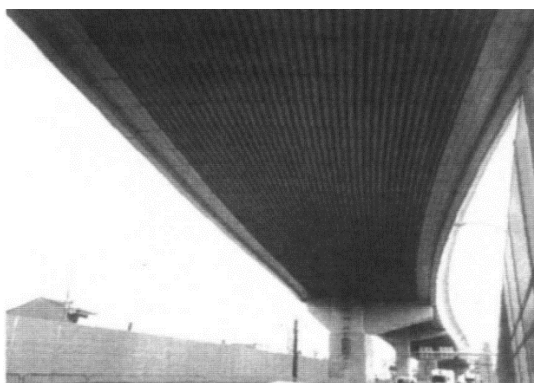
Obr. 10 Výměník tepla [7]



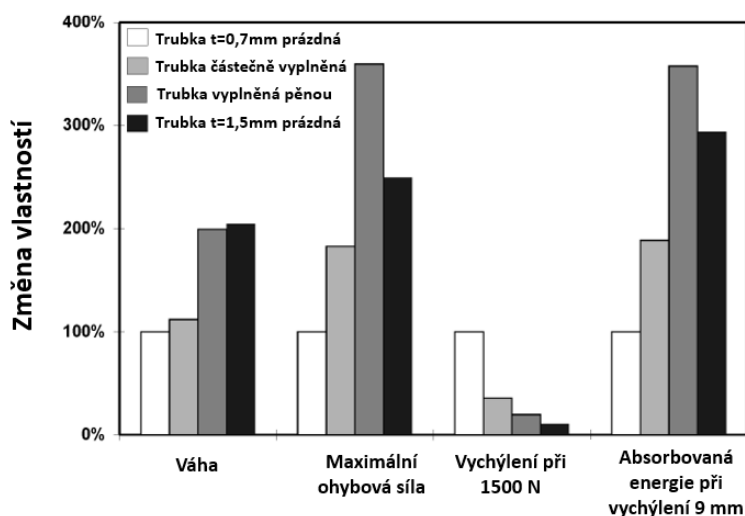
Obr. 11 Omezovače hoření [7]

Kovové pěny s uzavřenými póry se vyznačují výbornou absorpcí energie, frekvencí a pevností vůči hmotnosti, proto se nejčastěji používají v zátěžových aplikacích, jako tlumiče

energie a vyztužování profilů. Příklad takového použití lze pozorovat na Obr. 14 a význam tohoto použití lze sledovat z grafu na Obr. 13. Také se dají využít jako akustické tlumiče viz Obr. 12, kde byla použita hliníková pěna vyrobená metodou Alporas k odhlučnění nadzemního viaduktu, a spoustu dalších využití. Kovové pěny tedy přináší mnoho výhod v porovnání s jinými materiály a jejich použití se stává stále častějším v odvětvích chemického, dopravního, biomedicínského a stavebního průmyslu atd. [7] [8]



Obr. 12 konstrukce pohlcující zvuk na spodní straně nadzemního viaduktu [9]



Obr. 13 Rozdíl vlastností trubky vyztužené hliníkovou pěnou [8]



Obr. 14 Závěsná část tlumiče vyztužená hliníkovou pěnou [8]

3. Kovové materiály pro výrobu kovových pěn

Hliník je jedním z nejčastěji používaných kovů při výrobě pěn, ale k výrobě pěn lze použít i jiné kovy, například ocel, tantal, měď, nikl, titan a kovové kompozity. Z důvodů zájmu pouze o hliníkové pěny do této diplomové práce se budu zabývat pouze hliníkovými slitinami. Obecné informace hliníkových slitin jsou převzaty ze skript „Kovové materiály“ zdroje [10].

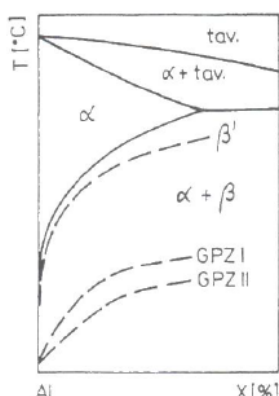
3.1 Základy hliníkových slitin

Slitiny hliníku se vyznačují kubickou plošně středěnou (kpls) krystalovou mřížkou. Relativně nízká teplota tání ($T_t = 933 \text{ K}$) a relativně vysoký teplotní koeficient podélné roztažnosti ($\alpha = 24 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) naznačují, že energie vazby mezi atomy hliníku není velká, což má za následek relativně nízké pevnostní charakteristiky. Vysoká koncentrace volných elektronů je příčinou vysoké elektrické vodivosti ($\lambda_c = 38 \text{ MS} \cdot \text{m}^{-1}$) a tepelné vodivosti ($\lambda_t = 209 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}$) slitin.

Primární fází technicky čistého hliníku a jeho slitin je fáze kpls α , která tvoří tuhý roztok příměsí anebo přídavných látek v hliníku. Ve většině hliníkových slitin vzniká eutektikum a při eutektické teplotě dosahuje rozpustnost přísad svého maxima. Rozpustnost přísad ve fázi α klesá s klesající teplotou (Obr. 15). Běžné legující prvky, které se vyskytují v hliníkových slitinách, vykazují různé stupně rozpustnosti. Na základě jejich maximální rozpustnosti (c_{\max}) při eutektické teplotě (T_{eut}) lze legující prvky rozdělit do několika skupin: s vysokou rozpustností (Zn a Mg), se střední rozpustností (Cu, Mn, Si), s malou rozpustností (Ti, Zr) a s velmi malou rozpustností (Be, Fe, Ni). Prvky z posledních dvou skupin jsou při 20 °C ve fázi α prakticky nerozpustné, zatímco ostatní prvky mají rovněž nízkou rozpustnost. V důsledku toho jsou hliníkové slitiny při pokojové teplotě obecně heterogenní a skládají se z fáze α a dalších minoritních fází (např. β), které vznikají precipitační dekompozicí pevného roztoku.

Za určitých podmínek, kdy je pevný roztok α_p přesycen, dochází k jeho precipitačnímu rozpadu. Před tímto rozpadem dochází k segregacním jevům, kdy se atomy příměsí X shlukují a vytvářejí shluky známé jako Guinierovy-Prestonovy zóny (GPZ). Vznik těchto GPZ závisí na faktorech, jako je dostatečně nízká teplota stárnutí, malé rozdíly ve velikosti atomů mezi příměsí X a Al nebo vysoká úroveň přesycení ve fázi α_p . Tvar GPZ se liší na základě rozdílů v atomových velikostech a obvykle mají největší rozměr kolem 10 nm a objemovou koncentraci 10^{14} nm^{-3} . Tyto GPZ hrají významnou roli v procesu precipitačního zpevnování, čímž se materiál stává pevnějším. Při rozpadu fáze α_p dochází postupně ke vzniku GPZ

I (neuspořádané shluky atomů X v mřížce Al), GPZ II (uspořádané shluky) a přechodné precipitační fáze β' . [10]



Obr. 15 Část rovnovážného diagramu soustavy Al-X s čarami rozpustnosti GPZ a fáze β' [10]

Hliník a jeho slitiny podléhají během tavení a lití aktivním reakcím s plyny přítomnými v okolní atmosféře. Tyto plyny se mohou spojovat s kovy za vzniku pevných roztoků a chemických sloučenin. Plyny mají tendenci se koncentrovat především na hranicích zrn a narušovat jejich soudržnost, což následně vede ke snížení mechanických vlastností kovových materiálů. Chemické sloučeniny vzniklé mezi plyny a kovy navíc přispívají k přítomnosti nekovových vměstků v materiálu. Pokud ke vzniku těchto chemických sloučenin dochází působením tepla, rozpustnost plynu v kovu se s rostoucí teplotou snižuje. Naopak při vzniku pevného roztoku se rozpustnost plynu s rostoucí teplotou zvyšuje. V hliníku a jeho slitinách se běžně vyskytují vodík, kyslík, dusík a uhlovodíky. V hliníku se kyslík nachází ve stavu chemicky vázaném na Al_2O_3 , dusík tvoří nitrid AlN a uhlík karbid Al_4C_3 . Hliníkové slitiny se značí dle normy ČSN EN 573-1:2005 a její stavy se značí dle ČSN EN 515:1996 [10] [11]

Tab. 2 Význam písmen pro značení základního stavu [11]

Písmeno	Stav výrobku
F	Z výroby
O	žíhaný
H	Deformačně zpevněný
W	Po rozpouštěcím žíhání
T	Tepelně zpracovaný k získání stabilních stavů jiných než F, O, H

3.2 Rozdělení hliníkových slitin

Hliníkové slitiny se dělí na 3 hlavní skupiny: 1. Technicky čistý hliník, 2. Tvářené slitiny hliníku a 3. Slévárenské slitiny hliníku

3.2.1 Technicky čistý hliník

Hliník se liší čistotou, která se udává jako hmotnostní procento daného kovu. Stejně jako u jiných technicky čistých kovů je čistota rozhodující. Nejčastějšími nečistotami v hliníku jsou Fe a Si, které se vyskytují ve výchozích surovinách. Již při obsahu pouhých 0,05 % Fe se na hranicích zrn vytváří eutektická fáze ($\alpha + \text{Al}_3\text{Fe}$), která snižuje tažnost a odolnost proti korozi. Křemík je v hliníku mnohem rozpustnější než železo, ale jehličkovité sraženiny fáze β mají podobný vliv jako eutektikum ($\alpha + \text{Al}_3\text{Fe}$). Pokud je přítomno železo i křemík, v Al99,5 a méně čistém hliníku se místo fáze β tvoří komplexní fáze $\text{Al}_m\text{Fe}_n\text{Si}$. Ke zvýšení pevnosti hliníku se běžně používá tváření za studena. Míra deformačního zpevnění dosažená během tohoto procesu je přímo úměrná stupni tváření a nepřímo úměrná čistotě hliníku. [10]

Tab. 3 Značení technicky čistého hliníku [10]

Označení		Obsah příměsí (max hm. %)			Použití
Číselné	Chem. Složení	Fe	Si	Cu	
EN AW-1050A	[Al99,5 (A)]	0,40	0,25	0,05	chem a potr. zařiz., mobil. nádrže
EN AW-1070A	[Al99,7 (A)]	0,25	0,20	0,03	chem. potr. Zařiz a el. techn. zařízení
EN AW-1199A	[Al99,99 (A)]	0,006	0,006	0,006	kondenzátory, povlaky (optika)
EN AW-1200	[Al99,0]	Fe+Si = 1,00		0,005	vodiče, nádoby, legování
EN AW-1350	[Al99,5]	Min 35,4 MS/m			vodiče

3.2.2 Tvářené slitiny hliníku

Slitiny hliníku, které lze homogenizovat zahřátím na oblast pevného roztoku α , jsou vhodné pro tvářecí procesy. Slitiny obsahující ve své struktuře precipitáty při pokojové teplotě lze zpevňovat procesem vytvrzování, kterým se dosáhne určitého stavu. Nejdůležitější stavy tepelně zpracovatelných hliníkových slitin viz Tab. 4. U některých vytvrzovaných slitin však nemusí být dosaženo požadované kombinace mechanických vlastností a odolnosti proti korozi, takže jsou pro vytvrzování nevhodné. Nejběžnějšími přísadami používanými ve vytvrzitelných slitinách hliníku jsou hořčík, mangan, měď, zinek a nikl. Hořčík hraje zásadní roli při umožnění vytvrzení a také zvyšuje odolnost proti korozi. Mangan přispívá ke zvýšení pevnosti, tvářitelnosti a teploty rekrystalizace. Zlepšuje také odolnost proti korozi a omezuje

růst zrn během homogenizačního žíhání. Měď a zinek účinně zpevňují slitinu, ale mohou mít negativní vliv na tvářitelnost a korozní odolnost. Nikl naopak zlepšuje mechanické vlastnosti při zvýšených teplotách a zvyšuje odolnost proti korozi u hliníkových slitin. Zástupce jednotlivých skupin tvářených slitin jsou v Tab. 5 [10]

Tab. 4 Nejdůležitější stavy tepelně zpracovatelných hliníkových slitin [11]

Označení	Stav
T3	rozpuštěcí žíhání + kalení + tváření za studena + přirozené stárnutí
T31	rozpuštěcí žíhání + kalení + tváření za studena (1% deformace) + přirozené stárnutí
T351	rozpuštěcí žíhání + kalení + uvolnění vnitřního napětí řízenou deformací (většinou 0,5 až 3 %) + přirozené stárnutí
T4	rozpuštěcí žíhání + kalení + přirozené stárnutí
T5	ochlazení ze zvýšené teploty tváření + umělé stárnutí
T6	rozpuštěcí žíhání + kalení + umělé stárnutí
T651	rozpuštěcí žíhání + kalení + uvolnění vnitřního napětí řízenou deformací (většinou 1 až 3 %) + umělé stárnutí
T7	rozpuštěcí žíhání + kalení + umělé přestárnutí
T76	rozpuštěcí žíhání + kalení + umělé přestárnutí pro dosažení dobré odolnosti proti vrstevnaté korozi
T8	rozpuštěcí žíhání + kalení + tváření za studena + umělé stárnutí

Tab. 5 Výčet tvářených slitin hliníku [10]

Označení		Stav	Mechanické vlastnosti			
Číselné	Chem. Složení		R _p 0,2 [MPa]	R _m [MPa]	A [%]	HBS
EN AW-2014	[AlCu4SiMg]	T4	220-270	380	10	110
		T6	320-380	420	6	130
EN AW-2024	[AlCu4Mg1]	T3	270-310	400	8	115
		T8	380	455	5	135
EN AW-2031	[AlCu2,5NiMg]	T6	270-320	380	4-10	110
EN AW-3103	[AlMn1]	H14	110-120	140	6	45
EN AW-4032	[AlSi12MgCuNi]	T6	315	380	9	120
EN AW-5754	[AlMg3]	H14	190	240	4	70
EN AW-6061	[AlMg1SiCu]	T4	110	180	12-14	60
		T6	240	290	6-10	90
EN AW-7075	[AlZn5,5MgCu]	T6	460-500	530	6	160
EN AW-8011A	[AlFeSi(A)]	H14	110	130	3	40

3.2.2.1 Nevytvrzované slitiny

Fáze α hliníku vykazuje velkou rozpustnost pro hořčík, přesto se binární slitiny Al-Mg nevytvrzují. Omezený nárůst pevnosti je zastíněn podstatným snížením tažnosti. Přesto slitiny s obsahem hořčíku do 7 % nacházejí uplatnění, protože s rostoucím obsahem hořčíku podporují tvorbu fáze β (Al_3Mg_2). Přítomnost fáze β však u těchto slitin zhoršuje tvářitelnost a odolnost proti korozi. Mechanické vlastnosti konkrétní slitiny se pohybují v rozmezí hodnot, které jsou ovlivněny především způsobem deformace, například typem použitého polotovaru. Al-Mg slitiny, které procházejí výrazným deformačním zpevněním, mají tendenci vykazovat vysoké zotavení, částečně i při teplotě okolí, a zároveň vykazují dobré mechanické vlastnosti při nízkých teplotách. [10]

3.2.2.2 Vytvrzované slitiny

Tvářené vytvrzované slitiny hliníku jsou vícesložkové a tvoří tři hlavní skupiny: Al-Cu-Mg-(Ni), Al-Mg-Si a Al-Zn-Mg-(Cu).

První skupinu tvoří slitiny typu Al-Cu-Mg, známé jako duraly nebo superduraly, jestliže mají vysoký obsah hořčíku. V měkkém stavu mají tyto slitiny mikrostrukturu tvořenou fázemi α , θ (Al_2Cu) a S (Al_2CuMg). Další prvky jako Fe, Mn a Si vytvářejí komplexní fáze, jako je AlCuFeMn nebo $\text{Al}_{12}\text{Fe}_3\text{Si}$, které jsou ve fázi α téměř nerozpustné. Po vytvrzení mikrostruktura zahrnuje kromě komplexních fází také fáze GPZ nebo θ' a S' .

Druhou skupinu tvoří slitiny Al-Mg-Si (avialy), které jsou rovněž široce používané tvarově tvrzené hliníkové slitiny. Po kalení za zvýšených teplot (520 až 535 °C) s následným kalením vodou a stárnutím (160 °C, 5 h) dosahují pevnosti kolem 300 MPa díky přítomnosti fáze β' (Mg_2Si). Tyto slitiny lze rovněž tvářet za studena za účelem zpevnění, přičemž se dosáhne pevnosti okolo 400 MPa. Naopak je lze změkčit žíháním (340 až 370 °C) a pomalým ochlazováním (maximálně 100 °C/h).

Třetí skupinu tvoří slitiny Al-Zn-Mg s širokým teplotním rozsahem homogenní fáze α . Tato fáze navíc vykazuje vysokou termodynamickou stabilitu při ochlazování, což umožňuje snížit rychlost ochlazování nutnou pro vznik přesyceného pevného roztoku α_p . Tyto slitiny mohou být podrobeny přirozenému stárnutí (14 dní), umělému stárnutí nebo duplexnímu stárnutí. Přítomné fáze vytvrzování jsou η' (Zn_2Mg) a T ($\text{Al}_2\text{Zn}_3\text{Mg}_3$). Dosažitelné precipitační vytvrzení je u těchto slitin srovnatelné s vytvrzením avialů. [10]

3.2.3 Slévárenské slitiny hliníku

Tyto slitiny se vyznačují vyšší koncentrací legujících prvků (Si, Mg, Cu, Mn, Ni) a nečistot (Fe, Mn, Si, Zn), jakož i specifickým podílem eutektik ve své struktuře, což vede k horším mechanickým vlastnostem ve srovnání s plně formovanými slitinami. Mají však příznivé slévárenské vlastnosti, jako je dobrá kruhovitost, snížené smrštění, minimalizace trhlin a lepší těsnost, díky čemuž jsou vhodné pro různé metody lití. Tyto slitiny lze odlévat pomocí pískových forem (S), kokil (K) nebo tlakového lití (D). Volba metody lití významně ovlivňuje výsledné vlastnosti, stejně jako jejich chemické složení a tepelné zpracování. Například tlakové odlitky, které jsou ve formě rychle ochlazeny, mají jemnozrnnou strukturu a jejich fáze je přesycena přísadami, což umožňuje přirozené stárnutí bez předchozího rozpouštěcího žíhání (T1). Nicméně v takových případech lze jako alternativní metodu provést i umělé stárnutí (T5). [10]

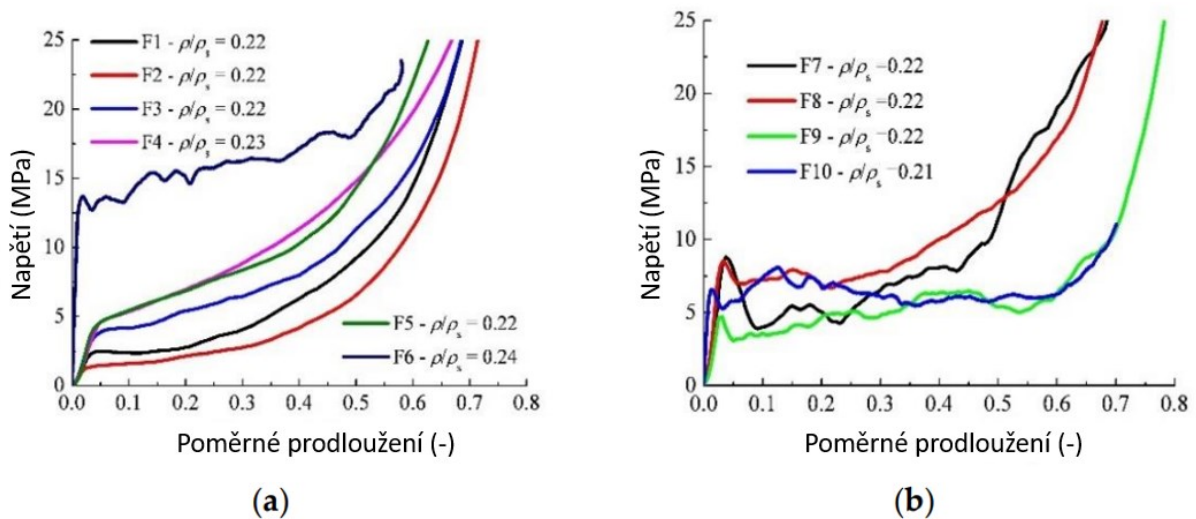
Tab. 6 Značení slévárenských slitin hliníku [10]

Označení		Slévárenské výrobky	Stav	Mechanické vlastnosti			
číslené	Chemické složení			R _p 0,2 [MPa]	R _m [MPa]	A [%]	HBS
AC-21000	AlCu4MgTi	S,K,L	T4	200	300-320	5-8	90-95
AC-41000	AlSi2MgTi	S,K	T6	180	240-260	3-5	85
AC-42000	AlSi7Mg	S,K,L	T6	180-220	240-260	1	75-90
AC-43000	AlSi10Mg	S,K	T6	180-220	220-260	1	75-90
AC-44000	AlSi11	S,K	F	70-80	150-170	6	45
AC-45000	AlSi6Cu4	S,K	F	90-100	150-170	1	60-75
AC-46000	AlSi9Cu3Fe	D	F	140	240	<1	80
AC-47000	AlSi12Cu	S,K	F	80-90	150-170	1-2	50-55
AC-48000	AlSi12CuNiMg	K	T6	240	280	<1	100
AC-51000	AlMg3	S,K	F	70	140-150	3-5	50
AC-51200	AlMg9	D	F	130	200	1	70
AC-71000	Al	S,K	T1	120-130	190-210	4	60-65

3.3 Zkoumané hliníkové slitiny

Lze říci, že k výrobě hliníkových pěn použít téměř jakoukoliv hliníkovou slitinu. Existují studie, které se zabývají výrobou hliníkových pěn i z recyklovaných plechovek od nápojů. Avšak různé slitiny se chovají různě a dosahují různých pevnostních charakteristik. Ve studii [12] bylo provedeno porovnání mechanických vlastností hliníkových pěn vyrobených metodou

typu Alporas z různých slitin hliníku. Zkoumány byly: Technicky čistý hliník Al 99,95; Al-7Si (podobná A356); Al-1Mg-0,6Si (podobná EN AW 6061); Al-6Zn-2,3Mg (podobná EN AW 7075) a její ekvivalent Al-5,5Zn-3Mg obsahující Sc, Zr.

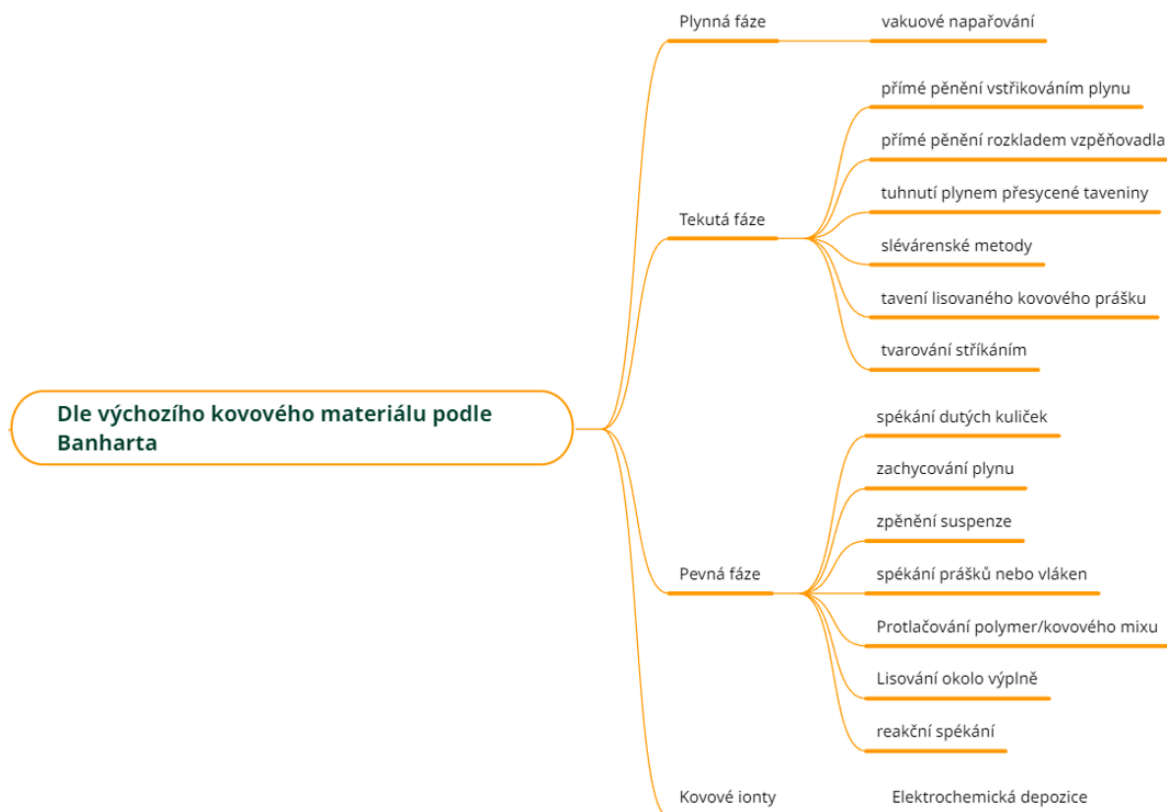


Obr. 16 Křivky tlakového napětí pro pěny F1, F3, F5, F7, F9 zpracované hydridem titanu TiH_2 a pěny F2, F4, F6, F8, F10 vyrobené s uhlíkatým vápenatým $CaCO_3$, všechny provedené s různými výchozími slitinami, jako jsou a) čistý Al (F1, F2), slitina Al-7Si (F3, F4), slitina Al-1Mg-0,6Si (F5, F6) a b) Al-5,5Zn-3Mg (Sc,Zr) (F7, F8), Al-6Zn-2,3Mg (F9, F10). [12]

Z výsledků studie můžeme vidět, že vzorky F1-F4 a (F5 v kombinaci s TiH_2), které mají dobré slévárenské vlastnosti vykazují hladký průběh. Zatímco vysokopevnostní hliníkové slitiny F7-F12 vykazují velké množství vrcholů, což značí vznik tvrdých intermetalických fází. Vlastnosti hliníkové pěny v hliníkových slitinách jsou velmi závislé také na jejich reakci s prvky zpěňovacího činidla a způsobu stabilizace. Těmito vlivy se zabývám dále v kapitole 5.1.

4. Výroba kovových pěn slévárenskou cestou

Výrobní metody lze rozdělit dle několika pohledů, pro obecný přehled lze rozdělit dle stavu, ve kterém se nachází výchozí kovový materiál, respektive z hlediska jeho skupenství. Toto rozdělení stanovil John Banhart ve zdroji [4]. Takto se dají metody rozdělit do čtyř hlavních skupin. Výrobní metody z plynné fáze, tekuté fáze, pevné fáze a kovové ionty (Obr. 17).



Obr. 17 Rozdělení dle výchozího kovového materiálu [4]

Výrobní procesy jsou dále rozděleny dle způsobu zpěňování do dvou skupin:

1. Přímé zpění
2. Nepřímé zpění

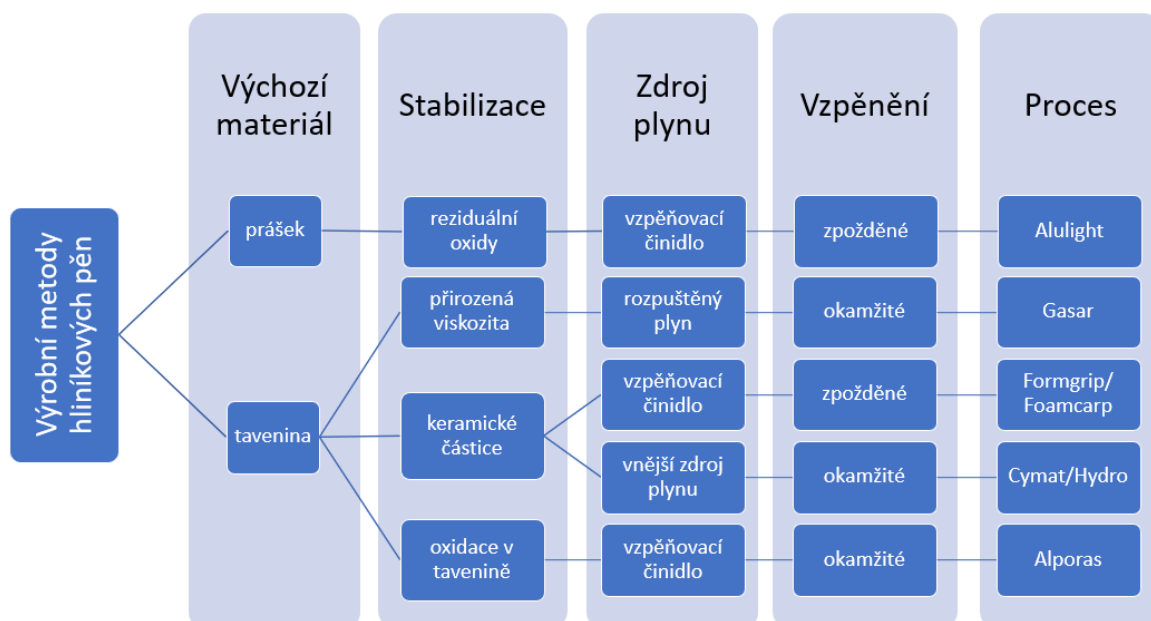
U přímého zpění kovových pěn se kov v kapalném stavu míchá spolu se zpěňovacím činidlem. Při kontaktu kovu s plynem dochází k jeho přeměně a vzniku pěny. Naproti tomu nepřímá metoda pění kovových pěn zahrnuje základní prekurzor v kombinaci rozptýlenými částicemi zpěňovacího činidla, jako je například Hydrid titanu (TiH_2). Při zahřátí prekurzoru nad teplotu tavení dochází k výrazné expanzi, která vede k jeho přeměně na pěnu.

Existuje 9 patentovaných technologických procesů, ale pouze pět z nich bylo úspěšně použito pro komerční účely. Existuje i více metod, ale ty jsou spíše laboratorního rázu

a z důvodů technické a finanční náročnosti komerčně nepoužívané. Různé výrobní společnosti neustále pracují na tradičních i netradičních přístupech, aby dosáhly efektivnějšího, spolehlivějšího, reprodukovatelnějšího a levnějšího výrobního systému. Tyto výrobní systémy se zaměřují na oddělenou výrobu kovových pěn s otevřenými a uzavřenými póry. Mezi výše zmíněných 9 patentovaných výrobních metod patří:

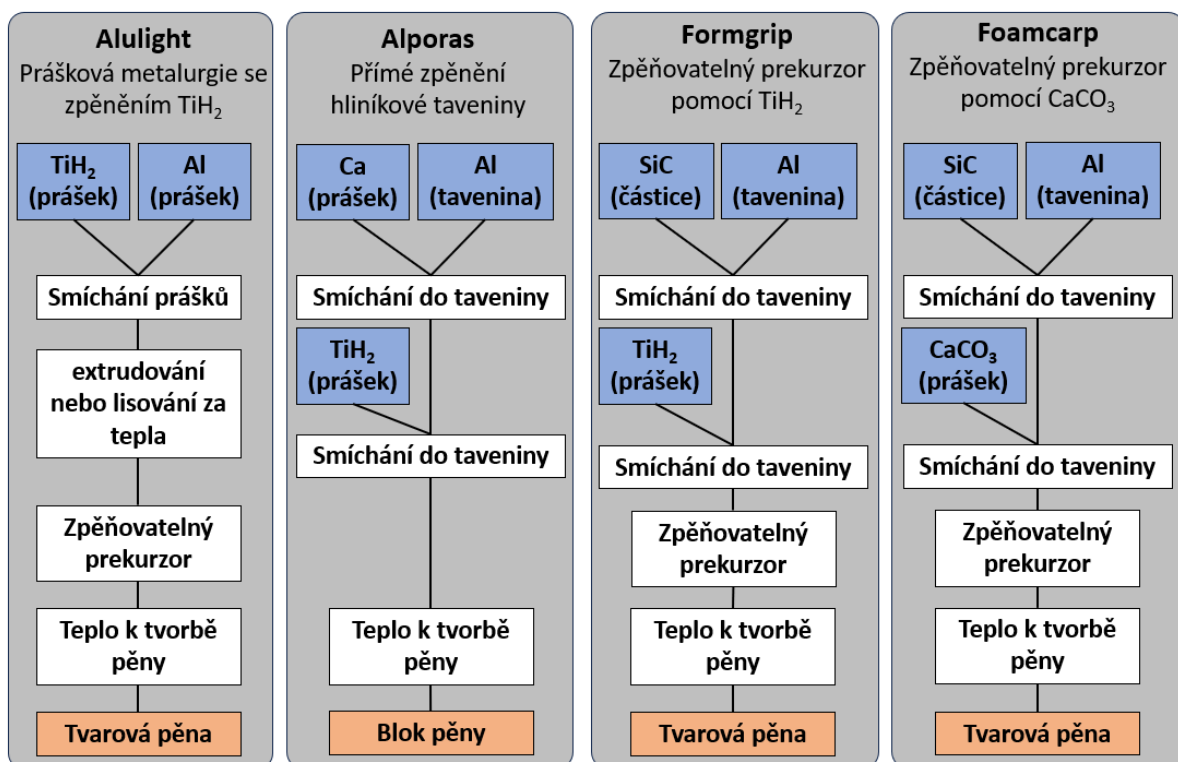
1. Probublávání vzduchem (přímé zpěnění).
2. Vkládání částic uvolňujících plyn do taveniny a řízením tlaku při chlazení (přímé zpěnění).
3. Vkládání částic uvolňujících plyn v polotuhých látkách (přímé zpěnění).
4. Nanášení kovů na pórovité preformy (nepřímé zpěnění).
5. Odlévání s polymerním nebo voskovým prekurzorem jako předlohou (nepřímé zpěnění).
6. Rozpínání zachyceného plynu.
7. Společné lisování nebo odlévání dvou materiálů.
8. Duté kulové struktury.
9. Eutektické tuhnutí plynu a kovu. [1]

Schématické provedení pěti nepoužívanějších výrobních metod je vyobrazeno na Obr. 18. Větev výrobních metod vycházejících z taveniny nese označení Slévárenská cesta (v aj. Melt route).



Obr. 18 Pět hlavních výrobních metod výroby kovových pěn [1]

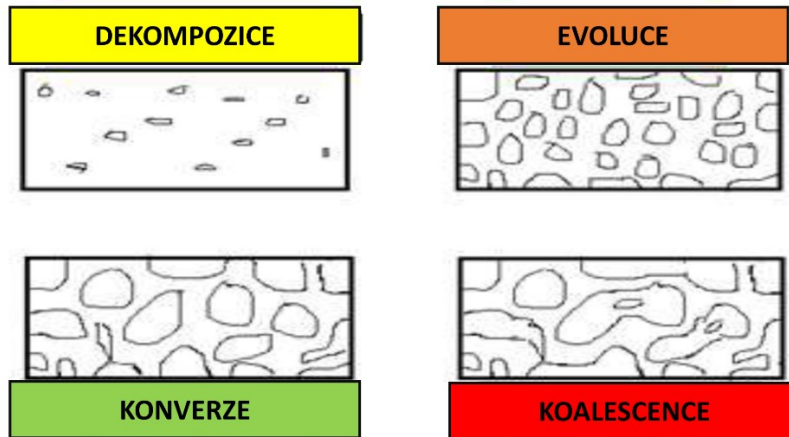
Výrobní metody se skládají z 2 hlavních kroků – stabilizace a zdroj plynu ke zpěnění. Účelem stabilizace taveniny je její úprava zvýšením viskozity k zachycení generovaného plynu ve formě bublin. Zdroj plynu může být různý, ale nejčastěji to bývá zpěňovací činidlo ve formě prášku, který se při zahřátí nad kritickou teplotu rozkládá a generuje plyn. Tyto činidla bývají nejčastěji hydridy například TiH_2 , ZrH_2 , MgH_2 atd. nebo Uhličitany například $CaCO_3$. Následuje zpěnění, které může být buď okamžité tzn. zpěnění ihned při výrobním procesu z taveniny. Anebo opožděné což znamená, že při výrobě se vyrobí zpěňovací prekurzor a pro zpěnění je potřebné zahřátí na teplotu tavení. Pro lepší představu může sloužit Obr. 19, na kterém jsou vyobrazeny výrobní metody hliníkových pěn pomocí práškových zpěňovadel. Pomocí těchto metod se vyrábí pěny s uzavřenými póry, které jsou vhodné k vyplňování profilů a dutin v metodách Alulight, Foamcarp, Formgrip anebo k tvorbě bloků pěn z jednoduchých tvarů při metodě Alporas. [1] [9] [4]



Obr. 19 Diagram výrobních procesů hliníkových pěn pomocí práškového zpěňovadla [13]

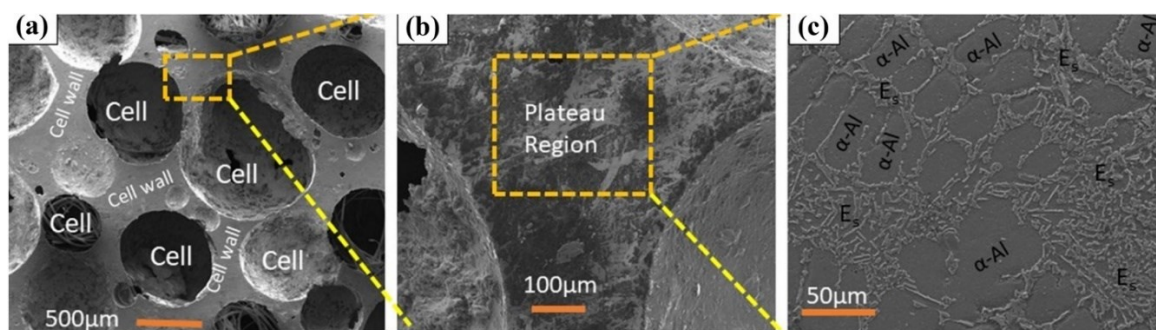
4.1 Proces vzniku pěny pomocí zpěňovacího činidla

Pro správnou výrobu je důležité pochopit proces pění. Proces pění následuje tyto 4 kroky (Obr. 20).



Obr. 20 Jednotlivé kroky při formování pěny [14]

Když se kov roztaví, Teplota zpěňovacího činidla překročí teplotu tání (T_t) a začne generovat plyn, který začne expandovat, což vede k tvorbě malých sférických pórů. Mezi složky pórů pěny (Cell) patří stěny pórů (Cell wall), rozhraní pórů a uzly. Stěna pórů funguje jako separátor mezi dvěma bublinami plynu a vykazuje zakřivení v důsledku rozdílu tlaku mezi nimi. Vzájemné průniky stěn pórů se nazývají plošné hranice (Plateau region), které tvoří vzájemně propojenou a neuspořádanou síť. Uzly představují spojnice nejméně čtyř plošných hranic.



Obr. 21 Detailní popis struktury pórů [15]

Vznik pěny vyžaduje určité množství povrchové energie, která je vždy větší než tepelná energie a nelze ji minimalizovat. V důsledku toho se pěna stává nestabilní. Jak bubliny rostou, interakce mezi póry způsobují změnu jejich tvaru ze sférického na polygonální, čímž se bubliny dostávají do metastabilního stadia s minimálním povrchem. Konečným tvarem bubliny je mnohoúhelník obklopený vrstvou tekutého materiálu, což má za následek plošné hranice

s rovným povrchem uprostřed a zakřivenými okraji. Tlak uvnitř plošných hranic je nižší než uvnitř stěn, což způsobuje proudění kapaliny směrem k plošným hranicím. To vede ke zhuštění okrajů plošných hranic na úkor tloušťky stěn, což nakonec vede ke zhrubnutí pěny.

Proces tvorby pěny zahrnuje fáze zrodu, života a zániku, přičemž k zániku pěny dochází na vrcholu třetího a na začátku čtvrtého kroku. Stabilitu pěny ovlivňují různé faktory, včetně geometrie plošných hranic, tloušťky buněčných stěn, povrchové adsorpce, povrchové pohyblivosti, dilatační viskozity a elasticity. Dosažení stability vyžaduje více než jen volbu vysoké objemové viskozity nebo nízkého povrchového napětí jednosložkové kapaliny. K zabránění ztenčení a roztržení filmu je nutná lokální síla, která působí proti lokální destabilizaci způsobené poruchami, jako jsou tepelné fluktuace nebo povrchové vlnění. Stabilizátor nebo prvek zvyšující viskozitu zpomaluje mechanismy stárnutí pěny, včetně stékání nebo konverze, koalescence a zhrubnutí. Stabilizátory vytváří na buněčné stěně hustou monovrstvu, která snižuje povrchové napětí, zvyšuje viskozitu a vytváří elektrostatické síly (tzv. disjunktní síly), které zabraňují kolapsu pěnového filmu. Přídavek stabilizátoru je proto pro stabilní tvorbu bublin zásadní.

Je třeba poznamenat, že expanze pěny je omezena spíše schopností vrstvy tekutého kovu odolat vzniklému napětí než dostupností plynu pro pění. Stabilita pěny je tedy klíčovou hodnotou pro získání vysoce kvalitní pěny a jedním z významných faktorů ovlivňujících stabilitu je tloušťka buněčné stěny, která závisí na průměru částic, složení slitiny, teplotě pění a materiálu částic. Větší částice mají za následek silnější stěny buňky. Při metodě slévárenské cesty je uvolňování plynu řízeno tepelným rozkladem zpěňovacího činidla. Pro dosažení stabilní pěny metodou taveniny je rozhodujícím faktorem správný výběr zpěňovacího činidla. [14]

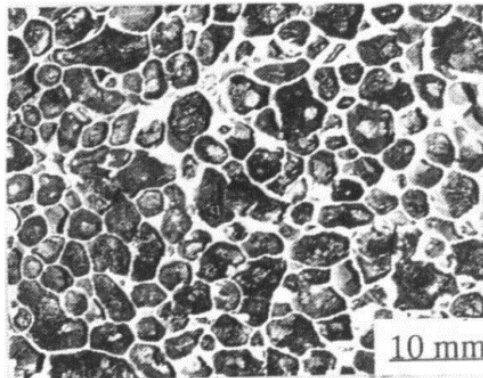
4.2 Výrobní metody slévárenskou cestou

Níže jsou popsány výrobní metody slévárenskou cestou pomocí práškový zpěňovadel, která jsou stěžejní pro tuto diplomovou práci.

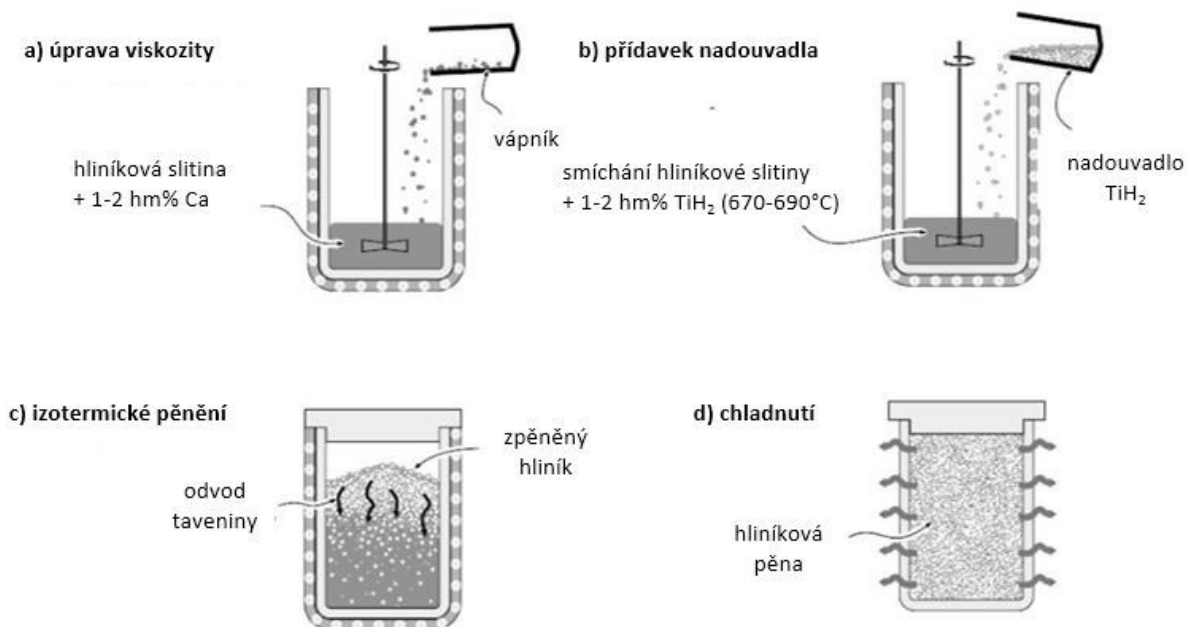
4.2.1 Alporas

Tuto metodu vynalezla Japonská firma Shinko Wires a funguje na principu přidání zpěňovadla uvolňujícího plyn do kovu. Napěnění je v tomto výrobním procesu dosaženo přidáním zpěňovacího činidla tzv. zpěňovadla do taveniny. Zpěňovací činidlo se za působení tepla rozkládá a vznikají plyny, které se ve formě bublin v tavenině zachycují a tím tvoří pěnu.

Ke stabilizaci se používá vápník a jako Zpěňovací činidlo se používá Hydrid titanu (TiH_2). Proces výroby následuje kroky vyobrazené na Obr. 23. Na Obr. 22 je zobrazena struktura hliníkové pěny vyrobené metodou Alporas. [3] [9]



Obr. 22 Vnitřní struktura metody Alporas [9]

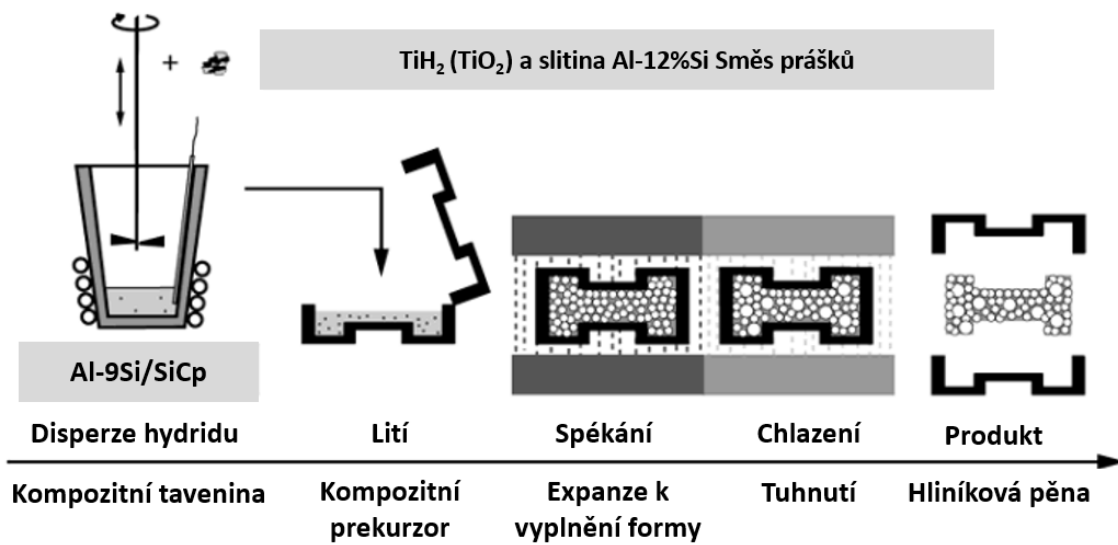


Obr. 23 Výrobní postup pro metodu Alporas [3]

4.2.1 Formgrip/ Foamcarp

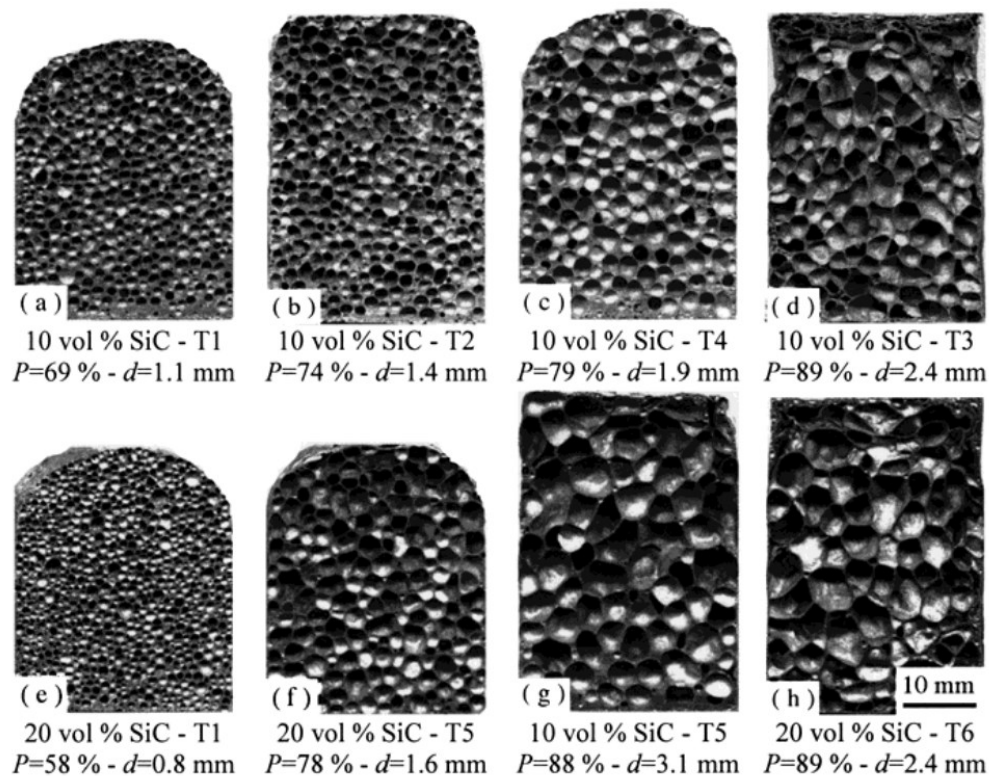
Jedná se o metodu výroby kovové pěny slévarenskou cestou na základě výroby prekurzoru. Postup spočívá v přípravě prekurzoru rozptýlením částic zpěňovacího činidla TiH_2 v roztaveném kompozitu na bázi hliníku a částic SiC_p zvaných Duralcan, který je následně solidifikován. Přetavením prekurzoru v matrici dochází vlivem tepelného rozkladu zpěňovadla k tvorbě pěny z taveniny. Schématický průběh procesu je vyobrazen na Obr. 24 Proces umožňuje snadnou kontrolu nad uvolňováním vodíku, drenážními procesy a strukturou pěny

pomocí manipulace s parametry, jako je předúprava pěnidla, tepelné děje a viskozita taveniny. Příklad vlivu viskozity úpravou velikosti SiC_p je ukázán na Obr. 25. [16]



Obr. 24 Výrobní proces metody Formgrip [16]

Metoda Foamcarp je v podstatě stejná viz Obr. 19, ale používá zpěňovací činidlo CaCO_3 místo TiH_2 . Tato změna byla provedena za účelem zlepšení ekonomiky procesu a zjemňujících procesů při použití CaCO_3 . [17]



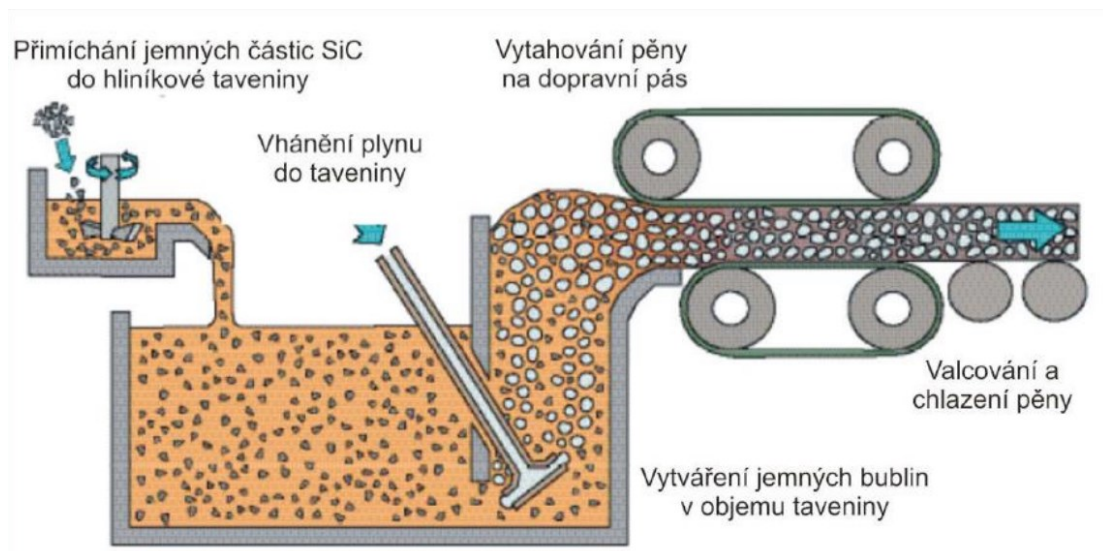
Obr. 25 Příklad pěny vzniklé pomocí metody Foamcarp ukazující závislost velikosti SiC částic v tavenině na výsledku pění [17]

4.2.2 Cymat/Hydro

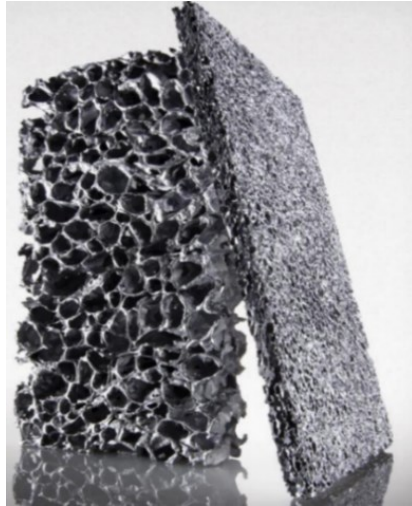
Tato metoda je využívána firmou Cymat v Kanadě a Hydro Aluminium v Norsku k výrobě pěn z hliníku a jeho slitin. Proces výroby touto metodou je následující:

1. Natavení kovové matrice
2. Přidání stabilizujících částic do taveniny (5-20 % SiC nebo Al_2O_3)
3. Injektáž plynu do taveniny oběžným kolem
4. Vytahování vzlínající pěny z povrchu taveniny

Tímto procesem je zpěnění dosaženo vpuštěním plynů (vzduchu, dusíku, argonu) speciálně navrženým oběžným kolem do stabilizované taveniny keramickými přísadami, který vhání a homogenně distribuuje bubliny. Na hladině taveniny vzniká pěna, která se poté různými dopravníky a podavači kontinuálně nebo nárazově vytahuje a tváří do požadovaných tvarů. Výsledná úprava tvaru musí být velmi jemná, aby nedošlo k poškození struktury, protože je relativně křehká díky přidaným tvrdým keramickým částicím. Takto vytažená pěna má uzavřené vnější stěny a pórovitost mezi 80 % a 97 %. Přidáváním tvrdých částic SiC nebo Al_2O_3 se zhoršuje obrobiteľnosť, a proto vznikají vyšší nároky na řezání pěn do požadovaných velikostí a tvarů. Také se otevírají uzavřené křehké póry vzniklé přidáním tvrdých křehkých částic. Tato metoda je ve větším měřítku nejlevnější metodou výroby hliníkových pěn. Příklad struktury vyrobené touto metodou je na Obr. 27 a proces výroby je nastíněn na Obr. 26. [18] [4]



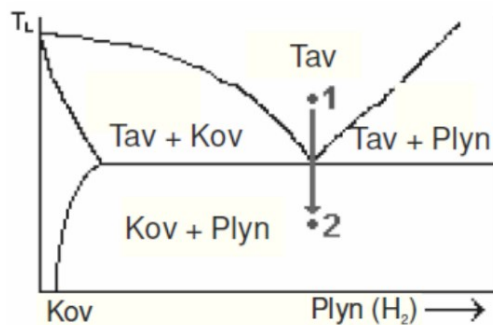
Obr. 26 Proces výroby metodou Cymat/Hydro [18]



Obr. 27 Příklad struktury metodou Hydro [19]

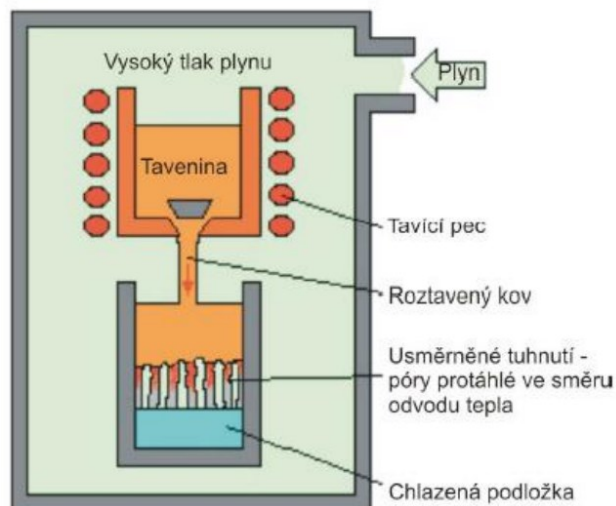
4.2.3 Gasar

Gasar v překladu z ruštiny znamená „vyztužený plynem“. Tato metoda je založena na faktu, že některé kovy tvoří eutektický systém s vodíkovými plyny. Na Obr. 28 je zobrazen eutektický diagram kov-plyn.



Obr. 28 dvoufázový eutektický diagram kov-plyn [18]

Rozpuštěním vodíku v kovu pod tlakem se připraví tavenina, která je zatím bez pórů s úplně rozpuštěným vodíkem. Poté se sníží teplota a tlak, tím je materiál donucen projít dvoufázovou oblastí. Pod teplotou v bodě eutektika dochází k vylučování fáze solidu a fáze plynu. S vhodně zvolenými rychlostmi tuhnutí a snižování tlaku dojde k zachycení plynu v materiálu a získáme naplynění. Na Obr. 29 je zobrazen výrobní proces metody Gasar. [18] [4]

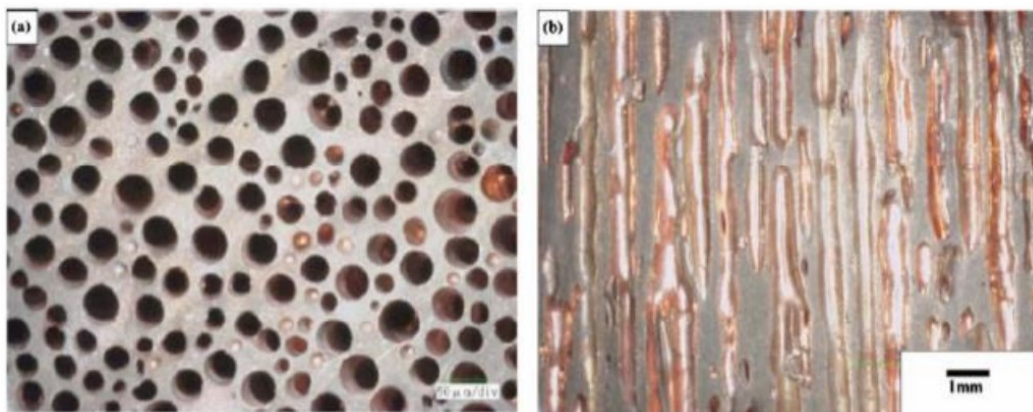


Obr. 29 Výrobní proces metody Gasar [18]

Výrobní proces je složen z těchto kroků:

1. Roztavení kovu v autoklávu
2. Rozpuštění vodíku v tavenině za zvýšeného tlaku
3. Lití přesycené taveniny do formy uvnitř autoklávu
4. Usměrněné tuhnutí taveniny za postupného snižování teploty a tlaku

Touto metodou lze získat díky usměrněnému tuhnutí usměrněně dlouhé póry s nízkou pórovitostí. Vhodné kovy pro Gasar jsou kovy se střední nebo vyšší teplotou tání, na které nemá vodík negativní efekt. Jedná se o Al, Cu, Ni, Mg, Ag, Au, Co, Cr atd. Na Obr. 30 je vidět podélný a příčný řez výrobku vyrobeného metodou Gasar k zobrazení dlouhých pórů. [18] [4]



Obr. 30 Struktura dosahovaná výrobní metodou Gasar [18]

5. Realizace a vyhodnocení experimentu

V této kapitole jsou popsány potřebné informace, na jejichž základě vyberu parametry k provedení experimentů. Na základě rešerše výrobních metod volím výrobní postup typu Alporas. Alporas využívá TiH_2 k zpěnění a Ca ke stabilizaci, avšak v posledních letech vznikají studie s využitím stejného výrobního postupu, ale s práškovým $CaCO_3$. Proto se hlouběji zaměřím na vlivy zpěňovadel a vyberu vhodnější způsob výroby. Výhodou výrobního postupu typu Alporas je její vhodnost k experimentálnímu výzkumu díky výrobě pěny v dávkách jednoduchých tvarů. Vlastnosti výsledné pěny jsou funkce výrobních parametrů, které se dají shrnout do dvou základních výrobních kroků.

1. Stabilizace taveniny
2. Zpěnění

Tyto kroky ovládají výslednou hliníkovou pěnu, která je charakterizována především makrostrukturou pórů mající přímý vliv na mechanické vlastnosti. Na tyto kroky má vliv velké množství proměnných a parametrů. K jejich správnému výběru je potřeba tyto parametry zvážit a prostudovat.

5.1 Průzkum vlivů hlavních faktorů

Relativní hustota ρ_{rel} je všeobecně uznávána jako klíčový faktor ovlivňující mechanické chování pěn. Je však důležité si uvědomit, že složení výchozí slitiny a podmínky zpracování, včetně použité metody a přítomnosti přídatných látek, významně přispívají k funkčním vlastnostem pěny. Proto je důležité tyto vlivy detailně prozkoumat a pochopit.

5.1.1 Vliv makrostruktury pórů

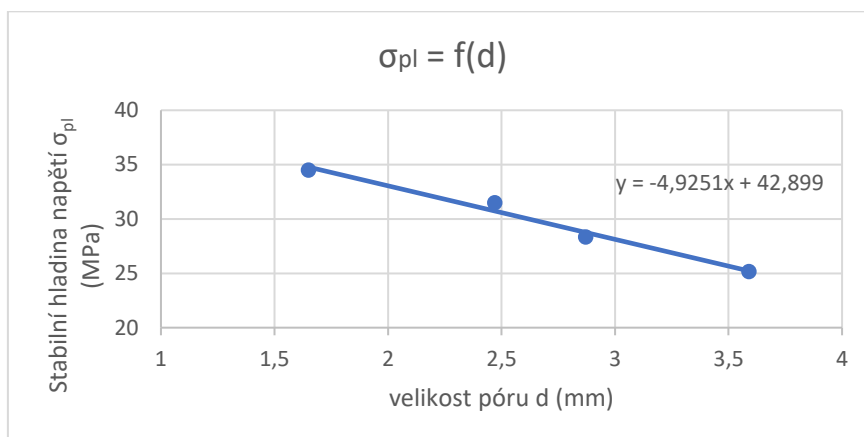
Vlastnosti hliníkových pěn jsou závislé jak na mikrostruktuře materiálu, tak na makrostruktuře pórů. Hlavními parametry makrostruktury jsou velikost, kruhovitost a defekty pórů a síla stěny. Ve studii [15] jsou tyto parametry zkoumány detailně. Bylo zjištěno, že se zvětšující se velikostí pórů klesá σ_{pl} (Obr. 31) a absorbovaná energie lineárně.

Kruhovitost se vyhodnocuje pomocí bezrozměrného faktoru kruhovitosti pomocí rovnice:

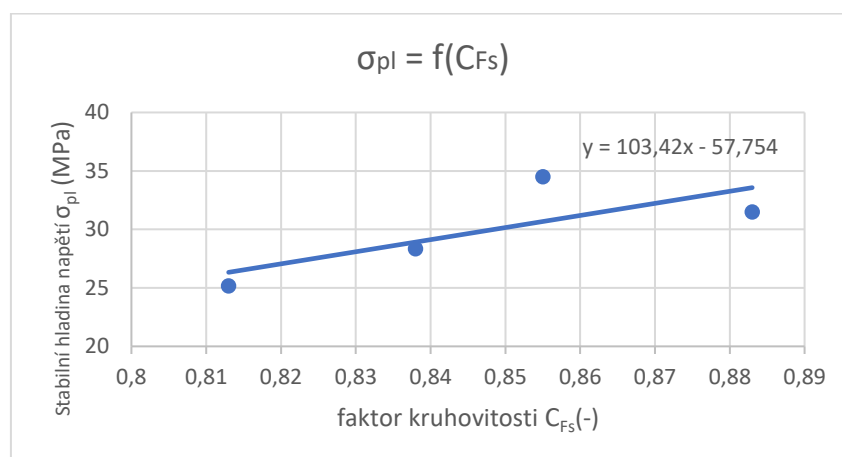
$$C_{FS} = \frac{1}{N_c} \cdot \sum \frac{4 \cdot \pi \cdot A_p}{P_p} [-] \quad 5.1$$

Kde N_c je počet pórů, A_p je plocha a P_p je obvod p-tého póru.

Obr. 32 ukazuje vliv faktoru kruhovitosti. Lze z něj vyčíst, že trend křivky σ_{pl} je rostoucí se zvyšující se kruhovitostí.



Obr. 31 Závislost vyrovnaného napětí na velikosti pórů [15]



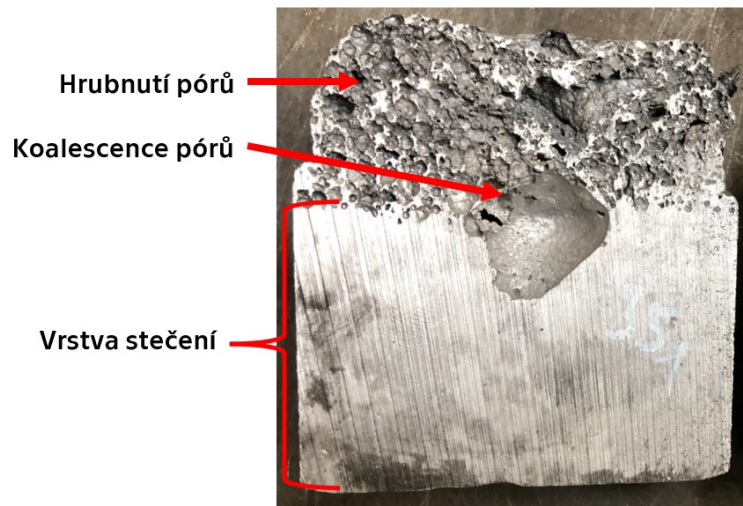
Obr. 32 Závislost vyrovnaného napětí na faktoru kruhovitosti [15]

Trochu kontra intuitivně klesá σ_{pl} s rostoucí silou stěn. To je zapříčiněno zvyšující se silou stěny s velikostí pórů. Vliv velikosti pórů převyšuje vliv zvyšující se síly stěny na σ_{pl} a proto závislost na síle stěny je ve výsledku klesající. Z těchto výsledků plyne, že je vhodnější mít větší počet malých pórů s co nejvyšší kruhovitostí.

5.1.2 Vliv stabilizace

Fyzikální podstata stabilizace je popsána v kapitole 4.1. Stabilizací slitiny pro výrobu hliníkové pěny se rozumí její úprava pro zachycení plynů a tou je především zvýšení její viskozity a/nebo snížení efektivního povrchového napětí. V nestabilizované tavenině se plyny nezachycují a unikají do okolí, dochází k stékání hliníkové slitiny stěnami což má za následek tvořící se spodní vrstvu solidní nenapěněné hliníkové slitiny a koalescence pórů (Obr. 33). Nestabilizovaná hliníková pěna nedosahuje dostatečné pórovitosti a získává vysokou

anizotropii ve směru zpěnění. Stabilizace lze dosáhnout různými způsoby mezi něž patří přivedení plynu do taveniny foukáním, přidání pevných částic nebo přidáním oxidujícího stabilizátoru. Při použití určitých zpěňovacích činidel například CaCO_3 dochází ke stabilizaci samovolně. [20], [12]



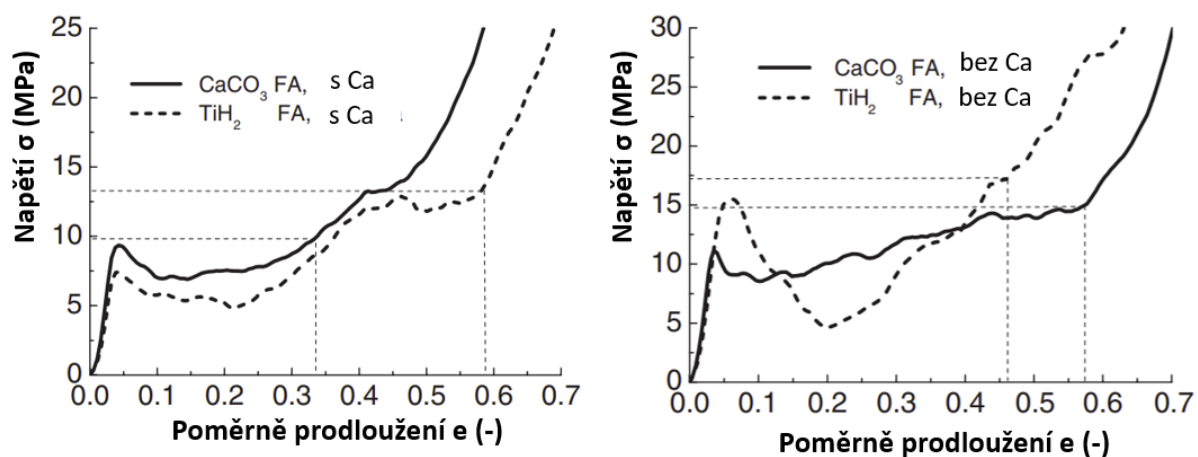
Obr. 33 Ukázka vlivu na experimentu

Při metodě stabilizace přivedením plynu do taveniny je plyn do roztaveného kovu přiváděn různými způsoby, jako jsou mechanické mixéry nebo přímé vstřikování plynu tryskou. Plyn reaguje s roztaveným kovem, což vede k tvorbě malých částic, včetně oxidů, spinelů a dalších. Kontrola nad velikostí, tvarem a objemovým podílem těchto částic za účelem vytvoření stabilní matrice vhodné pro účely pění je velmi náročná. [20]

V metodě stabilizace přidáním pevných částic do hliníkových slitin se používají pevné částice například SiC , Si_3N_4 , Al_2O_3 atd., jejichž disperzí v tavenině se dosahuje stabilizace. Problém s použitím pevných částic ke stabilizaci je náročné udržování konstantního poměru pevné fáze kvůli obtížné kontrole teploty. Kromě toho bylo zjištěno, že dosažení rovnoměrného smáčení a disperze jemného prášku, jako je SiC s velikostí zrn menší než 0,02 mm, vyžaduje velmi dlouhý proces míchání. [9]

Jako nejspolehlivější se ukázala metoda stabilizace pomocí pevných částic oxidujících prvků s vysokou afinitou ke kyslíku jako jsou Ca a Mg. Přidáním těchto prvků se proces oxidace na povrchu a uvnitř roztaveného kovu posílí, což vede k tvorbě oxidů (např. CaO , MgO , Al_2O_3 , CaAl_2O_4 atd.) v požadovaném objemu. Také dochází k tvorbě různých intermetalických fází. To umožňuje rychlé zahuštění taveniny hliníkové slitiny. [9]

Při výrobě hliníkových pěn slévárenskou cestou se stabilizace běžně provádí přidáním jemného prášku Ca (zvyšující viskozitu až pět krát). Tato metoda má však svá úskalí. Ca reaguje s taveninou hliníkové slitiny a tvoří cizí křehké intermetalické fáze podle chemického složení. Jedná se například o Al_4Ca , Al_2CaSi_2 , Al_2CaZn_2 nebo Al_2CaCu . Kromě toho vznik těchto fází doprovází ochuzení o legující prvky ze stěn pórů, což vede ke změně chemického složení od základního materiálu. To má za následek další snížení celkové pevnostní charakteristiky. Toto lze pozorovat například na křivkách tlakových zkoušek ze studie zdroje [12] (Obr. 34), kde při použití Ca dostává křivka sedlový tvar. [12] [21] [22]



Obr. 34 porovnání tlakové zkoušky pro ZAM s a bez přidání Ca jako stabilizátoru [22]

Při metodě pění pomocí CaCO_3 se tvoří vrstvy pevných oxidů na povrchu buněk. Tento fakt hraje zásadní roli při vytváření jemné struktury v pěnách vyrobených přidáním CaCO_3 . Tyto oxidové vrstvy účinně brání zhrubnutí a koalescenci buněk. V tomto ohledu se očekává, že přidavek Ca jako oxidačního stabilizátoru v kombinaci s CaCO_3 bude mít malý význam, protože jeho příznivý účinek na viskozitu taveniny bude pravděpodobně zanedbatelný. Další stabilizační mechanismy jsou popsány v 5.1.3.2. [21]

5.1.3 Vliv zpěňovacího činidla

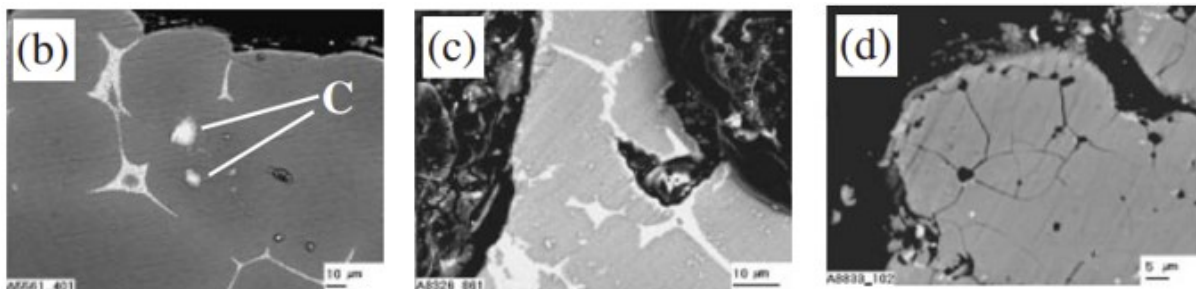
Role zpěňovacího činidla ve formě prášku v metodě Alporas je zajistit svým rozkladem tvorbu plynů ve formě bublin v tavenině, které se viskozitou taveniny s jejím následným ochlazením uchytí a vznikne pěna. Materiál zpěňovacího činidla musí mít schopnost produkovat požadované množství bublin plynu o požadované velikosti. Také musí mít vhodnou teplotu rozkladu pro daný materiál. Pro hliníkové slitiny se vhodná teplota rozkladu pohybuje mezi $350\text{ }^\circ\text{C}$ a $850\text{ }^\circ\text{C}$. Velmi důležitý faktor hraje vliv zpěňovacího činidla na složení a mikrostrukturu základního materiálu z důvodu tvorby křehkých intermetalických fází.

Materiál, množství a vlastnosti zpěňovacího činidla (granulometrie, čistota) s výrobními parametry, mají přímý vliv na konečné vlastnosti pěny. [20]

Existuje celá řada zpěňovacích činidel, avšak pro hliníkové pěny se používají nejčastěji Hydridy a Uhličitany. Z hydridů je hlavní Hydrid Titanu (TiH_2) původně použitý při vynálezu této metody a široce využívaný dodnes. Mezi používané hydridy patří dále ZrH_2 a MgH_2 . Další nepoužívanější skupinou jsou Uhličitany, z nichž nejdůležitější je Uhličitan Vápenatý ($CaCO_3$), který nabízí ekonomičtější a bezpečnější alternativu a odlišnou strukturu pórů s charakteristickými vlastnostmi. Alternativou je například Dolomit, avšak není příliš používán. Potenciální použití $CaCO_3$ je pod rozsáhlým výzkumem. Vzhledem k rozsáhlosti použití, vhodnosti a dostupnosti se budu zabývat pouze Hydridem titanu a Uhličitanem Vápenatým. [20] [14]

5.1.3.1 Hydrid Titanu (TiH_2)

Teplota rozkladu Hydridu titanu je přibližně $430\text{ }^\circ\text{C}$. Při ohřevu nad teplotu rozkladu se začne uvolňovat velké množství vodíku. Rozkládá se reakcí [13]:



Obr. 35 SEM stěny póru hliníkové pěny vyrobené TiH_2 [22]

Používá se převážně v kombinaci s Ca jako stabilizátoru. Stěny buněk pěn vyrobených s TiH_2 jsou pokryty tenkou vrstvou krystalů oxidu Al_2O_3 , v které jsou roztroušeny oxidické krystaly $CaAl_4O_7$ a Al_3Ti .

Při použití TiH_2 jako zpěňovacího činidla a slitiny hliníku byl zjištěn vznik křehkých intermetalických fází převážně Al_3Ti , které zhoršují pevnost v tlaku. Například v hliníkové pění ze základního materiálu s chemickým složením Al-5.5Zn-3Mg-0.6Cu-0.5Mn podobné EN AW 7075 (dále jako ZAM) se rozpuštěný titan převážně hromadí v doménách redundantní fáze $T(AlCuMgZn)$, což má za následek vznik intermetalické sloučeniny Al_3Ti (C) (Obr. 35). Výrazná segregace v materiálu stěny je způsobena nerovnoměrným rozložením rozpuštěného titanu v těchto doménách (Obr. 35 b). Předpokládá se, že přítomnost křehké sloučeniny Al_3Ti

v redundantní fázi negativně ovlivňuje tažnost a houževnatost stěny póru. Jemná síť trhlin se šíří podél redundantní fáze v materiálu buněčné stěny pěn TiH_2 odvozených ze slitiny ZAM před jakýmkoli zatížením, jak je znázorněno na Obr. 35 c) a d). Kromě toho jsou v materiálu buněčné stěny slitiny ZAM přítomny náhodně rozptýlené částice obohacené o titan a potažené vrstvou Al_3Ti , zejména v případech, kdy byl použit proces zpěňování bez přidání Ca (Obr. 35). Vznik těchto částic lze přičíst neúplnému rozkladu pěnidla TiH_2 . Tento výsledek je předpokládán vzhledem k faktu, že konečná teplota potřebná k tepelnému rozkladu TiH_2 je nadměrně vysoká. [22]

křehké intermetalické a eutektické fáze byly zjištěny ve většině hliníkových slitin vyrobených pomocí TiH_2 mající negativní efekt v různém měřítku. Nejlépe je lze pozorovat na velmi oscilující tlakové zkoušce, kde jednotlivé vrcholky lze vysvětlit jako rychlé vysoce nehomogenní deformace a následný náhlý kolaps, což naznačuje zborcení stěn křehkým lomem. To lze pozorovat na výsledcích tlakových zkoušek na Obr. 34. (Křivka znázorněná čárkovanou čarou označuje průběh pěny vyrobené pomocí TiH_2). Níže je vypsána tabulka (Tab. 7) s různým složením základního materiálu v kombinaci s použitými % TiH_2 jako zpěňovacím činidly a % Ca jako stabilizátory při procesu výroby se zjištěným složením stěn a nežádoucích produktů. [12]

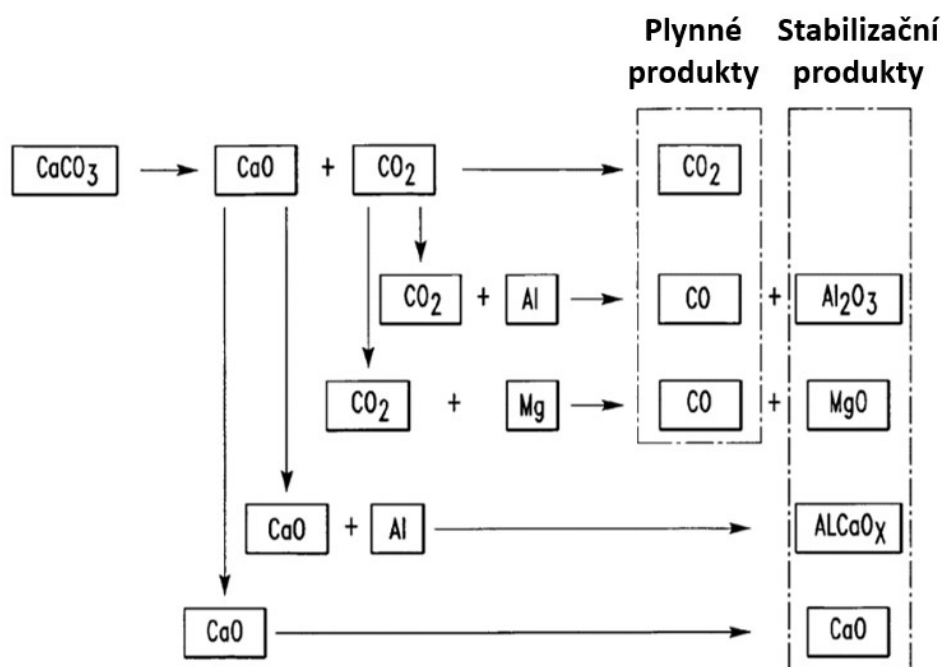
Tab. 7 Přehled výrobních materiálů, mikrostruktury a kontaminujících produktů při použití TiH_2 a Ca [12]

Základní materiál s výrobními aditivami (%)	Mikrostruktura materiálu stěn	Kontaminující vedlejší produkty
Al + 1TiH ₂ + 1Ca	α -Al+E (Al+Al ₃ Ti+Al ₄ Ca)	Částice: TiH ₂ / Al ₃ Ti/ TiAl ₂
Al-7Si + 1.5TiH ₂ + 1Ca	α -Al (Ti) + E(Al-Si)	Částice: TiH ₂ / Al ₃ Ti, Al ₃ Ti (Si), Al ₂ CaSi ₂
Al-1Mg-0.6Si + 1.5TiH ₂ + 1Ca	E (Al+Mg ₂ Si + S(Al ₂ CuMg) +CuAl ₂) + E (α -Al + Al ₄ Ca + Al ₂ CaSi ₂ + Al ₄ CaCu + Al ₃ Ti)	Částice: TiH ₂ / Al ₃ Ti, Al ₃ Ti
Al-5.5Zn-3.0Mg (Sc,Zr) + 1.5TiH ₂ + 1Ca	α -Al (Ti) + T(AlCuMgZnCaTi)	Částice: TiH ₂ / Al ₃ Ti, Al ₃ (ScZr)
Al-6Zn-2.3Mg + 1.5TiH ₂ + 1Ca	α -Al (Ti) + T(AlCuMgZnCaTi) / M(AlCuMgZnCaTi) / S(CuMgAl ₂ CaTi)	Částice: TiH ₂ / Al ₃ Ti

5.1.3.2 Uhličitan Vápenatý (CaCO_3)

CaCO_3 je nejvhodnější uhličitan díky teplotě vhodné k rozkladu v rozmezí od přibližně 550 do 850 °C a podobné hustotě hliníku 2710 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$. [20] [13]

Uhličitan vápenatý vykazuje mimořádnou účinnost jako zpěňovací činidlo. Při tomto procesu dochází k rozkladu uhličitanu vápenatého v roztaveném kovu za vzniku pevných částic CaO a reaktivního plynu CO . Při silném míchání se bubliny plynu vytvořené v roztaveném kovu trhají a rozbíjejí, čímž se tavenina vystavuje většímu povrchu reaktivního plynu. To vede k prudké reakci mezi plynem a roztaveným hliníkem, při níž vzniká Oxid uhelnatý (CO) a na místě vytvořené Al-O . Fáze oxidů kovů, včetně Al_2O_3 , CaO , MgO a dalších sloučenin, působí jako stabilizátory pěny tekutého kovu tím, že mění viskozitu a povrchovou energii roztaveného kovu se schématickým vyobrazením na Obr. 36. [20]

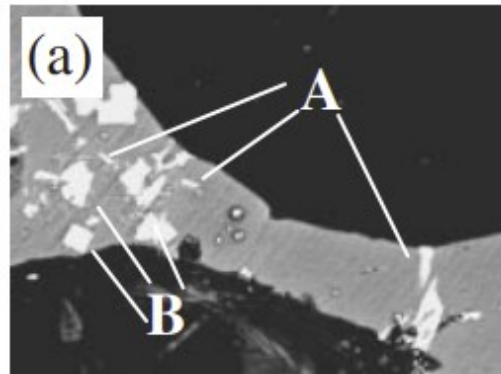


Obr. 36 Schéma rozkladu CaCO_3 v tavenině [20]

Jak bylo řečeno v kapitole 5.1.1 tvoří se vrstvy pevných oxidů na povrchu buněk. Tento fakt hraje zásadní roli při vytváření jemné struktury v pěnách vyrobených přidáním CaCO_3 . Tyto oxidové vrstvy účinně brání zhrubnutí a koalescenci buněk. Díky tomu v porovnání s pěnami z TiH_2 mívají pěny až 2x menší velikost pórů.

CaCO_3 pěny minimalizují zpevňovací/odpevňovací účinky způsobené poškozením buněčných stěn. Použití CaCO_3 při zpracování hliníkové pěny vede k jemnější buněčné struktuře, což následně vede ke zvýšení elastické tuhosti pěny. Kromě toho hliníková pěna

vyrobená s CaCO_3 vykazuje ve srovnání s pěnou TiH_2 plastičtější chování v tlaku. To lze pozorovat na tlakových zkouškách na Obr. 34, kde pěny vyrobené pomocí CaCO_3 vykazují hladší průběhy křivek oproti TiH_2



Obr. 37 Mikrostruktura hliníkové pěny ze základní ZAM materiálu zpěněné pomocí CaCO_3 [22]

Na Obr. 37 lze pozorovat mikrostrukturu hliníkové pěny zpěněné pomocí CaCO_3 složené z eutektických fází (A) a náhodně rozmístěných sekundárních fází (B). [20] [22]

Optimálně se průměrná velikost částic CaCO_3 může pohybovat od 0,5 do 40 μm . Alternativně lze použít prášek s průměrnou velikostí až 150 μm , ale reakční doba pění se značně prodlužuje s nekompletní dekompozicí i po 10 minutách míchání. [20]

CaCO_3 lze použít při výrobě hliníkových pěn přidáním v jednom kroku, kde se smíchá určité množství CaCO_3 s taveninou za prvních reakcí s menšími částicemi CaCO_3 ke stabilizaci a po určitém čase se využijí větší částice k napěnění při stálém míchání. Anebo přidáním ve dvou krocích, kde se nejdříve přidá menší množství CaCO_3 (ideálně 0,5 až 2 %) s delší dobou míchání a posléze se přidá další množství CaCO_3 k napěnění po krátkou dobu míchání. [20]

Níže je vypsána tabulka (Tab. 8) s různým složením základního materiálu v kombinaci s použitými % CaCO_3 jako zpěňovacím činidly a při procesu výroby se zjištěným složením stěn a nežádoucích produktů. [12]

Tab. 8 Přehled výrobních materiálů, mikrostruktury a kontaminujících produktů při použití CaCO_3 [12]

Základní materiál s výrobními aditivami (%)	Mikrostruktura materiálu stěn	Kontaminující vedlejší produkty
Al + 2CaCO ₃ + 1Ca	α -Al + E (Al+Al ₄ Ca)	Jemné částice CaO
Al-7Si + 2CaCO ₃	α -Al + E (Al-Si)	Jemné částice CaO
Al-1Mg-0.6Si + 2CaCO ₃	α -Al + E (α -Al + CuAl ₂), α -Al + E (α -Al + S(Al ₂ CuMg)), α -Al + E (α -Al + Mg ₂ Si)	Jemné částice CaO
Al-5.5Zn-3.0Mg (Sc,Zr) + 2CaCO ₃	α -Al + T(AlCuMgZn)	Částice Al ₃ (Sc, Zr) Jemné částice CaO
Al-6Zn-2.3Mg + 2CaCO ₃	α -Al + T(AlCuMgZn)/ M(AlCuMgZn)/ S(CuMgAl ₂)	Jemné částice CaO

5.1.3.3 Smáčivost

Smáčivost částic má významný vliv na jejich chování v tekutinách. Je známo, že pevné částice se špatnou smáčivostí mají tendenci koagulovat, když jsou umístěny v kapalném prostředí. Naproti tomu částice s dobrou smáčivostí se v kapalině rozptýlí rovnoměrněji, čímž se zabrání tvorbě velkých shluků. Pokud pevné částice slouží jako zdroj plynu, vede přítomnost špatné smáčivosti k menšímu počtu nukleačních center pro tvorbu bublin ve srovnání s částicemi s dobrou smáčivostí. V důsledku toho je v druhém případě větší část kapaliny obsazena bublinami. Částice s dobrou smáčivostí jsou navíc účinnější při uvolňování plynu ve srovnání s částicemi se špatnou smáčivostí. [23]

Ke zlepšení smáčení se používají techniky povrchového povlakování. Tyto techniky zajišťují homogenní rozložení práškového činidla, což přispívá k celkové kvalitě a výkonnosti konečného výrobku. Míra smáčivosti se obvykle hodnotí jako hodnota kontaktního úhlu (θ), který se vytvoří mezi kapalinou a povrchem pevné látky v daném prostředí. Bylo zjištěno, že povlakování CaCO_3 pomocí CaF_2 vede ke snížení kontaktního úhlu o 15° ve srovnání s nepotaženým uhličitanem vápenatým. Povlakování zpěňovacího činidla CaCO_3 vedlo ve studii zdroje [23] k tvorbě jemnější a homogennější struktury pórů v hliníkových pěnách, což naznačuje zlepšení rozprostření práškového činidla v tavenině vedoucí ke zlepšení kvality hliníkové pěny. Na druhou stranu je tento přístup zdoluhavý a cenově náročný z důvodů výroby, která se skládá z cca 40 minut namáčení prášku v roztoku NaF za stálého míchání s následující filtrací částic a sušením. [23]

5.2 Návrh experimentu hledání funkčního výrobního postupu

Pro výrobu hliníkových pěn slévárenskou cestou pomocí práškových zpěňovadel je nutné si nejdříve stanovit průběh celého procesu provádění experimentů. To obsahuje výběr základního materiálu, zpěňovacího činidla, metodu stabilizace, způsob ohřevu, formu pro zpěnění, způsob míchání, tvar míchadla, času míchání, času pění, způsob ochlazení atd.

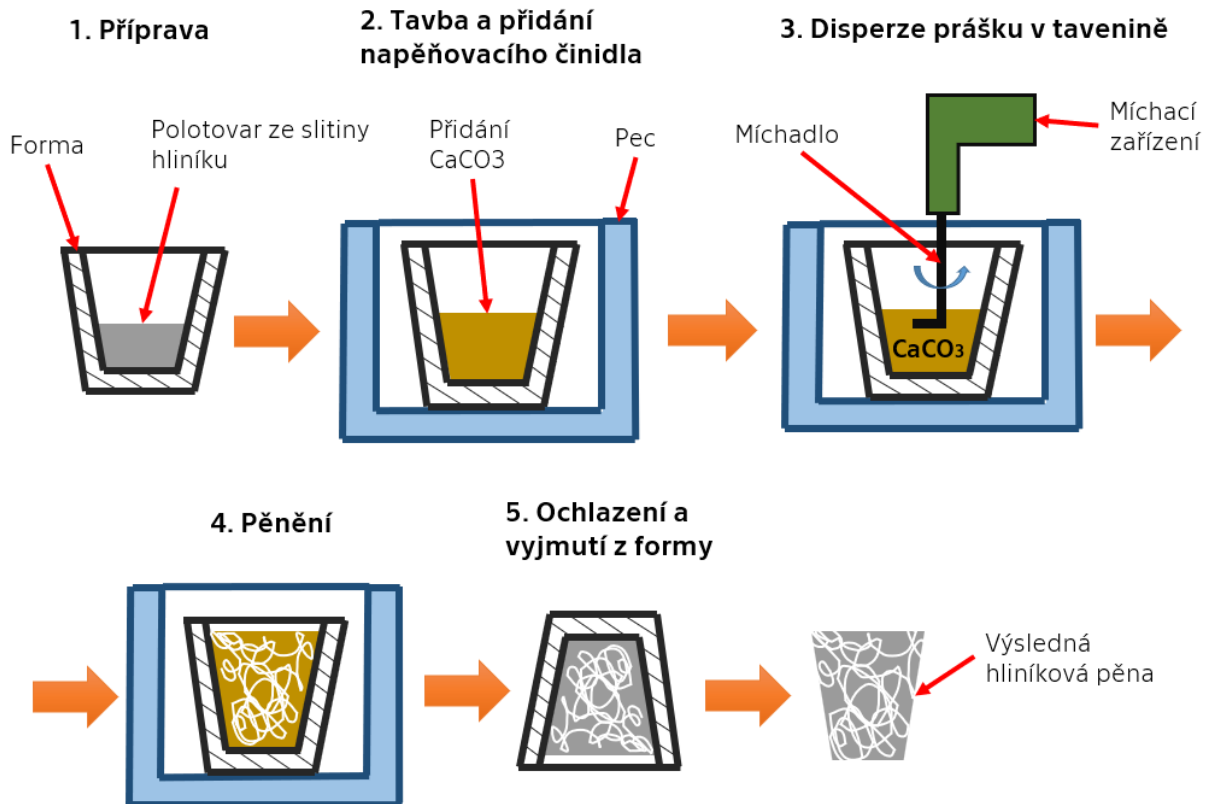
5.2.1 Volba výrobního procesu

Výrobní proces volím podobný metodě Alporas popsany v kapitole 4.2.1. Výrobní proces této metody se obecně skládá z roztavení slitiny hliníku ve formě, stabilizace taveniny, přidání zpěňovadla a mícháním ve formě k disperzi prášku a získání pěny.

V první řadě je potřeba vybrat zpěňovací činidlo. Kritéria výběru zpěňovacího činidla závisí na několika důležitých faktorech, mezi které patří:

1. Složení a teplota rozkladu: Rozklad zpěňovacího činidla by měl probíhat v teplotním rozmezí základního materiálu. Pokud se uvolní dříve, než se základní kov rozloží, může nepříznivě ovlivnit strukturu pěny. Na druhou stranu, pokud se nadouvadlo rozkládá příliš pozdě, může dojít k rapidnímu uvolnění plynu, což komplikuje kontrolu nad výrobním procesem.
2. Kompatibilita zpěňovacího činidla: Zvolené zpěňovací činidlo by nemělo při reakci se základním kovem vytvářet křehké intermetalické fáze. To je důležité pro zachování požadovaných mechanických vlastností pěny. [14]

V kapitole 5.1.3 byly probrány jednotlivé možnosti. Výběr je mezi Hydridem Titanu (TiH_2) a Uhličitánem Vápenatým (CaCO_3). Na základě výše zvolených bodů k výběru volím zpěňovací činidlo CaCO_3 . Z důvodů lepší dosahované struktury a vyšších pevnostních vlastností kvůli menšímu obsahu křehkých intermetalických fází než zpěňování TiH_2 a teplotou rozkladu blíže teplotě tání základního materiálu díky čemuž nedochází k předběžnému uvolňování plynu. Dle [20] lze provést stabilizaci a zpěnění v jednom kroku přidání CaCO_3 . Rozhodl jsem se tento přístup využít z důvodu snížení počtu proměnných a tím zjednodušení celého procesu. Volím tedy modifikovanou metodu Alporas do jednoho kroku změnou zpěňovacího činidla. Obecný postup navrhovaného výrobního procesu je schématicky znázorněn na Obr. 38.



Obr. 38 Schématický postup výroby

Prášek CaCO_3 použijte kupovaný z internetového obchodu, srážený pro analýzy.

Obsahuje:

1. Minimálně 99 % uhličitanu vápenatého
2. Maximálně 0,02 % chloridů
3. Maximálně 0,05 % síranů
4. Maximálně 0,001% olova
5. Maximálně 0,001 % železa [24]



Obr. 39 Nádoba 1 kg uhličitanu vápenatého použitého k výrobě [24]

Pro snadné provádění experimentů je potřeba si vyrobit vhodnou formu, ve které bude hliníková slitina tavena, míchána a potenciálně uzavřena. Vhodné prvky, které je potřeba při konstrukci zohlednit jsou:

1. Snadné vyjmutí formy z pece
2. Bezpečné vyjmutí hliníkové pěny z formy
3. Zajištění opakovatelnosti použití
4. Vnější rozměry takové, aby byla zajištěna pohodlná manipulace v peci

Za tímto účelem jsem navrhnul formu z litiny EN GJL 150, kterou budu dále nazývat „kokila“ vyrobenou odléváním do pískové formy s následným soustružením vnitřní dutiny. Kokila je válcového tvaru s vnitřní válcovou dutinou takových rozměrů umožňujících manipulaci míchací metly s průměrem 60 mm. Kokila je opatřena 5° zkosením na vnitřní dutině kvůli bezproblémovému vyjmutí hliníkové pěny a na vnějším povrchu k usnadnění výroby v pískové formě. Objem vnitřní dutiny kokily je 0,76 litru. Kokila je opatřena tloušťkou stěny 10 mm k dosažení dostatečné pevnosti při vyklepávání a dostatečné hmotnosti, aby při míchání nedocházelo k pohybu kokily v peci. Kokila je osazena lemem, jehož horní plocha je sražena frézováním ke zvýšení styčné plochy, aby se snížila možnost vytečení taveniny hliníkové slitiny mimo kokilu. Dutina kokily je navíc vybarvena Model kokily je zobrazen na obrázku Obr. 40. Výkres v příloze 1.

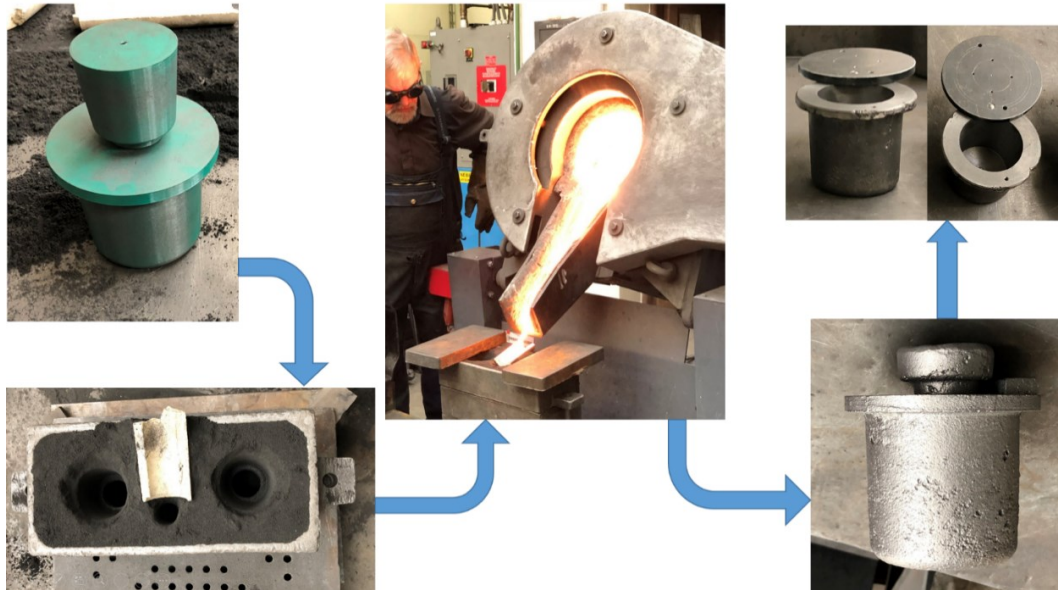
Kokilu lze uzavřít víkem z ocelového plechu tloušťky 10 mm. Otáčí se okolo ocelového kolíku, jehož osa je umístěna ve stěně kokily. Víko lze pojistit v uzavřené poloze ocelovými páčkami se závitem M5. Víko je vyřezáno z plechu plazmou a díry se závity pro šrouby a díry na odfuk jsou dovrtnuty (výkres v příloze 2). Také jedna plocha je sražena pro lepší dosednutí ploch s kokilou. Již vyrobené kokily s víky jsou zobrazeny na Obr. 41 s ukázkovým výrobním procesem na Obr. 42.



Obr. 40 3D model kokily s víkem



Obr. 41 Foto výsledných vyrobených kokil



Obr. 42 Proces výroby litinových kokil

Jako materiál polotovaru na výrobu hliníkových pěn použiji vsázku ze slitiny hliníku, která je zrovna na slévárně k dispozici. Pomocí ručního spektrometru a analyzátoru kovů Delta Professional od BAS Rudice s.r.o. jsem analyzoval vsázku a jedná se o slévárenský silumin AISi5 se zvýšeným obsahem Mn. Přesné složení viz Obr. 43, který dle zdroje [12] je vhodný k výrobě hliníkových pěn touto metodou.

El	%	+/-	Spec (AISi5)
Mg	0.93	0.23	[0.20-0.85]
Al	89.44	0.22	[70.00-95.00]
Si	6.23	0.06	[4.00-6.00]
Ti	0.09	0.02	[0.00-0.15]
Cr	0.024	0.006	Stopa[0.03]

Obr. 43 Výsledek analýzy slitiny hliníku

Tuto vsázku použijí k odlití polotovaru ve tvaru dutiny kokily a následnému nařezání na požadovaný objem. Odlitky z hliníkové slitiny mají v průměru 0,96 kg. Objem slitiny ke zpěnění volím 30 % objemu dutiny kokily, aby měla dostatek prostoru k napěnění. To odpovídá zhruba 300 g polotovaru.



Obr. 44 Navážené a nařezané polotovary

5.2.1 Použité stroje a přístroje

V této kapitole je výčet použitých strojů a přístrojů použitých při experimentech.

1. Míchací zařízení Powerplus POWC6021 s výkonem 1050 W a proměnou rychlostí otáček 0-900 ot.min⁻¹. Maximální průměr metly činí 100 mm a vnitřní závit ve vřetenu je M14. [25]



Obr. 45 Míchací zařízení s proměnnými otáčkami [25]

2. Vrtačka Bosch PSB 400 s tříčelistovým sklíčidlem a dvoustupňovou převodovkou. 1. stupeň má rychlost otáčení 2200 ot.min⁻¹ a 2. stupeň 2800 ot.min⁻¹ bez zatížení.



Obr. 46 Vrtačka se sklíčidlem Bosch PSB 400 ze slévárenské dílny

3. Přesná váha Kern 440-49A s kompaktními rozměry, výhodné při stísněných prostorových podmínkách. Přípustný rozsah teploty prostředí 5 °C až 35 °C. Detailní parametry viz Obr. 48. [26]



Obr. 47 Váha Kern 440-49A [26]

KERN 440-49A	
Rozlišení d	0,1 g
Rozsah vážení Max	6000 g
Min. hmot. jed. ks	2 g
Vážicí miska (Ø/ŠxD)	[D] 150x170 mm
Reprodukovatelnost	0,1 g
Linearita	± 0,3 g

Obr. 48 Parametry přesné váhy Kern 440-49A [26]

4. Indukční pec firmy Inductotherm se zdrojem VIP Power-trak o výkonu 75kW



Obr. 49 Idukční pec Inductotherm



Obr. 50 Zdroj a řídící jednotka k indukční peci Inductotherm

5. Pásová pila Bomar ProfiCut 275.230 DG. „Toto je univerzální pásová pila s robustním ramenem a pilovým pásem o výšce 27 mm. Přesné vedení pilového pásu a synchronně běžící kartáč na odstraňování třísek, jsou dobrým předpokladem pro efektivní výkon stroje a dlouhou životnost pilového pásu. Přítlak do řezu je zajištěn vlastní hmotnostní ramene.“
[27]



Obr. 51 Pásová pila Bomar Proficut 275.230 DG

Pracovní režim:	manuální
Typ stroje:	horizontální pásová pila
Typ řezu:	Úhlové řezy
Rozsah úhlových řezů:	0 ° - 60 °
Pohon:	0,7 / 1,1 kW, 3 x 400 V/ 50 Hz
Rychlost pilového pásu:	35 - 70 m/min.
Rozměry pilového pásu:	2 720 x 27 x 0,9 mm
Ložná výška materiálu:	760 mm
Délka nejkratšího zbytku:	40 mm
Nejmenší řezaný průměr	Ø 5 mm

Obr. 52 Specifikace pásové pily Bomar Proficut 275.230 DG [21]

6. Laboratorní pila Struers Labotom-3. „Labotom je snadno použitelný a výkonný stolní řezací stroj, který zvládne širokou škálu tvarů, velikostí a materiálů. Je robustní a spolehlivý, zajišťuje maximální dobu provozuschopnosti a k rychlému a efektivnímu dělení obrobků jej může používat jakákoli obsluha s minimálním zaškolením. Pevné chladicí trysky zlepšují kvalitu řezání a snižují riziko chyby obsluhy.“ [28]

Parametry:

- Řezná kapacita: 62 x 250 mm
- Ruční stroj s jednoduchým ovládacím panelem se 3 tlačítky
- Velikost řezného kola o průměru 250 mm nebo 350 mm
- Velký řezací stůl

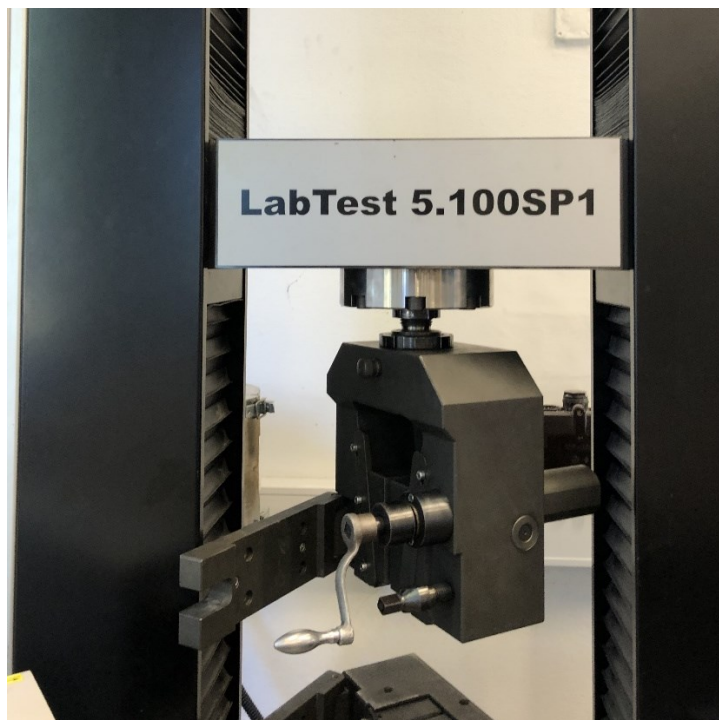
- Řezací rukojeť s hladkým pohybem pro řízené dělení
- Integrovaná mycí pistole

[28]



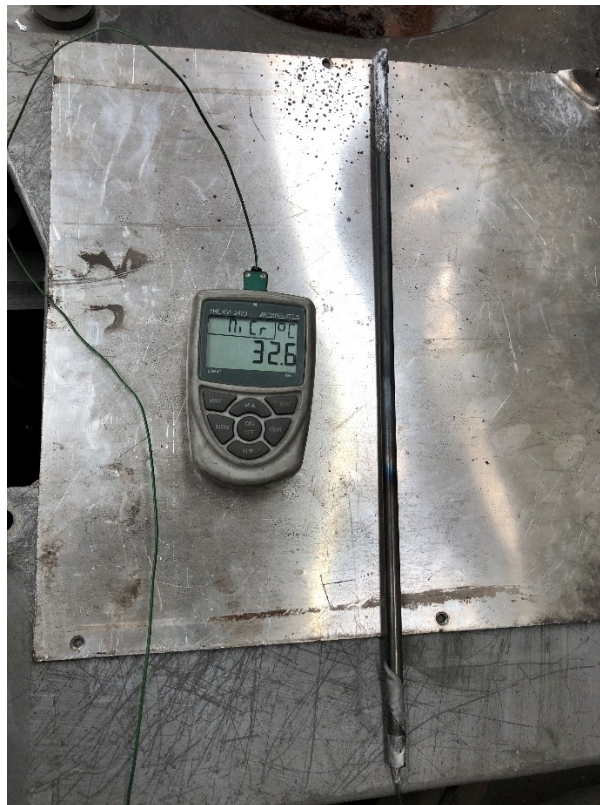
Obr. 53 Laboratorní pila Struers Labotom-3

7. Statické zkušební zařízení Labotech LabTest 5.100 SP1 se software TEST&MOTION+. [29]



Obr. 54 Zkušební zařízení LabTest 5.100 SP1

8. Termočlánek Ni-CrNi používaný ve fakultní slévárně FS ČVUT.



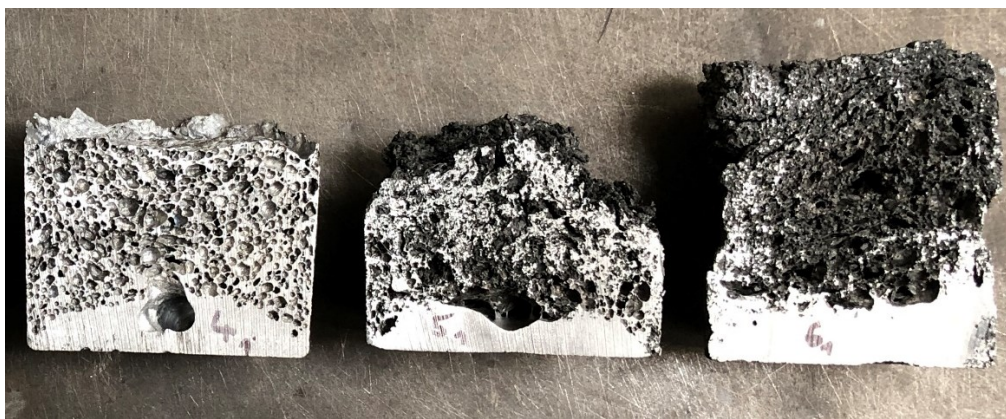
Obr. 55 Termočlánek Ni-CrNi

5.2.2 Funkčnost výrobního procesu

Byly provedeny průzkumné testy ke zjištění funkčnosti výrobního procesu ve školní dílně. V 1. sérii pokusů bylo vyrobeno 6 pěn (Číslováno 1-6) viz Obr. 56 a Obr. 57.

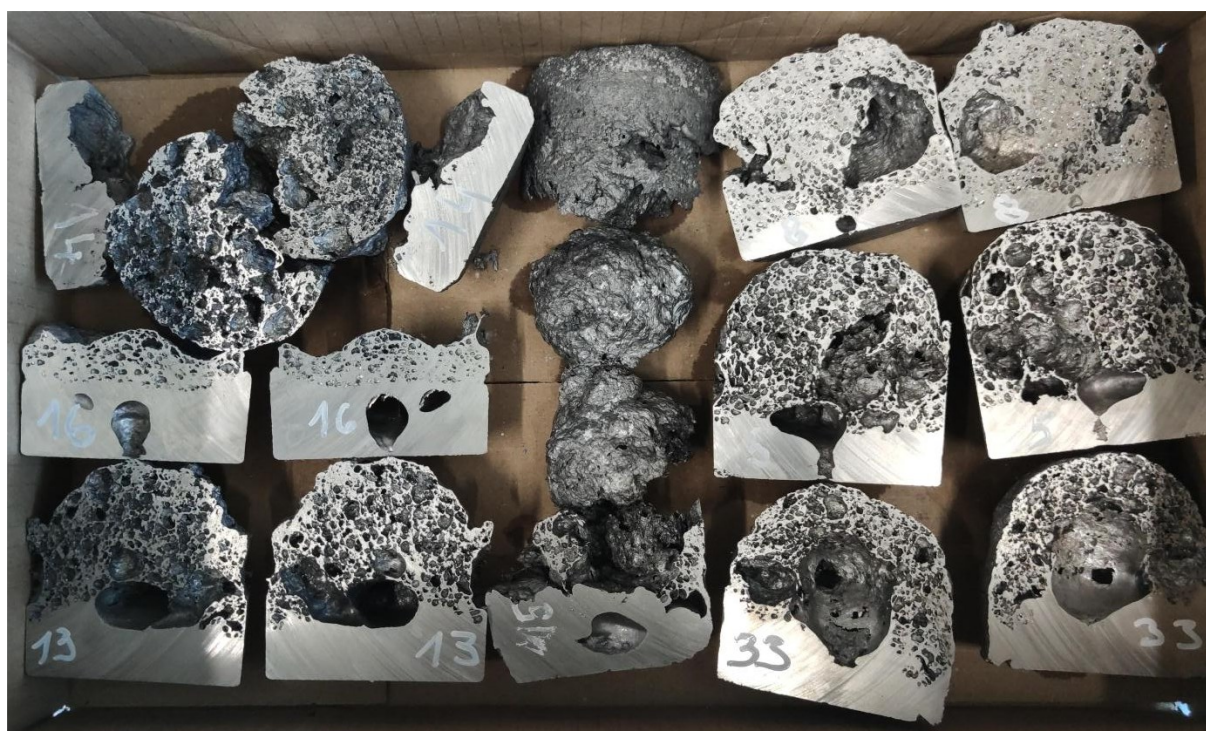


Obr. 56 1. série experimentů ve školní dílně – 1. část



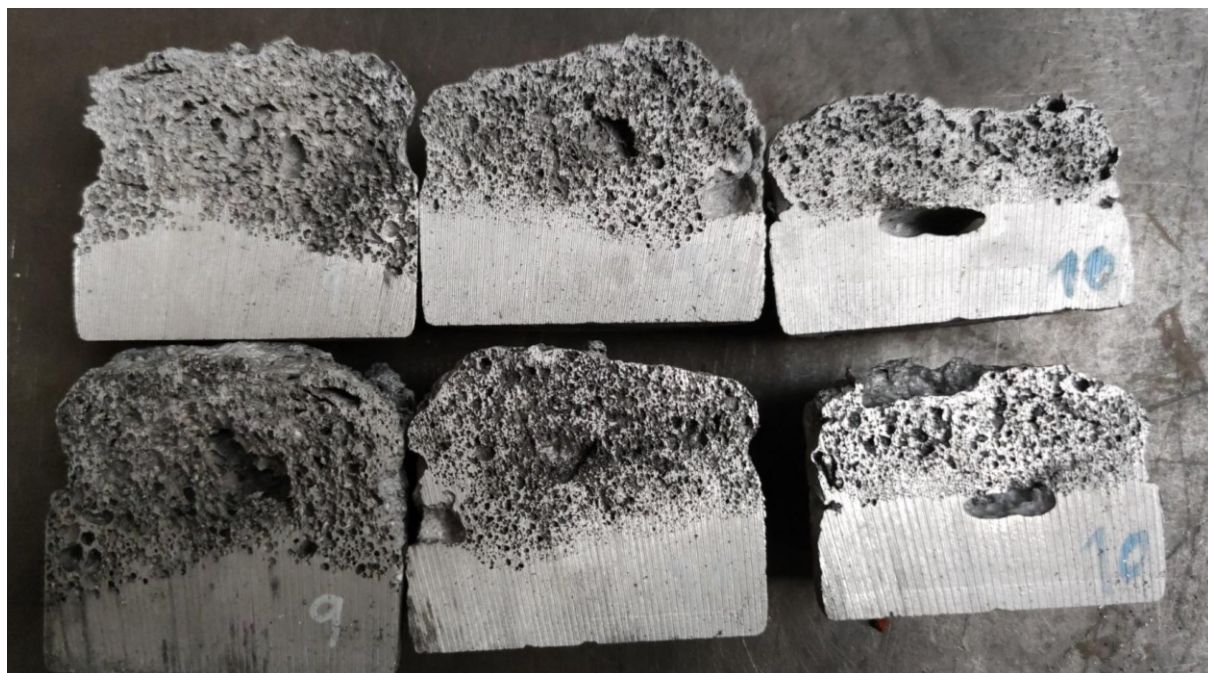
Obr. 57 1. série experimentů ve školní dílně – 2. část

Pokus číslo 4 vypadal velmi slibně, proto byl následně proveden pokus o DOE dle kapitoly 5.4, avšak hliníkové pěny nevypadaly jako při 1. sérii experimentů a vykazovali značné množství defektů. Pokus číslo 4 se nepodařilo zopakovat. To dokázalo špatnou opakovatelnost a nepředvídatelnost procesu. Z tohoto důvodu bylo DOE přerušeno. Dále bylo nutné pokračovat v optimalizaci výrobního procesu ke zlepšení těchto aspektů. Číslování původních experimentů bylo pro DOE přerušeno. Výsledky hliníkových pěn při 1. pokusu o DOE viz Obr. 58.



Obr. 58 1. pokus DOE s neoptimalizovaným výrobním procesem

Následně byla provedena 2. série experimentů k optimalizaci. Zde číslování pokračuje 7-17. Experiment číslo 7 nedopadl jako pěna a k vyjmutí z kokily bylo nutné pěnu zničit, proto není na snímcích. Obrázky z jednotlivých experimentů viz Obr. 59, Obr. 60, Obr. 61, Obr. 62



Obr. 59 2. Série průzkumných experimentů - 1. část



Obr. 60 2. Série průzkumných experimentů - 2. část



Obr. 61 2. Série průzkumných experimentů - 3. část



Obr. 62 2. Série průzkumných experimentů - 4. část

Součástí těchto experimentů bylo i hledání vhodného míchadla, která jsou zobrazena na Obr. 63 a Obr. 64.



Obr. 63 Zkoumaná míchadla. Vlevo nakoupené míchadlo na barvy a stavební směs, uprostřed míchadlo z tlustého drátu, vpravo míchadlo z tenkého drátu



Obr. 64 Zkoumaná míchadla z tenkého svařovacího drátu o průměru 3 mm

Původně bylo cílem i zjišťování vlivu při izobarickém pění tudíž při zavřeném víku kokily, ale od toho bylo upuštěno, protože většina pěn zpočátku nedosáhla hladiny a tento jev je velmi náročné kvantifikovat, protože tlak uzavřené nádoby je funkce objemu vsázky a míry napění, což má za následek kombinaci několika faktorů navzájem. To vnáší nadměrnou komplexitu.

Shrnutí prováděných experimentů je sepsáno v příloze 4. Při experimentech 1-8 nebyla teplota měřena a výkon indukční pece byl udržován na 25 kW. Poté se začala teplota měřit termočlánkem Ni-CrNi v ocelové trubce a korigovat změnou výkonu indukční pece.

5.3 Vyhodnocení experimentů hledání funkčního výrobního procesu

Jelikož se jedná o nevyzkoušenou technologii, je zapotřebí nejprve docílit obecných výsledků. To v našem případě znamená výroba hlinkové pěny s minimálním množstvím defektů z výroby a docílení co nejhomogennější distribuce pórů. Také k provedení experimentů, které se dají vyhodnocovat je zapotřebí mít proces v určité míře stabilní tzn. zajištění opakovatelnosti výroby pěn. Byla zkoumána spousta faktorů ovlivňující výrobní proces. Mezi nejdůležitější se ukázal % CaCO_3 , doba míchání, typ míchadla, způsob míchání, teplota, způsob vkládání prášku, způsob ochlazení a doba pění.

5.3.1 Typ míchadla a způsob míchání

Experimenty ukázali jako důležité taveninu promíchat k rozprostření prášku. Pokud je tavenina míchaná moc agresivně nebo pokud dochází k víření celého objemu taveniny v kokile, tak pěna dostává struskovitý charakter, nedochází k rovnoměrnému rozprostření prášku a dosahuje se nekvalitní pěny. Promíchání se dosahuje správným výběrem míchadla, které musí být vyrovnané a mít vhodný tvar. Původní míchadlo bylo koupené určené na barvy a stavební směsi viz Obr. 65.



Obr. 65 Míchací spirála na barvy a stavební směsi

Toto míchadlo bylo následně uchyceno relativně složitým způsobem přivařením šroubu se závitem M14 na konec míchadla a našroubováním na míchací zařízení (Obr. 45). Toto řešení se ukázalo jako nevhodné, protože při vyndávání míchadlo tohoto tvaru působilo jako nádoba a vyjímalo velké množství stabilizované taveniny z kokily. Z nutnosti hledání

nového míchadla se ukázalo řešení uchycení míchadel na toto míchací zařízení závitem M14 jako velmi nevhodné. Při změně by bylo potřeba pokaždé vymyslet nějaký způsob přichycení k míchacímu zařízení a také při aretaci tímto způsobem vznikají problémy se souosostí, protože šroubová spojení středěná závitem nezaručují dostatečnou toleranci, a to vede k házení míchadla. Také regulace otáček se ukázala jako nevhodná, jelikož dle výrobce má mít rozmezí otáček 0-900 ot/min, ale v reálu začínaly otáčky přibližně na 300 ot/min a zařízení bylo těžké a nemotorné. Proto jsem zvolil náhradní míchací zařízení, a to vrtačku ze slévárenské dílny značky Bosch s konstantní rychlostí 2200 ot/min viz Obr. 46, která je osazena sklíčidlem k aretaci. Toto sklíčidlo je relativně přesné a umožňuje jednoduše a rychle měnit míchadla.

Dále jsem zkoušel míchadla z ohýbaných svařovacích drátů o různých průměrech. Ukázalo se, že čím tenčí drát, tím lepší promíchání, protože se tím omezuje víření taveniny. Z tohoto důvodu jsem dále používal nejtenčí dostupný drát, a to svařovací drát ze slévárenské dílny o průměru 3 mm. I takto tenký svařovací drát, pokud je vyrovnaný, se v tavenině neohne odstředivou silou díky odporu taveniny.

Dále jsem hledal optimální tvar míchadla. Nejvíce se osvědčilo míchadlo číslo 9 (Obr. 64), které je navíc trochu zkroucené do šroubovice, aby vedlo taveninu směrem ke dnu. Výkres s rozměry v příloze 3.

Způsobem míchání je myšleno pohybování míchadla v tavenině a vyjmutí míchadla taveniny. Zjistil jsem, že pohybováním proti směru otáčení míchadla dochází k vnášení velkých vzduchových bublin. Také se ukázal vhodný pohyb vertikálně k zamíchání slitiny u hladiny.

Také byl pozorován vliv míchání taveniny elektromagnetickou indukcí. Toto se ukázalo jako bez efektu pravděpodobně z důvodu ulpění shluku prášku u kraje kokily a síly míchání indukcí byly moc nízké k jeho odloupení od kraje a k rozbití shluku prášku na částice.

5.3.2 Teplota

Při prvních pokusech indukční peci jsem teplotu nehlídal, ale z důvodu zvýšení efektivity slitinu taval při relativně vysokém výkonu indukční pece 25 kW. To mělo za následek přehřátí taveniny což vedlo k velmi vysoké vrstvě stečení u dna. To bylo pravděpodobně způsobeno nadměrně sníženou viskozitou a zvýšenou zabíhavostí. To vedlo k průtoku taveniny stěnami mezi póry vedoucí k tvorbě vysoké vrstvy stečení. Zároveň dochází k rapidnímu rozkladu CaCO_3 což má za následek náhlou generaci plynu, který spíše uteče do

ovzduší a špatně se kontroluje. Také některé pěny jevíly velmi černé pravděpodobně spálené póry.



Obr. 66 Pěna se "spálenými póry" a vysokou vrstvou stečení

Udržování teploty přibližně 20 °C nad teplotou tavení hliníkové slitiny se ukázalo jako nejlepší způsob. V našem případě se jedná o teplotu okolo 640 °C. Toho se dosáhlo snížením výkonu na 5 kW po dosažení teploty solidu.

5.3.3 Způsob vkládání prášku

Způsob vkládání má primárně vliv na smáčení prášku CaCO_3 v tavenině a jeho disperzi v tavenině. Byly zkoumány tyto způsoby.

1. Nasypání prášku na povrch taveniny
2. Nasypání prášku na dno kokily před tavením
3. Vnoření prášku v kuličce alobalu do taveniny
4. Položení prášku v kuličce alobalu na dno před tavením



Obr. 67 Kulička alobalu se zabaleným práškem CaCO_3 na slévárenské váze

Při nasypání na povrch docházelo k tvorbě shluků CaCO_3 , které bylo velmi náročné rozmixovat a dostat do taveniny. Při nasypání CaCO_3 na dno kokily s následným roztavením

AlSi5 docházelo k ulpění CaCO_3 ke dnu a nerozmixování. Při vkládání CaCO_3 v kuličce alobalu do taveniny následným zamixováním docházelo k částečnému rozprášení CaCO_3 do ovzduší. Nejvíce se osvědčil způsob vkládání na dno kokily v kuličce z alobalu. Tím nedocházelo k ulpění CaCO_3 u dna a prášek měl dostatečně prostoru na to se rozšířit v tavenině, než vyplave na povrch.

5.3.4 Doba pění

Důležitý faktor při tvorbě pěny. Pokud je tato doba příliš krátká, nemá prášek CaCO_3 dostatek času na generaci plynu a napění je malé. Pokud je doba příliš dlouhá dojde ke zvětšení pórů v takové míře, že se začnou rozpadat, bortit a spojovat. Nejlepších výsledků se dosáhlo pění po dobu růstu. Jakmile pěna přestala růst, vyndala se % CaCO_3 a ochladila k uzamčení.

5.3.5 Způsob ochlazení

Všechny pokusy byly prováděny okamžitým ochlazením ve vodě po dosažení maximální výšky zpění k „uzamčení“ pěny tzn. k ukončení procesu pění dosáhnutím co nejrychleji teploty solidu. První pokusy se nořily celé do vody, ale to se ukázalo v několika případech jako nevhodné. Po ponoření začala působit velká vztlaková síla na nejvíce napěnou část pěny z důvodu vysoké pórovitosti P a tím nižší hustoty ρ než vody. V některých případech docházelo k ztuhnutí pouze horní části pěny (kontakt s vodou) a spodní byla stále v likvidu díky teplotě kokily. V tu chvíli začali působit výše zmíněné síly a došlo k utržení pěny. Nejvhodnější se ukázalo nejdříve ponořit pouze dno a takto chladit zhruba minutu. Po této době se již dosáhlo uzamčení pěny a poté celá kokila ponořila do vody k dochlazení a vyjmutí hliníkové pěny z kokily.

5.3.6 Výsledný způsob funkčního výrobního postupu

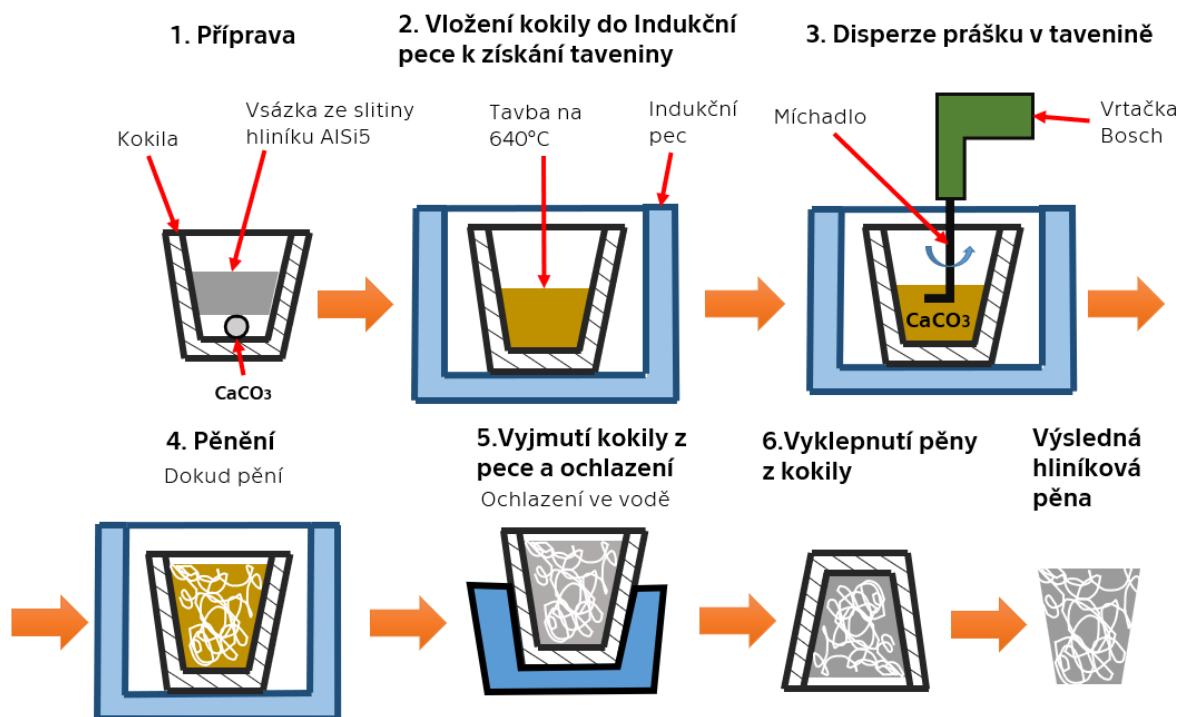
Pomocí několika sérií pokusů jsem identifikoval klíčové proměnné a našel stabilní funkční postup výroby hliníkových pěn pomocí práškových zpěňovadel (kapitola 5.2.1). Volím objem vsázky 30 % vůči objemu dutiny kokily, aby měla pěna dostatek prostoru k napění a nepřetekla. Výrobní postup následuje tyto kroky:

1. Příprava

- 1.1. Příprava vsázky – 300 gramů AlSi5

- 1.2. Navážení poměru prášku CaCO_3 vzhledem k váze vsázky AlSi5

- 1.3. Zabalení prášku CaCO_3 do kuličky potravinářského alobalu a vložení na dno kokily
- 1.4. Vložení vsázky do kokily nad kuličku s CaCO_3
2. Vložení kokily do Indukční pece k získání taveniny
 - 2.1. Nastavení výkonu na 25 kW do překročení teploty solidu
 - 2.2. Snížení výkonu na 5 kW do získání taveniny
3. Disperze prášku v tavenině
 - 3.1. Vložení míchadla ke dnu kokily
 - 3.2. Míchání vybranými míchadlem z 5.3.1 ve vrtačce Bosch s pomalým krouživým pohybem po směru rotace míchadla a pomalými vertikálními pohyby.
 - 3.3. Po uplynutí dané doby přestat míchat
4. Pěnění
 - 4.1. Vyjmutí míchadla při stěně kokily
 - 4.2. Počkání, dokud pěna přestane růst
5. Vyjmutí kokily z pece a ochlazení
 - 5.1. Ochlazení dna kokily, dokud nedojde ke ztuhnutí pěny
 - 5.2. Ponoření celé kokily s pěnou do vody k dochlazení
6. Vyklepnutí pěny z kokily



Obr. 68 Schéma výsledného funkčního výrobního postupu

5.4 Design of experiment

Existuje spousta přístupů, jak provádět a vyhodnocovat experimenty. Nejběžnější a nejzastaralejší metodologie provádění experimentů je variace jedné proměnné a zafixování všech ostatních. Tento přístup je vhodný, pokud chceme zjistit přesné chování jedné proměnné a pochopení jejího vlivu na systém. Na druhou stranu tento přístup vyžaduje velké množství experimentů k jejímu vyhodnocení a nezachycuje efekt souběžných vlivů více proměnných na systém. [30]

Jednou z dalších metodologií provádění experimentů je tzv. Design of Experiment (DOE). DOE je statistický nástroj používaný při návrhu, vývoji a optimalizaci různých typů systémů, procesů a výrobků. Je to víceúčelový nástroj, který lze použít v různých situacích, jako je návrh pro porovnání, screening proměnných, identifikace funkcí, optimalizace a robustní design. [30]

K provedení experimentů volím použití DOE především díky možnosti pochopení systému s více proměnnými na základě minimálního počtu experimentů.

DOE je účinný nástroj, který umožňuje vědcům získávat maximální množství dat a zároveň minimalizovat množství potřebných činností pro sběr dat. Využitím faktoriálních experimentálních návrhů lze studovat příčiny a vlivy několika faktorů současně, čímž se lze vyhnout nutnosti provádět samostatné studie, které mění pouze jeden faktor po druhém. Tento přístup umožňuje posoudit citlivost každého faktoru a interakce mezi různými faktory. Je důležité poznamenat, že tradiční studie, které se zaměřují jen na jeden faktor zvlášť, neposkytují pohled na tyto interakce. To vyzdvihuje výhodu použití technik DOE pro zkoušky a vyhodnocování inženýrských systémů. [31]

DOE je v podstatě forma regresní analýzy, kterou lze použít v různých kontextech. V DOE se běžně používá několik typů návrhů pro provádění experimentů.

1. **Porovnávání:** V této aplikaci se provádí vícenásobné porovnání s cílem vybrat nejlepší možnost pomocí statistických testů, jako je t-test, Z-test nebo F-test.
2. **Screening proměnných:** Dvouúrovňový faktoriální design se používá k identifikaci důležitých faktorů z množství faktorů, které ovlivňují výkonnost systému, procesu nebo výrobku.
3. **Identifikace přenosové funkce:** Jakmile jsou identifikovány důležité vstupní proměnné, lze pomocí přenosových funkcí zkoumat vztah mezi těmito proměnnými

a výstupní proměnnou, což umožňuje další analýzu výkonnosti systému, procesu nebo výrobku.

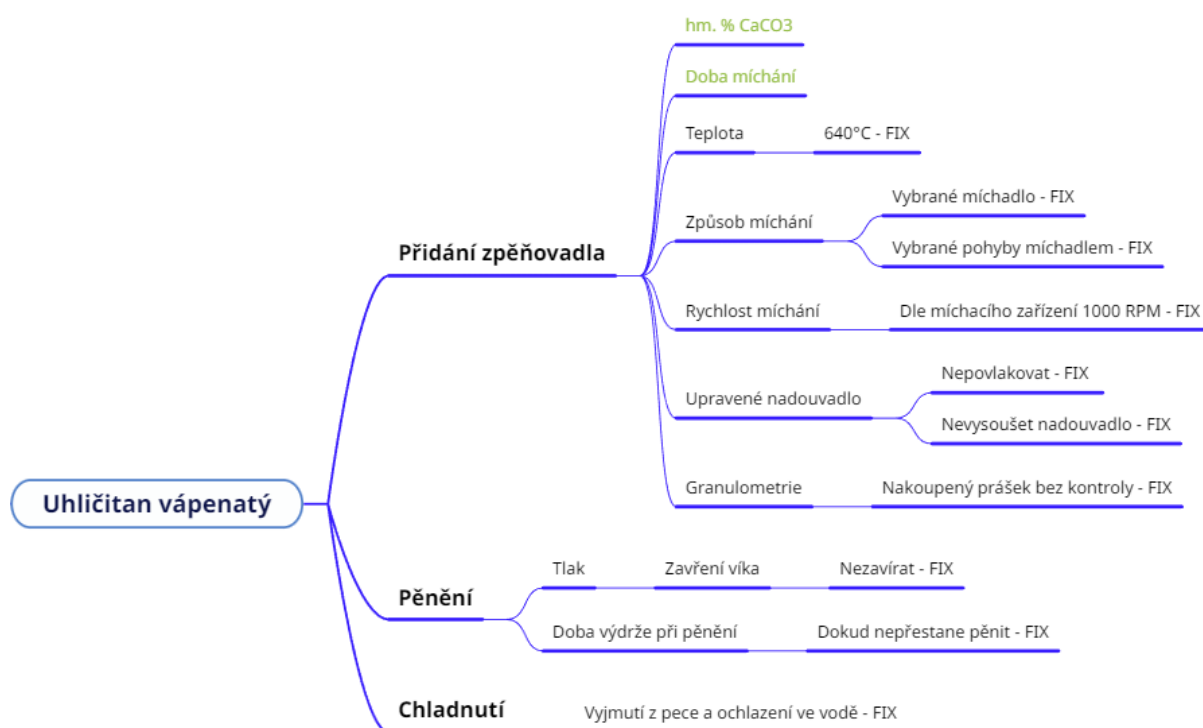
4. **Optimalizace systému:** Získané přenosové funkce lze využít k optimalizaci určením optimálního nastavení proměnných, což vede ke zlepšení výkonnosti systému, procesu nebo výrobku.
5. **Robustní návrh:** Tato aplikace se zaměřuje na snížení variability systému, procesu nebo výrobku, aniž by byly odstraněny její příčiny. Zohledňuje faktory rozdělené na vnější, vnitřní a mezi jednotkové odchylky, přičemž cílem je zajistit odolnost systému vůči rušivým vlivům a zlepšit celkovou kvalitu. [31]

Prvním a zároveň nejnáročnějším úkolem při provádění DOE je jeho správné naplánování. Plánování se skládá z následujících kroků:

1. **Popis konkrétního cíle:** Jasně uvedení problémů nebo cílů, které budou v rámci experimentu zkoumány.
2. **Definice proměnných:** Určení a definice měřitelných výsledků experimentů na základě definovaných cílů.
3. **Výběr faktorů a úrovní:** Určení nezávislých proměnných (faktorů), které mohou ovlivnit výstupní veličinu.
4. **Volba způsobu provedení experimentu:** Výběr vhodného typu designu na základě stanovených cílů, např. screeningový design pro identifikaci významných faktorů nebo funkce faktor-odezva pro optimalizaci.
5. **Určení počtu potřebných zkušebních vzorků:** Na základě počtu faktorů, úrovní a počtu opakování k získání odchylky.
6. **Provedení experimentu pomocí navrženého plánu:** Provedení plánovaného experimentu podle zvoleného plánu.
7. **Analýza dat:** K analýze shromážděných údajů se používají statistické metody, jako je regresní analýza a analýza rozptylu (ANOVA).
8. **Praktické závěry a případná doporučení:** Vypracování závěrů na základě analýzy a předložení praktických doporučení. K ilustraci výsledků a ověření závěrů se doporučuje použít grafické znázornění. [31]

5.4.1 Návrh experimentu pomocí DOE

Proměnných do tohoto výrobního systému vstupuje opravdu hodně. Je potřeba vybrat zkoumané veličiny a zbylé zafixovat. Stručný přehled proměnných a jak jsou fixované je zobrazeno na Obr. 69. Hmotnostní % CaCO_3 a doba míchání jsou faktory mající jednu z největších vlivů na výsledné vlastnosti a jsou snadno ovladatelné a měřitelné. Proto je volím jako zkoumané parametry metodou DOE. K provedení experimentů využiji zjištěný funkční výrobní postup dle 5.3.



Obr. 69 Přehled proměnných a jejich fixace

Jako typ návrhů pro provádění experimentů volím tzv. Plný faktoriál. Toto je nejhlubší forma DOE, která umožňuje sledování všech interakcí. Počet hladin určuje počet zkoumaných bodů k regresní analýze. Předpokládám lineární průběh, proto volím 2 levely. Po provedení experimentů a jejich vyhodnocení je potřeba najít středový bod a v tomto bodě udělat kontrolní výrobu a vyhodnocení k ověření, jestli zjištěná lineární závislost opravdu odpovídá. Pokud by kontrolní body nespádali do blízkého okolí křivky, znamenalo by to, že závislost není lineární, ale zakřivená a tyto body se použijí k úpravě a zpřesnění funkce na křivku. Počet opakování experimentů volím 3x ke zjištění opakovatelnosti a směrodatné odchylky výsledků.

Nejprve byly hledány maximální a minimální hodnoty mezi kterým je proces výroby stabilní a stále vzniká pěna. Minimální hodnota % CaCO₃ se ukázala být 2 %. Při nižší hodnotě a nižších časech míchání nedocházelo k napěnění, ale pouze stabilizaci, zároveň při delších časech míchání docházelo k využití veškerého CaCO₃ a nevznikla pěna. Maximální hodnota % CaCO₃ se ukázala 6 %. Při vyšší hodnotě docházelo k výrazné koalescenci pórů. Časy míchání volím 30 a 70 s. Při nižších časech byl pozorován nezreagovaný CaCO₃ a při vyšších časech docházelo k mechanické destrukci pórů, jelikož míchání neprobíhá v celém objemu najednou. Tudiž v nemíchaných místech docházelo k pění a pokračováním v míchání se dosáhlo mechanické destrukci pórů.

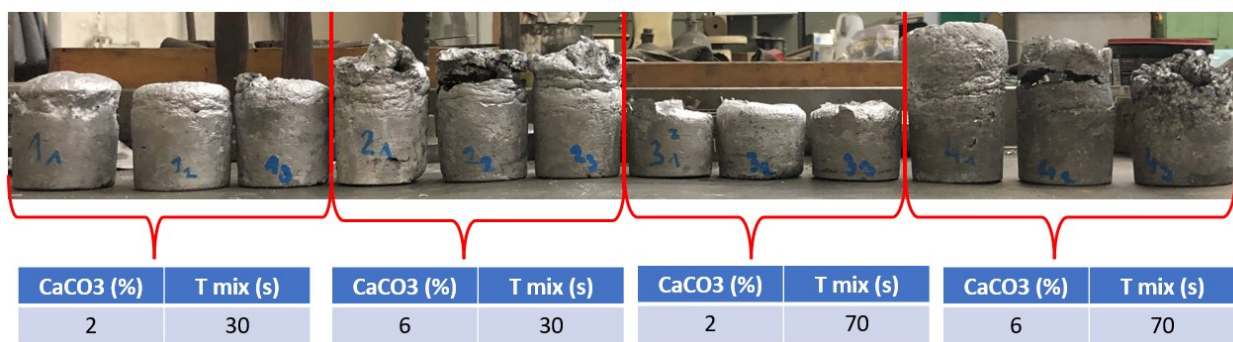
DOE pro 2 proměnné a 2 hladiny typu Full Faktoriál se stanovenými hodnotami je sepsáno v tabulce Tab. 9 Tato tabulka byla 3x za sebou výrobně zopakována (3 dávky) a to činí celkový počet 12 vyrobených pěn.

Tab. 9 Vyhodnocovaný Full Faktoriál DOE

Č. experimentu	Poměr CaCO ₃ (%)	Čas míchání (s)
1	2	30
2	6	30
3	2	70
4	6	70

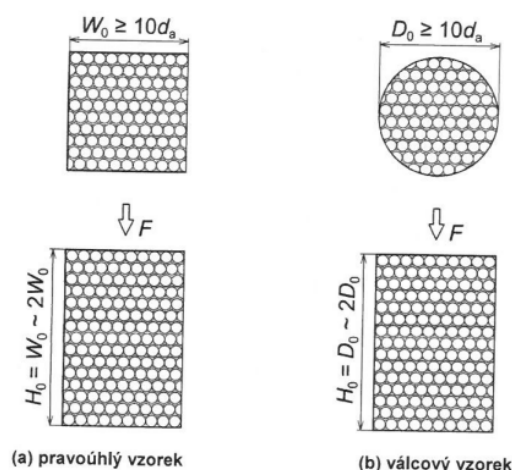
5.4.1 Provedení DOE

Dle návrhu výše byly provedeny experimenty. Na Obr. 70 lze pozorovat výsledné pěny. Porovnáním vzhledu hliníkových pěn se stejnými parametry lze pozorovat vysokou podobnost vyrobených pěn. Díky tomuto faktu potvrzují tyto pěny za vhodné k vyhodnocení do DOE.



Obr. 70 Pěny vytvořené parametry dle DOE

Pro provedení experimentů se vzorky připravily k tlakové zkoušce dle normy ISO 13314. To se skládá z nařezání vzorků kruhového nebo čtvercového průřezu dle Obr. 71.



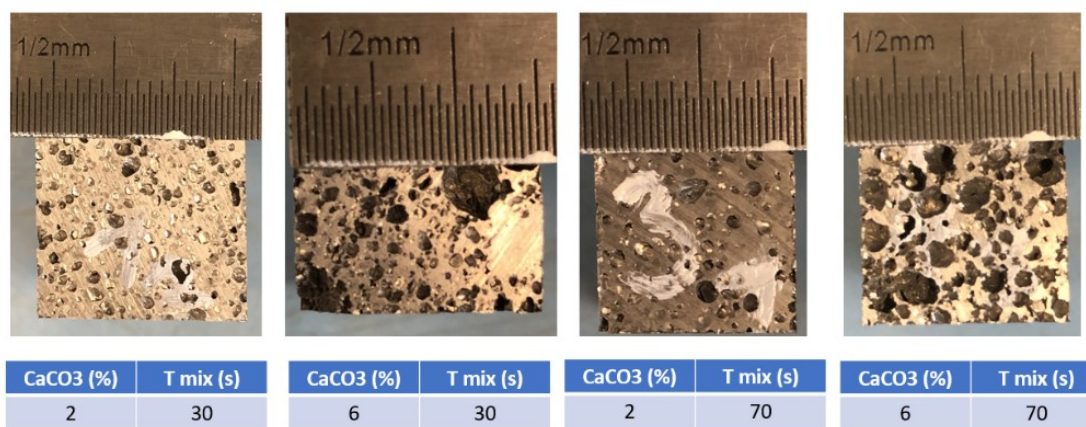
Obr. 71 Schématické znázornění zkušební vzorku

S velikostí průřezu W_0 větší než 10násobek velikosti pórů nastal problém, protože některé vzorky obsahují velké bubliny uprostřed a proto najít vhodné místo, které by bylo vhodné k řezu bylo náročné. Proto tento požadavek byl uvolněn na 6 až 10násobek velikosti pórů. Volím 15x15x30mm což dle měření velikosti 10 náhodných pórů v řezu posuvným měřítkem spadá do stanoveného rozmezí. Vzorky byly nařezány kotoučovou metalografickou pilou na vzorky, které lze pozorovat na Obr. 74 a Obr. 73. Nařezané vzorky se následně přesně změřily a zvážily. Z těchto hodnot a znalosti hustoty AlSi5 lze vypočítat pórovitost P úpravou vzorečku 2.1 na:

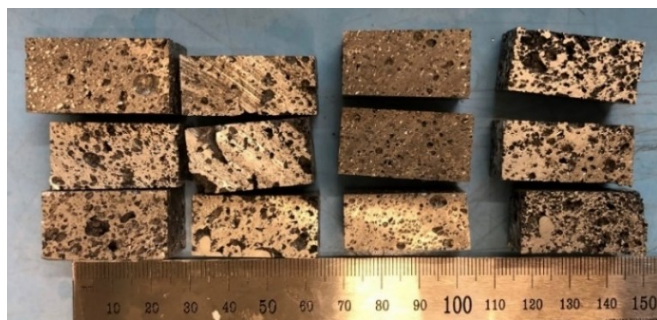
$$P = 1 - \left(\frac{m}{m_s} \right) \cdot 100 [\%] \quad 5.3$$

Kde

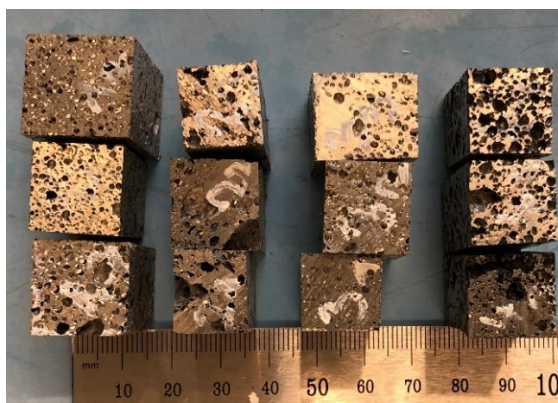
$$m_s = \rho_s \cdot V \quad 5.4$$



Obr. 72 Detail struktury pórů pro jednotlivé parametry

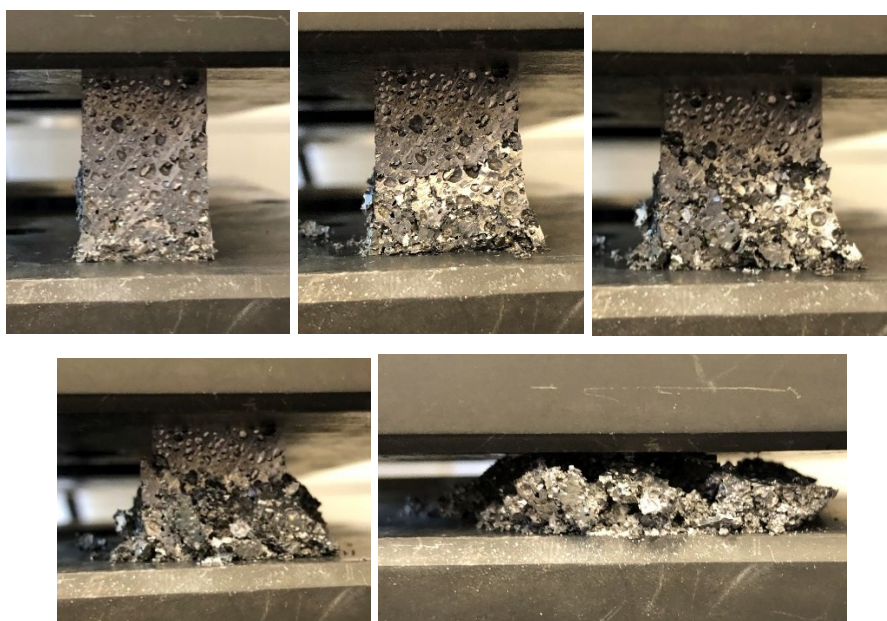


Obr. 73 Nařezané vzorky z hliníkové pěny – pohled z boku

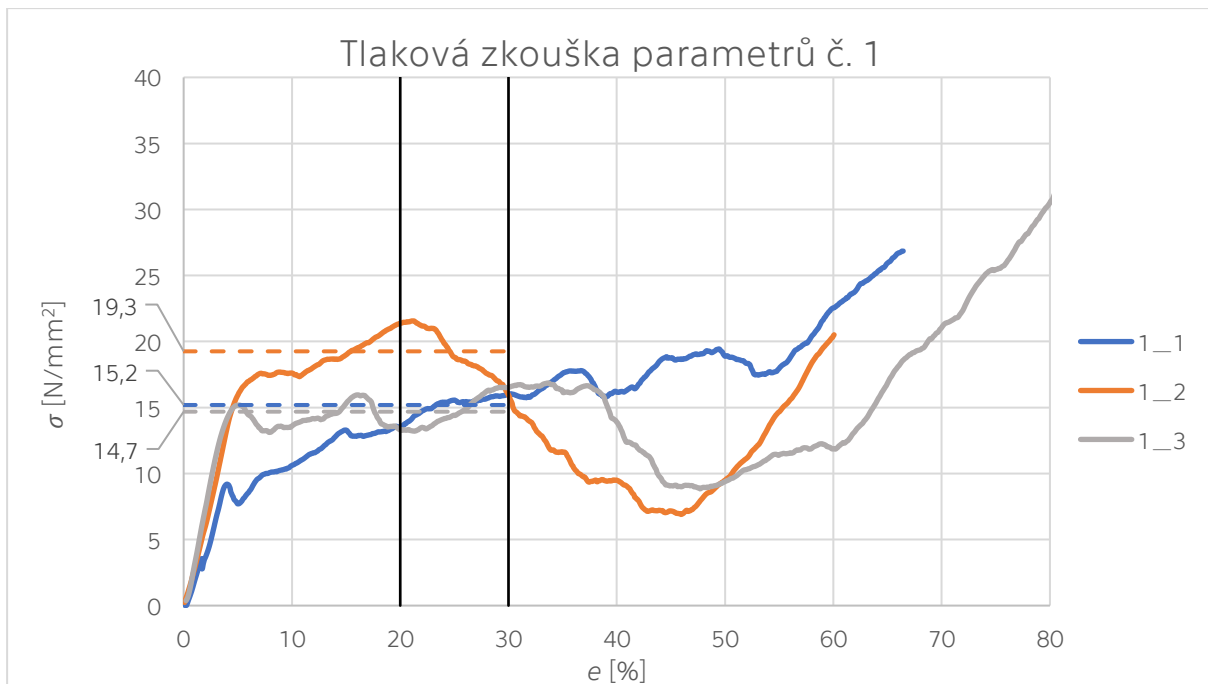


Obr. 74 Nařezané vzorky z hliníkové pěny – pohled shora

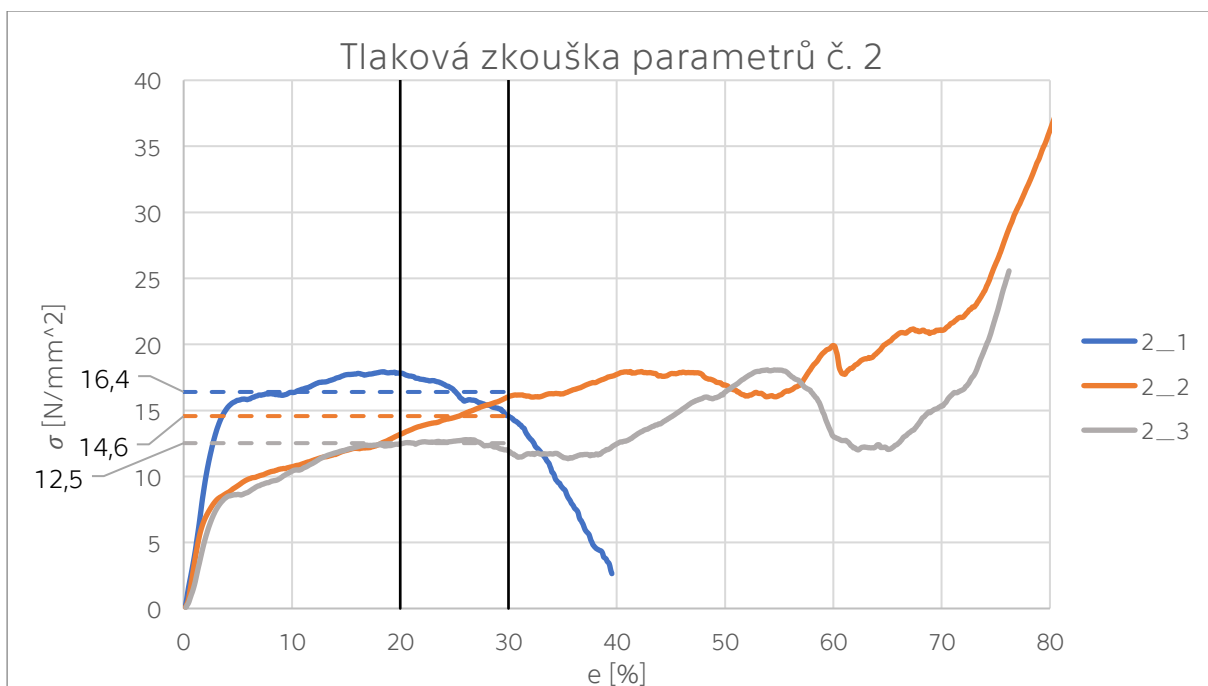
Následně na nařezaných kvádrových vzorcích se provedly zkoušky v tlaku (viz Obr. 75), z kterých se vyhodnocoval průběh křivky napětí na poměrné deformaci. Z těch se odečetly hodnoty stabilní hladiny napětí při plastické deformaci σ_{pl} dle normy ISO 13314. Rozmezí pro odečtení σ_{pl} volím mezi stlačením $e_1=20\%$ a $e_2=30\%$. Tlakové zkoušky stejného nastavení jsou shrnuty do grafů (Obr. 76, Obr. 77, Obr. 78, Obr. 79) s vyznačenými σ_{pl} .



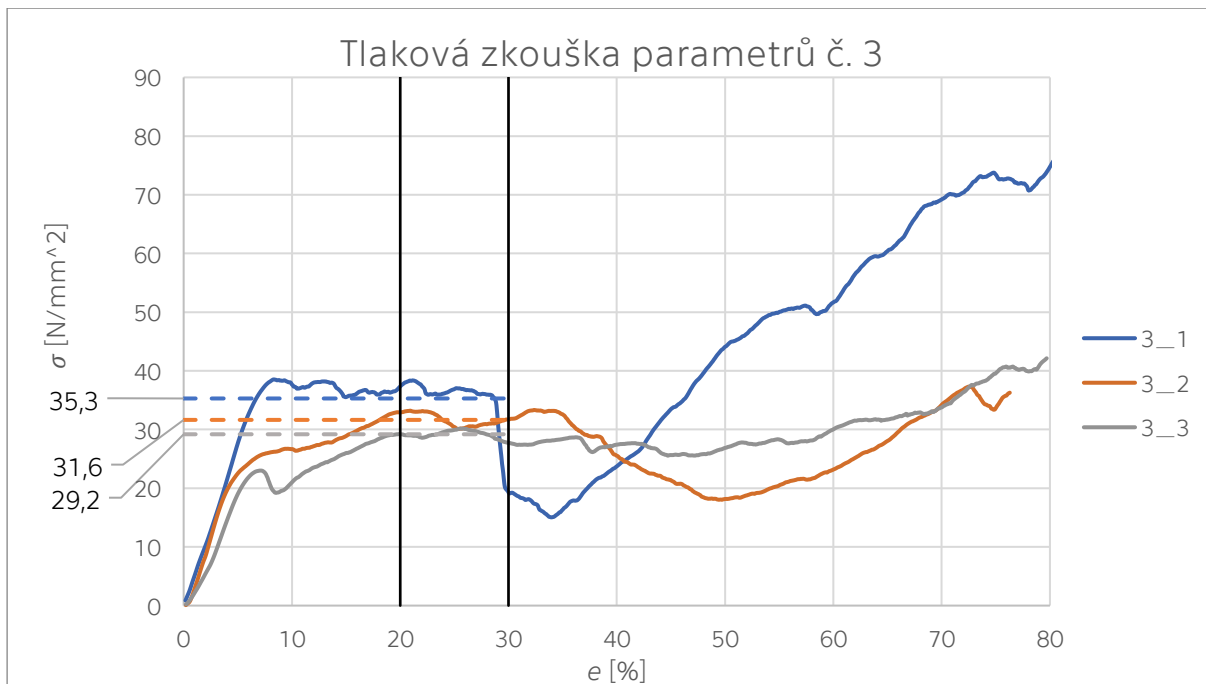
Obr. 75 Fotky z průběhu tlakové zkoušky



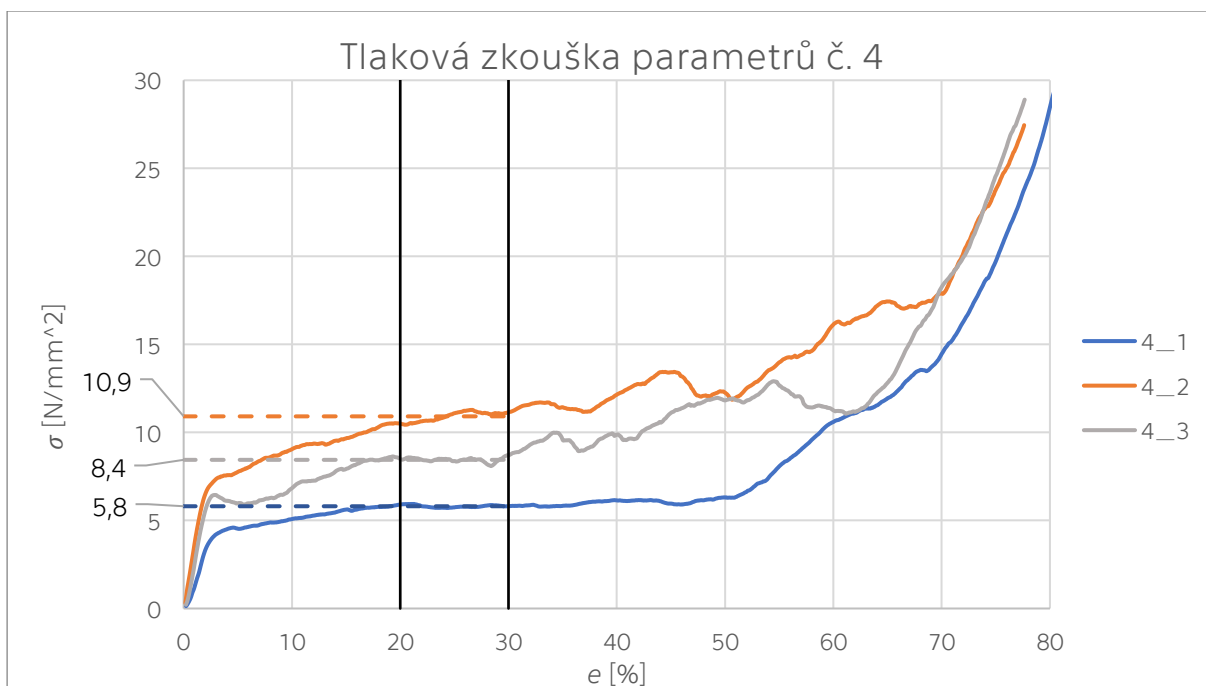
Obr. 76 Tlakové zkoušky parametrů DOE č. 1 (3 opakování)



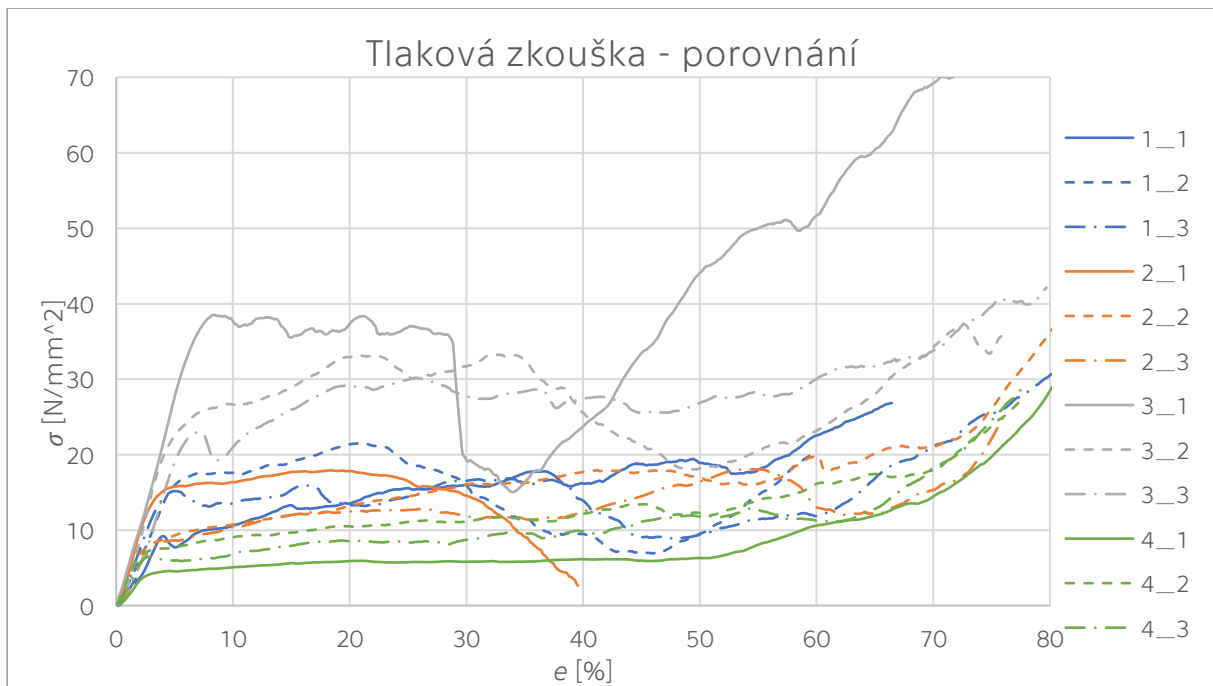
Obr. 77 Tlakové zkoušky parametrů DOE č. 2 (3 opakování)



Obr. 78 Tlakové zkoušky parametrů DOE č. 3 (3 opakování)



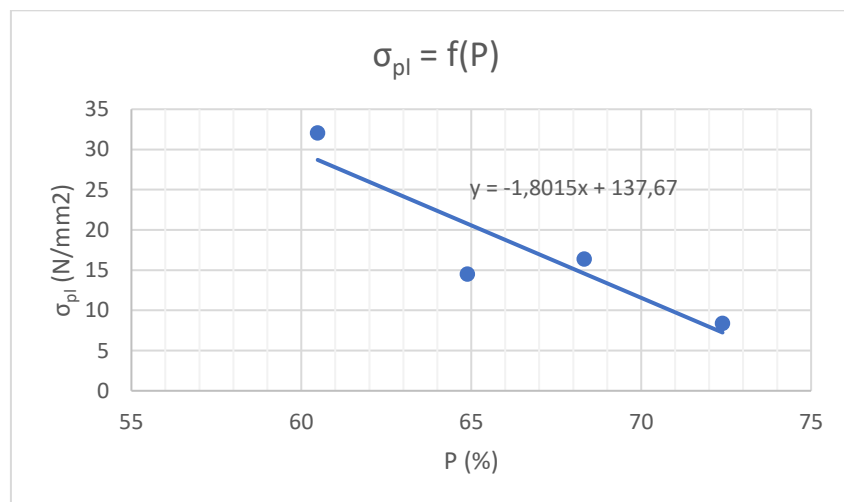
Obr. 79 Tlakové zkoušky parametrů DOE č. 4 (3 opakování)



Obr. 80 Porovnání tlakových zkoušek

Z porovnání křivek tlakových zkoušek můžeme konstatovat, že na nastavení opravdu hodně záleží. Křivky označené číslem 4 vykazují nejhladší průběhy zatímco číslem 3 vykazují největší proměnlivost. Zde myslím hraje roli velikost zkušebních vzorků. Jelikož není dodržen požadavek normy na velikost průřezu W_0 větší než 10násobek velikosti pórů, hraje zde roli rozložení pórů ve vzorcích. To se ukázalo při tlakových zkouškách lokálním rozpadem pěny a prudkými propady napětí například vzorku 3_1 nebo u předčasně ukončeného testu vzorku 2_1.

Dále je možné pozorovat závislost stabilní hladiny napětí na pórovitosti v Obr. 81. Tento klesající trend je očekávatelný a koresponduje s rešerší.



Obr. 81 Závislost stabilní hladiny napětí na pórovitosti

5.4.2 Vyhodnocení DOE

Pomocí aplikace Minitab 17 jsem analyzoval výsledky z Tab. 10 a Tab. 11.

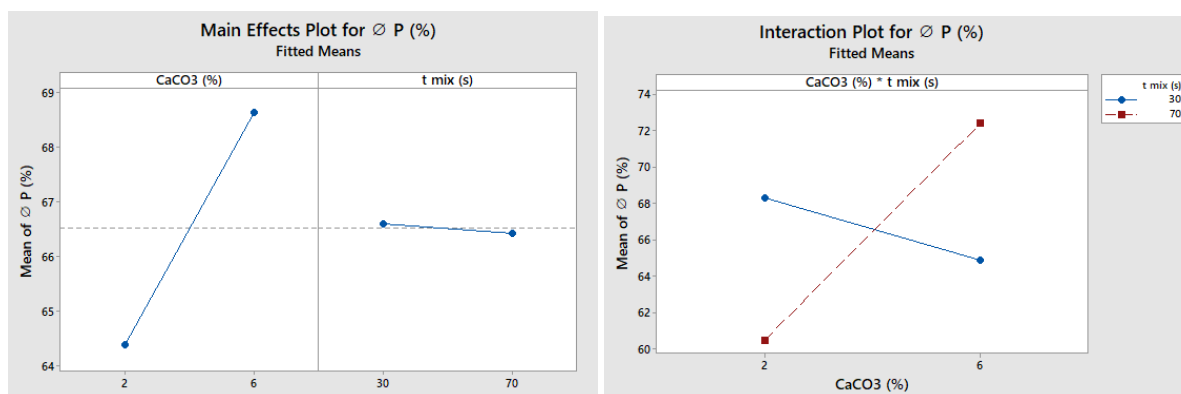
5.4.2.1 Pórovitost P

Naměřené hodnoty pórovitostí pro jednotlivé experimenty dle DOE lze pozorovat v Tab. 10

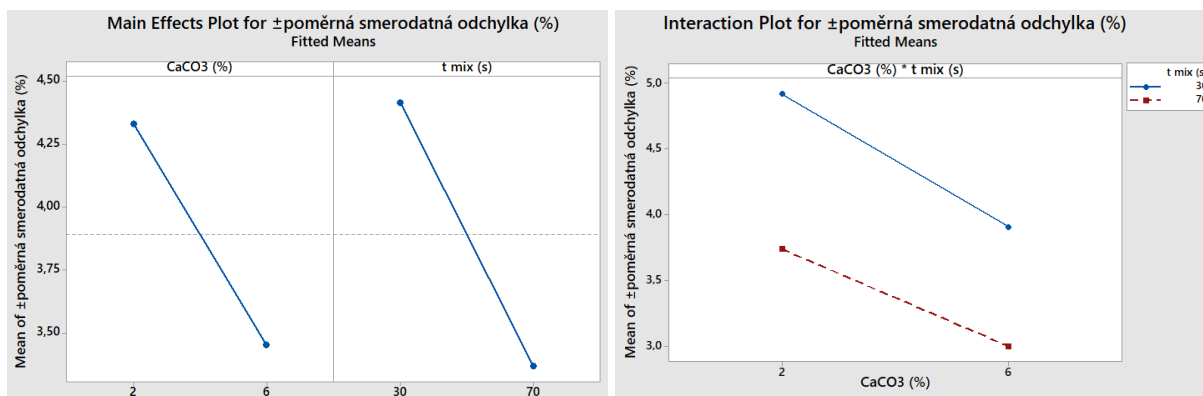
Tab. 10 Hodnoty pórovitosti a směrodatné odchylky z DOE

č. exp.	CaCO ₃ (%)	t _{mix} (s)	P1 (%)	P2 (%)	P3 (%)	Ø P (%)	±σ	±σ _p (%)
1	2	30	71,98	63,86	69,12	68,32	3,36	4,92
2	6	30	62,86	68,46	63,35	64,89	2,53	3,91
3	2	70	57,29	61,99	62,17	60,48	2,26	3,74
4	6	70	75,43	70,47	71,29	72,39	2,17	3,00

Dle Obr. 82 lze pozorovat vlivy nastavení na výslednou průměrnou hodnotu pórovitosti ØP (%) a její nominální směrodatnou odchylku ±σ a poměrnou ±σ_p (%) vyjadřující procentuální odchylku od průměrné hodnoty. Čím prudší sklon křivky tím větší vliv. Samostatný čas míchání dle grafu vlevo nevykazuje téměř žádný vliv na průměrnou hodnotu pórovitosti, ale dle grafu vpravo interakce času míchání a % CaCO₃ je čas míchání také významný. Zároveň tento parametr nejvíce ovlivňuje směrodatnou odchylku, viz Obr. 83. Tento jev byl pozorován i v řezech pěnamí, u kterých se ukázalo, že při nízkých časech se dělá středová bublina větší a při vyšších časech míchání menší nebo úplně zmizí.



Obr. 82 Vlevo: vliv jednotlivých parametrů na P (%); vpravo: vliv interakce vlivů na P (%)

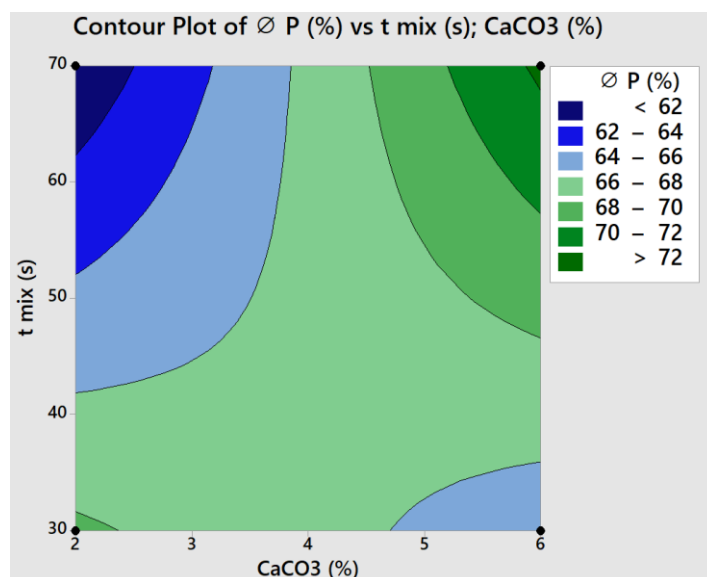


Obr. 83 Vliv jednotlivých parametrů na směrodatné odchylce $\pm\sigma_p$; vpravo: vliv interakce obou vlivů na $\pm\sigma_p$

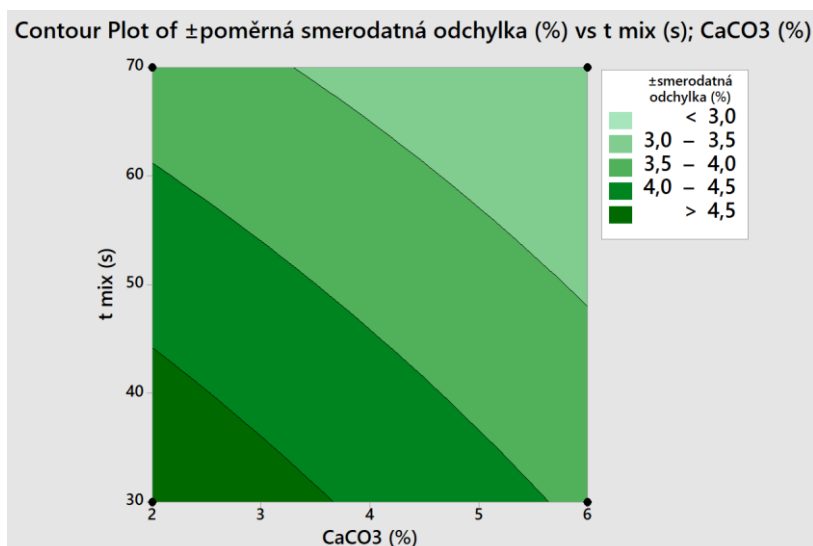
Hlavní výstup z DOE pro pórovitost je Obr. 84 a Obr. 85. V těchto konturových grafech je vidět závislost výrobních parametrů na pórovitosti a na její směrodatné odchylce. Výpočet pórovitosti v závislosti na výrobních parametrech se řídí rovnicí 5.5, kde CaCO_3 se dosazuje v procentech a t_{mix} v sekundách.

$$P = 81,67 - 3,734 \cdot \text{CaCO}_3 - 0,3877 \cdot t_{\text{mix}} + 0,09589 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot t_{\text{mix}} \quad 5.5$$

Z grafů můžeme vyčíst, že pro získání nejvyšší možné hodnoty P a nejnižší směrodatné odchylky získáme nastavení $t_{\text{mix}} = 70$ s; $\text{CaCO}_3 = 6$ %.



Obr. 84 Konturový graf výrobních parametrů jako funkce pórovitosti



Obr. 85 Konturový graf výrobních parametrů jako funkce směrodatné odchytky pórovitosti

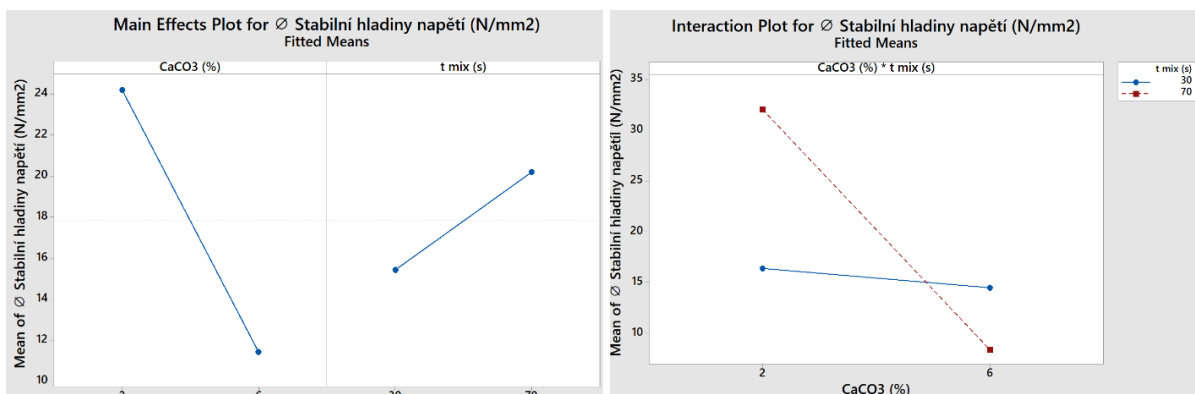
5.4.2.2 Stabilní hladina napětí σ_{pl}

Shrnutí výsledků z tlakových zkoušek pro σ_{pl} je v Tab. 11

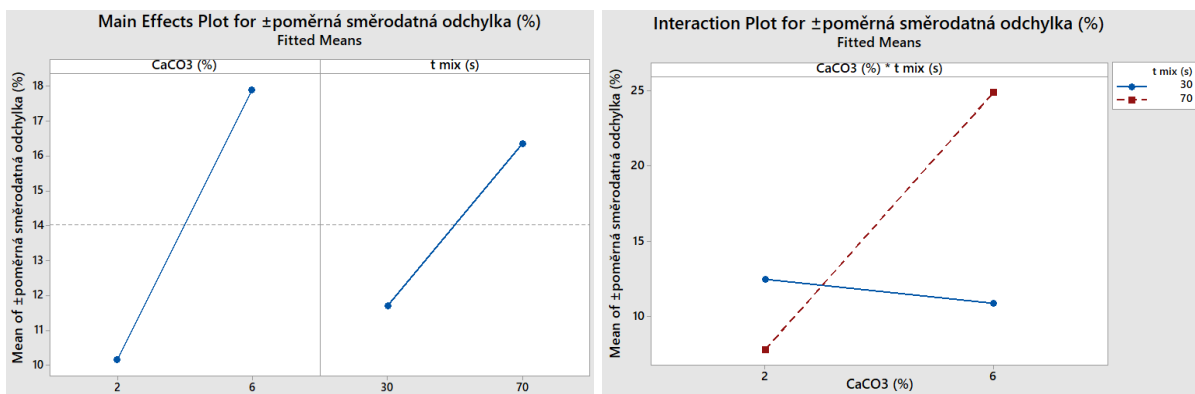
Tab. 11 Hodnoty stabilní hladiny napětí σ_{pl} a směrodatné odchytky z DOE

č. exp.	CaCO3 (%)	t mix (s)	σ_{pl1} (N/mm ²)	σ_{pl2} (N/mm ²)	σ_{pl3} (N/mm ²)	$\bar{\sigma}_{pl}$ (N/mm ²)	$\pm\sigma$	$\pm\sigma_p$ (%)
1	2	30	15,2	19,3	14,7	16,4	2,0	12,5
2	6	30	16,4	14,6	12,5	14,5	1,6	10,9
3	2	70	35,3	31,6	29,2	32,0	2,5	7,8
4	6	70	5,8	10,9	8,4	8,4	2,1	24,9

V Obr. 86 lze pozorovat vlivy nastavení na výslednou průměrnou hodnotu σ_{pl} a na Obr. 87 vlivy na její poměrnou směrodatnou odchytku $\pm\sigma_p$. Oba parametry nastavení vykazují důležitost na výsledném σ_{pl} .



Obr. 86 Vlevo: Vliv jednotlivých parametrů na hladině stabilního napětí (N/mm²); vpravo: vliv interakce vlivů na stabilní hladině napětí (N/mm²)



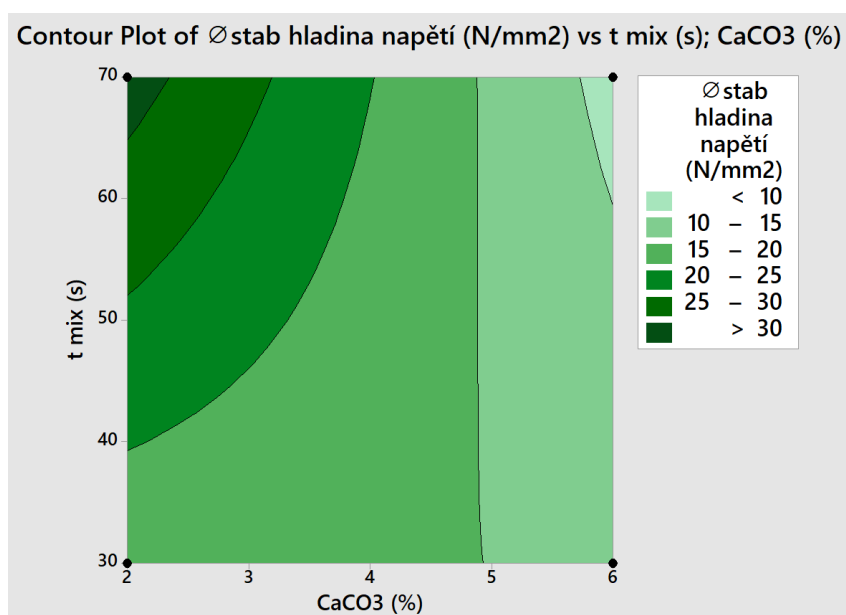
Obr. 87 Vliv jednotlivých parametrů na poměrné směrodatné odchyšky $\pm\sigma_p$; vpravo: vliv interakce obou vlivů na $\pm\sigma_p$

Hlavní výstup z DOE pro stabilní hladinu napětí σ_{pl} je Obr. 88 a Obr. 89. V těchto konturových grafech je vidět závislost výrobních parametrů na stabilní hladině napětí σ_{pl} a jeho poměrné směrodatné odchyšky $\pm\sigma_p$. Z těchto grafů je vidět, že nejvyšší hodnoty σ_{pl} se dosahuje nízkou hodnotou přidaného CaCO₃ a delším časem míchání. Zároveň se tím rapidně snižuje poměrná směrodatná odchyška.

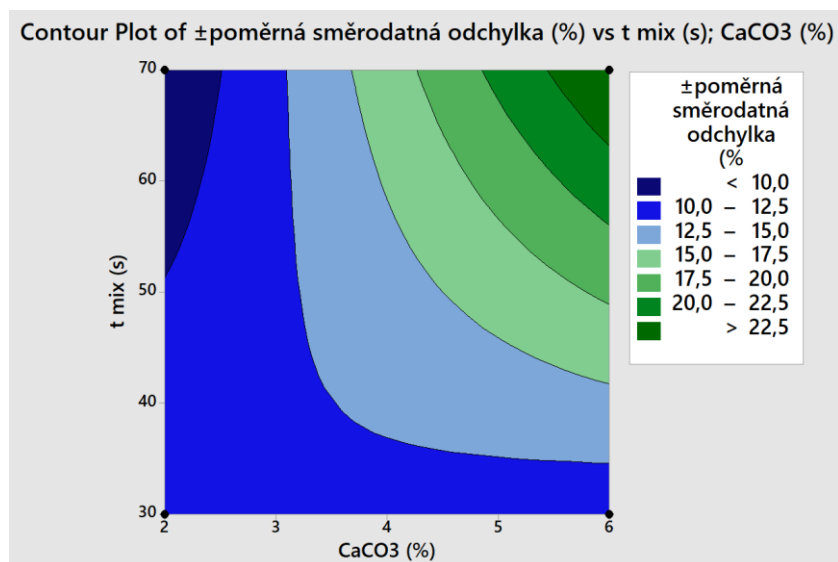
Výpočet stabilní hladiny napětí v závislosti na výrobních parametrech se řídí rovnicí 5.6, kde CaCO₃ se dosazuje v procentech a t_{mix} v sekundách.

$$\sigma_{pl} = -2,595 + 3,612CaCO_3 + 0,6638t_{mix} - 0,1361CaCO_3 \cdot t_{mix} \left(\frac{N}{mm^2} \right) \quad 5.6$$

Z grafů můžeme vyčíst, že pro získání nejvyšší možné hodnoty σ_{pl} a nejnižší poměrné směrodatné odchyšky získáme nastavení $t_{mix} = 70$ s; CaCO₃ = 2 %.



Obr. 88 Konturový graf výrobních parametrů jako funkce stabilní hladiny napětí σ_{pl}



Obr. 89 Konturový graf výrobních parametrů jako funkce poměrné směrodatné odchylky $\pm\sigma_p$ stabilní hladiny napětí σ_{pl}

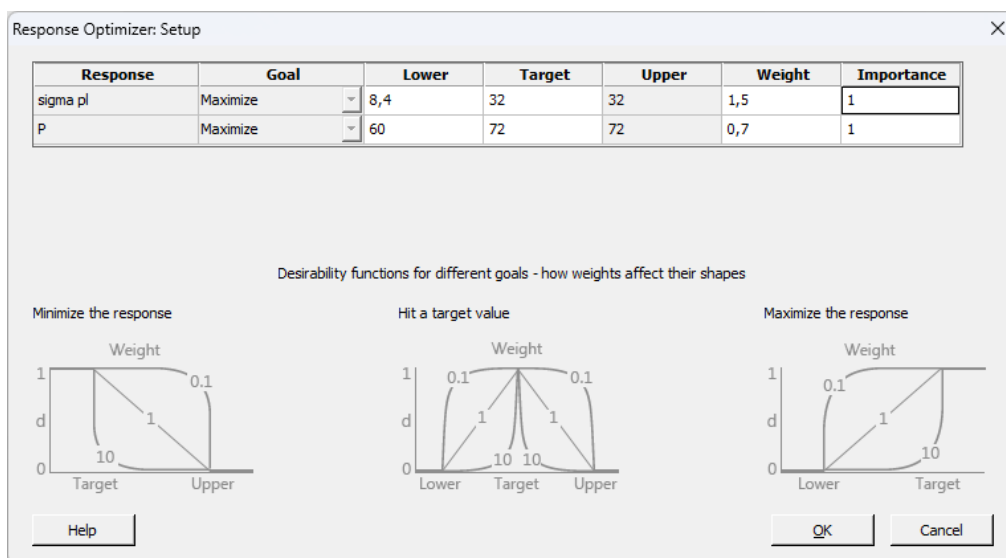
Z konturových grafů poměrných směrodatných odchylek pro P a σ_{pl} můžeme vyčíst, že se zvyšujícím časem se snižuje $\pm\sigma_p$, což potvrzuje předpoklad, že se zvyšuje promíchanost CaCO_3 v tavenině a to vede k více homogennímu rozložení i velikosti pórů.

5.4.2.3 Optimální nastavení

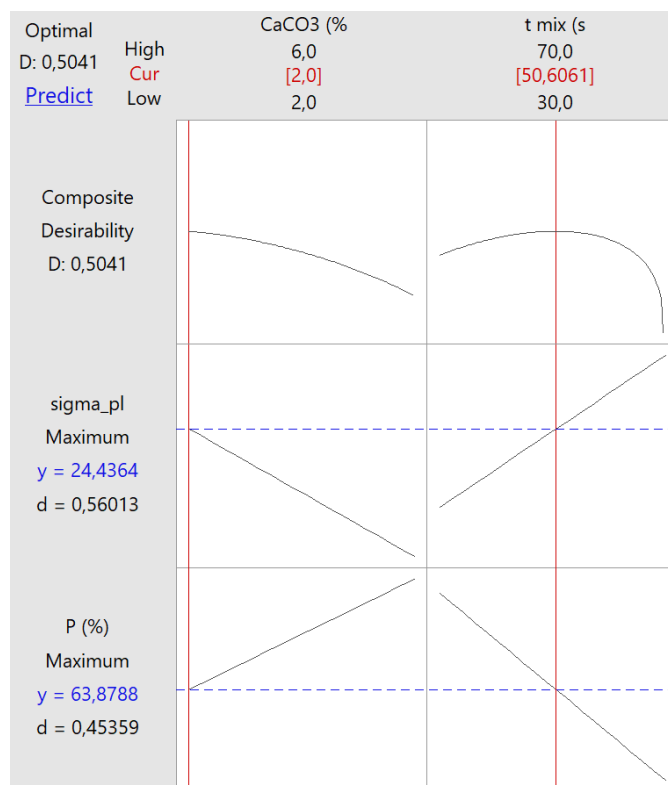
K hledání optimálního nastavení se v aplikaci Minitab 17 používá optimalizátor výstupů (response optimizer), který optimalizuje dané vstupy na požadovaných cílech (dosažení maximální hodnoty, minimální hodnoty nebo cílové hodnoty). Pro hledání optimálního nastavení je potřeba si nejdříve stanovit optimální hliníkovou pěnu. Obecně bývá snahou získání co nejlehčí hliníkové pěny při co nejvyšší pevnosti tzn. co nejvyšší hodnoty P a σ_{pl} . Proto jsem použil optimalizátor výstupů s cílem maximalizace obou hodnot na datech Tab. 12. Zvolené váhy pro optimalizaci parametrů jsem zvolil hodnotu 1,5 pro σ_{pl} a pórovitost 0,7. Pórovitost se pohybuje na dobrých číslech i při nižších dosažených hodnotách, ale σ_{pl} má vyšší variabilitu a vyšší potenciál dosáhnout vysoké hodnoty viz Obr. 90.

Tab. 12 Shrnutí hodnot P a σ_{pl}

Vzorek	CaCO_3 (%)	t_{mix} (s)	ϕ P (%)	$\phi \sigma_{pl}$ (N/mm ²)
1	2	30	68	16,4
2	6	30	65	14,5
3	2	70	60	32,0
4	6	70	72	8,4



Obr. 90 Nastavení optimalizátoru

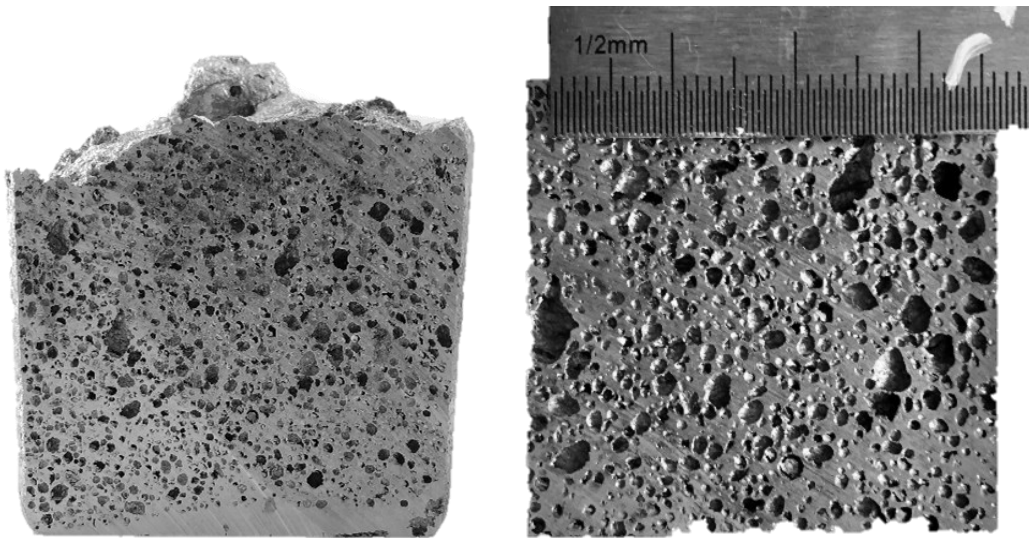


Obr. 91 Výsledek optimalizátoru

Dle Obr. 91 pomocí optimalizátoru výstupů bylo zjištěno optimální nastavení parametrů: 2 % CaCO₃ a 50 vteřin míchání. Tímto nastavením by mělo být dosaženo $\sigma_{pl} = 24,5$ N.mm⁻² a P=64 %.

Byla provedena tabva zjištěným optimálním nastavením viz Obr. 92, u které byla změřena P=65 %. Při porovnání velikosti a tvaru buněk s předešlými tabvami z DOE lze

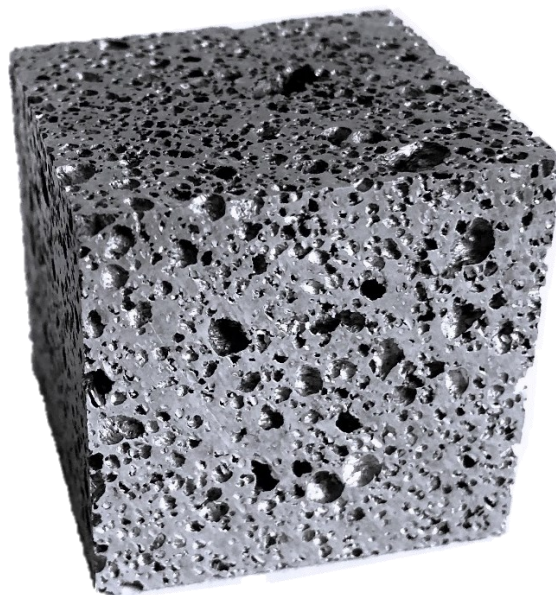
pozorovat, že póry odpovídají těm, které vykazovali vyšší σ_{pl} . Tato pěna byla následně rozřezána do tvaru krychle 40x40x40 mm.



Obr. 92 Vyrobená optimalizovaná hliníková pěna s detailem na póry

Z důvodu malého množství zbývající vsázky k provedení všech 3 hliníkových pěn nemá velký význam provádět zkoušku tlakem a ničení optimalizované hliníkové pěny. Proto vzorek této pěny je uchován na ukázkou (Obr. 92). Pro představu zvětšení objemu lze použít výpočet rovnicí 5.7, v kterém je vypočítán násobek nabytí objemu hliníkové pěny vůči základnímu materiálu, který v optimálním nastavení činí 2,9násobek.

$$V_{pěna} = x \cdot V_{zmat} \rightarrow x = \frac{V_{pěna}}{V_{zmat}} = \frac{V_{pěna}}{m \cdot \rho} = \frac{57,72}{54 \cdot 2,7} = 2,9 \quad 5.7$$



Obr. 93 Optimalizovaná nařezaná krychle 40x40x40 mm

6. Závěr a zhodnocení

V této diplomové práci jsem se zabýval výrobou hliníkových pěn pomocí práškových zpěňovadel ve fakultní slévárně na fakultě strojní ČVUT. Pomocí práškových zpěňovadel lze vyrobit hliníkovou pěnu několika způsoby, ale všechny se skládají ze dvou hlavních výrobních kroků. Stabilizace taveniny a zpěnění práškovým zpěňovadlem. Zvolil jsem obdobu metody Alporas, kterou se vyrábí bloky jednoduchých tvarů hliníkové pěny a v originální verzi se stabilizace provádí zamícháním prášku Ca do taveniny s následným přimícháním TiH_2 ke zpěnění. Já jsem modifikoval metodu Alporas a stabilizaci i zpěnění jsem provedl pouze v jednom kroku přidáním a zamícháním prášku $CaCO_3$. To výrazně zjednodušuje a zlevňuje výrobní proces. Provést stabilizaci a zpěnění v jednom kroku je možné díky reakci prvků po rozpadu $CaCO_3$ s taveninou hliníkové slitiny za vzniku intermetalických fází a oxidů, které taveninu stabilizují. Zároveň se generují plyny CO a CO_2 , které se ve stabilizované tavenině zachycují a tím tvoří hliníkovou pěnu s uzavřenými póry.

Stěžejním bodem k výrobě hliníkových pěn, které by se daly dále zkoumat je nalézt takový výrobní postup, který je do jisté míry opakovatelný, kontrolovatelný a vyrábí hliníkovou pěnu s co nejmenším množstvím defektů. K tomuto účelu jsem provedl sérii čítající přes 18 taveb, ve které jsem zjišťoval vlivy a různá nastavení proměnných například míchací zařízení, míchadla, rychlosti míchání, rozmezí časů míchání, časy pěnění, způsoby vkládání prášku, teploty, rozmezí % $CaCO_3$, atd. Jako základní materiál jsem použil hliníkovou slitinu AlSi5. Výrobní postup jsem nakonec ustálil na výrobním postupu popsáném v podkapitole 5.3.6.

Následně jsem provedl výrobu hliníkových pěn k evaluaci mechanických vlastností. Zkoumal jsem vliv % $CaCO_3$ a času míchání t_{mix} jako funkce Pórovitosti (P) a Stablní hladiny napětí (σ_{pl}) což jsou nejdůležitější veličiny z hlediska pevnostních charakteristik kovových pěn. Vyhodnocované proměnné (% $CaCO_3$ a t_{mix}) jsem vyhodnotil dle rešerše a průzkumných experimentů jako nejlivnější parametry. K provedení a vyhodnocení experimentům jsem zvolil statistickou metodiku „Design of experiment“ (DOE). DOE je účinný nástroj umožňující provedení co nejnižšího počtu pokusů se získáním funkcí jednotlivých parametrů, tak i jejich interakcí pomocí minimálních a maximálních hodnot v daných intervalech proměnných. Zvolil jsem typ DOE plný faktoriál s dvěma proměnnými a dvěma hladinami, který předpokládá lineární průběh, který lze očekávat). Pro provedení DOE jsem si stanovil maximum a minimum obou zkoumaných proměnných (2–6 % $CaCO_3$; 30–70 s t_{mix}). Provádění experimentů touto

metodou spočívá v provádění a vyhodnocování všech možných kombinací proměnných v minimu a maximu. Tyto experimenty jsem 3x zopakoval k zjištění směrodatné odchylky. Experimentů jsem provedl celkem dvanáct. Hliníkové pěny z DOE jsem následně rozřezal na kvádry 15x15x30mm, které jsem následně přesně přeměřil a zvažil k vyhodnocení pórovitosti P (%) a poté provedl tlakovou zkoušku dle ISO 13314 k získání diagramů závislosti napětí σ ($\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$) na stlačení e (%). Z těch jsem následně vyhodnotil jednotlivé stabilní hladiny napětí σ_{pl} dle normy jako průměrnou hodnotu napětí mezi $e_1=20$ % a $e_2=30$ %. Z těchto hodnot jsem vytvořil tabulky (Tab. 10 a Tab. 11) na jejichž základě jsem provedl DOE pomocí aplikace Minitab 17. Výsledky DOE jsou závislosti proměnných % CaCO_3 a t_{mix} na P a σ_{pl} rovnicí i konturovou mapou k vizualizaci. Následně na základě shrnutí průměrných hodnot v Tab. 12. jsem použil funkci optimalizátoru proměnných k získání maximální hodnoty σ_{pl} s váhou 1,5 a maximální hodnoty P s váhou 0,8 protože hodnoty % P jsou relativně vysoké i při spodních dosažených hodnotách (nejnižší 60 %). Z optimalizátoru proměnných jsem získal optimální nastavení 2 % CaCO_3 a dobu míchání $t_{mix}=50$ s. Pěna vyrobená tímto nastavením by měla dosahovat $P=64$ % a $\sigma_{pl}=24,5$ N/mm^2 . Vyrobil jsem kontrolní hliníkovou pěnu s tímto nastavením a získal hodnotu $P=65$ %. Z důvodu zbylé vsázky pouze na jednu tavbu hodnotím správnost DOE pouze měřením pórovitosti, tvarem a velikostí pórů. Z výsledku P je vidět, že hodnoty jsou téměř totožné. Také póry jsou podobné jako ve vzorcích, které dosahovali nejvyšších σ_{pl} . Tudíž hodnotím provedení DOE.

Během práce se podařilo splnit všechny cíle zadání od teoretického popisu vlivů hlavních proměnných, na jejichž základě jsem navrhl jednodušší, rychlejší a levnější výrobní postup, přes optimalizování tohoto výrobního postupu do funkčního a opakovatelného stavu, který jsem následně použil na provedení experimentů ke zkoumání vlivů výrobních parametrů na hlavních charakteristikách hliníkové pěny, až po vyhodnocení optimálního nastavení k získání nejvyšších mechanických vlastností.

7. Bibliografie

- [1] RAJAK, Dipen Kumar a Manoj GUPTA. *An Insight Into Metal Based Foams* [online]. Singapore: Springer Singapore, 2020 [cit. 2023-03-06]. Advanced Structured Materials. ISBN 978-981-15-9068-9. Dostupné z: doi:10.1007/978-981-15-9069-6
- [2] URBAN, Tomáš. *Studium porézních struktur v přírodních objektech* [online]. Liberec, 2013 [cit. 2023-04-01]. Dostupné z: https://dspace.tul.cz/bitstream/handle/15240/13062/bc_26311.pdf?sequence=1. Bakalářská práce. Technická univerzita v Liberci.
- [3] KROUPOVÁ, Ivana. *Využití slévárenské technologie při výrobě kovových pěn s nepravidelnou vnitřní strukturou*. Ostrava, 2022. Habilitační práce. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava.
- [4] BANHART, John. Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams. *Progress in Materials Science* [online]. 2001, **2001**(46), 74 [cit. 2023-06-24]. Dostupné z: doi:10.1016/S0079-6425(00)00002-5
- [5] Properties of metal foams. In: *Metal Foams: Design Guide* [online]. 1. Butterworth-Heinemann: Elsevier, 2000, s. 40-54 [cit. 2022-03-13]. ISBN 9780750672191. Dostupné z: doi:10.1016/B978-075067219-1/50006-4
- [6] ČSN ISO 13314. *Mechanické zkoušení kovů – Zkoušení tvárnosti – Zkouška porézních a pěnových kovů tlakem*. První. Ženeva: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [7] Duocel Foam Applications. In: *Ergaerospace* [online]. USA [cit. 2023-04-03]. Dostupné z: <https://ergaerospace.com/metal-foam-applications/>
- [8] SIMANCIK, Frantisek, Walter RAJNER a Rainhard LAAG. *Alulight - Aluminum Foam for Lightweight Construction* [online]. In: . s. - [cit. 2023-04-03]. ISSN 0148-7191. Dostupné z: doi:10.4271/2000-01-0337
- [9] MIYOSHI, T., M. ITOH, S. AKIYAMA a A. KITAHARA. Aluminum Foam, “Alporas”: The Production Process, Properties and Applications. *MRS Proceedings* [online]. 1998, **521** [cit. 2023-04-03]. ISSN 0272-9172. Dostupné z: doi:10.1557/PROC-521-133

- [10] MACEK, Karel, Jiří JANOVEC, Peter JURČI a Petr ZUNA. *Kovové materiály*. Vyd. 1. V Praze: Nakladatelství ČVUT, 2006. ISBN 80-01-03513-1.
- [11] Číselné označování hliníku a jeho slitin. In: *Bolzano* [online]. Kladno: Bohdan Bolzano s.r.o., 2020 [cit. 2023-07-31]. Dostupné z: https://bbolzano.cz/assets/files/Hlinikove_slitiny.pdf
- [12] BYAKOVA, Alexandra, Svyatoslav GNYLOSKURENKO, Andrey VLASOV, Yan YEVYCH a Nikolay SEMENOV. The Mechanical Performance of Aluminum Foam Fabricated by Melt Processing with Different Foaming Agents: A Comparative Analysis. *Metals* [online]. 2022, **2022**(8), 10 [cit. 2023-06-13]. Dostupné z: doi:10.3390/met12081384
- [13] C. CURRAN, David. *Aluminium foam production using calcium carbonate as a foaming agent* [online]. Cambridge, 2004 [cit. 2022-03-14]. Dostupné z: <https://www.repository.cam.ac.uk/handle/1810/252945>. Disertační práce. University of Cambridge.
- [14] BISHT, Ankur, Brijesh GANGIL a Vinay Kumar PATEL. Selection of blowing agent for metal foam production: A review. *Journal of Metals Materials and Minerals* [online]. 2020, **2020**(1), 1-10 [cit. 2023-03-06]. ISSN 8576149. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.55713/jmmm.v30i1.597>
- [15] VERMA, Karan Singh, Dilip MUCHHALA, Sanjay Kumar PANTHI a D. P. MONDAL. Influences of Cell Size, Cell Wall Thickness and Cell Circularity on the Compressive Responses of Closed-Cell Aluminum Foam and its FEA Analysis. *International Journal of Metalcasting* [online]. 2022, **16**(2), 798-813 [cit. 2023-03-06]. ISSN 1939-5981. Dostupné z: doi:10.1007/s40962-021-00627-2
- [16] GERGELY, V. a B. CLYNE. The FORMGRIP Process: Foaming of Reinforced Metals by Gas Release in Precursors. *Adv. Eng. Mater.* [online]. 2000, **2**(4), 175-178 [cit. 2023-07-29]. Dostupné z: doi:10.1002/(SICI)1527-2648(200004)2:4<175::AID-ADEM175>3.0.CO;2-W
- [17] GERGELY, V., D.C. CURRAN a T.W. CLYNE. The FOAMCARP process: foaming of aluminium MMCs by the chalk-aluminium reaction in precursors. *Composites Science and Technology* [online]. 2003, **63**(16), 2301-2310 [cit. 2023-07-29]. ISSN 0266-3538. Dostupné z: doi:10.1016/S0266-3538(03)00263-X.

- [18] ZYRYANOVÁ, Irina. *Lité kovové pěny z Al slitin* [online]. Ostrava, 2011 [cit. 2022-03-13]. Dostupné z: <https://dspace.vsb.cz/handle/10084/87705>. Diplomová práce. Technická univerzita Ostrava.
- [19] Flat Panel Process. In: *Cymat* [online]. [cit. 2022-03-14]. Dostupné z: <https://www.cymat.com/technology-production-process/>
- [20] BRYANT, J. Daniel, Jacob A. KALLIVAYALIL, Mark D. CROWLEY, Joseph R. GENITO, Larry F. WIESERMAN, Deborah Murphy WILHEMY a William E. BOREN, JR. *Method for producing foamed aluminum products by use of selected carbonate decomposition products*. United States. US007452402B2. Přihlášeno 29.4.2005. Uděleno 18.11.2008. Dostupné také z: <https://patentimages.storage.googleapis.com/a7/fd/fd/1ea4d01effa010/US7452402.pdf>
- [21] BYAKOVA, Alexandra V., A. SIRKO, Konstantine MYKHALENKOV, Yu V. MILMAN, Svyatoslav GNYLOSKURENKO a T. NAKAMURA. Improvements in Stabilisation and Cellular Structure of Al based Foams with Novel Carbonate Foaming Agent. *High Temperature Materials and Processes* [online]. 2006, **2007**(26), 8 [cit. 2023-06-13]. Dostupné z: <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/HTMP.2007.26.4.239/html#Vancouver>
- [22] BYAKOVA, Aleksandra V., Svyatoslav V. GNYLOSKURENKO, Alexander I. SIRKO, Yuliy V. MILMAN a Takashi NAKAMURA. The Role of Foaming Agent in Structure and Mechanical Performance of Al Based Foams. *MATERIALS TRANSACTIONS* [online]. 2006, **2006**(47), 9 [cit. 2023-06-13]. Dostupné z: doi:10.2320/matertrans.47.2131
- [23] NAKAMURA, Takashi, Svyatoslav V. GNYLOSKURENKO, Kazuhiro SAKAMOTO, Aleksandra V. BYAKOVA a Ryoichi ISHIKAWA. Development of New Foaming Agent for Metal Foam. *Materials Transactions* [online]. 2002, **2002**(43), 6 [cit. 2023-06-18]. Dostupné z: doi:10.2320/matertrans.43.1191
- [24] Uhličitan vápenatý srážený p.a. , 1000 g. In: *Mach chemikálie* [online]. Ostrava: MACH CHEMIKÁLIE spol. s r.o., 2018 [cit. 2023-07-30]. Dostupné z: <https://www.eshop.mach-chemikalie.cz/laboratorni-chemikalie/uhlicitan-vapenaty-srazeny-p-a-1000-g-detail>

- [25] POWERPLUS POWC6021. In: *Heureka* [online]. web [cit. 2023-07-13]. Dostupné z: <https://michadla.heureka.cz/powerplus-powc6021/#specifikace/>
- [26] Přesné váhy 440. In: *UNIPRO-ALPHA* [online]. web [cit. 2023-07-13]. Dostupné z: <https://vahy-kern.cz/produkty/kern-laboratorni-vahy/presne-vahy/440-presne-vahy>
- [27] ProfiCut 275.230 DG. In: *BOMAR, spol. s r.o.* [online]. web: BEC Solution Group [cit. 2023-07-16]. Dostupné z: <https://bomar-saws.com/cz/produkty/proficut/proficut-275-230-dg.html>
- [28] LABOTOM. In: *Struers* [online]. web [cit. 2023-07-13]. Dostupné z: <https://www.struers.com/en/Products/Cutting/Cutting-equipment/Labotom#>
- [29] *Labortech* [online]. web: Labortech, 2020 [cit. 2023-07-16]. Dostupné z: <https://www.labortech.cz/>
- [30] DURAKOVIC, Benjamin. Design of Experiments Application, Concepts, Examples: State of the Art. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences* [online]. 2018, **2017**(5), 19 [cit. 2023-06-18]. ISSN 2303-4521. Dostupné z: doi:10.21533/pen.v5i3.145
- [31] UY, Manny a Jacqueline K. TELFORD. Optimization by Design of Experiment techniques. *IEEE Aerospace Conference Proceedings* [online]. 2009, 10 [cit. 2023-06-18]. Dostupné z: doi:10.1109/aero.2009.4839625

8. Seznam tabulek

Tab. 1 Souhrn historických milníků kovových pěn [1].....	14
Tab. 2 Význam písmen pro značení základního stavu [11]	23
Tab. 3 Značení technicky čistého hliníku [10]	24
Tab. 4 Nejdůležitější stavy tepelně zpracovatelných hliníkových slitin [11]	25
Tab. 5 Výčet tvářených slitin hliníku [10]	25
Tab. 6 Značení slévárenských slitin hliníku [10]	27
Tab. 7 Přehled výrobních materiálů, mikrostruktury a kontaminujících produktů při použití TiH ₂ a Ca [12]	44
Tab. 8 Přehled výrobních materiálů, mikrostruktury a kontaminujících produktů při použití CaCO ₃ [12].....	47
Tab. 9 Vyhodnocovaný Full Faktoriál DOE	69
Tab. 10 Hodnoty pórovitosti a směrodatné odchyly z DOE	75
Tab. 11 Hodnoty stabilní hladiny napětí σ_{pl} a směrodatné odchyly z DOE.....	77
Tab. 12 Shrnutí hodnot P a σ_{pl}	79

9. Seznam obrázků

Obr. 1 vlevo: Snímek vnějšího povrchu skeletu ježovky černé (zvětšeno 100x); vpravo: Snímek vnitřní struktury borky borovice lesní (zvětšeno 150x) [2]	13
Obr. 2 Diagram vysvětlení pomocí disperze jedné fáze do druhé [3].....	16
Obr. 3 Vlevo – struktura pěny s uzavřenými póry; vpravo – pěna s otevřenými póry [3].....	16
Obr. 4 Teoretický průběh tlakové zkoušky kovových pěn [1]	17
Obr. 5 Teoretický průběh tahové zkoušky kovových pěn pro podélné a příčné směry zatížení [1]	18
Obr. 6 Schématická ukázka průběhu napětí na stlačení z normy ČSN ISO 13314 [6].....	19
Obr. 7 Závislost druhu aplikace na vzájemné propojenosti pórů [3].....	20
Obr. 8 Vzduchové odlučovače oleje [7].....	20
Obr. 9 Akustické použití [7]	20
Obr. 10 Výměník tepla [7]	20
Obr. 11 Omezovače hoření [7]	20
Obr. 12 konstrukce pohlcující zvuk na spodní straně nadzemního viaduktu [9].....	21
Obr. 13 Rozdíl vlastností trubky vyztužené hliníkovou pěnou [8]	21
Obr. 14 Závěsná část tlumiče vyztužená hliníkovou pěnou [8].....	21
Obr. 15 Část rovnovážného diagramu soustavy Al-X s čarami rozpustnosti GPZ a fáze β' [10]	23
Obr. 16 Křivky tlakového napětí pro pěny F1, F3, F5, F7, F9 zpracované hydridem titanu TiH_2 a pěny F2, F4, F6, F8, F10 vyrobené s uhličitánem vápenatým $CaCO_3$, všechny provedené s různými výchozími slitinami, jako jsou a) čistý Al (F1, F2), slitina Al-7Si (F3, F4), slitina Al-1Mg-0,6Si (F5, F6) a b) Al-5,5Zn-3Mg (Sc,Zr) (F7, F8), Al-6Zn-2,3Mg (F9, F10). [12].....	28
Obr. 17 Rozdělení dle výchozího kovového materiálu [4]	29
Obr. 18 Pět hlavních výrobních metod výroby kovových pěn [1].....	30
Obr. 19 Diagram výrobních procesů hliníkových pěn pomocí práškového zpěňovadla [13] ..	31
Obr. 20 Jednotlivé kroky při formování pěny [14]	32
Obr. 21 Detailní popis struktury pórů [15].....	32
Obr. 22 Vnitřní struktura metody Alporas [9]	34
Obr. 23 Výrobní postup pro metodu Alporas [3]	34
Obr. 24 Výrobní proces metody Formgrip [16]	35

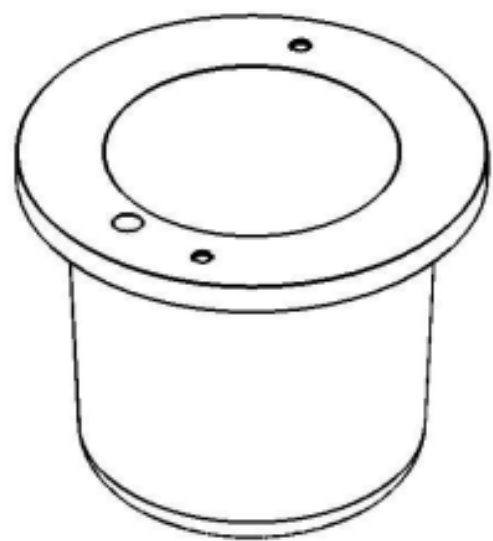
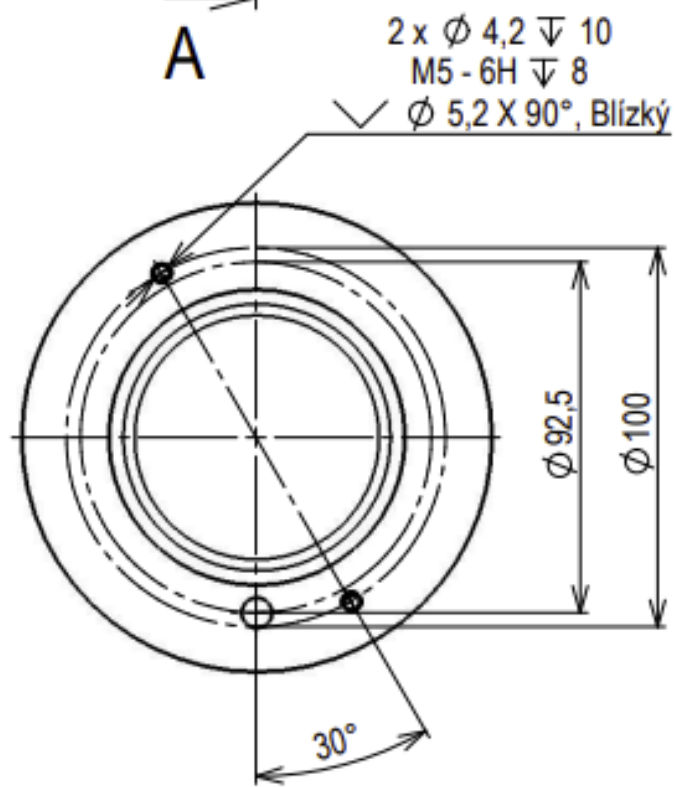
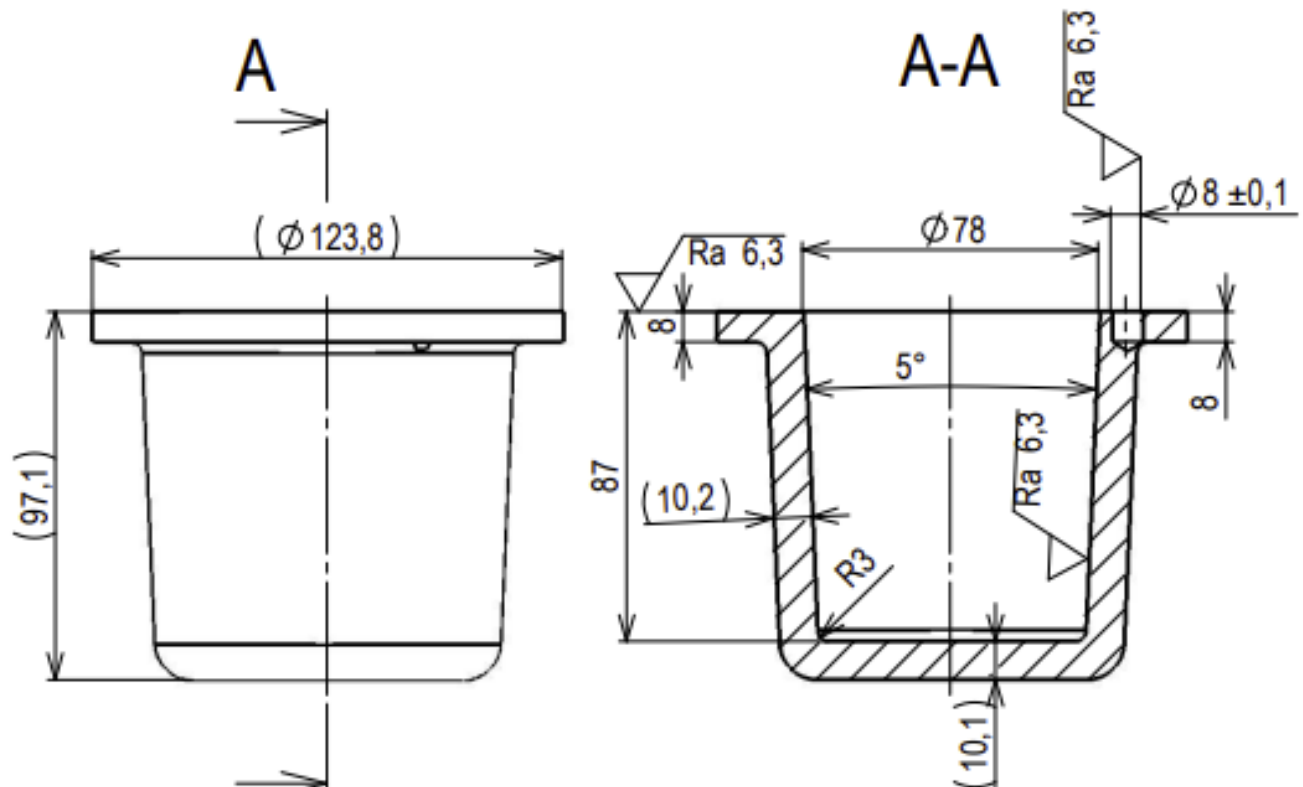
Obr. 25 Příklad pěny vzniklé pomocí metody Foamcarp ukazující závislost velikosti SiC částic v tavenině na výsledku pěnění [17].....	35
Obr. 26 Proces výroby metodou Cymat/Hydro [18]	36
Obr. 27 Příklad struktury metodou Hydro [19]	37
Obr. 28 dvoufázový eutektický diagram kov-plyn [18]	37
Obr. 29 Výrobní proces metody Gasar [18]	38
Obr. 30 Struktura dosahovaná výrobní metodou Gasar [18]	38
Obr. 31 Závislost vyrovnaného napětí na velikosti pórů [15]	40
Obr. 32 Závislost vyrovnaného napětí na faktoru kruhovitosti [15]	40
Obr. 33 Ukázka vlivu na experimentu	41
Obr. 34 porovnání tlakové zkoušky pro ZAM s a bez přidání Ca jako stabilizátoru [22]	42
Obr. 35 SEM stěny póru hliníkové pěny vyrobené TiH ₂ [22].....	43
Obr. 36 Schéma rozkladu CaCO ₃ v tavenině [20]	45
Obr. 37 Mikrostruktura hliníkové pěny ze základní ZAM materiálu zpěněné pomocí CaCO ₃ [22]	46
Obr. 38 Schématický postup výroby	49
Obr. 39 Nádoba 1 kg uhličitanu vápenatého použitého k výrobě [24].....	49
Obr. 40 3D model kokily s víkem.....	50
Obr. 41 Foto výsledných vyrobených kokil	51
Obr. 42 Proces výroby litinových kokil	51
Obr. 43 Výsledek analýzy slitiny hliníku	51
Obr. 44 Navážené a nařezané polotovary.....	52
Obr. 45 Míchací zařízení s proměnnými otáčkami [25]	52
Obr. 46 Vrtačka se sklíčidlem Bosch PSB 400 ze slévárenské dílny	53
Obr. 47 Váha Kern 440-49A [26]	53
Obr. 48 Parametry přesné váhy Kern 440-49A [26].....	53
Obr. 49 Indukční pec Inductotherm	54
Obr. 50 Zdroj a řídicí jednotka k indukční peci Inductotherm	54
Obr. 51 Pásová pila Bomar Proficut 275.230 DG	55
Obr. 52 Specifikace pásové pily Bomar Proficut 275.230 DG [21]	55
Obr. 53 Laboratorní pila Struers Labotom-3	56
Obr. 54 Zkušební zařízení LabTest 5.100 SP1.....	56

Obr. 55	Termočlánek Ni-CrNi	57
Obr. 56	1. série experimentů ve školní dílně – 1. část	57
Obr. 57	1. série experimentů ve školní dílně – 2. část	58
Obr. 58	1. pokus DOE s neoptimalizovaným výrobním procesem.....	58
Obr. 59	2. Série průzkumných experimentů - 1. část.....	59
Obr. 60	2. Série průzkumných experimentů - 2. část.....	59
Obr. 61	2. Série průzkumných experimentů - 3. část.....	59
Obr. 62	2. Série průzkumných experimentů - 4. část.....	60
Obr. 63	Zkoumaná míchadla. Vlevo nakoupené míchadlo na barvy a stavební směs, uprostřed míchadlo z tlustého drátu, vpravo míchadlo z tenkého drátu.....	60
Obr. 64	Zkoumaná míchadla z tenkého svařovacího drátu o průměru 3 mm.....	60
Obr. 65	Míchací spirála na barvy a stavební směsi	61
Obr. 66	Pěna se "spálenými póry" a vysokou vrstvou stečení.....	63
Obr. 67	Kulička alobalu se zabaleným práškem CaCO ₃ na slévárenské váze.....	63
Obr. 68	Schéma výsledného funkčního výrobního postupu	65
Obr. 69	Přehled proměnných a jejich fixace	68
Obr. 70	Pěny vytvořené parametry dle DOE.....	69
Obr. 71	Schématické znázornění zkušební vzorku.....	70
Obr. 72	Detail struktury pórů pro jednotlivé parametry	70
Obr. 73	Nařezané vzorky z hliníkové pěny – pohled z boku	71
Obr. 74	Nařezané vzorky z hliníkové pěny – pohled shora	71
Obr. 75	Fotky z průběhu tlakové zkoušky	71
Obr. 76	Tlakové zkoušky parametrů DOE č. 1 (3 opakování).....	72
Obr. 77	Tlakové zkoušky parametrů DOE č. 2 (3 opakování).....	72
Obr. 78	Tlakové zkoušky parametrů DOE č. 3 (3 opakování).....	73
Obr. 79	Tlakové zkoušky parametrů DOE č. 4 (3 opakování).....	73
Obr. 80	Porovnání tlakových zkoušek	74
Obr. 81	Závislost stabilní hladiny napětí na pórovitosti.....	74
Obr. 82	Vlevo: vliv jednotlivých parametrů na P (%); vpravo: vliv interakce vlivů na P (%)	75
Obr. 83	Vliv jednotlivých parametrů na směrodatné odchylce $\pm\sigma_p$; vpravo: vliv interakce obou vlivů na $\pm\sigma_p$	76
Obr. 84	Konturový graf výrobních parametrů jako funkce pórovitosti	76

Obr. 85 Konturový graf výrobních parametrů jako funkce směrodatné odchylky pórovitosti	77
Obr. 86 Vlevo: Vliv jednotlivých parametrů na hladině stabilního napětí (N/mm^2); vpravo: vliv interakce vlivů na stabilní hladině napětí (N/mm^2)	77
Obr. 87 Vliv jednotlivých parametrů na poměrné směrodatné odchylce $\pm\sigma_p$; vpravo: vliv interakce obou vlivů na $\pm\sigma_p$	78
Obr. 88 Konturový graf výrobních parametrů jako funkce stabilní hladiny napětí σ_{pl}	78
Obr. 89 Konturový graf výrobních parametrů jako funkce poměrné směrodatné odchylky $\pm\sigma_p$ stabilní hladiny napětí σ_{pl}	79
Obr. 90 Nastavení optimalizátoru	80
Obr. 91 Výsledek optimalizátoru	80
Obr. 92 Vyrobená optimalizovaná hliníková pěna s detailem na póry	81
Obr. 93 Optimalizovaná nařezaná krychle 40x40x40 mm	81

10. Přílohy

1. VÝKRES – FORMA
2. VÝKRES – VÍKO
3. VÝKRES – OPTIMALIZOVANÉ MÍCHADLO
4. Tabulka – Souhrn prováděných experimentů



(Ra 6,3)

MATERIÁL: EN-GJL-150		ISO 13715		+0.1		+0.1			
POLOTOVAR: ODLITEK		-0.1		-0.1					
TOL. DLE ISO 8015	ISO 14405-1								
PŘESNOST ISO 2768 - mK	ISO 14405-3								
VŠEB. TOL. ISO 8062 -									
AUTOR	DATUM	PODPIS	DATUM	HMOTNOST	2,59	kg	MÉRITKO	1:2	
NAVRHL Geyer	6.4.2023	PŘEZK.		SESTAVA			PROMÍTÁNÍ: (ISO E)		
KRESLIL Geyer		SCHVÁLIL		SEZNAM ČÁSTÍ			TYP: VV		

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ

NÁZEV **FORMA**
 ČÍSLO VÝKRESU **1**
 LIST: 1/1

CHRÁNĚNO DLE ISO 16016

1 2 3 4

A

2x Ø5,8 SKRZ

4x Ø3 SKRZ

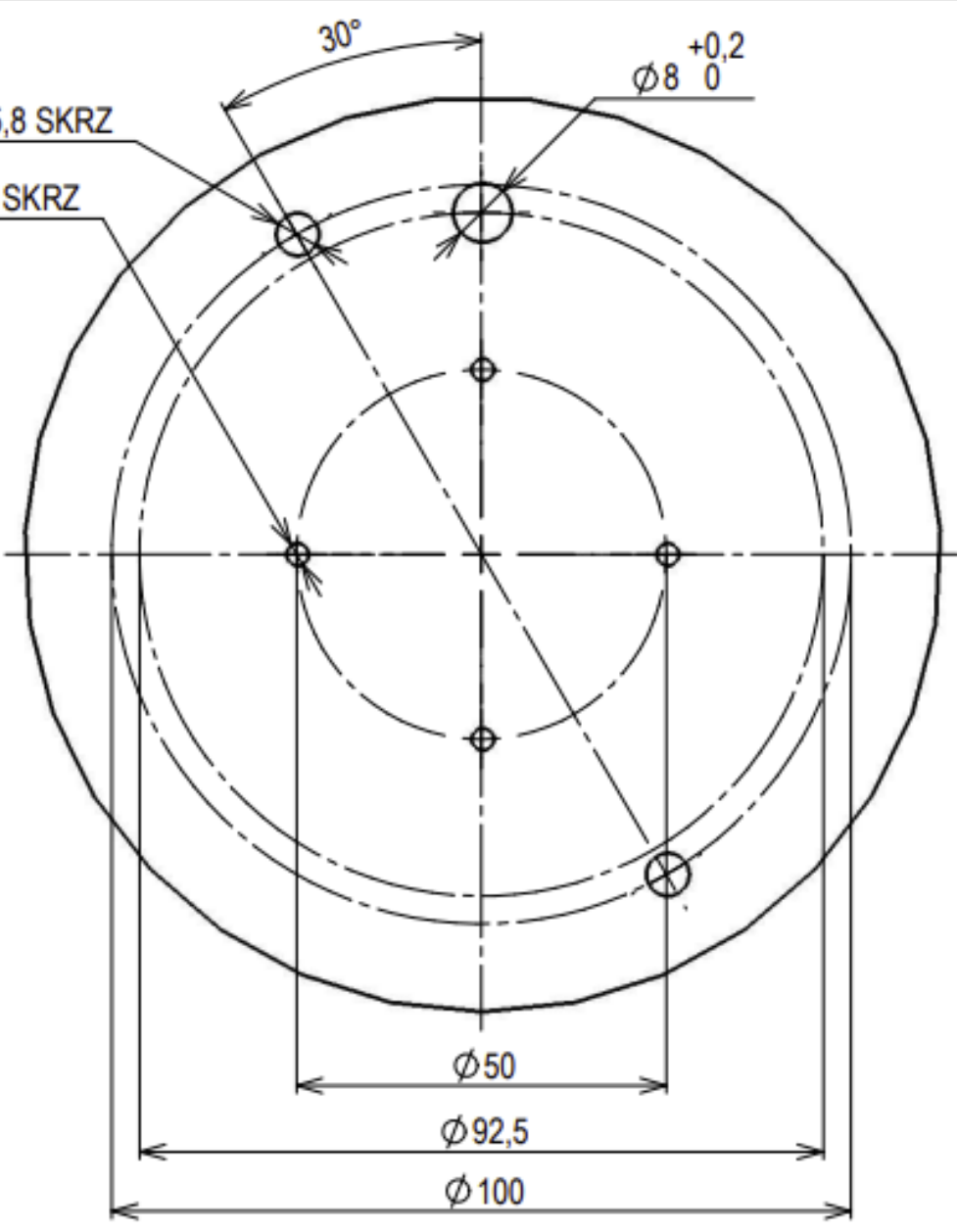
30°

Ø8 ^{+0,2}/₀

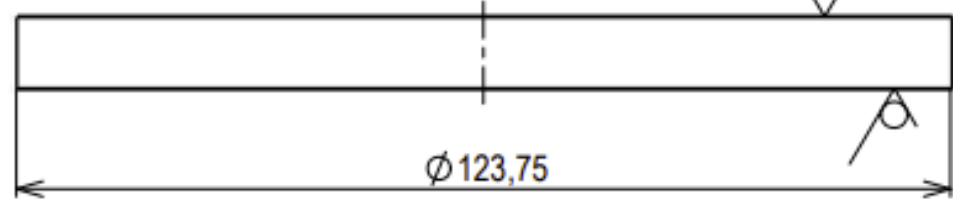
B

C

D

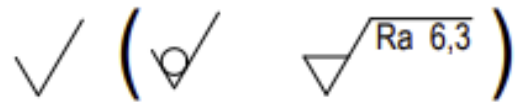


Ra 6,3



Ø 123,75

E - ODEBRAT STRANU, KTERÁ JE V KONTAKTU S KOKILOU



MATERIÁL: E295	
POLOTOVAR: P10 - 1000x2000 ČSN 42 5310	
TOL. DLE ISO 8015	ISO 14405-1
PŘESNOST ISO 2768 - mK	ISO 14405-3
VŠEB. TOL. ISO 8062 -	

ISO 13715	+0.1	+0.1
	-0.1	-0.1

NOVĚ	ZMĚNA	DATUM	PODPIS

AUTOR	DATUM	PODPIS	DATUM	HMOTNOST	0,89 kg	MĚŘITKO	1:1
NAVRHL Geyer	6.4.2023	PŘEZK.		SESTAVA		PROMĚTÁNÍ:	⊕ (ISO E)
KRESLIL Geyer		SCHVÁLIL		SEZNAM ČÁSTÍ			TYP: VV

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ

NÁZEV **VÍKO**
 ČÍSLO VÝKRESU **2**
 LIST: 1/1

CHRÁNĚNO DLE ISO 16016

1 2 3 4

1 2 3 4

A

A

B

B

C

C

D

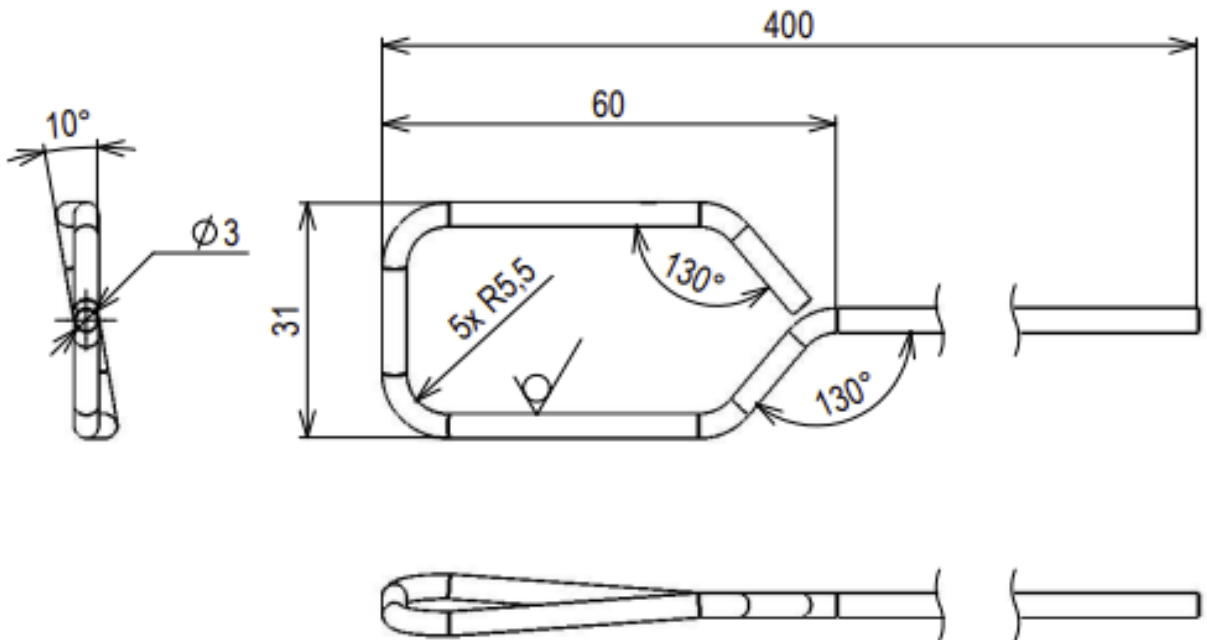
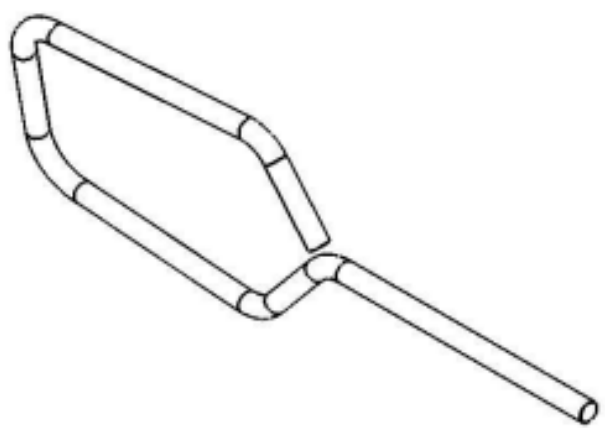
D

E

E

F

F



ROZVINUTÁ DÉLKA 485 mm

√ Ra 6.3 (√)

MATERIÁL: AISI 316L		ISO 13715		+0.3 +0.3					
POLOTOVAR: Svařovací drát d3 - AWS A 5.9 ER 316 LSI		-0.3 -0.3							
TOL. DLE ISO 8015		ISO 14405-1							
PŘESNOST ISO 2768 - mK		ISO 14405-3							
VŠEB. TOL. ISO 8062 -						INDEX		ZMĚNA	
AUTOR		DATUM		PODPIS		DATUM		HMOTNOST 0,01 kg	
NAVRHL Michal Geyer		PŘEZK.				MĚŘITKO 1:1			
KRESLIL Michal Geyer		SCHVÁLIL				SESTAVA		TYP: VV	
						SEZNAM ČÁSTÍ		PROMĚTÁNÍ: (ISO E)	



NÁZEV OPTIMALIZOVANÉ MÍCHADLO
TYP: VV
ČÍSLO VÝKRESU 3
LIST: 1/1

CHRÁNĚNO DLE ISO 16016

1 2 3 4

č. ex.	CaCO ₃ (%)	čas míchání (min)	čas pěníení (min)	teplota	Způsob vkládání	Míchadlo	Problém	Poznámka
1	6	2,5	3	nehlídána	Nasypání na hladinu	Na barvy a stavební směsi	Ulpění klubka prášku na hladině, víření taveniny, vyjímání pěny z kokily kvůli tvaru míchadla	Mícháno míchacím zařízením s proměnnými otáčkami
2	6	5; 0,7	3	nehlídána	Nasypání na dno kokily	Indukce; Tlustý drát (d6) tvaru L	Indukcí nezamícháno, víření taveniny, vysoká vrstva stečení	Změna míchacího zařízení na vrtačku Bosch
3	3	1	2,5	nehlídána	Ponořením v alobalu	tenký drát (d3) tvaru L	Prášek nestihl doputovat až na dno a došlo k rozfoukání do ovzduší	
4	3	2	1	nehlídána	V alobalu na dně kokily	tenký drát (d3) tvaru háku (č. 2)	žádný	zatím nejlepší výsledek – použito jako reference
5	10	6	1	nehlídána	V alobalu na dně kokily	tenký drát (d3) tvaru háku (č. 2)	Struskovitý charakter, černé "spálené" póry, vznik strusky na hladině taveniny	
6	10	1,3	2,5	nehlídána	V alobalu na dně kokily	tenký drát (d3) tvaru háku (č. 2)	Struskovitý charakter, černé "spálené" póry, vznik strusky na hladině taveniny	
7	1	1	2	nehlídána	V alobalu na dně kokily	tenký drát (d3) tvaru háku (č. 3)	Velmi roztříštěná tavenina, nedošlo vůbec k napěnění, ale k upění taveniny ve tvaru víru ke kokile	Míchadlo značně vířilo taveninu
8	1	1	do zpěníení	nehlídána	V alobalu na dně kokily	tenký drát (d3) tvaru háku (č. 4)	Nadměrně vysoká vrstva stečení	Míchadlo trochu vyrovnáno a k víření již docházelo méně, větší objem taveniny než u předchozích
9	3	2	1	Nehlídána naměřeno 740 °C	V alobalu na dně kokily	tenký drát (d3) tvaru háku (č. 4)	Nadměrně vysoká vrstva stečení	Pokus o zopakování experimentu č. 4.
10	3	2	bez zpěníení	nehlídána naměřeno 670 °C	V alobalu na dně kokily	tenký drát (d3) tvaru háku (č. 4)	Nadměrně vysoká vrstva stečení, malé zpěníení	Ochlazení na vzduchu
11	3	1	do zpěníení	640 °C	V alobalu na dně kokily	tenký drát (d3) tvaru háku (č. 9)	bublina uprostřed	
12	3	1	do zpěníení	640 °C	V alobalu na dně kokily	tenký drát (d3) tvaru háku (č. 5)	Velká bublina u strany	Vyndávání míchadla ze strany kokily
13	3	1	do zpěníení	640 °C	V alobalu na dně kokily	tenký drát (d3) tvaru háku (č. 10)	bublina uprostřed	Vyndání středem při točení
14	3	1	do zpěníení	640 °C	V alobalu na dně kokily	tenký drát (d3) tvaru háku (č. 12)	Porušené póry	Vyndávání míchadla ze strany kokily
15	3	1	do zpěníení	nehlídána	V alobalu na dně kokily	tenký drát (d3) tvaru háku (č. 13)	Velká vrstva stečení, porušené póry	
16	3	1	do zpěníení	640 °C	V alobalu na dně kokily	tenký drát (d3) tvaru háku (č. 10)	Porušené póry	
17	3	1	do zpěníení	640 °C	V alobalu na dně kokily	tenký drát (d3) tvaru háku (č. 11)	Porušené póry	
18	3	1	do zpěníení	640 °C	V alobalu na dně kokily	tenký drát (d3) tvaru háku (č. 9)		Opakování experimentu č. 11 - vyšla stejně, kontrola před DOE