



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

VÝVOJ STRATEGIÍ PRO VÝROBU PRUTOVÝCH STRUKTUR TECHNOLOGIÍ WAAM

DEVELOPMENT OF STRATEGIES FOR WIRE ARC ADDITIVE MANUFACTURING OF LATTICE STRUCTURES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Martin Kouba

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jakub Slaviček

BRNO 2026

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav konstruování
Student: **Bc. Martin Kouba**
Studijní program: Konstrukční inženýrství
Studijní obor: bez specializace
Vedoucí práce: **Ing. Jakub Slavíček**
Akademický rok: 2025/26

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

Vývoj strategií pro výrobu prutových struktur technologií WAAM

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Aditivní technologie umožňují vyrábět komplexní geometrie jako například prutové struktury s potenciálním uplatněním v pozemní nebo letecké dopravě. Nízká energetická náročnost a vysoká efektivita využití materiálu v navařeném stavu jsou hlavní přednosti technologie WAAM. Využití této technologie pro výrobu prutových struktur je dalším krokem k rozšíření možností efektivní výroby komplexních dílů. Předpokladem pro zvládnutí procesu výroby prutových struktur technologií WAAM je navržení a otestování strategií a procesních parametrů výroby, stejně tak, jako efektivní způsob přípravy výrobních dat.

Typ práce: vývojová
Výstup práce: funkční vzorek (G-funk)

Cíle diplomové práce:

Hlavním cílem této diplomové práce je vyvinout strategie, procesní parametry a generátor výrobních dat pro prutové struktury vyráběné technologií WAAM.

Dílčí cíle diplomové práce:

- vypracovat přehled současného stavu poznání v oblasti WAAM prutových struktur
- experimentálně stanovit vhodné procesní parametry
- navrhnout a otestovat různé strategie navařování prutových struktur
- vyvinout generátor výrobních dat
- navrhnout a vyrobit ukázkový prutový díl

Požadované výstupy:

Požadované výstupy: průvodní zpráva.

Rozsah práce: cca 72 000 znaků (40 – 50 stran textu bez obrázků).

Časový plán, struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:
<http://ustavkonstruovani.cz/texty/magisterske-studium-ukonzeni/>

Seznam doporučené literatury:

ABE, Takeyuki a Hiroyuki SASAHARA. Layer geometry control for the fabrication of lattice structures by wire and arc additive manufacturing. Additive manufacturing. 2019, roč. 28, s. 639-648. ISSN 22148604.

YU, Ziping, Zengxi PAN, Donghong DING, Zixuan RONG, Huijun LI a Bintao WU. Strut formation control and processing time optimization for wire arc additive manufacturing of lattice structures. Journal of Manufacturing Processes. 2022, roč. 79, č. May, s. 962–974. ISSN 15266125.

YU, Ziping, Donghong DING, Zengxi PAN, Huijun LI, Qinghua LU a Xuwei FANG. A strut-based process planning method for wire arc additive manufacturing of lattice structures. Journal of Manufacturing Processes. 2021, roč. 65, č. March, s. 283–298. ISSN 15266125.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2025/26

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá návrhem a ověřením strategie výroby kovových prutových struktur technologií Wire Arc Additive Manufacturing. Práce je zaměřena na pravidelné prostorové struktury typu BCC a FCC vyráběné z materiálu G3Si1. V práci byly stanoveny svařovací parametry pro bodové navařování prutů, ověřena výroba šikmých prutů při různých orientacích svařovací hubice a porovnány způsoby tvorby uzlových bodů. Na základě výroby jednotkových buněk byla navržena výrobní strategie, která byla implementována do parametrického generátoru výrobních dat v prostředí Grasshopper. Generátor převádí vstupní CAD geometrii požadovaného dílu na výrobní data pro robotické pracoviště a zahrnuje také řízení tepelné akumulace pomocí časových prodlev. Navržený postup byl ověřen výrobou zkušebních struktur a demonstračního dílu. Výsledky ukazují, že vytvořená strategie a generátor představují použitelný základ pro automatizovanou výrobu prutových struktur technologií WAAM.

KLÍČOVÁ SLOVA

Prutové struktury, WAAM, BCC a FCC struktury, uzlové body, orientace svařovací hubice

ABSTRACT

The diploma thesis deals with the design and verification of a manufacturing strategy for metallic truss structures using Wire Arc Additive Manufacturing. The work focuses on regular three-dimensional BCC and FCC structures manufactured from G3Si1 material. The thesis defines welding parameters for point-by-point deposition of struts, verifies the production of inclined struts with different welding torch orientations, and compares methods for producing nodal points. Based on the manufacturing of unit cells, a manufacturing strategy was proposed and implemented into a parametric manufacturing data generator in the Grasshopper environment. The generator converts the input CAD geometry of the required part into manufacturing data for a robotic workstation and also includes control of heat accumulation using time delays. The proposed procedure was verified by manufacturing test structures and a demonstrator part. The results show that the developed strategy and generator provide a usable basis for the automated production of truss structures using WAAM.

KEYWORDS

Lattice structures, WAAM, BCC and FCC structures, nodal points, welding torch orientation.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KOUBA, Martin. *Vývoj strategií pro výrobu prutových struktur technologií WAAM*. Brno, 2026, 116 s. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí diplomové práce Ing. Jakub Slaviček.

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu práce Ing. Jakubu Slavičkovi za odborné vedení, cenné rady, věcné připomínky a vstřícný přístup po celou dobu řešení diplomové práce.

Dále bych chtěl poděkovat svým kamarádům a spolužákům za pomoc, podporu a ochotu během studia i při řešení této práce.

V neposlední řadě bych rád poděkoval své přítelkyni a rodině za trpělivost, podporu a povzbuzení, které mi poskytovali po celou dobu studia i při zpracování této závěrečné práce.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, pod odborným vedením Ing. Jakuba Slavička. Současně prohlašuji, že všechny zdroje obrazových a textových informací, ze kterých jsem čerpal, jsou řádně citovány v seznamu použitých zdrojů.

Při zpracování textové části práce byly využity nástroje generativní umělé inteligence, konkrétně jazykový model *ChatGPT* založený na architektuře *GPT-5.5 Thinking*, a to výhradně za účelem jazykové korektury a stylistických úprav. Odborný obsah práce, návrh výrobní strategie, provedení experimentů, vyhodnocení naměřených dat, tvorba generátoru výrobních dat a formulace závěrů byly vytvořeny autorem práce.

.....

Podpis autora

OBSAH

1	ÚVOD	14
2	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	15
2.1	Prutové struktury	15
2.2	Technologie WAAM	18
2.3	Pracoviště WAAM	18
2.4	Svařovací procesy využívané pro WAAM	20
2.4.1	Metoda GTAW	20
2.4.2	Metoda GMAW	20
2.4.3	Metoda CMT	21
2.4.4	Pulzní řízení svařovacího proudu	21
2.5	Nastavení svařovacích parametrů	22
2.5.1	Nastavení svařovacích parametrů pro navařování po bodech	22
2.5.2	Nastavení svařovacích parametrů pro kontinuální navařování	25
2.6	Výroba prutů pod úhlem	27
2.6.1	Vliv gravitačního působení při výrobě prutů pod úhlem	28
2.6.2	Kompenzace gravitačního zrychlení	29
2.6.3	Kolize svařovací hubice a vyrobené struktury	30
2.7	Výroba uzlových bodů	30
2.7.1	Rozdělení uzlových bodů prutových struktur	31
2.7.2	Specifika výroby uzlových bodů	31
2.7.3	Způsoby výroby uzlových bodů	31
2.8	Řízení tepelného zatížení při výrobě	32
2.8.1	Vliv tepelného vstupu	33
2.8.2	Akumulace tepla při výrobě	33
2.8.3	Řízení akumulované teploty během výroby	34
2.9	Existující strategie výroby	35
2.9.1	Strategie výroby	35
2.10	Shrnutí hlavních zjištění	39
2.11	Identifikace novosti a příležitosti	40
3	ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	41
3.1	Analýza problému	41
3.1.1	Zákazník	41
3.1.2	Spotřebitel	41

3.1.3	Produkt	41
3.1.4	Charakteristika problému	42
3.2	Cíl práce	43
4	KONCEPČNÍ NÁVRH	44
4.1	Analýza cílů	44
4.2	Specifická omezení	44
4.3	Technická funkční analýza	46
4.4	Návrh řešení	47
4.5	Koncepty výroby	48
4.5.1	Způsob navařování	48
4.5.2	Výroba šikmých prutů	49
4.5.3	Způsob výroby uzlových bodů	50
5	PŘEDBĚŽNÝ NÁVRH	52
5.1	Použitá zařízení	52
5.2	Nastavení svařovacích parametrů	54
5.2.1	Průběh experimentu	55
5.2.2	Vliv svařovacích parametrů na rozměry návaru	56
5.2.3	Výběr svařovacích parametrů	58
5.2.4	Detailnější testování svařovacích parametrů	58
5.2.5	Optimalizace svařovacích parametrů	59
5.3	Výroba prutů pod úhlem	60
5.3.1	Navařování s kolmou orientací hubice	61
5.3.2	Navařování s nakloněnou hubicí	62
5.4	Experimentální zjištění limitní teploty	63
5.5	Výroba buněk prutových struktur	65
5.5.1	Výroba buňky typu BCC	66
5.5.2	Výroba buňky typu FCC	78
5.6	Výběr přístupů pro výrobu prutových struktur	86
5.6.1	Výběr orientace hubice pro výrobu	89
5.6.2	Výběr způsobu výroby uzlového bodu	90
6	DETAILNÍ NÁVRH	91
6.1	Generátor výrobních dat	91
6.1.1	Úpravy uzlových bodů	93
6.1.2	Stanovení pořadí výroby návarů	94

6.1.3	Řízení tepelné akumulace během výroby	95
6.1.4	Ověření generátoru výrobních dat	95
6.2	Výroba testovacích struktur	96
6.2.1	Kontrola tepelné akumulace v průběhu výroby	96
6.2.2	Přesnost vyrobených struktur	98
6.3	Výroba demonstračního dílu	103
7	DISKUZE	105
7.1	Vývoj výrobní strategie	105
7.2	Ověření generátoru výrobních dat na zkušebních strukturách	106
7.3	Ověření použitelnosti strategie na demonstračním dílu	107
8	ZÁVĚR	108
9	VÝSLEDKY PODLE RIV	109
10	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	111
11	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	116
11.1	Seznam použitých zkratk	116
11.2	Seznam použitých symbolů a veličin	117
12	SEZNAM OBRÁZKŮ	118
13	SEZNAM TABULEK	122
14	SEZNAM PŘÍLOH	123

1 ÚVOD

Prutové struktury patří mezi konstrukční prvky, které umožňují dosáhnout příznivého poměru mezi hmotností a mechanickými vlastnostmi. Uplatnění nacházejí zejména v odlehčených dílech, kde mohou nahrazovat plný materiál, případně jako součásti hybridních konstrukcí. Typickými aplikacemi jsou rovněž prvky určené pro pohlcování energie nebo tlumení vibrací.

Výroba kovových prutových struktur je však vzhledem k jejich složité prostorové geometrii technologicky náročná. Konvenčními postupy je jejich výroba obtížná až nemožná, a proto se jako vhodná alternativa nabízí aditivní technologie. U práškových metod aditivní výroby kovů je však velikost vyráběných dílů omezena rozměry stavební komory, což limituje jejich využití pro rozměrnější prutové struktury. Pro tyto aplikace je perspektivní technologie Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM), založená na postupném navařování materiálu vrstvu po vrstvě pomocí tavení přídavného drátu elektrickým obloukem. Ve srovnání s práškovými metodami aditivní výroby nabízí WAAM vyšší depoziční rychlost, nižší pořizovací a provozní náklady a možnost výroby dílů větších rozměrů.

Využití technologie WAAM pro výrobu prutových struktur však přináší řadu specifických problémů. Při navařování jednotlivých prutů je nutné zajistit stabilní růst materiálu, požadovaný sklon prutů a dostatečnou přesnost jejich napojení v uzlových bodech. Dalším důležitým faktorem je tepelné zatížení. Opakované lokální ohřívání může vést k akumulaci tepla, změně tvaru svarové lázně, deformacím prutů a tím zhoršení přesnosti výroby.

Pro spolehlivou výrobu prutových struktur je proto nutné navrhnout ucelenou výrobní strategii, která definuje způsob navařování prutů, posloupnost výroby, tvorbu uzlových bodů a řízení tepelné akumulace.

Tato diplomová práce se zabývá návrhem a ověřením právě takové strategie výroby prutových struktur. Řešení je zaměřeno na výrobu pravidelných prostorových struktur typu BCC a FCC z materiálu G3Si1. Součástí práce je také implementace navržené strategie do generátoru výrobních dat v prostředí Grasshopper, který umožní automatizovanou přípravu příkazů pro robotickou výrobu.

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

Technologie Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) je v současné době využívána především pro výrobu rozměrných kovových dílů. V odborné literatuře je však v posledních letech zkoumána také možnost jejího využití pro výrobu prutových struktur, která je dosud řešena převážně na úrovni výzkumu. Pro další rozvoj této oblasti je nezbytné vycházet z dosavadních poznatků. Tato kapitola proto; shrnuje současný stav poznání v dané oblasti a vytváří teoretický rámec pro další části práce.

2.1 Prutové struktury

Prutové struktury jsou konstrukce tvořené soustavou prutů, které jsou mezi sebou spojeny v uzlech. Díky efektivnímu rozložení materiálu v prostoru umožňují prutové struktury dosáhnout relativně nízké hmotnosti při zachování požadované pevnosti a tuhosti konstrukce. [24]

Rozdělení prutových struktur

Prutové struktury lze rozdělit podle geometrického uspořádání jednotlivých prutů v prostoru. Z tohoto hlediska se rozlišují rovinné (2D) a prostorové (3D) prutové struktury. [24]

Rovinné prutové struktury jsou tvořeny pruty uspořádanými v jedné rovině, přičemž přenos zatížení je omezen na toto rovinné uspořádání, jako příklad lze uvést příhradové konstrukce. [24]

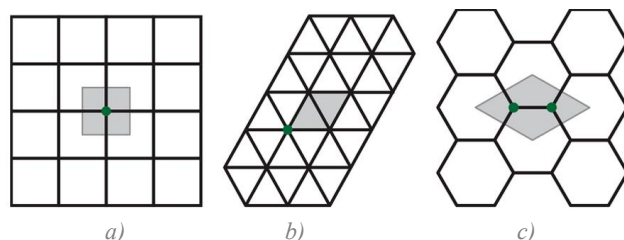
Prostorové prutové struktury jsou tvořeny pruty orientovanými ve více směrech, jejichž trojrozměrné uspořádání umožňuje přenos zatížení v několika směrech současně. [24]

Z hlediska geometrické pravidelnosti lze prutové struktury dále rozdělit na nepravidelné a pravidelné (periodické). Nepravidelné prutové struktury nemají jednoznačně se opakující geometrii a jejich tvar je často výsledkem topologické optimalizace. Naproti tomu pravidelné prutové struktury jsou tvořeny opakováním jednotkové buňky, jejíž geometrie určuje celkové mechanické vlastnosti struktury. [24]

Z hlediska mechanického chování lze prutové struktury dělit na struktury s převahou ohybového chování (bending-dominated) a struktury s převahou osového chování (stretch-dominated). U struktur s převahou ohybového chování se deformace projevuje především ohybem prutů a změnou polohy uzlů, což vede k pozvolnějšímu průběhu deformace. U struktur s převahou osového chování je zatížení přenášeno hlavně tahem nebo tlakem v prutech, a tyto struktury proto obvykle dosahují vyšší tuhosti a únosnosti. [24]

Pravidelné 2D struktury

Z hlediska geometrie jednotkové buňky lze rozlišit několik základních typů pravidelných 2D prutových struktur. Nejčastěji se vyskytují čtvercové, trojúhelníkové a hexagonální struktury (Obr. 2-1), které se liší tvarem jednotkové buňky, počtem prutů sbíhajících se v uzlech a jejich orientací v rovině. [23] [24]



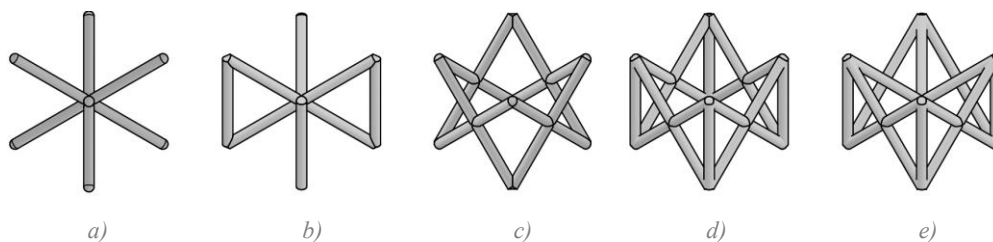
Obr. 2-1 2D prutová struktura a) Čtvercová, b) Trojúhelníková, c) Hexagonální [23]

Pravidelné 3D struktury

Pravidelné prostorové prutové struktury vznikají systematickým uspořádáním prutů v rámci jednotkové buňky, která je následně periodicky opakována ve třech prostorových směrech. Nejčastěji je jednotková buňka definována na bázi krychlové geometrie, přičemž jednotlivé pruty propojují její rohové body. [21] [24]

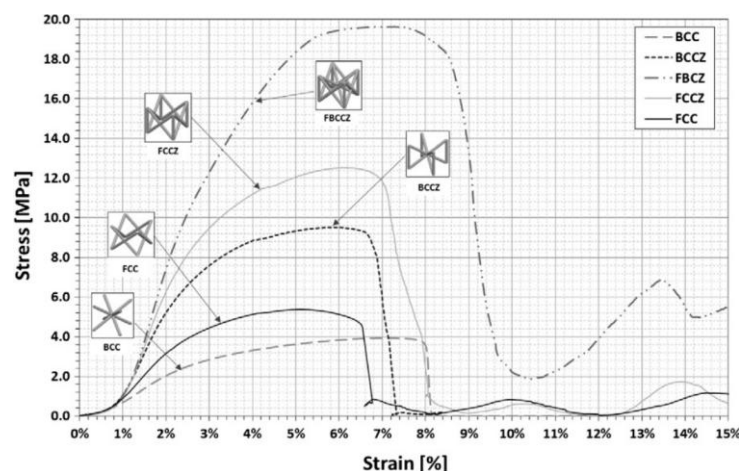
Základním příkladem pravidelné prostorové prutové struktury je Body-Centred-Cube (BCC) topologie, ve které jsou pruty vedeny po tělesových úhlopříčkách jednotkové buňky. Odlišným uspořádáním je Face-Centred-Cube (FCC) topologie, v níž jsou pruty vedeny po stěnových úhlopříčkách jednotkové buňky. [21]

Další buňky vznikají doplněním zmíněných topologií o vertikální pruty orientované ve směru zatížení, tyto buňky jsou označovány jako BCCZ a FCCZ. Kombinací obou typů buněk vzniká topologie FBCCZ, která obsahuje jak pruty typu BCC a FCC, tak i vertikální pruty. Uvedené typy jednotkových buněk jsou znázorněny na Obr. 2-2. [21]



Obr. 2-2 Buňka typu a) BCC, b) BCCZ, c) FCC, d) FCCZ, e) F2BCCZ [21]

Na obrázku 2-3 jsou znázorněny tlakové křivky napětí–přetvoření pro prutové struktury typu BCC, FCC, BCCZ, FCCZ a FBCCZ. Struktury BCC a FCC vykazují pozvolnější průběh deformace a nižší dosažené hodnoty napětí, což souvisí s výraznějším ohybovým chováním. Doplnění vertikálních prutů u variant BCCZ a FCCZ vede k vyšší tuhosti a únosnosti, protože Z-pruty umožňují přímý přenos zatížení ve směru působící síly. Nejvyšší hodnoty napětí vykazuje topologie FBCCZ, u níž svislé Z-pruty přenášejí tlakové zatížení, zatímco prvky BCC a FCC přispívají k jejich podepření. [21]



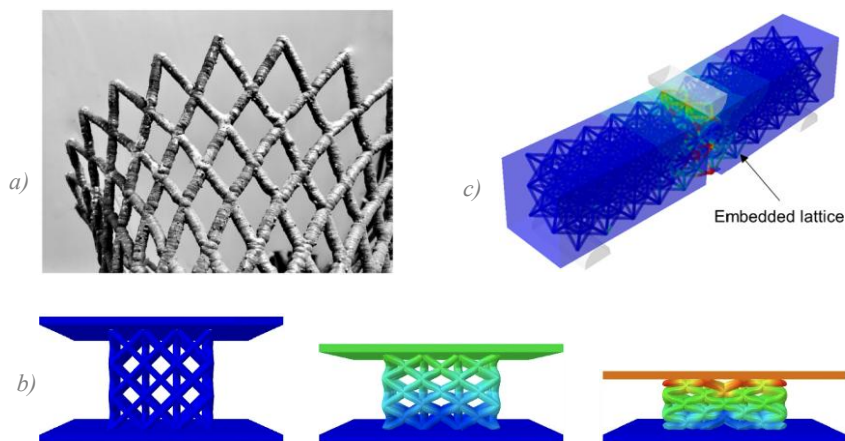
Obr. 2-3 Tlakový diagram 3D prutových struktur [21]

Použití prutových struktur

Prutové struktury vyráběné technologií WAAM se ve srovnání se strukturami vyrobenými práškovými aditivními technologiemi vyznačují hrubší geometrií, což se promítá do robustního konstrukčního pojetí zaměřeného především na vysokou únosnost. Z tohoto důvodu nacházejí uplatnění zejména jako odlehčené nosné prvky, nebo konstrukční výplně, u nichž je požadováno snížení hmotnosti při zachování dostatečné tuhosti. [24] [33]

Významnou oblast použití představují energeticky absorbující struktury, u nichž je žádoucí postupná deformace a řízený kolaps při zatížení. Prutové struktury umožňují efektivní disipaci energie prostřednictvím ohybu a vzpěru jednotlivých prutů a postupného zhroucení buněk, čímž dochází k plynulému pohlcování deformační práce. Jsou proto vhodné pro aplikace, jako jsou nárazové absorbéry, deformační zóny nebo ochranné konstrukční prvky. [32]

Prutové struktury lze rovněž využít jako výztuž v kompozitních materiálových systémech, kde díky otevřené topologii umožňují zalévání nebo infiltraci matricí, například betonem nebo lehkými kovy, a vytvářejí prostorově propojený skelet umožňující přenos zatížení mezi jednotlivými fázemi. Tím dochází ke zvýšení pevnosti, houževnatosti a odolnosti proti šíření trhlin. Příklady uvedených oblastí použití jsou znázorněny na Obr. 2-4. [25] [26]



Obr. 2-4 Použití prutových struktur – a) Odlehčené konstrukce [33], b) Kineticky absorbující konstrukce [32], c) Hybridní systémy [25]

2.2 Technologie WAAM

Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) je technologie aditivní výroby kovů založená na vrstvení materiálu pomocí svařovacího oblouku a kovového drátu. Svařovací oblouk slouží jako zdroj tepla, který natavuje přídavný materiál i povrch základního materiálu. Natavený kovový drát je následně ukládán na povrch ve formě housenky, jejíž geometrie je dána nastavením parametrů svařování a rychlostí pohybu svařovací hubice. Výsledný tvar dílu vzniká postupným ukládáním těchto housenek, které se vrství podle předem definované trajektorie. [1]

Oproti práškovým metodám aditivní výroby se technologie WAAM vyznačuje výrazně vyšší depoziční rychlostí, vysokou materiálovou účinností a možností výroby rozměrných kovových dílů bez omezení velikosti pracovní komory. Výhodou je rovněž nižší cena jak výrobního zařízení, tak vstupního materiálu. Tyto přednosti jsou vyváženy nižší geometrickou přesností a horší kvalitou povrchu, a proto je u dílů vyrobených WAAM nutné následné obrábění funkčních ploch. [1]

2.3 Pracoviště WAAM

Pro zajištění polohování svařovací hubice během procesu WAAM lze využít různé typy výrobních zařízení. Jednotlivá zařízení se liší zejména velikostí pracovního prostoru a složitostí trajektorie nástroje, kterou jsou schopna realizovat. V praxi se nejčastěji uplatňují tříosé stroje a průmyslové roboty s šesti stupni volnosti (Obr. 2-5). Tato zařízení mohou být dále rozšířena o dodatečná polohovadla, jako jsou rotační nebo naklápěcí stoly, která zvyšují možnosti výroby pracoviště. [3] [4] [5]

Třiosé stroje

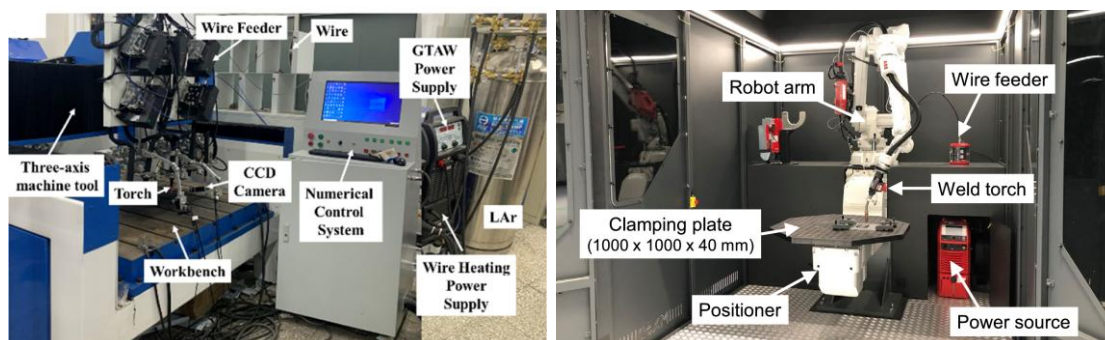
Třiosé CNC stroje představují konstrukčně jednoduché a přesné řešení pro realizaci technologie WAAM. Výhodou těchto zařízení je vysoká polohovací přesnost, tuhost a stabilita pohybu. Nevýhodou je relativně malý výrobní prostor daný konstrukcí stroje. Dalším omezením je nízký počet stupňů volnosti, který neumožňuje změnu orientace svařovací hubice vůči dílu, a tím i výrobu složitějších struktur. Toto omezení lze efektivně odstranit použitím doplňkových naklápěcích stolů. [3] [5]

Průmyslový roboti

Šestiosé průmyslové roboty jsou v současnosti nejrozšířenějším řešením pro realizaci WAAM. Jejich hlavní výhodou je vysoká flexibilita daná šesti stupni volnosti, která umožňuje plynulé změny orientace svařovací hubice a realizaci prostorově složitých trajektorií. Robotická pracoviště rovněž umožňují výrobu rozměrných dílů bez omezení velikostí pracovní komory. Pro další zvýšení výrobního prostoru je možné robota umístit na lineární pojezdovou dráhu. Nevýhodou robotických systémů je nižší polohovací přesnost a tuhost ve srovnání s CNC stroji, což může negativně ovlivnit geometrickou přesnost navařovaných struktur. [4]

Dodatečná polohovací zařízení

Použití dodatečných polohovadel, jako jsou rotační nebo naklápěcí stoly, umožňuje rozšíření kinematických možností jak CNC strojů, tak robotických pracovišť. Naklápěcí polohovadla umožňují natočit vyráběný díl do výhodnější polohy, čímž lze omezit negativní vliv gravitace při ukládání materiálu. Rotační polohovadla naopak mohou zvětšit využitelný pracovní prostor zejména u průmyslových robotů, protože umožňují natáčet díl vůči robotu a tím zachovat orientaci svařovací hubice i v místech, která by při pevně upnutém dílu byla nedosažitelná. Současně však dochází ke zvýšení složitosti celého pracoviště, zejména z hlediska programování a synchronizace pohybů jednotlivých os. [5]



Obr. 2-5 Pracoviště WAAM s využitím tříosého stroje (vlevo) [3], průmyslového robota (vpravo) [2]

2.4 Svařovací procesy využívané pro WAAM

Pro realizaci technologie WAAM jsou v odborné literatuře nejčastěji využívány svařovací procesy GTAW (Gas Tungsten Arc Welding), GMAW (Gas Metal Arc Welding) a její modifikace CMT (Cold Metal Transfer). Princip těchto procesů je znázorněn na Obr. 2-6. [6]

2.4.1 Metoda GTAW

Při svařovacím procesu GTAW je elektrický oblouk vytvářen mezi netavitelnou wolframovou elektrodou a základním materiálem a slouží jako zdroj tepla pro natavení základního materiálu a vytvoření svarové lázně. Přídavný materiál je do svarové lázně přiváděn samostatně ve formě drátu a jeho tavení probíhá působením tepla z oblouku. Wolframová elektroda se během procesu neodtavuje, což přispívá ke stabilnímu vedení oblouku. Díky oddělenému přívodu materiálu je umožněno nezávislé řízení tepelného vstupu a dávkování materiálu. [7]

Výhodou svařovacího procesu GTAW v technologii WAAM je stabilní průběh navařování a stabilní chování svarové lázně. Díky oddělenému řízení tepelného vstupu a dávkování přídavného materiálu je možné proces jemně regulovat, což nachází uplatnění zejména u aplikací vyžadujících přesnější kontrolu geometrie navařovaného materiálu. Metoda GTAW se rovněž vyznačuje minimálním rozstříkem a rovnoměrným ukládáním materiálu, což přispívá k vyšší geometrické pravidelnosti navařovaných vrstev. Nevýhodou metody GTAW je nižší depoziční rychlost ve srovnání s procesy GMAW, což omezuje její využití při výrobě objemových dílů. [6] [7]

2.4.2 Metoda GMAW

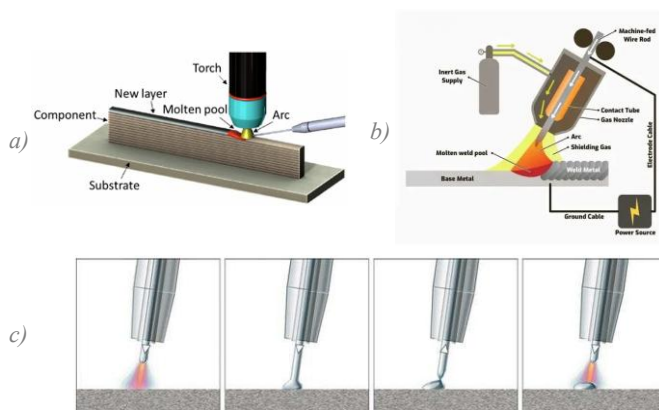
Svařovací proces GMAW je obloukové svařování tavící se elektrodou ve formě kovového drátu v ochranné atmosféře. Elektrický oblouk je vytvářen mezi kontinuálně podávaným přídavným materiálem a základním materiálem, přičemž teplo oblouku zajišťuje současné tavení drátu i základního materiálu. Přenos přídavného materiálu do svarové lázně probíhá ve formě kapek, jejichž charakter je dán nastavenými svařovacími parametry, zejména svařovacím proudem, napětím a rychlostí podávání drátu. [6]

V technologii WAAM je metoda GMAW využívána především díky vysoké depoziční rychlosti, což umožňuje rychlou výrobu objemných a velkorozměrových dílů. Nevýhodou tohoto procesu je vyšší tepelný vstup a méně stabilní chování svarové lázně ve srovnání s GTAW nebo řízenými variantami GMAW, což může negativně ovlivnit geometrickou přesnost navařovaných vrstev. Z tohoto důvodu je klasický proces GMAW v rámci technologie WAAM často nahrazován jeho modifikacemi, například procesem CMT. [6] [9]

2.4.3 Metoda CMT

Proces CMT je založen na aktivním řízení přenosu přídavného materiálu pomocí pohybu svařovacího drátu. Elektrický oblouk je vytvářen mezi tavící se elektrodou ve formě kovového drátu a základním materiálem, přičemž při vzniku krátkého spojení dochází k dočasnému snížení svařovacího proudu a krátkému zpětnému pohybu drátu. Tím je umožněno oddělení kapky přídavného materiálu s minimálním rozstříkem a sníženým tepelným vstupem. [6] [9]

Výhodou svařovacího procesu CMT je zejména stabilní průběh navařování při poměrně vysoké depoziční rychlosti a současně nižším tepelném vstupu než u konvenčních režimů GMAW. Řízený přenos kapek přídavného materiálu omezuje rozstřík, což je výhodné při výrobě prutových struktur. Metoda CMT je využívána u aplikací, kde je požadována vyšší výrobní rychlost při zachování stability procesu. [8] [9]



Obr. 2-6 Svařovací metoda a) GTAW [7], b) GMAW [9], c) Princip CMT [9]

2.4.4 Pulzní řízení svařovacího proudu

U svařovacích procesů využívaných v technologii WAAM se kromě režimu konstantního proudu využívá také pulzní řízení svařovacího proudu. Tento režim je aplikovatelný napříč procesy GTAW i GMAW, včetně jejich řízených variant, a spočívá v periodickém střídání vyšší a nižší úrovně svařovacího proudu. Pulzní řízení umožňuje časově modulovat tepelný vstup do svarové lázně, aniž by došlo k přerušení hoření elektrického oblouku. [19]

Ve fázi vyššího proudu dochází k intenzivnějšímu natavení přídavného materiálu a základního materiálu, zatímco ve fázi nižšího proudu je tepelný výkon omezen a svarová lázeň má možnost částečně ztratit energii a stabilizovat se. Tímto způsobem lze ovlivňovat chování svarové lázně, průběh tuhnutí a celkovou stabilitu procesu. Pulzní režim je v technologii WAAM využíván v případech, kdy je požadována vyšší kontrola tepelného vstupu a geometrie navařovaného materiálu. [19]

2.5 Nastavení svařovacích parametrů

Rozměry prutů vyráběných technologií WAAM jsou přímo určeny nastavením svařovacích parametrů, které ovlivňují množství ukládaného materiálu, stabilitu procesu a chování svarové lázně. Význam a vliv jednotlivých parametrů se liší v závislosti na způsobu ukládání materiálu, přičemž v odborné literatuře se rozlišuje bodové a kontinuální navařování prutů. Nastavení svařovacích parametrů je proto nutné vždy posuzovat ve vztahu ke zvolené strategii navařování. [10] [11]

2.5.1 Nastavení svařovacích parametrů pro navařování po bodech

Při bodovém navařování prutů není materiál ukládán plynule, ale prut vzniká postupným vytvářením jednotlivých bodových návarů. Každý bodový návar je vytvořen samostatným svařovacím cyklem při konstantní poloze svařovací hubice. Rozměry prutu a jeho kontinuita jsou proto přímo závislé na nastavení svařovacích parametrů, které řídí množství naneseného materiálu, tvar svarové lázně a tepelné zatížení v místě navařování. [10] [12]

V odborné literatuře jsou v souvislosti s bodovým navařováním jako klíčové nastavované parametry uváděny:

- Doba hoření oblouku.
- Rychlost podávání přídatného materiálu.
- Časová prodleva mezi navařováním jednotlivých návarů.

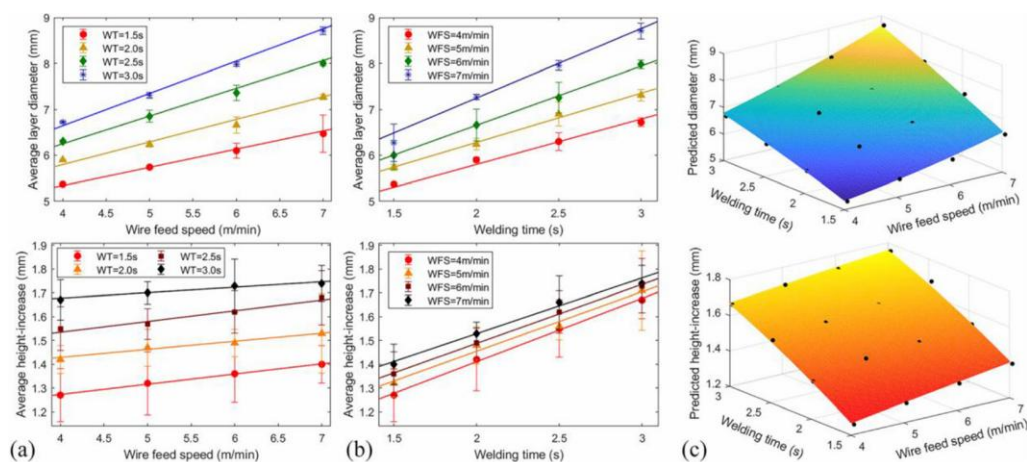
Doba hoření oblouku spolu s rychlostí podávání drátu řídí objem uloženého materiálu a tím i velikost a tvar návarů. Časová prodleva mezi navařováním ovlivňuje míru ochlazení materiálu před nanesením dalšího návaru a hraje významnou roli z hlediska akumulace tepla, její vliv je podrobněji popsán v kapitole 2.8. Proudové a napěťové charakteristiky procesu jsou řízeny prostřednictvím synergické linie pomocí svařovacího zdroje, kdy jejich hodnoty automaticky vyplývají ze zvolené rychlosti podávání drátu. [12]

Vliv jednotlivých svařovacích parametrů na geometrii bodově navařovaných prutů je patrný z grafických závislostí uvedených na obr. 2-7. Se zvyšující se rychlostí podávání drátu při konstantní době hoření oblouku dochází k nárůstu průměru a výškového přírůstku vytvářeného návaru, přičemž tento trend je pozorovatelný pro všechny sledované doby hoření oblouku. Z grafů je zároveň patrné, že změna rychlosti podávání drátu se výrazněji promítá do průměru návaru než do jeho výšky. [12]

Zvýšení doby hoření oblouku při konstantní rychlosti podávání drátu vede k nárůstu průměru návaru, přičemž tento trend je obdobný jako při zvyšování rychlosti podávání drátu. Výrazněji se však projevuje u výškového přírůstku návaru, který s rostoucí dobou hoření oblouku narůstá podstatně více než při zvyšování rychlosti podávání drátu. Rozdílný charakter vlivu jednotlivých parametrů souvisí s odlišným mechanismem jejich působení na svarovou lázeň. [12]

Zvýšení rychlosti podávání drátu vede k vyššímu okamžitému přívodu materiálu do svarové lázně, zatímco prodloužení doby hoření oblouku prodlužuje dobu jeho ukládání. V obou případech tak dochází ke zvýšení celkového objemu uloženého materiálu, avšak výsledný vliv na geometrii návaru není totožný. Při vyšší rychlosti podávání drátu se zvětšený objem svarové lázně po ukončení oblouku vlivem smáčivosti rozlévá převážně v radiálním směru, což se projevuje výraznějším nárůstem průměru. Naproti tomu prodloužení doby hoření oblouku vede k delšímu tepelnému působení na předchozí návar, intenzivnějšímu natavení podkladu a ke změně podmínek rozlivu a tuhnutí svarové lázně. V důsledku těchto změn se větší část ukládaného materiálu nemusí uplatnit pouze v radiálním rozšíření, ale také ve směru růstu prutu, což se projeví nárůstem výšky vytvářeného návaru. [12] [13]

Prostorové aproximační plochy znázorněné na obr. 2-7 c) ukazují, že výsledné rozměry návaru jsou dány kombinovaným působením rychlosti podávání drátu a doby hoření oblouku. Nastavení svařovacích parametrů proto musí vycházet z jejich kombinovaného účinku, nikoli z posuzování jednotlivých parametrů samostatně. [12]



Obr. 2-7 Rozměry návaru v závislosti na a) WFS, b) Času navařování, c) WFS a Času navařování [12]

Konkrétní nastavení svařovacích parametrů pro navařování po bodech

Tabulka 1 představuje svařovací parametry, které byli využiti ve studiích, které se zabývali výrobou prutů technologií WAAM metodou CMT.

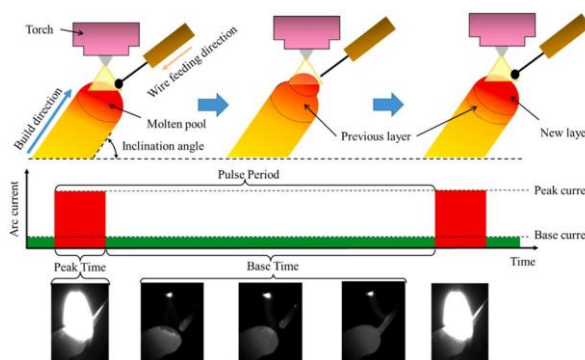
Tabulka 1 Přehled používaných svařovacích parametrů pro navařování po bodech

Autor, rok vydání	Průměr přídavného materiálu [mm]	Rychlost podávání drátu [m/min]	Čas navarov ání [s]	Průměr prutu [mm]	Výška návaru [mm]
Waldschmitt, 2024 [14]	1	6	0,7	7	1,2
Grossi, 2025 [15]	1	6	0,6	6	1
		4	0,3	4	0,5
Abbaszadeh, 2025 [16]	1	6	0,7	6	1
		8	1,2	8	1,45
Baglivo, 2024 [17]	1,2	2,7	0,5/0,8	5	1,1
Yu, 2021 [12]	0,9	4	2	5,9	1,4
Andrade, 2024 [36]	1	0,9	0,5	3,2	0,4
Müller, 2019 [37]	1	5	2,4	8,2	2,15

Z uvedených studií vyplývá, že při výrobě prutů technologií WAAM jsou používány přídavné materiály o průměru v rozsahu od 0,9 do 1,2 mm. Rychlost podávání drátu je ve sledovaných pracích nastavována v rozmezí 0,9 až 8 m/min a doba navařování se pohybuje od 0,3 do 2,4 s. Tomu odpovídá rozsah výšky návaru, který se pohybuje od 0,4 do 2,15 mm. V rámci těchto parametrů byly vyráběny pruty o průměru 3,2 až 8,2 mm.

2.5.2 Nastavení svařovacích parametrů pro kontinuální navařování

Během kontinuálního navařování je elektrický oblouk udržován zapálený po celou dobu výroby prutu a svařovací hubice se plynule pohybuje ve směru jeho osy. Na rozdíl od bodového navařování materiál není ukládán v oddělených návarech, ale celý prut je vytvářen souvislou depozicí při jednom nepřerušeném hoření oblouku. Oblouk je řízen pulzním režimem popsaným v kapitole 2.4.4, což umožňuje omezit přehřívání svarové lázně při zachování plynulé depozice (Obr. 2-8). [3]



Obr. 2-8 Kontinuální navařování s pulsním řízením proudu [3]

Kontinuální způsob navařování prutů je v literatuře popisován méně často než bodové navařování, které umožňuje řízené ochlazování mezi jednotlivými navařovacími cykly, a tím usnadňuje stabilizaci svarové lázně. Kontinuální strategie naopak přináší vyšší produktivitu díky eliminaci časových ztrát spojených s opakovaným zapalováním a zhašení oblouku, současně však vyžaduje přesné řízení tepelného vstupu, aby nedocházelo ke ztrátě tvarové stability prutu. [3]

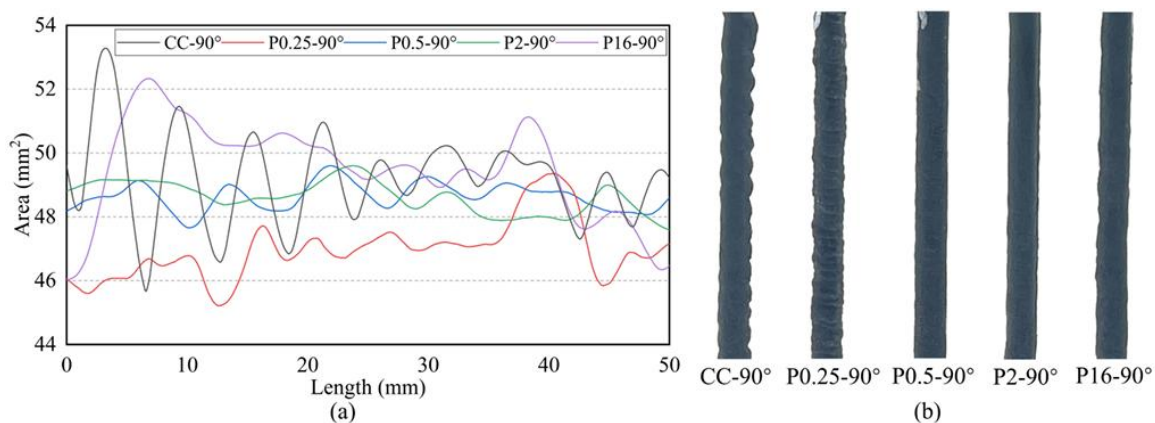
V rámci dostupných studií je kontinuální navařování prutů realizováno obloukovými procesy typu GTAW a GMAW, případně v kombinaci s předehřevem přídavného materiálu, který podporuje jeho stabilní tavení. Z hlediska nastavovaných parametrů se u kontinuální strategie uvádí zejména:

- Rychlost pohybu svařovací hubice.
- Rychlost podávání přídavného materiálu.
- Parametry pulzního režimu svařovacího proudu (velikost špičkového a základního proudu a jejich frekvence).

Rychlost pohybu svařovací hubice ovlivňuje dobu působení oblouku na jednotku délky dráhy a tím i lokální tepelný vstup během ukládání materiálu. Rychlost podávání přídavného materiálu určuje množství přiváděného drátu v čase a společně s rychlostí pohybu svařovací hubice ovlivňuje množství materiálu uloženého na jednotku délky prutu. Tento poměr je rozhodující pro výsledný průměr prutu, protože vyšší rychlost podávání drátu nebo nižší rychlost pojezdu vede při stabilním procesu k většímu množství uloženého materiálu na jednotku délky a tím ke zvětšení průřezu prutu. [3] [20]

Parametry pulzního režimu svařovacího proudu ovlivňují stabilitu růstu prutu a rovnoměrnost jeho průřezu, protože určují časový průběh tepelného vstupu do svarové lázně. Střídání špičkové a základní fáze vede k periodickému natavování a částečnému ochlazování svarové lázně, čímž se mění podmínky jejího tuhnutí a stabilita během depozice. Pulzní frekvence určuje délku těchto fází, a tím ovlivňuje průběh natavování, přenosu a stabilizace přídavného materiálu ve svarové lázni. Její změna se proto může projevit kolísáním geometrie prutu. [20]

Z obr. 2-9 je patrné, že pulzní frekvence má významný vliv na stabilitu geometrie kontinuálně navařovaného prutu. Graf zobrazuje průběh průřezové plochy podél délky prutu pro režim konstantního proudu (CC) a pro pulzní režimy s různou frekvencí, kde označení P0.25, P0.5, P2 a P16 odpovídá pulznímu řízení oblouku s frekvencí 0,25 Hz, 0,5 Hz, 2 Hz a 16 Hz. Z porovnání jednotlivých křivek je patrné, že volba pulzní frekvence ovlivňuje míru kolísání průřezu, přičemž rozdíly jsou patrné i na kvalitativním srovnání prutů na pravé straně obrázku. [20]



Obr. 2-9 a) Navařovaná plocha v délce pro různé pulzní frekvence, b) Pruty navařené při různých pulzních frekvencích [20]

Konkrétní nastavení svařovacích parametrů pro kontinuální navařování

Tabulka 2 představuje konkrétní svařovací parametry pro kontinuální navařování použité ve studiích.

Tabulka 2 Přehled používaných svařovacích parametrů pro kontinuální navařování

Autor, rok vydání	Metoda výroby	Průměr přídavného materiálu [mm]	Rychlost podávání drátu [m/min]	Rychlost pohybu robota [m/min]	Proud špičkový/základní [A]	Pulsní frekvence [Hz]	Průměr prutu [mm]
Mao, 2025 [20]	GTAW, hot wire	1,2	1	0,024	100/2	0,25/0,5/ 2/16	-
			0,3		20/5		4,6
			0,5		40/5		6
Jing, 2023 [3]	GTAW, hot wire	1,2	0,8	0,02	100/5	0,5	7,6
			1,2		180/5		9,3

Z uvedených studií vyplývá, že kontinuální navařování prutů je realizováno metodou GTAW s předehřevem přídavného materiálu (hot-wire) při použití drátu o průměru 1,2 mm. Rychlost podávání drátu se pohybuje v rozmezí 0,3 až 1,2 m/min a rychlost pohybu hořáku v řádu 0,02 až 0,024 m/min. Nastavení špičkového proudu v rozsahu 20 až 180 A umožňuje výrobu prutů o průměru přibližně 4,6 až 9,3 mm při pulzní frekvenci 0,25 až 16 Hz.

2.6 Výroba prutů pod úhlem

Aby bylo možné technologií WAAM realizovat prutové struktury je nezbytné zvládnout navařování prutů nejen ve svislé orientaci, ale i pod úhlem vůči směru působení gravitace. Schopnost spolehlivě navařovat pruty pod úhlem představuje jeden z klíčových předpokladů pro uplatnění této technologie při výrobě prutových struktur.

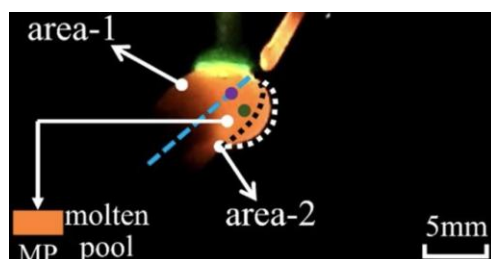
2.6.1 Vliv gravitačního působení při výrobě prutů pod úhlem

Při výrobě prutů pod úhlem dochází ke změně podmínek formování svarové lázně v důsledku působení gravitačního zrychlení. Zatímco při svislé orientaci osy prutu je působení tíhových sil vůči procesu ukládání materiálu osově symetrické, při odklonu osy prutu od svislé orientace se tato symetrie narušuje a mění se rozložení sil působících na natavený kov. [27] [28]

Změněný stav rovnováhy sil se projevuje nerovnoměrným rozložením svarové lázně. Natavený materiál má vlivem gravitace tendenci stékat směrem k dolní části prutu, čímž dochází k posunu těžiště svarové lázně mimo ideální osu prutu (Obr. 2-10). Důsledkem je ztráta tvarové symetrie prutu, která se projevuje vznikem excentricity jeho osy, lokálním zesílením průřezu na straně působení gravitace a kolísáním průměru prutu v průběhu jeho růstu. [10] [27]

Intenzita uvedených jevů je úzce spjata s objemem svarové lázně a s dobou jejího tuhnutí. Při ukládání většího množství nataveného materiálu vzniká svarová lázeň s větší hmotností a delší dobou, po kterou zůstává v tekutém nebo polotekutém stavu. V tomto časovém intervalu je svarová lázeň výrazněji ovlivněna gravitačním působením, které podporuje tok nataveného kovu mimo osu prutu. Důsledkem je zvýšená náchylnost k tvarovým nestabilitám, které se mohou projevit deformací prutů a v krajních případech mohou vést až k jejich kolapsu. [10] [27]

Z tohoto důvodu jsou k uvedeným problémům obecně náchylnější pruty vyráběné kontinuálním způsobem, u nichž je svarová lázeň udržována po delší dobu a materiál je do ní plynule doplňován. U bodového navařování je tento vliv částečně omezen přerušovaným charakterem procesu, avšak stabilita prutu zůstává závislá na velikosti jednotlivých návarů, tepelném vstupu a době prodlevy mezi navařovacími cykly. [10] [27]



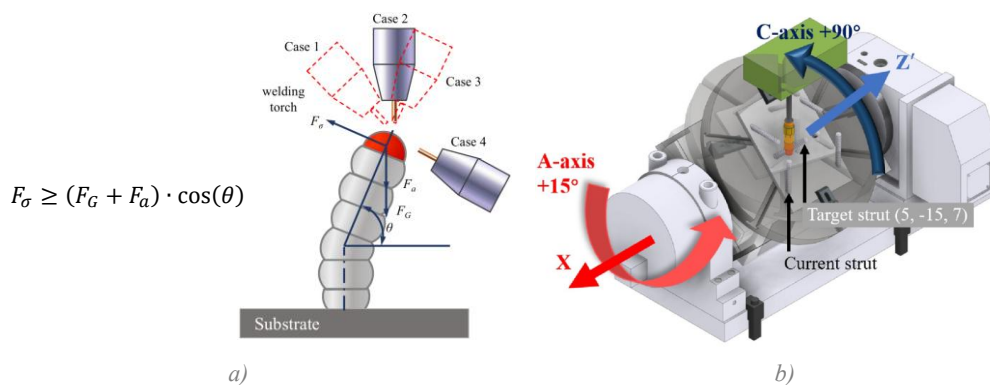
Obr. 2-10 Stékání svarového kovu vlivem působení gravitačního zrychlení [27]

2.6.2 Kompenzace gravitačního zrychlení

Možnosti kompenzace gravitačního působení při navařování prutů pod úhlem vycházejí z rovnováhy sil působících na svarovou lázeň (Obr. 2-11a). Gravitační síla podporuje tok nataveného kovu mimo osu prutu, zatímco povrchové napětí taveniny a její interakce s podkladem přispívají k udržení tvarové stability návarů. Součástí této rovnováhy je také síla svařovacího oblouku, jejíž velikost i směr lze ovlivnit nastavením svařovacích parametrů a orientací hořáku. Vhodným natočením svařovací hubice lze proto částečně omezit gravitační tok taveniny, snížit excentricitu ukládaného materiálu a zlepšit stabilitu růstu prutu při větších sklonech (Obr. 11a). [10]

Gravitační účinky lze dále omezovat vhodným nastavením svařovacích parametrů. Ty určují tepelný vstup do svarové lázně, množství ukládaného materiálu a intenzitu působení svařovacího oblouku. Při menším objemu svarové lázně klesá hmotnost nataveného kovu, a tím i gravitační síla podporující jeho tok mimo osu prutu. Současně se zvyšuje význam povrchového napětí vůči hmotnosti taveniny, což přispívá k lepšímu udržení tvaru návarů. Vliv tepelného vstupu na formování svarové lázně je podrobněji popsán v kapitole 2.8.1. [8] [10] [29]

Další možnost kompenzace gravitačního působení je změna orientace navařované struktury vůči směru gravitačního zrychlení pomocí naklápěcích stolů (Obr. 11b). Tímto způsobem lze během navařování udržovat osu prutu v orientaci svislého navařování, čímž se vytvářejí podmínky pro stabilní formování svarové lázně. [5]



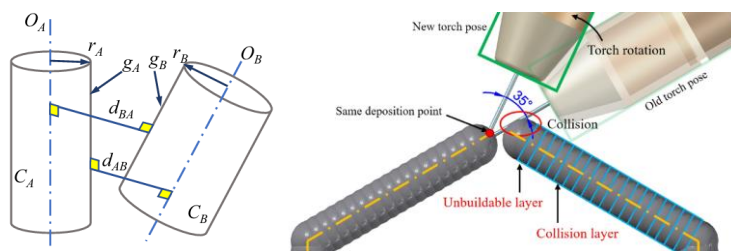
Obr. 2-11 a) Rovnováha sil působících na svarovou lázeň, b) Změna orientace navařovaného prutu

2.6.3 Kolize svařovací hubice a vyrobené struktury

Při kompenzaci gravitačního působení změnou působení směru síly oblouku vzniká riziko kolize mezi hubicí a již vyrobenými pruty, zejména v oblastech jejich vzájemného napojení. [5]

Aby bylo možné těmto kolizím předejít, je nutné kolizní místa předem identifikovat. Identifikace je založena na geometrickém popisu navařované struktury a svařovací hubice, přičemž oba objekty jsou v zjednodušeném modelu uvažovány jako válcová tělesa s definovaným poloměrem (Obr. 2-12 vlevo). Pro jednotlivé polohy hubice podél trajektorie je vyhodnocována minimální vzdálenost mezi osou hubice a osami již navařených prutů. Pokud tato vzdálenost klesne pod stanovenou bezpečnou mez, danou součtem jejich poloměrů a bezpečnostní rezervou, je daná konfigurace považována za kolizní. [10] [28]

V identifikovaných kolizních místech je následně nutné upravit orientaci svařovací hubice změnou jejího úhlu tak, aby byla zachována funkce kompenzace gravitačního působení a současně nedošlo ke kontaktu hubice s vyrobenou strukturou (Obr. 2-12 vpravo). Tímto postupem lze zajistit bezkolizní průběh navařování i při výrobě geometricky složitých prutových struktur. [5] [10]



Obr. 2-12 Analýza kolize (vlevo) [10], Vyhnutí se kolizi (vpravo) [5]

2.7 Výroba uzlových bodů

Uzlové body prutových struktur jsou místa, ve kterých se jednotlivé pruty spojují a dochází zde k přenosu zatížení mezi nimi. Geometrická přesnost a mechanické vlastnosti uzlových bodů tak přímo ovlivňují únosnost celé prutové struktury, neboť určují účinnost přenosu sil mezi jednotlivými pruty. Z tohoto důvodu vyžaduje výroba uzlových bodů zvýšenou pozornost, zejména z hlediska dosažení přesnosti a pevnosti spoje. [15]

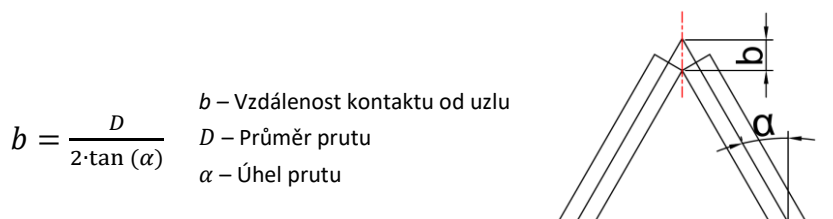
2.7.1 Rozdělení uzlových bodů prutových struktur

Uzlové body prutových struktur lze rozdělit podle prostorového uspořádání prutů a podle charakteru jejich napojení. Z hlediska prostorového uspořádání se rozlišují dvourozměrné (2D) a trojrozměrné (3D) uzlové body. U 2D uzlových bodů jsou pruty uloženy v jedné rovině, zatímco u 3D uzlových bodů se pruty sbíhají z různých prostorových směrů. [15]

Podle charakteru napojení prutů lze uzlové body rozdělit na konvergentní a divergentní. U konvergentních uzlů se pruty do oblasti uzlu sbíhají, zatímco u divergentních uzlů z oblasti uzlu vystupují. [15]

2.7.2 Specifika výroby uzlových bodů

Při výrobě uzlových bodů dochází k dotyku prutů dříve než v geometrickém modelu. Důvodem je nenulový průměr skutečných prutů, zatímco geometrický model pracuje pouze s jejich osami protínajícími se v jednom bodě. Poloha tohoto předčasného kontaktu závisí na průměru prutů a jejich vzájemném úhlu (Obr. 2-3). Bez úprav geometrie by docházelo k nadměrnému hromadění materiálu v oblasti uzlu a tím ke zhoršení jeho geometrické přesnosti. Těmito úpravami se zabývají jednotlivé způsoby výroby uzlových bodů, které cíleně modifikují geometrii uzlu a způsob ukládání materiálu v jeho okolí. [15]



Obr. 2-13 Spojení prutů před dosažením teoretického uzlu [15]

2.7.3 Způsoby výroby uzlových bodů

Způsoby výroby uzlových bodů určují, jak je upravena geometrie v místě uzlu, tedy jaká je vzájemná poloha prutů a rozložení materiálu v uzlovém bodu. [15]

V odborné literatuře jsou definovány způsoby:

- Přiblížení prutů

Při tomto způsobu se jednotlivé pruty postupně přibližují směrem k uzlovému bodu, přičemž se v jeho oblasti dostanou na takovou vzájemnou vzdálenost, že dojde k jejich spojení, aniž by se jejich osy geometricky křížily (Obr. 2-14a). [15]

- S centrálním bodem

U tohoto způsobu jsou jednotlivé pruty přivedeny do blízkosti uzlového bodu, přičemž vlivem jejich vzájemného přiblížení dochází ke spojení ještě před dosažením polohy uzlu. Do místa tohoto spojení je následně navařen vertikální prut, který vytváří centrální část uzlového bodu (Obr. 2-14b). [15]

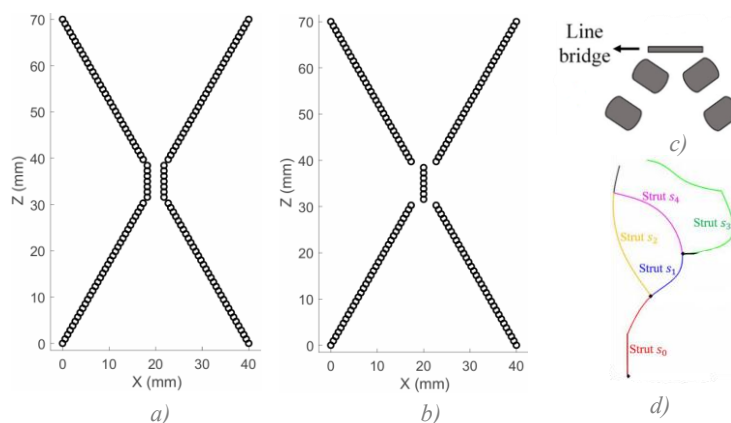
- Kontinuální navaření uzlového bodu

Při kontinuální výrobě uzlového bodu jsou jednotlivé pruty přivedeny do vzájemné blízkosti, aniž by mezi nimi došlo k přímému spojení. Spojení prutů je následně vytvořeno kontinuálním navařením materiálu v oblasti uzlového bodu (Obr. 2-14c). [17] [30]

- Po prutech

Uzlový bod je vytvářen postupným navařováním jednotlivých prutů, kdy je do oblasti uzlového bodu nejprve navařen jeden prut a následně je do stejného místa dovařen další prut, čímž vzniká uzlový bod (Obr. 2-14d). [12]

Uvedené způsoby výroby uzlových bodů lze přizpůsobit pro výrobu jak dvourozměrné (2D) tak i trojrozměrného (3D) uzlu.



Obr. 2-14 Výroba uzlového bodu a) Přiblížením prutů [15], b) S centrálním bodem [15], c) Kontinuálním navařením [17], d) Po prutech [12]

2.8 Řízení tepelného zatížení při výrobě

Při výrobě prutových struktur technologií WAAM hraje působení tepla významnou roli z hlediska geometrické přesnosti a opakovatelnosti procesu. Tepelné zatížení během procesu je určováno jak velikostí tepelného vstupu při samotném navařování, tak mírou akumulace tepla v již vyrobené části struktury. Pro zajištění geometricky přesné a stabilní výroby prutových struktur je proto nezbytné tepelné zatížení během procesu vhodným způsobem řídit. [8] [18]

2.8.1 Vliv tepelného vstupu

Tepelný vstup představuje množství energie dodané do svarové lázně v průběhu navařování. Je určován svařovacím proudem, napětím a dobou hoření oblouku. Ovlivňuje velikost a chování svarové lázně, rychlost tuhnutí navařovaného materiálu a jeho interakci s již vytvořenou částí struktury. [8]

Při vysokém tepelném vstupu dochází k výraznému natavení přídavného i základního materiálu, což vede ke zvětšení objemu svarové lázně a ke zvýšení její tekutosti. Natavený kov má v takovém případě tendenci se více rozlévat, což se u prutových struktur může projevit zvětšením průměru prutu, zhoršením tvarové stability a vyšší citlivostí na gravitační působení. Současně dochází ke zpomalení procesu tuhnutí, čímž se prodlužuje doba, po kterou je svarová lázeň náchylná k deformacím. [8]

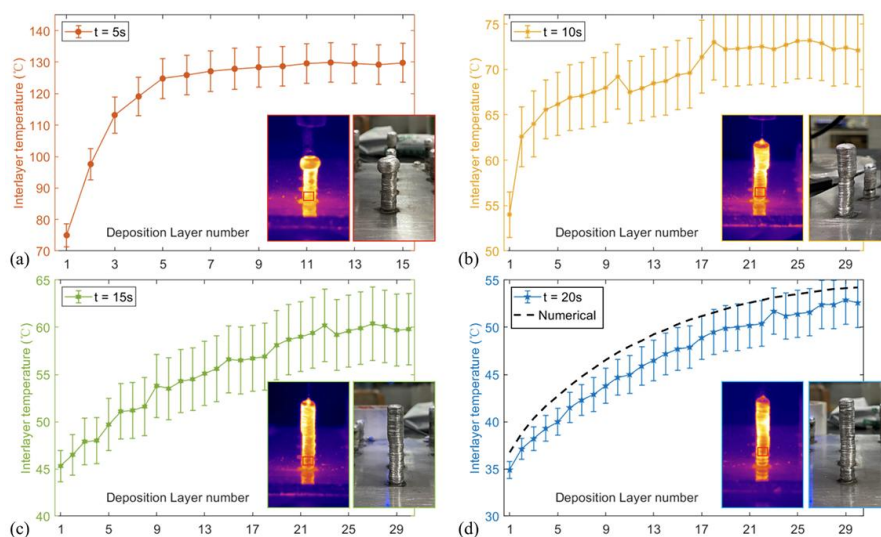
Naopak nízký tepelný vstup omezuje natavení materiálu a vede k menšímu objemu svarové lázně s nižší tekutostí. Tento stav podporuje rychlejší tuhnutí navařované vrstvy a vyšší tvarovou stabilitu prutů, což je z hlediska geometrické přesnosti žádoucí. Příliš nízký tepelný vstup však může způsobit nedostatečné natavení přídavného materiálu a omezené natavení povrchu předchozí vrstvy. V důsledku toho může docházet ke zhoršení spojení mezi jednotlivými návarů a k lokálním nespojitostem v prutu. Tyto jevy se mohou projevit sníženou soudržností struktury a negativně ovlivnit její mechanickou integritu. [8]

2.8.2 Akumulace tepla při výrobě

Při výrobě prutových struktur dochází vedle okamžitého tepelného zatížení jednotlivými navařovacími cykly také k postupné akumulaci tepla v již vyrobené části struktury, která je důsledkem opakovaného lokálního ohřívání při navařování. Pokud časový interval mezi jednotlivými navařovacími cykly není dostatečný k odvodu tepla do okolí, dochází v průběhu výroby k nárůstu teploty navařované struktury. [18]

V důsledku této akumulace teploty se s narůstající výškou struktury zvyšuje interpass teplota, tedy teplota předchozího návaru před zahájením dalšího navařovacího cyklu. Navařování na prut s vyšší interpass teplotou mění podmínky formování svarové lázně, zejména z hlediska rychlosti tuhnutí. Toto pomalejší tuhnutí prodlužuje dobu, po kterou zůstává materiál tekutý, čímž se zvyšuje náchylnost ke stékání vlivem gravitace což vede ke zhoršení geometrické přesnosti. [8] [18]

Akumulace tepla během výroby prutů je patrná na obr. 2-15, který znázorňuje vývoj interpass teploty při různých časových intervalech mezi navařovacími cykly. Z grafů vyplývá, že interpass teplota s rostoucím počtem návarů postupně narůstá, přičemž kratší intervaly vedou k výraznější akumulaci tepla a vyšším ustáleným teplotám. [18]



Obr. 2-15 Interpass teplota pro dobu mezi navařováním a) 5s, b) 10s, c) 15s, d) 20s [18]

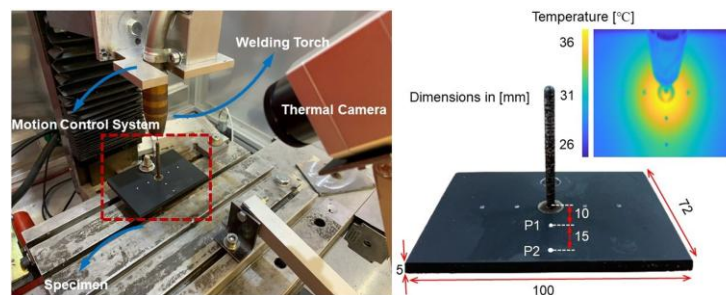
2.8.3 Řízení akumulované teploty během výroby

Akumulace tepla ovlivňuje stabilitu procesu i geometrickou přesnost navařovaných prutů. Pokud není tepelný stav struktury během výroby řízen, může docházet ke změnám ve formování svarové lázně a ke vzniku geometrických odchylek. [8]

Jedním ze základních přístupů k omezení akumulace tepla je vhodný návrh pořadí navařování v rámci výškové úrovně. Rozložení navařovacích kroků v každé úrovni zabráňuje opakovanému ukládání materiálu v bezprostředně sousedních oblastech a tím umožňuje snížit lokální přehřívání struktury. [18]

Významným nástrojem řízení akumulované teploty je nastavení dostatečných časových prodlev mezi jednotlivými navařovacími cykly. Zařazení časových intervalů umožňuje odvod tepla do okolí a omezuje nárůst interpass teploty s postupující výrobou. Délka těchto prodlev musí být volena s ohledem na nastavené svařovací parametry, materiál a výšku úrovně navařování. [18] [8]

Další možností řízení akumulované teploty je monitorování teplotního pole během výroby pomocí termokamery (Obr. 2-16). Získané teplotní informace umožňují sledovat aktuální tepelný stav navařované struktury a identifikovat oblasti s nadměrným tepelným zatížením. Na základě těchto informací lze upravovat časový rozvrh nebo pořadí navařování jednotlivých bodů, případně zahajovat další navařovací kroky až po dosažení požadované teploty v dané oblasti. [18] [16]



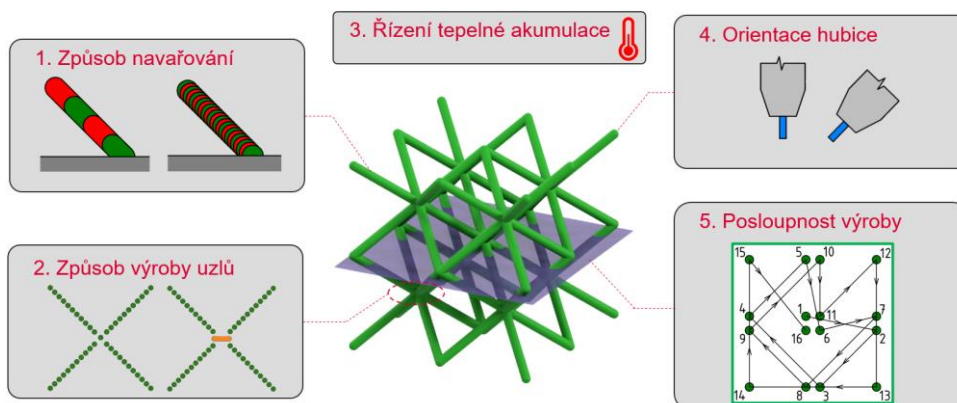
Obr. 2-16 Kontrola akumulovaného tepla pomocí termokamery

2.9 Existující strategie výroby

Tato kapitola se zabývá popisem již existujících strategií výroby prutových struktur technologií WAAM. Jednotlivé strategie budou popsány a diskutovány jejich základní nedostatky.

2.9.1 Strategie výroby

Před samotným představením existujících strategií výroby prutových struktur je nutné vymezit pojem strategie výroby. V této práci je za strategii výroby považován komplexní popis výroby prutových struktur technologií WAAM. Tento popis zahrnuje definici způsobu navařování prutů, postup navařování jednotlivých návarů, včetně definice způsobu výroby uzlových bodů. Součástí strategie je rovněž stanovení orientace svařovací hubice během výroby, a to včetně způsobu řešení kolizních situací mezi hubicí a již vyrobenou částí struktury. Nedílnou součástí strategie je také stanovení způsobu řízení akumulace tepla během výroby. Cílem takto definované strategie je dosažení geometricky přesné a opakovatelné výroby prutových struktur. Tento obecný popis strategie výroby slouží jako podklad pro programování celého robotického systému pracoviště WAAM k výrobě prutových struktur.



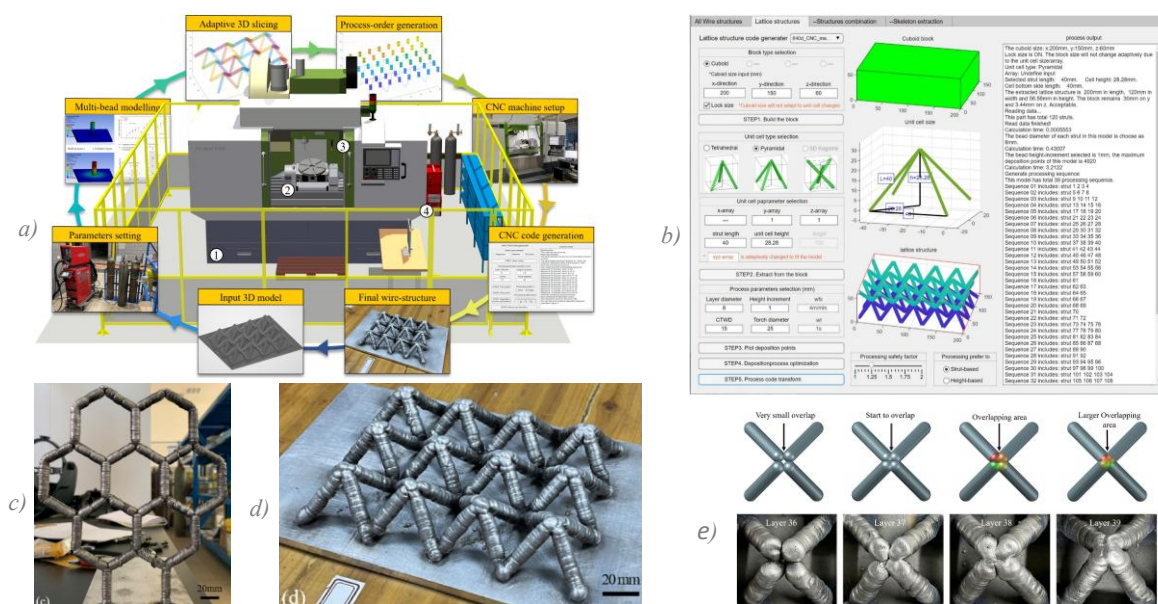
Obr. 2-17 Strategie výroby prutových struktur

V rámci studie je navržena strategie výroby periodických 2D (hexagonálních) a 3D (buňky topologie BCC) prutových struktur. Výroba je realizována metodou CMT na tříosém stroji s rotačním naklápěcím stolem, který umožňuje orientovat jednotlivé pruty do svislé polohy během navařování. [5]

Strategie je založena na bodovém způsobu navařování a svařovací hubice je během výroby orientována v ose prutu, přičemž v kolizních oblastech je její orientace lokálně upravována za účelem zajištění bezkolizního průběhu výroby. [5]

Součástí strategie je definice postupu navařování po jednotlivých výškových úrovních, kdy je v rámci každé úrovně stanoveno pořadí tvorby návarů na základě jejich polohy v rovině x–y. Uzlové oblasti jsou realizovány přiblížením prutů. Autoři dále navrhuji automatický generátor výrobních dat, který ze vstupní geometrie CAD obálky a zvoleného typu jednotkové buňky vytváří kód pro výrobu prutové struktury. [5]

Navržená strategie se nezabývá řízením akumulace tepla během výroby ani vyhodnocením geometrické přesnosti vyrobených struktur. Tvorba uzlových bodů je v práci zmíněna pouze okrajově a není samostatně podrobněji zkoumána. Zároveň je použití strategie omezeno na prutové struktury s topologií typu BCC a vyvinutý generátor výrobních dat není veřejně dostupný. [5]



Obr. 2-18 Strategie autora Yu 2021 a) Výrobní zařízení, b) Prostředí generátoru výrobních dat, c) Vyrobená 2D struktura, d) vyrobená 3D struktura, e) Výroba uzlových bodů [5]

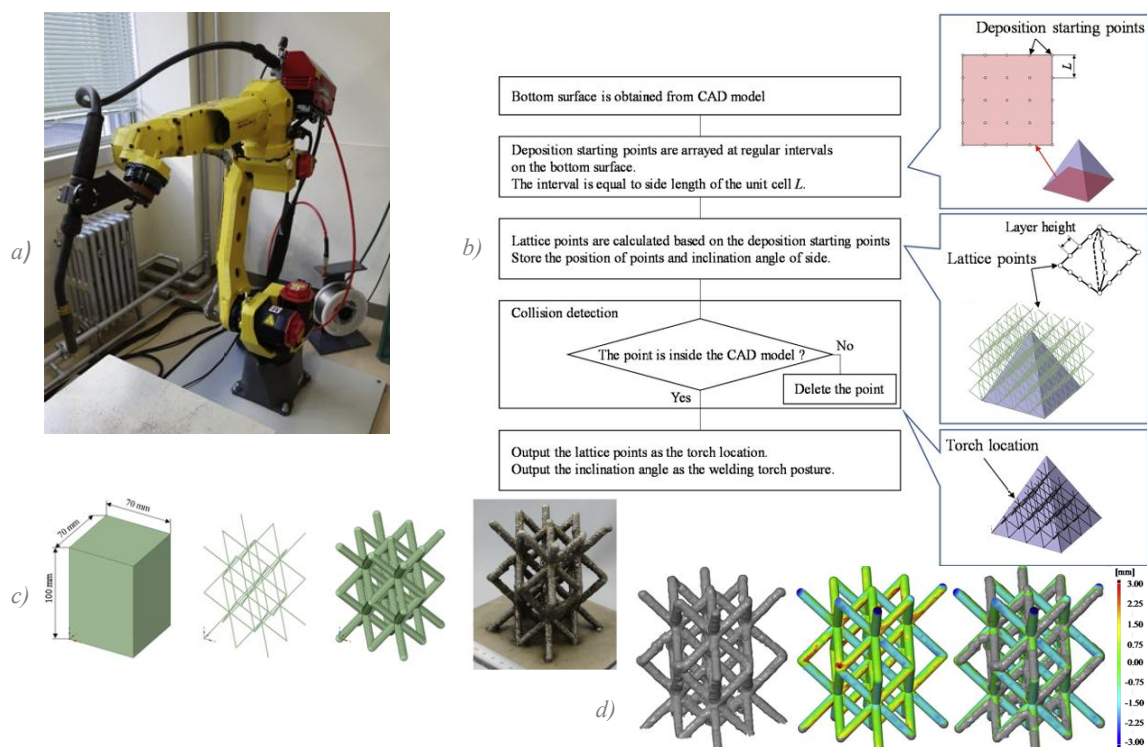
V této práci je navržena strategie výroby periodických 3D prutových struktur typu BCC. Výroba je realizována na robotickém pracovišti metodou GMAW. [34]

Jednotlivé pruty jsou vytvářeny bodovým způsobem navařování a svařovací hubice je během výroby orientována v ose prutu, přičemž není popsán způsob predikce a vyhnutí se kolizím. [34]

Výrobní postup je členěn do jednotlivých výškových úrovní a zahrnuje řízení časových prodlev mezi návary za účelem omezení tepelné akumulace. Minimální doba pro ochlazení je stanovena experimentálně na základě měření povrchové teploty a vyhodnocení stability geometrie prutů při různých časových prodlevách. Takto určená časová prodleva zajišťuje omezení geometrických odchylek během výroby. [34]

Součástí práce je rovněž vývoj CAM systému, který generuje výrobní data ze vstupního CAD modelu. Strategie je demonstrována na výrobě jednoduché BCC struktury, přičemž geometrická přesnost vyrobených struktur je kvantitativně hodnocena pomocí CT měření. [34]

Mezi nedostatky lze zařadit zaměření strategie jen na prutové struktury s topologií typu BCC. Dále není popsán způsob výroby uzlových bodů a postup navařování v úrovních. Vyvinutý CAM systém není veřejně dostupný. [34]



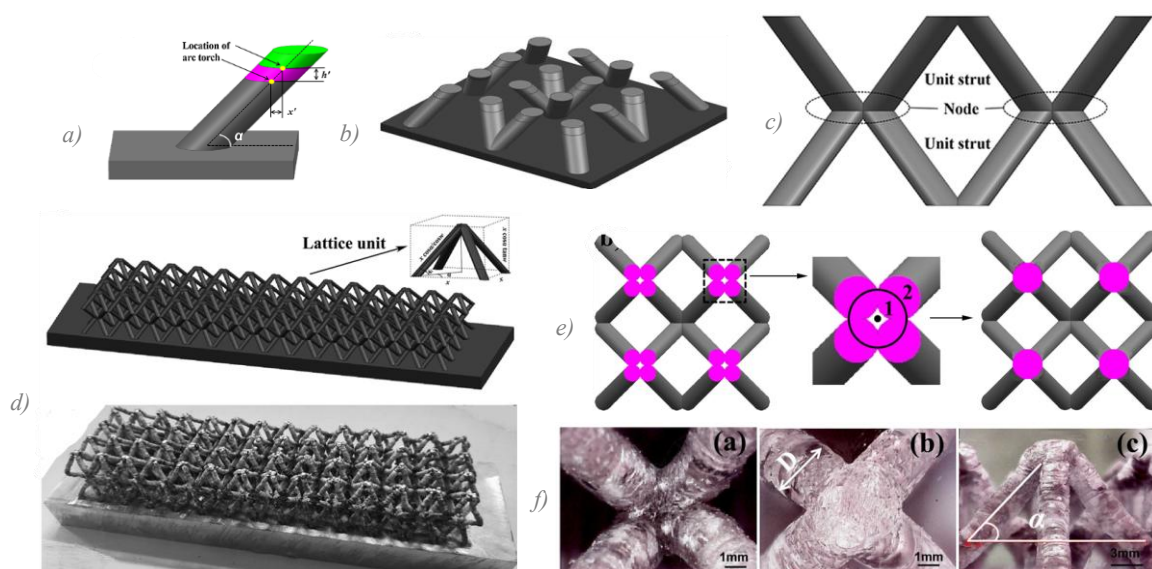
Obr. 2-19 Strategie autora Abe 2019 a) Výrobní zařízení, b) Struktura CAM systému (generátoru výrobních dat) c) CAD obálka, vložená prutová struktura, vizualizace, vyrobená struktura, d) Kontrola geom. přesnosti [34]

Strategie výroby prutových struktur technologií WAAM je v této práci realizována metodou GMAW v pulzním režimu, přičemž pro polohování svařovací hubice je využit šestiosý průmyslový robot. Výroba probíhá po bodech, kdy jsou návary ukládány ve formě kapek svarového kovu, jejichž velikost a počet určuje výslednou geometrii prutu. [30]

V průběhu výroby je svařovací hubice po celou dobu udržována ve svislé orientaci, což omezuje riziko kolizí s již vyrobenými částmi struktury. [30]

Uzlové body jsou vytvářeny kombinací bodového navařování středu uzlu a následného kontinuálního navařování po jeho obvodu, jehož cílem je vytvoření plochy pro napojení navazujících prutů. [30]

Mezi omezení navržené strategie lze zařadit její zaměření pouze na buňky typu BCC. Práce zároveň neuvádí konkrétní sekvenci ukládání jednotlivých svarových bodů v rámci jedné výškové úrovně a neřeší řízení akumulace tepla během výroby. [30]



Obr. 2-20 Strategie autora Youngjie 2020 a) Výroba po bodech, b) Výroba po úrovních, c) Rozdělení struktury na pruty a uzly, d) Navařená struktura, e) Způsob výroby uzlových bodů, f) Detail na uzlový bod [30]

2.10 Shrnutí hlavních zjištění

Prutové struktury nacházejí uplatnění v odlehčených konstrukcích, energii absorbujících strukturách a kompozitních systémech jako prostorová výztuž [24] [25] [26] [32]. Technologie WAAM umožňuje jejich výrobu s vyšší depoziční rychlostí a nižšími náklady než práškové metody aditivní výroby [1].

Při výrobě prutových struktur technologií WAAM je klíčové nastavení svařovacích parametrů, které přímo ovlivňuje geometrii vyráběných prutů, přičemž jejich výrobu lze realizovat vrstvením jednotlivých bodových návarů, nebo kontinuálním navařováním [10] [11]. V případě bodového navařování jsou základními nastavovanými parametry doba hoření oblouku, rychlost podávání drátu a časová prodleva mezi jednotlivými návary [12]. Z dostupných studií vyplývá, že rychlost podávání drátu se pohybuje přibližně v rozmezí 0,9 až 8 m/min a doba navařování v rozmezí přibližně 0,3 až 2,4 s [14] [15] [16] [17] [36] [37].

Při kontinuálním navařování je nastavení parametrů komplexnější. Mezi hlavní nastavované parametry patří rychlost pohybu svařovací hubice, rychlost podávání drátu a parametry pulzního režimu navařování [3] [20]. Ve známých studiích jsou tyto parametry uváděny v rozsahu rychlosti podávání drátu 0,3 až 1,2 m/min, rychlosti pohybu hubice 0,02 mm/s, špičkového proudu 20 až 180 A při pulzní frekvenci 0,25 až 16 Hz [3] [20].

Při navařování prutů pod úhlem dochází vlivem gravitace k narušení symetrického formování svarové lázně. Natavený materiál má tendenci stékat k dolní části prutu, což může způsobit posun svarové lázně mimo ideální osu [10] [27]. Tyto jevy jsou ovlivněny zejména objemem svarové lázně a dobou jejího tuhnutí, proto se výrazněji projevují u kontinuálního navařování [10] [27]. Gravitační působení lze omezit vhodnou orientací svařovací hubice, snížením tepelného vstupu nebo změnou orientace vyráběné struktury pomocí polohovacího zařízení [5] [8] [10] [29]. Při změně orientace hubice je nutné předem vyhodnocovat riziko kolizí s již vyrobenými pruty a v kolizních místech její orientaci upravit [5] [10] [28].

Významnou roli při určování geometrické přesnosti a pevnosti prutových struktur hrají uzlové body, ve kterých se jednotlivé pruty spojují a dochází zde k přenosu zatížení mezi nimi. Před vlastní výrobou uzlového bodu je nutné zohlednit nenulový průměr prutů a upravit jejich geometrii v okolí uzlu [15]. Uzlové body lze poté vytvářet různými způsoby – přiblížením prutů [15], vytvořením centrálního bodu [15], postupným navařováním prutů [12], nebo kontinuálním navařením materiálu v oblasti uzlu [17] [30]. Tyto přístupy lze využít jak pro dvourozměrné, tak pro prostorové uzly.

Dalším významným faktorem ovlivňujícím průběh výroby je vstup tepla a jeho akumulace. Nadměrná akumulace tepla zpomaluje tuhnutí nataveného materiálu a vede ke zhoršení geometrické přesnosti vyráběných prutů [8]. Z tohoto důvodu je nutné tepelný stav během výroby řídit, například vhodnou volbou pořadí výroby jednotlivých návarů a nastavením dostatečných časových prodlev mezi navařovacími cykly [8] [18]. Pro zefektivnění těchto postupů lze využít zpětnovazební řízení výrobního procesu založené na monitorování teploty během výroby [16] [18].

Existující strategie výroby prutových struktur technologií WAAM jsou v publikovaných pracích demonstrovány na výrobě periodických struktur typu BCC. Pro tvorbu výrobních dat autoři obvykle využívají specializované generátory výrobních dat, které na základě vstupního CAD modelu generují výrobní SRC kód pro výrobu prutové struktury. Jednotlivé strategie se liší zejména orientací svařovací hubice během výroby a způsobem tvorby uzlových bodů. [5] [34] [30]

2.11 Identifikace novosti a příležitosti

V posledních letech byly publikovány studie zaměřené na využití technologie WAAM pro výrobu prutových struktur. Tato technologie nabízí potenciál pro jejich výrobu zejména díky relativně nízkým výrobním nákladům a možnosti výroby rozměrných struktur. Výroba touto technologií je však stále ve fázi vývoje a některé aspekty výrobního procesu nejsou dosud v literatuře podrobněji popsány.

Hlavním faktorem ovlivňujícím výslednou geometrii prutů jsou svařovací parametry, které určují rozměry jednotlivých návarů. V publikovaných pracích je závislost rozměrů návaru na svařovacích parametrech sice sledována, experimenty jsou však často prováděny pouze v omezeném rozsahu doby hoření oblouku. Rozšíření tohoto rozsahu může přispět k lepšímu pochopení formování prutů při bodovém navařování.

Pro využití prutových struktur v konstrukčních aplikacích je důležité znát jejich mechanické vlastnosti. Ty jsou významně ovlivněny způsobem výroby uzlových bodů, ve kterých dochází k přenosu zatížení mezi jednotlivými pruty. Dosavadní studie se zaměřují především na výrobu uzlů ve dvourozměrných strukturách, zatímco tvorba prostorových uzlů je v literatuře popsána pouze v omezeném rozsahu. Současně nejsou jednotlivé způsoby výroby uzlových bodů mezi sebou systematicky porovnány.

Publikované strategie výroby jsou demonstrovány na strukturách typu BCC. To vytváří prostor pro rozšíření o jiný typ buňky. V některých studiích jsou pro tvorbu výrobních trajektorií využívány generátory výrobních dat, které generují výrobní SRC kód na základě CAD modelu obálky vyráběné prutové struktury. Tyto nástroje však nejsou veřejně dostupné. To vytváří prostor pro návrh vlastního generátoru výrobních dat.

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

3.1 Analýza problému

Technologie WAAM představuje perspektivní způsob výroby velkorozměrových prutových struktur, jelikož umožňuje výrobu tvarově a prostorově složitých konstrukcí, které by bylo konvenčními výrobními postupy obtížné až nemožné realizovat. Zároveň ve srovnání s jinými technologiemi aditivní výroby kovů nabízí vyšší rychlost výroby, menší celkové náklady na výrobu a větší výrobní prostor. Přesto se v současné době jedná převážně o experimentální způsob výroby, jehož praktické využití je zatím omezené.

Toto omezení je způsobeno řadou technologických problémů, které přímo ovlivňují stabilitu výrobního procesu a výslednou geometrickou přesnost vyrobených struktur. Mezi tyto problémy patří zejména citlivost procesu na nastavení svařovacích parametrů, orientace svařovací hubice při navařování a tepelný stav již vyrobené části struktury. Pro dosažení stabilní, geometricky přesné a opakovatelné výroby je proto nutné tyto dílčí problémy zvládnout a vzájemně provázat v rámci jednotné výrobní strategie.

3.1.1 Zákazník

Zákazníkem jsou společnosti působící v oblasti aditivní výroby, které se zabývají výrobou prutových konstrukcí z kovu a disponují technickým zázemím umožňujícím realizaci technologie WAAM.

3.1.2 Spotřebitel

Spotřebitelem navržených výrobních strategií jsou osoby působící ve společnostech využívajících technologii WAAM, které tyto strategie mohou využít při přípravě a realizaci výrobního procesu.

3.1.3 Produkt

Produktem této práce je výrobní strategie a předpis nastavení procesních parametrů pro výrobu prutových struktur technologií WAAM. Tato výrobní strategie bude implementována v softwarovém nástroji vytvořeném v prostředí Grasshopper. Tento Grasshopper skript bude sloužit k automatizované přípravě výrobních dat, kdy na základě vstupního CAD modelu obálky prutové struktury bude generovat výrobní data pro výrobu prutové struktury dle navržené výrobní strategie.

3.1.4 Charakteristika problému

V tabulce 3 jsou představeny důležité atributy pro vývoj strategie výroby prutových struktur technologií WAAM. Hlavním cílem je dosažení schopnosti výroby prutových struktur s deklarovanou geometrickou přesností.

Tabulka 3 Přehled atributů produktu (C – Cíle, O – Omezení, F – Funkce, P – Prostředek)

Název	C	O	F	P
Schopnost výroby prutových struktur	x		x	
Schopnost geometrické přesnosti $\pm 5\%$ velikosti jednotkové buňky	x	x		
Výroba uzlových spojů s dostatečnou kvalitou spojů	x	x		
Omezení tepelného vstupu	x		x	
Homogenní rozložení tepla během výroby	x		x	
Kolizně bezpečný pohyb		x	x	
Generátor výrobních dat na základě CAD obálky	x			x
Materiál struktur G3Si1				x
Výrobní zařízení (robot, rotační polohovadlo)				x

3.2 Cíl práce

Hlavním cílem diplomové práce je navrhnout a ověřit strategii výroby prutových struktur technologií WAAM. Navržená strategie bude zahrnovat všechny aspekty definované v kapitole 2.9.1, tedy způsob navařování prutů, postup navařování v jednotlivých výškových úrovních, způsob výroby uzlových bodů, orientaci svařovací hubice a způsob řízení akumulace tepla během výroby. Strategie má umožnit výrobu prutových struktur typu BCC a FCC z materiálu G3Si1 při dodržení geometrické přesnosti $\pm 5 \%$ velikosti jednotkové buňky. Součástí práce je také vytvoření generátoru výrobních dat v prostředí Grasshopper, který na základě vstupní CAD obálky vygeneruje výrobní data pro robotickou výrobu prutové struktury podle navržené strategie.

Aby toho mohlo být dosaženo, je zapotřebí:

- Experimentálně stanovit vliv svařovacích parametrů na geometrii navařovaného prutu.
- Ověřit výrobu prutů pod úhlem vůči horizontální rovině při kolmé orientaci hubice i při orientaci hubice v ose prutu tak, aby bylo dosaženo přesnosti sklonu prutu $\pm 0,5^\circ$.
- Stanovit limitní interpass teplotu, při které nedochází k deformaci prutu vlivem akumulace tepla.
- Otestovat způsoby výroby uzlových bodů při výrobě jednotkových buněk prutových struktur typu BCC a FCC a porovnat je z hlediska geometrické přesnosti a mechanických vlastností.
- Navrhnout generátor výrobních dat v prostředí Grasshopper.
- Výroba a vyhodnocení testovacích struktur.
- Výroba ukázkového dílu.

4 KONCEPČNÍ NÁVRH

4.1 Analýza cílů

Hlavním cílem práce je navrhnout a ověřit strategii výroby prutových struktur technologií WAAM. Strategie musí umožnit výrobu prutových struktur typu BCC a FCC z drátu G3Si1 při dodržení požadované geometrické přesnosti. Z tohoto důvodu je nutné se při řešení zaměřit na několik vzájemně souvisejících oblastí, které ovlivňují výslednou kvalitu a opakovatelnost výroby.

První oblastí je stanovení svařovacích parametrů, které určují rozměry vyráběných prutů. Druhou oblastí je ověření výroby šikmých prutů, jelikož přesnost sklonu prutů přímo ovlivňuje výslednou geometrii celé struktury.

Další část řešení se zaměřuje na výrobu uzlových bodů, které musí zajistit správné napojení prutů a dostatečnou pevnost spoje. Způsoby tvorby uzlů budou ověřeny při výrobě buněk BCC a FCC a porovnány z hlediska geometrické přesnosti a mechanických vlastností.

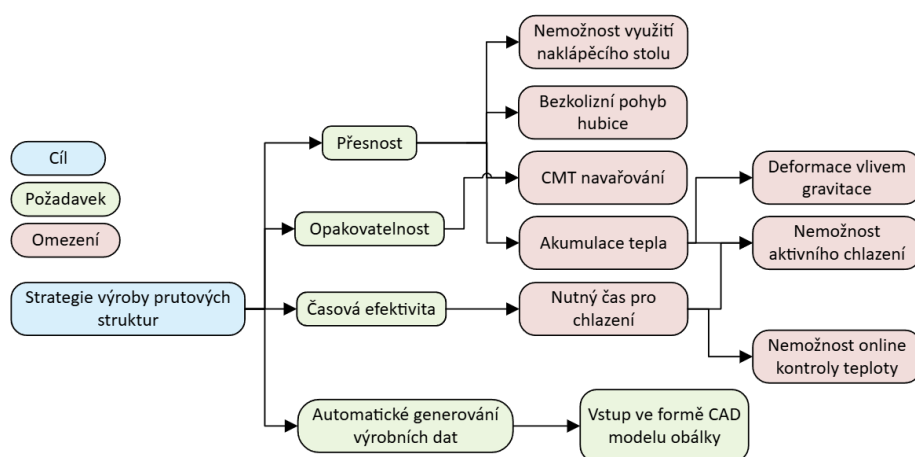
Pro omezení deformací prutů vlivem akumulace tepla je nutné stanovit limitní interpass teplotu a využít ji při návrhu časových prodlev mezi jednotlivými navařovacími cykly. Výsledná strategie bude implementována do generátoru výrobních dat v prostředí Grasshopper, jehož funkčnost bude ověřena výrobou testovacích struktur a ukázkového dílu.

4.2 Specifická omezení

Při výrobě prutových struktur technologií WAAM působí řada specifických omezení. Jedním z faktorů, ovlivňujících přesnost, je působení gravitace na roztavený kov, které se výrazně projevuje při navařování prutů pod úhlem a může vést ke stékání taveniny a následné deformaci prutu. Toto chování je úzce spojeno s akumulací tepla v konstrukci, neboť při vyšší teplotě struktury zůstává navařený materiál déle v tekutém stavu a jeho náchylnost ke gravitačnímu stékání se zvyšuje. Akumulace tepla tak představuje omezení jak z hlediska dosažitelné geometrické přesnosti, tak z hlediska maximální rychlosti výroby. Při příliš rychlém výrobním postupu může docházet k deformacím vlivem gravitace, zatímco nadměrné prodlevy mezi jednotlivými navařovacími cykly proces zpomalují.

Dalším faktorem ovlivňujícím přesnost je nutnost zajištění bezkolizního pohybu hořáku. Tento problém se projevuje při výrobě s hubicí orientovanou v ose prutu, kdy může v oblasti uzlových bodů dojít ke kolizi hořáku s již navařenými pruty. V těchto místech je proto nutné orientaci hubice upravit, což však může způsobovat drobné odchylky od požadované geometrie prutu. Přesnost a opakovatelnost je dále omezena samotnou technologií CMT, u které se mohou v průběhu navařování vyskytovat procesní odchylky. Tyto odchylky souvisejí s řízením svařovacího procesu, při němž zdroj v každém CMT cyklu provádí korekce proudu a napětí s cílem udržet oblouk stabilní. V jejich důsledku vznikají malé rozdíly v okamžitém tepelném vstupu a v množství naneseného materiálu. V důsledku toho mohou mít jednotlivé návary i při shodném nastavení parametrů mírně rozdílné rozměry. Tyto odchylky se přenášejí do dalších úrovní, kde se kumulují a mohou vést k vychýlení celé struktury od požadované geometrie a tím i ke snížení opakovatelnosti výroby mezi jednotlivými kusy.

Samostatnou oblastí jsou omezení vyplývající z použitého pracoviště WAAM na Fakultě strojního inženýrství VUT v Brně. Pracoviště je vybaveno rotačním stolem bez možnosti naklápění, což omezuje přesnost výroby šikmých prutů. Naklápěcí stůl by umožnil udržet optimální polohu svarové lázně vůči směru působení gravitace, čímž by se snížilo stékání taveniny a zlepšila by se geometrická přesnost vyráběných prutů. Dalším omezením je skutečnost, že ačkoliv je pracoviště vybaveno termokamerou a rozvodem stlačeného vzduchu pro aktivní chlazení, tyto systémy nejsou zapojeny do online řízení výrobního procesu a jsou využívány pouze offline. Zapojení termokamery do výrobního procesu by umožnilo zahajovat jednotlivé kroky navařování až po dosažení definované teploty konstrukce, zatímco využití aktivního chlazení stlačeným vzduchem v automatizovaném režimu by umožnilo urychlit ochlazování navařených částí. Kombinace těchto prvků by vedla k přesnější regulaci teploty struktury a ke zkrácení výrobního času. V současném stavu je možné regulaci teploty řešit nepřímo vložením doby chlazení mezi jednotlivými navařovacími cykly, což prodlužuje výrobní čas a snižuje přesnost řízení teploty. Přehled hlavních cílů a omezení je znázorněn na Obr. 4-1.



Obr. 4-1 Strom cílů a omezení

4.3 Technická funkční analýza

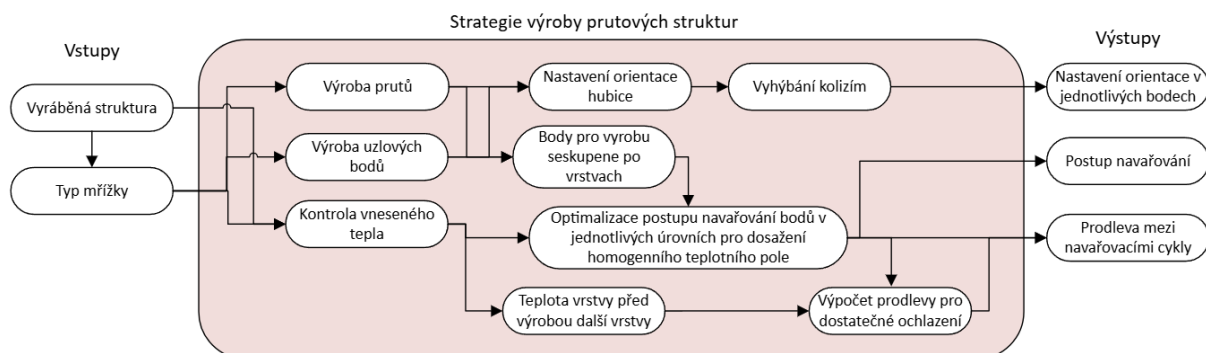
Vstupem do vyvíjené strategie je vyráběná struktura tvořena jednotlivými buňkami.

Hlavními úkoly navrhované strategie je stanovit způsob výroby prutů a uzlových bodů a řídit maximální teplotu ve struktuře. V prvním kroku proběhne určení způsobu výroby prutů a uzlových částí. Dále je vyráběná struktura rozdělena na jednotlivé body navařování a těmto bodům jsou přiřazeny orientace hubice při výrobě. Tyto orientace hubice jsou následně optimalizovány za účelem zamezení rizika kolizí mezi hubicemi a již navařenými pruty.

Všechny výrobní body jsou rozřazeny podle své výškové pozice do úrovní, kde v rámci každé úrovně probíhá optimalizace pořadí navařování tak, aby bylo dosaženo homogenního teplotního pole.

Kontrola tepla ve struktuře se zaměřuje na teplotu části struktury, na kterou má být vyráběn návar. Tato teplota bude řízena prostřednictvím časových prodlev mezi jednotlivými navařovacími cykly, přičemž délka prodlev bude stanovena s ohledem na počet návarů v úrovni a experimentálně zjištěný čas chlazení.

Výstupem je kompletní postup výroby návarů v jednotlivých úrovních, který zahrnuje stanovení orientace hubice pro každý bod a určení časových prodlev mezi navařováním jednotlivých bodů. Celkový postup je schematicky znázorněn na Obr. 4-2.



Obr. 4-2 Technická funkční analýza (Glass box)

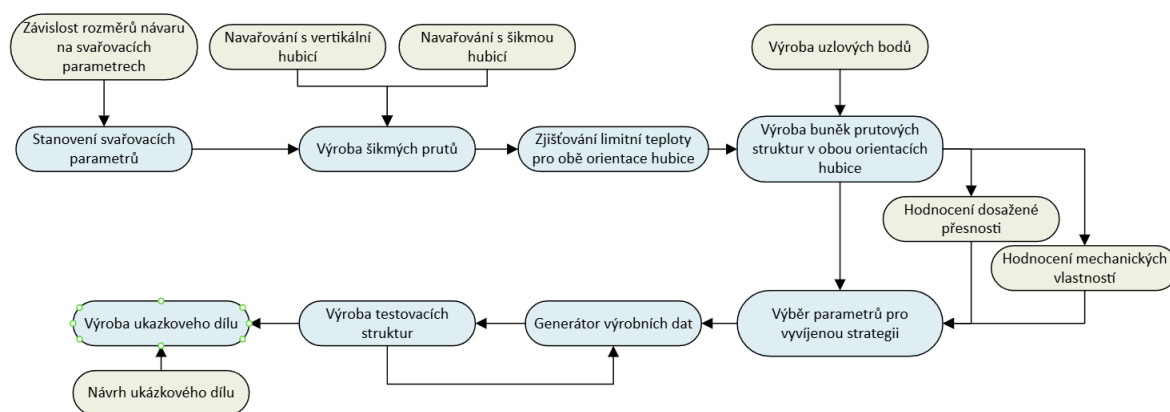
4.4 Návrh řešení

Prvním krokem vývoje bude zmapování vlivu svařovacích parametrů na rozměry navařovaného prutu. Na základě zjištěných závislostí budou vybrány konkrétní svařovací parametry, které budou použity v navazujících experimentech. Tyto experimenty budou zaměřeny na ověření vyrobitelnosti šikmých prutů ve dvou konfiguracích, a to s vertikální orientací svařovací hubice a s hubicí orientovanou ve směru osy prutu. Na tuto část naváže výroba prutů při různých interpass teplotách s cílem stanovení limitní teploty, při níž ještě nedochází k deformaci prutu vlivem akumulace tepla.

Dalším krokem bude výroba jednotlivých typů buněk prutových struktur, která bude provedena při obou orientacích svařovací hubice a s různými způsoby tvorby uzlových bodů. Následně bude provedena analýza dosažené geometrické přesnosti a mechanických vlastností vyrobených buněk. Na základě těchto výsledků bude vybrána orientace hubice a způsob výroby uzlového bodu pro navrhovanou výrobní strategii.

Na základě zvolených výrobních přístupů bude následovat vývoj skriptu v prostředí Grasshopper, který bude sloužit jako generátor výrobních dat. Z vložené CAD obálky bude vytvářet příkazy pro výrobu prutové struktury na robotickém pracovišti. V rámci skriptu bude optimalizován postup výroby v jednotlivých výškových úrovních a bude určován potřebný čas ochlazení před dalším navařováním. Skript bude následně testován při výrobě testovacích struktur a na základě zjištěných výsledků bude zpětně optimalizován.

Posledním krokem bude návrh a výroba ukázkového dílu, který prokáže funkčnost navržené strategie i vyvinutého generátoru výrobních dat. Celkový postup řešení práce je schematicky znázorněn na Obr. 4-3.



Obr. 4-3 Návrh postupu řešení práce

4.5 Koncepty výroby

Kapitola koncepty výroby se zaměřuje na návrh a posouzení různých přístupů k realizaci dílčích částí výroby prutových struktur technologií WAAM.

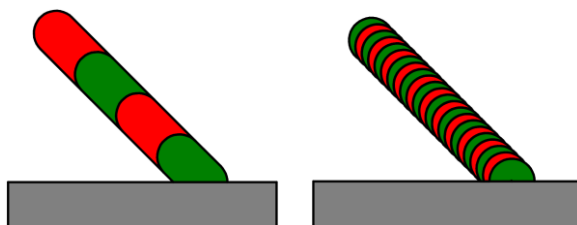
4.5.1 Způsob navařování

Rešerše představila dva způsoby nanášení materiálu – kontinuální navařování a navařování po bodech. Kontinuální navařování je výhodné díky vyšší produktivitě, která vyplývá z plynulé depozice prutu bez opakovaného zapalování a zhášení oblouku. Nevýhodou je však komplexnější nastavení svařovacích parametrů, které musí být sladěny tak, aby byl zajištěn stabilní růst prutu a nedocházelo k jeho deformaci vlivem nadměrného tepelného vstupu a akumulace tepla. U prostorových prutových struktur může navíc výroba celého prutu v jednom souvislém kroku způsobovat překážky při následné výrobě dalších prutů a zvyšovat tak riziko kolize se svařovací hubicí. Výrobu lze sice rozdělit na kratší kontinuální segmenty (Obr.4-4 vlevo), tím se však částečně omezuje hlavní výhoda tohoto přístupu, tedy vysoká produktivita.

Navařování po bodech je naproti tomu založeno na přerušovaném ukládání materiálu v jednotlivých návarech (Obr. 4-4 vpravo), což vede k cyklickému ohřevu a ochlazování vyráběné struktury. Tento způsob umožňuje účinnější omezení akumulace tepla a lepší kontrolu tuhnutí svarové lázně, avšak za cenu nižší výrobní produktivity.

S ohledem na charakter řešené úlohy je upřednostněn způsob navařování po bodech. Tento přístup umožňuje mapování vlivu svařovacích parametrů na geometrii navařovaného bodu při menším počtu proměnných a je vhodný pro postupnou výrobu celé prutové struktury po jednotlivých výškových úrovních. Přerušovaný charakter ukládání materiálu dále přispívá ke snížení rizika deformací souvisejících s akumulací tepla.

Kontinuální navařování je v rámci práce uvažováno pouze jako alternativní přístup pro lokální úseky, například v oblasti uzlových bodů.



Obr. 4-4 Kontinuální navařování po segmentech (vlevo), navařování po bodech (vpravo)

4.5.2 Výroba šikmých prutů

Dosažení přesné výroby šikmých prutů s definovaným úhlem je zásadní pro zajištění geometrické přesnosti vyráběných struktur. Výrobu těchto prutů lze realizovat dvěma způsoby – s vertikální orientací svařovací hubice (Obr. 4-5 vlevo), nebo s jejím natočením do osy vyráběného prutu (Obr. 4-5 vpravo).

Vertikální natočení hubice

V této konfiguraci je svařovací hubice po celou dobu procesu orientována kolmo k podložce, bez ohledu na sklon vyráběného prutu.

Výhody:

- Nižší nároky na vybavení pracoviště (pro polohování postačí tříosý stroj).
- Jednodušší na řízení (méně náročný Grasshopper skript).

Nevýhody:

- Nižší přesnost orientace prutů.
- Omezení úhlu vyráběného prutu (se zmenšujícím se úhlem se zvětšuje jejich deformace).
- Horší geometrická a tvarová přesnost vyrobeného prutu.
- Spodní část prutu vykazuje horší kvalitu povrchu, tzv. „downskin“.

Orientace hubice v ose prutu

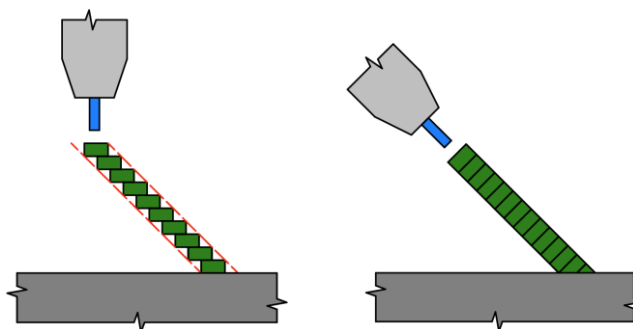
Při tomto nastavení je svařovací hubice orientována ve směru osy vyráběného prutu.

Výhody:

- Lepší geometrická a tvarová přesnost vyrobeného prutu.
- Přesnější orientace navařených prutů.

Nevýhody:

- Vyšší nároky na vybavení pracoviště (průmyslový robot, otočný stůl).
- V prostoru uzlových bodů hrozí riziko kolize svařovací hubice s již navařenými pruty (nutné predikovat a vyhnout se).
- Náročnější na řízení (změna orientace hubice při výrobě, ovládání otočného stolu).



Obr. 4-5 Vertikálně orientovaná hubice (vlevo), hubice orientovaná ve směru osy prutu (vpravo)

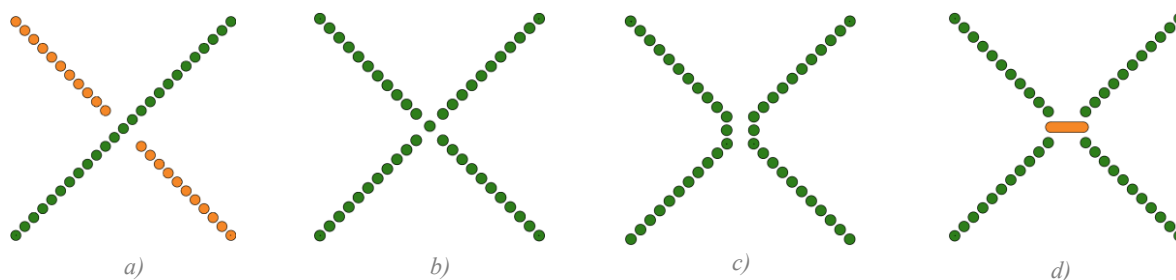
V rámci práce budou buňky prutových struktur vyráběny jak s vertikálně orientovanou hubicí, tak s hubicí orientovanou ve směru osy prutu. Tento přístup umožní porovnání technologicky jednoduššího řešení s vertikální orientací hubice a potenciálně přesnějšího řešení s hubicí nakloněnou ve směru osy prutu. Obě výrobní konfigurace budou následně hodnoceny z hlediska dosažené geometrické přesnosti a výrobního času.

4.5.3 Způsob výroby uzlových bodů

V rámci rešerše byly popsány způsoby výroby uzlových bodů. V tabulce 4 jsou tyto způsoby dále porovnány z hlediska jejich hlavních výhod a nevýhod.

Tabulka 4 Způsoby výroby uzlových bodů

Typ	Popis	Výhody	Nevýhody
Po prutech	Uzlový bod je vytvářen postupným navařováním prutů. Nejprve je vytvořen jeden prut, na který jsou následně napojovány další pruty.	Malý vnos tepla do místa uzlu.	Riziko kolize hubice s již vyrobeným prutem.
S jedním centrálním bodem	Pruty se neprolnou, ale přiblíží se na tak malou vzdálenost, že dojde k jejich spojení. Do střední části uzlu je vložen středový bod.	Rychlá výroba uzlových bodů. Jednoduchý program.	Menší množství materiálu v místě uzlu, které může zhoršit spojitost mezi pruty a tím i pevnost struktury.
Přiblížení prutů	Pruty se neprolnou, ale přiblíží se na tak malou vzdálenost, že dojde k jejich spojení.	Jednoduchý program. Zvětšený objem materiálu v uzlu.	Nutné delší prodlevy mezi navařovacími cykly v uzlu.
Kontinuální navaření uzlu	Uzel je navržen jako s centrálním bodem, ale namísto tohoto bodu je kontinuálně navařeno spojení prutů.	Vhodné rozmístění materiálu v místě uzlu, zajišťující dobré spojení prutů.	Složitější program, který mění způsob navařování (bodový/kontinuální) v průběhu výroby. Kontinuální vrstva zvyšuje vnos tepla – nutné delší prodlevy mezi navařovacími cykly v uzlu.



Obr. 4-6 Způsoby výroby uzlových bodů – a) Po prutech, b) S centrálním bodem, c) Přiblížení prutů, d) Kontinuální navaření uzlového bodu

Pro další část práce jsou zvoleny způsoby výroby uzlových bodů přiblížením prutů a kontinuální vrstvou. Tyto přístupy umožňují vhodné rozmístění objemu materiálu v oblasti uzlu, což přispívá k dobrému spojení jednotlivých prutů a k zajištění mechanické integrity uzlové oblasti. Uzly buněk prutových struktur budou vyrobeny oběma způsoby a následně porovnány z hlediska geometrické přesnosti a mechanické pevnosti.

Způsob po prutech nebyl zvolen, neboť může vést ke zvýšenému počtu kolizních situací mezi svařovací hubicí a pruty, které jsou navařeny dříve.

Způsob výroby s centrálním bodem nebyl zvolen z důvodu nízkého objemu materiálu v oblasti uzlu, který by mohl negativně ovlivnit mechanické vlastnosti v uzlové oblasti.

5 PŘEDBĚŽNÝ NÁVRH

5.1 Použitá zařízení

Pro řešení diplomové práce bylo využito robotické pracoviště WAAM na VUT v Brně, schematicky znázorněné na Obr. 5-1. Na tomto pracovišti operuje šestiosé robotické rameno, polohovací otočný stůl a svařovací zdroj CMT.

Robotické rameno

Pro pohyb svařovací hubice byl použit průmyslový robot KUKA KR 60 HA. Tento model nabízí opakovatelnost pohybu $\pm 0,05$ mm, dosah přibližně 2033 mm a nosnost 60 kg. Díky vysoké přesnosti a rozsahu je vhodný pro výrobu rozsáhlých prutových struktur.

Rotační stůl

Polohování navařované struktury zajišťuje otočný stůl KUKA KPF1-V500 Variante 3. Aby bylo možné na stůl navařovat a současně jej otáčet bez nutnosti přepojování zemnicí svorky, byl doplněn o zařízení pro automatické uzemnění od firmy CLOOS. Toto zařízení je přitlačováno z dolní strany rotační části stolu a zajišťuje uzemnění i při jeho otáčení.

Svařovací zdroj

Pro navařování byl použit svařovací zdroj Fronius TPS 3200 CMT, který umožňuje navařování metodami MIG, MAG a WIG. V rámci řešení práce byla použita modifikace procesu MIG CMT. Tato technologie pracuje v proudovém rozsahu 3–320 A a umožňuje nastavit rychlost podávání drátu až do 15 m/min. Zařízení rovněž podporuje využití synergických linií, které automaticky upravují parametry procesu na základě zvoleného materiálu, průměru drátu, typu ochranného plynu a nastavené rychlosti podávaného drátu.

Termokamera

Pro kontrolu teploty při výrobě byla využita termokamera Workswell WIC Industrialm s rozlišením 640×512 px, teplotní citlivostí $\leq 0,03$ °C a měřitelným rozsahem až do 1 500 °C. Kamera je připojena k počítači prostřednictvím rozhraní Gigabit Ethernet a její výstup je zpracováván pomocí softwaru dodávaného výrobcem.

Skener

Pro vyhodnocení geometrie navařených struktur byl použit optický 3D skener ATOS Triple Scan III. Pro měření struktur byl zvolen měřicí objem $0,5 \times 0,5 \times 0,5$ m, kterému odpovídá použitá sada objektivů, přičemž skener v tomto nastavení dosahuje nejistoty měření $\pm 0,02$ mm. Před samotným měřením je nutné povrch struktury zmatnit pomocí křídového spreje, aby se omezily odlesky a zajistilo se tak stabilní snímání povrchu. Výstupem je 3D mračno bodů, které bude následně zpracováno v softwaru GOM Inspect pro porovnání s nominální geometrií a vyhodnocení tvarových a rozměrových odchylek.

Nástroj pro tvorbu výrobních příkazů

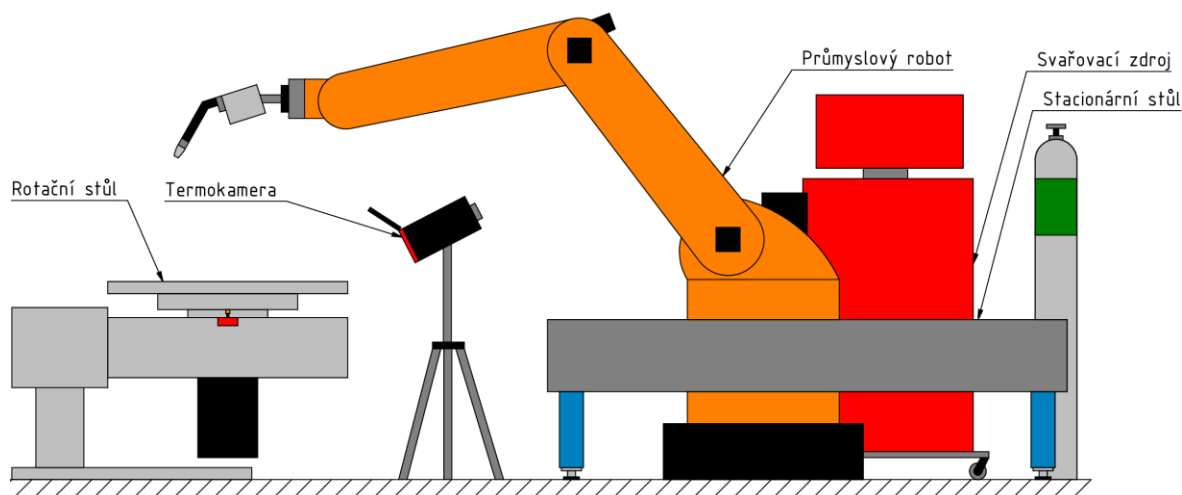
Pro generování výrobních příkazů je využito prostředí Grasshopper, které umožňuje tvorbu parametrických modelů a programů. V rámci práce je v tomto prostředí vytvořen program pro automatickou přípravu výrobních dat na základě vstupní geometrie. Výstupem programu jsou kompletní SRC soubory obsahující pohybové instrukce robota, řízení navařovacího cyklu a časové prodlevy mezi jednotlivými body navařování.

Navařovaný materiál

Pro výrobu byl využit materiál G3Si1. Jedná se o nelegovanou manganovo – křemíkovou ocel určenou pro svařování nelegovaných a nízkolegovaných konstrukčních ocelí. Tento materiál se vyznačuje dobrou svařitelností, stabilním obloukem a nízkou tvorbou rozstříku. Obsah křemíku a manganu ve svarovém kovu zvyšuje odolnost proti vzniku pórů, zajišťuje jemnější strukturu svaru a přispívá k dosažení vyšší houževnatosti.

Tabulka 5 Vlastnost navařovaného materiálu

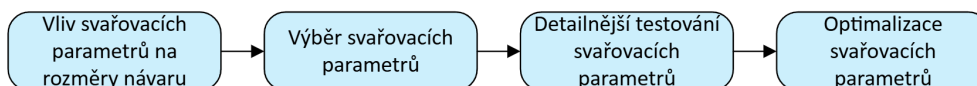
Označení	G3Si1
Norma	EN ISO 14341-A
Chem. složení	C $\approx$ 0,08%, Mn = 1,4-1,6%, Si = 0,7-1%
Mech. vlastnosti	Re $\geq$ 420MPa, Rm $\approx$ 570MPa, A $\geq$ 22%
Použitý průměr drátu	0,8mm



Obr. 5-1 Schéma použitého pracoviště

5.2 Nastavení svařovacích parametrů

Tato kapitola popisuje postup nastavení svařovacích parametrů. V první části bude zmapován vliv jednotlivých parametrů na rozměry návaru. Na základě požadované geometrie budou vybrány konkrétní hodnoty svařovacích parametrů, které budou následně detailně testovány a případně optimalizovány tak, aby splňovaly definované požadavky. Celkový postup stanovení svařovacích parametrů je schematicky znázorněn na Obr. 5-2.



Obr. 5-2 Postup stanovení svařovacích parametrů

Nastavované svařovací parametry

V souladu s provedenou rešerší byly jako hlavní nastavované parametry bodového navařování prutů zvoleny rychlost podávání drátu a doba hoření oblouku. Ostatní procesní parametry byly nastavovány automaticky svařovacím zdrojem prostřednictvím synergické linie. Časová prodleva mezi navařovacími cykly byla řízena manuálně tak, aby opakované navařování probíhalo až ve chvíli, kdy se interpass teplota blížila teplotě okolí. Tím byla omezena akumulace tepla, která by mohla vést k deformacím a ztrátě tvarové stability prutu.

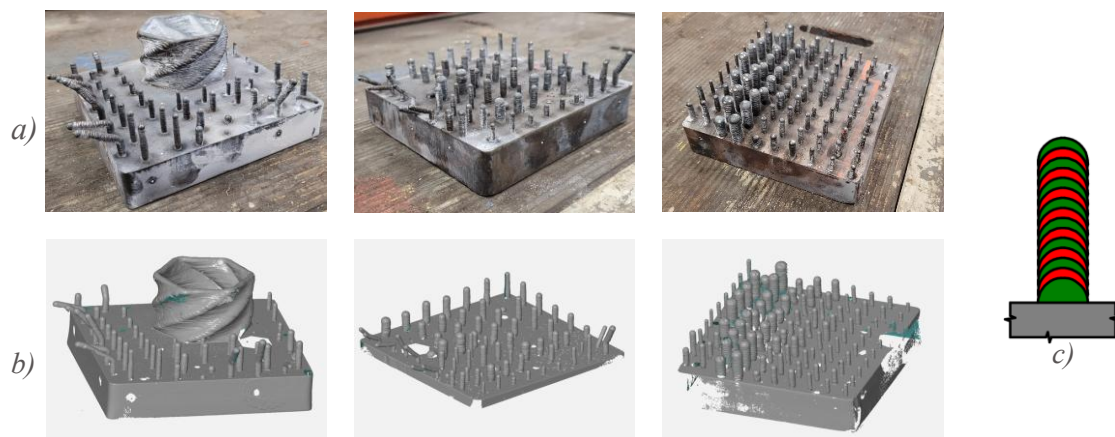
Rozsah testovaných parametrů

V nalezených studiích se rychlost podávání drátu pohybuje v rozmezí $0,9 - 8,0 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ a čas navařování v intervalu $0,3 - 2,4 \text{ s}$ (kap. 2.5.1). Na základě těchto údajů byl pro experiment zvolen rozsah rychlosti podávání drátu $1,5 - 8,0 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, přičemž horní hranice odpovídá hodnotám uváděným v rešerši a dolní hranice je dána technickými možnostmi použitého svařovacího zdroje, který neumožňuje rychlost podávání drátu menší, než je uvedená hodnota.

Rozsah času navařování byl pro experiment stanoven na $0,1 - 2,4 \text{ s}$. Horní hranice odpovídá maximálním hodnotám používaným v dostupných studiích, zatímco dolní hranice byla záměrně snížena s cílem zkoumat geometrii prutů i při kratších časech navařování.

5.2.1 Průběh experimentu

V experimentu byly navařovány pruty tvořené patnácti návary, přičemž každý prut byl vyroben s odlišnou kombinací svařovacích parametrů. Jednotlivé kombinace byly voleny systematicky tak, aby pokryly sledovaný rozsah rychlosti podávání drátu a doby hoření oblouku. Výškový krok robota mezi jednotlivými body byl u každého prutu konstantní, avšak mezi jednotlivými pruty se lišil v závislosti na zvolené kombinaci svařovacích parametrů. Hodnota výškového kroku byla stanovena odhadem na základě výsledků předchozího experimentu. Po dokončení navařování byly platformy s vyrobenými pruty digitalizovány pomocí 3D skenování (Obr. 5-3).

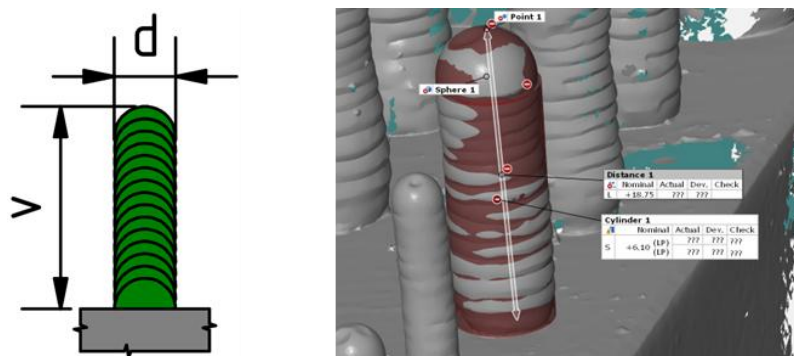


Obr. 5-3 Platformy s navařenými pruty – a) Fotografie, b) Sken, c) Schéma navařeného prutu

5.2.2 Vliv svařovacích parametrů na rozměry návaru

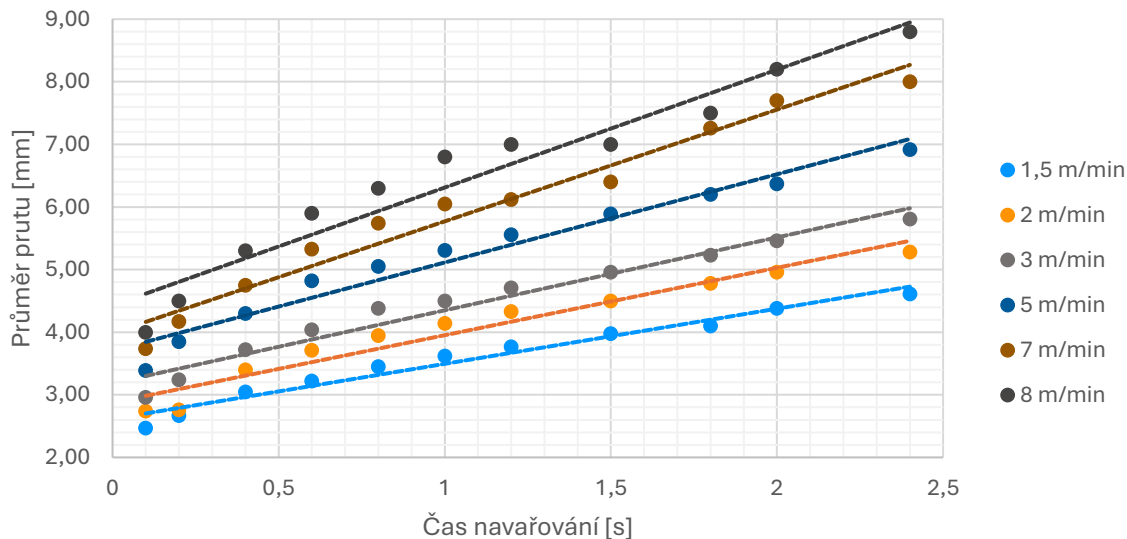
Vyhodnocení naskenované geometrie bylo provedeno v softwaru GOM Inspect. U všech prutů byla měřena jejich celková výška a průměr, přičemž průměr byl stanoven pomocí Gaussovy aproximace. Měřené rozměry a příklad vyhodnocení v softwaru GOM Inspect jsou znázorněny na Obr. 5-4.

Z celkové výšky prutu byla následně vypočtena průměrná výška jednoho navařeného bodu, a to jako podíl celkové výšky prutu a počtu realizovaných návarů.



Obr. 5-4 Měřené rozměry (vlevo), měření v programu GOM Inspect (vpravo)

Grafické zobrazení na Obr 5-5 znázorňuje závislost průměru prutu na svařovacích parametrech.

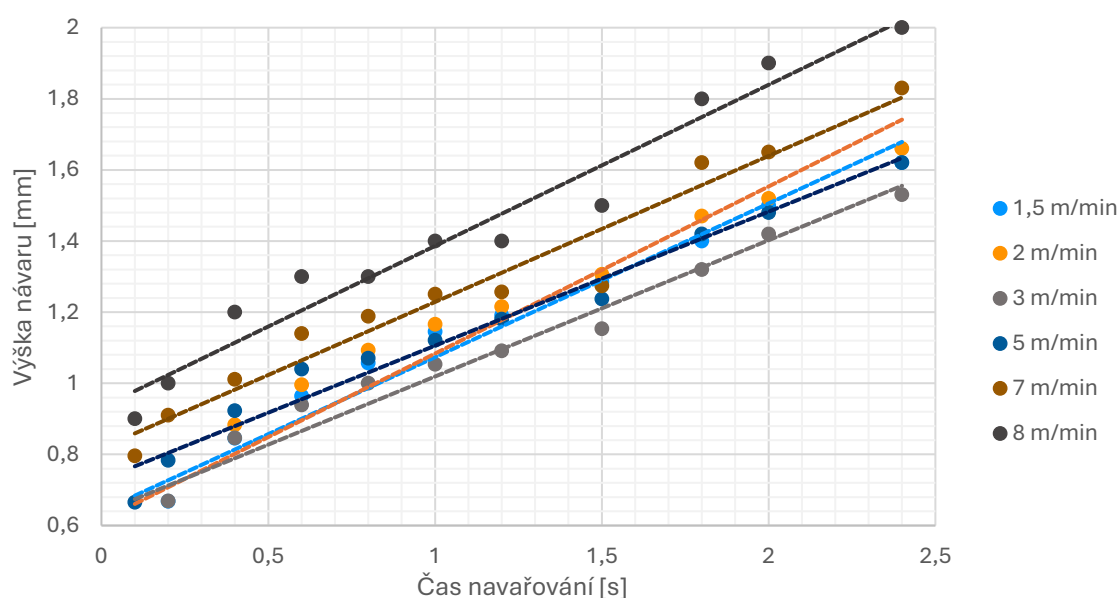


Obr. 5-5 Závislost průměru prutu na svařovacích parametrech

Z naměřených dat lze pozorovat, že vliv rychlosti podávání drátu se zesiluje s rostoucí dobou navařování. Zatímco při krátkých časech navařování (0,1–0,4 s) jsou rozdíly v průměru prutů mezi jednotlivými rychlostmi podávání drátu relativně malé, při delších časech navařování (nad 1 s) se tyto rozdíly zvětšují. Tento rozdíl je dán tím, že při krátké době navařování mají přechodové jevy při zapálení a ukončení oblouku vzhledem k celkové době procesu větší význam. Rozdíly v rychlosti podávání drátu se proto výrazněji projeví až při delších časech navařování.

V grafu lze zároveň pozorovat případy, kdy při shodné rychlosti podávání drátu a rozdílném čase navařování byla naměřena stejná hodnota průměru prutu. Tyto shody lze přičíst zaokrouhlení hodnot, případně použité metodě stanovení průměru pomocí Gaussovy aproximace, která poskytuje průměrnou hodnotu průměru přes plášť prutu.

Grafické zobrazení na Obr. 5-6 ukazuje závislost průměrné výšky jednoho návaru na svařovacích parametrech.



Obr. 5-6 Závislost průměrné výšky návaru na svařovacích parametrech

Z naměřených dat vyplývá, že průměrná výška návaru roste ve větší míře se zvyšující se dobou navařování, což odpovídá poznatkům uvedeným v rešerši. Vliv rychlosti podávání drátu je rovněž patrný, avšak není ve všech případech jednoznačný.

U některých kombinací parametrů dochází ke zpomalení nárůstu nebo ke stagnaci výšky návaru. To může souviset s větším rozlivem materiálu do stran, kdy se dodaný materiál projeví spíše nárůstem průměru než výšky prutu. K rozdílům mohlo přispět také zaokrouhlování hodnot, jelikož výška návaru byla stanovena jako průměr z celkové výšky prutu.

5.2.3 Výběr svařovacích parametrů

Z rešerše odborné literatury vyplývá, že průměr prutů vyráběných technologií WAAM se pohybuje v rozmezí 4–8 mm. Pro tuto práci byl zvolen průměr prutu 5 mm, který do uvedeného rozsahu spadá. Při předběžném testování pruty tohoto průměru nevykazovaly výrazné defekty ani nestabilitu růstu. Zvolená hodnota je zároveň vhodná z hlediska implementace výrobní strategie a následné kontroly rozměrů.

Jako výška jednoho návaru byla zvolena hodnota 1 mm. Tato hodnota usnadňuje členění geometrie do jednotlivých výškových úrovní a zjednodušuje následné vyhodnocení rozměrů. Současně při průměru prutu 5 mm zajišťuje vhodný poměr mezi výškovým přírůstkem a průměrem prutu, který umožňuje stabilní růst bez výrazného schodovitého efektu.

Na základě naměřených závislostí byly vybrány kombinace svařovacích parametrů (Tabulka 6), při kterých se výsledná geometrie prutu pohybovala přibližně v oblasti požadovaného průměru 5 mm a výškového přírůstku 1 mm.

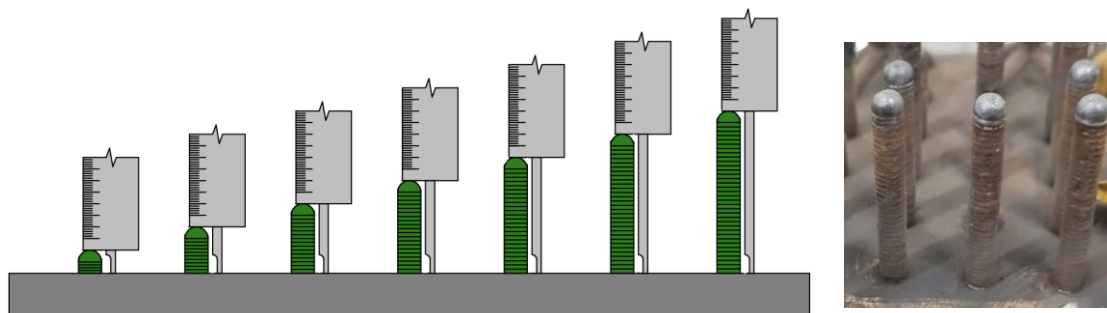
Tabulka 6 Kombinace svařovacích parametrů splňující požadavek výšky a průměru návaru

Sada parametrů	WFS [m/min]	t [s]	U [V]	I [A]	$HI = U \cdot I \cdot t$ [J]
1	7	0,4	94	12,6	473,8
2	6	0,6	84	12,3	619,9
3	5	0,8	77	12,2	751,5

Na základě tepelného vstupu jsou zvoleny svařovací parametry $WFP = 7 \text{ m/min}$ a $t = 0,4 \text{ s}$.

5.2.4 Detailnější testování svařovacích parametrů

Zvolené svařovací parametry byli detailněji testovány při navařování prutů o výšce 35 mm. V průběhu výroby byla výška prutu průběžně kontrolována vždy po navaření pěti bodů (Obr. 5-7 vlevo).



Obr. 5-7 Měření po 5 návarech (vlevo), Fotografie navařených prutů (vpravo)

Při měření bylo zjištěno, že první sada návarů (1–5) vykazuje větší průměrnou výšku než následující, jejichž výška je podobná a stabilní. Tento trend byl potvrzen i při dalším testu, při němž byl vyráběn prut o výšce 7 mm a byl samostatně měřen výškový přírůstek každého návaru. Z experimentu bylo zjištěno, že první návar dosahuje výrazně větší výšky (2 mm), zatímco výšky následujících návarů se pohybují okolo 1 mm s pouze malými odchylkami.

Tento jev je způsoben odlišnými geometrickými podmínkami při navařování prvního bodu, který je ukládán na rovný povrch platformy, zatímco následující jsou navařovány na již vytvořený návar přibližně kulového tvaru. Tyto rozdílné podmínky ovlivňují tvar svarové lázně a vedou k většímu vertikálnímu přírůstku prvního návaru, což vyžaduje optimalizaci svařovacích parametrů v počáteční fázi procesu. [38]

5.2.5 Optimalizace svařovacích parametrů

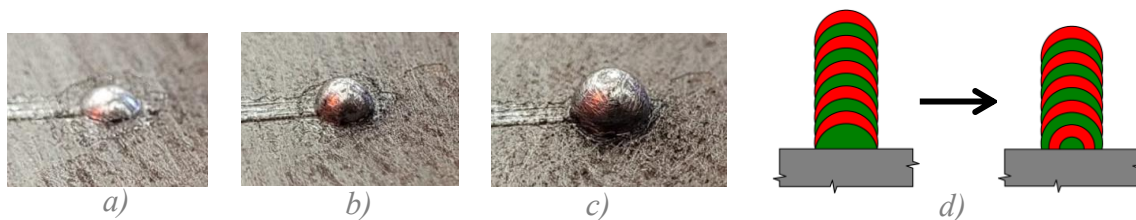
V rámci optimalizace svařovacích parametrů bylo nutné řešit dva problémy. Prvním je, že první návar vykazuje větší výšku než následující. Druhým problémem je, že jeho větší výška ovlivnila vyhodnocení výšky dalších návarů, jelikož geometrie prutu byla od počátku zatížena touto odchylkou.

Optimalizace výšky prvního návaru

Optimalizace svařovacích parametrů prvního návaru byla provedena úpravou doby navařování. Na základě experimentálního měření byl pro první návar zvolen čas navařování 0,05 s, při kterém bylo dosaženo požadované výšky 1 mm (Obr. 5-8a).

Tato úprava byla následně testována na prutu tvořeném pěti návary. Přestože první návar dosáhl požadované výšky, zvýšený výškový přírůstek se projevil u druhého návaru. Z tohoto důvodu byla v další fázi optimalizace upravena také doba navařování druhého návaru, která byla na základě experimentálního ověření stanovena na 0,08 s (Obr. 5-8b). Od třetího návaru již byla použita původně stanovená doba navařování 0,4 s (Obr. 5-8c).

Kvůli optimalizaci svařovacích parametrů prvních návarů mají tyto návary menší průměr ve srovnání s následujícími (Obr. 5-8d). Tento rozdíl je v průběhu další výroby částečně kompenzován překrytím následujícími návary, čímž dojde k vyrovnání průměru prutu. I v případě, že překrytí není zcela kompletní, nepředstavuje tato skutečnost problém, jelikož je struktura po dokončení výroby odřezána od platformy, na kterou je během výroby uchycena.



Obr. 5-8 a) První návar (0,05s), b) Druhý návar (0,08s), c) Třetí návar (0,4s), d) Schéma výsledku optimalizace

Optimalizace celkových svařovacích parametrů

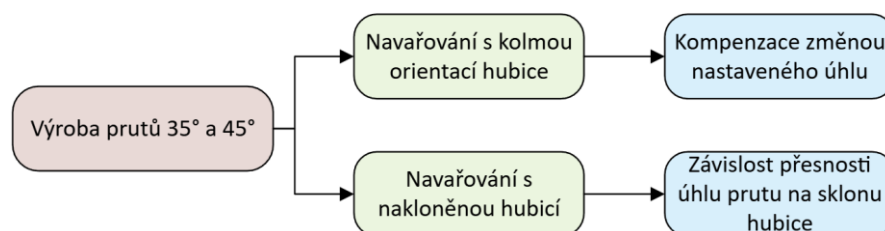
Při této optimalizaci byla zvýšena rychlost podávání drátu z 7 m/min na 7,5 m/min. Optimalizované svařovací parametry byly ověřeny při výrobě prutu o výšce 35 mm, přičemž výška prutu byla opět kontrolována po každých pěti návarech.

Ověření ukázalo, že po provedené optimalizaci docházelo ke stabilnímu a rovnoměrnému růstu prutu. Průměrná výška návaru se v jednotlivých úsecích pohybovala v rozmezí 0,98–1,04 mm a celková výška prutu dosáhla přibližně 35,2 mm. To potvrzuje, že zvolená sada parametrů umožňuje dosáhnout požadovaného výškového přírůstku návaru přibližně 1 mm.

5.3 Výroba prutů pod úhlem

Výroba šikmých prutů byla zaměřena na pruty pod úhlem 35° a 45°, které tvoří vyráběné buňky prutových struktur. Navařování bylo realizováno ve dvou konfiguracích – s vertikální orientací svařovací hubice a s hubicí nakloněnou ve směru růstu prutu.

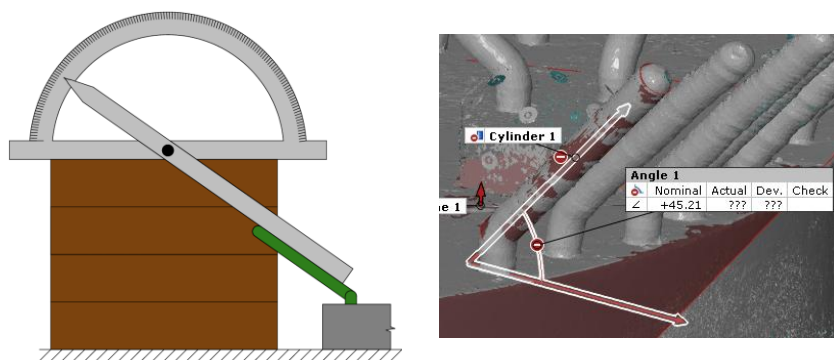
Při výrobě s vertikální orientací budou případné odchylky úhlu kompenzovány úpravou nastaveného úhlu prutu v programu. U výroby s šikmou orientací hubice bude hodnocen vliv sklonu hubice na úhel navařeného prutu. Současně bude u obou metod navařování posuzována opakovatelnost výroby, tedy rozdílnost úhlů prutů vyrobených při stejných procesních parametrech. Cílem je dosáhnout požadovaného úhlu prutu tak, aby se jeho hodnota včetně opakovatelnosti nacházela ve stanovené toleranci.



Obr. 5-9 Testování výroby šikmých prutů

Nakloněné pruty byly vyráběny na předem navařený prut o výšce 5 mm, který simuluje podmínky při výrobě celých prutových struktur, kde jsou pruty navařovány na předchozí návary s přibližně kulovým profilem. Navařované pruty měly délku šikmé části 40 mm, která byla experimentálně určena jako dostatečná pro ustálení růstu prutu během navařování. Při menších délkách by geometrie mohla být ovlivněna přechodovým chováním mezi svislou a šikmou částí prutu.

V průběhu výroby byl úhel navařovaného prutu operativně měřen mechanickým úhloměrem s rozlišením 1° (Obr. 5-10 vlevo), přičemž naměřené hodnoty sloužily k průběžné korekci vstupních parametrů. Po dokončení výroby všech testovaných vzorků bylo provedeno skenování a kontrolní vyhodnocení úhlu v programu (Obr. 5-10 vpravo).



Obr. 5-10 Operativní měření úhloměrem při výrobě (vlevo), Měření v GOM Inspect (vpravo)

5.3.1 Navařování s kolmou orientací hubice

Při experimentu byl nejprve navařen prut s nastaveným úhlem $35^\circ/45^\circ$. Na základě vyhodnocení dosaženého úhlu prutu bylo provedeno přenastavení úhlu prutu tak, aby po navaření odpovídal požadované hodnotě. Tabulka 7 uvádí průměrnou hodnotu úhlu stanovenou z měření čtyř prutů, které byly navařeny při stejných parametrech. U hodnot úhlů je současně uvedena směrodatná odchylka, která charakterizuje opakovatelnost dosaženého úhlu při výrobě prutů se stejnými parametry.

Tabulka 7 Výroba šikmých prutů s kolmou orientací hubice

Požadovaný úhel [°]	Nastavený úhel [°]	Vyrobený úhel [°]	Požadovaný úhel [°]	Nastavený úhel [°]	Vyrobený úhel [°]
	35	$36,1 \pm 0,4$		45	$45,5 \pm 0,3$
35	34	$34,9 \pm 0,4$	45	44	$44,8 \pm 0,3$
	33	$34 \pm 0,3$		43	$44 \pm 0,4$

Výsledky experimentu ukázaly, že vyrobený prut měl úhel systematicky vyšší než úhel nastavený. Tento výsledek je v rozporu s předpokladem vyplývajícím z rešerše (kap. 2.6), kde je uvedeno, že při navařování pod úhlem dochází vlivem gravitace ke stékání svarové lázně, které by vedlo ke zmenšování výsledného úhlu prutu. Jedním z možných vysvětlení tohoto jevu je skutečnost, že při experimentech byly zvoleny svařovací parametry s minimálním tepelným vstupem, který vede k rychlejšímu tuhnutí svarové lázně. Ta tak zůstává kratší dobu v tekutém stavu a gravitační zrychlení má omezený prostor k jejímu deformování.

Současně při kolmé orientaci hubice není směr růstu prutu řízen její orientací, ale pouze její polohou. Směr růstu tak může být ovlivněn tím, v jakém místě na čele již vytvořeného prutu působí svařovací oblouk a kde se následně ustálí svarová lázeň. Pokud čelo prutu není dokonale symetrické, může se lázeň stabilizovat mírně mimo ideální osu, což vede k odchylce lokálního směru nárůstu. Tento mechanismus se pak může projevit jak systematickou odchylkou výsledného úhlu, tak i rozptylem dosažených úhlů, který byl v experimentu vyjádřen směrodatnou odchylkou přibližně $\pm 0,4^\circ$. [35] [31]

5.3.2 Navařování s nakloněnou hubicí

V tomto kroku byly navařovány pruty s nakloněnou svařovací hubicí. Cílem experimentu bylo posoudit vliv úhlu natočení hubice na výsledný úhel navařeného prutu. Tabulka 8 uvádí průměrnou hodnotu dosaženého úhlu stanovenou z měření čtyř prutů navařených při stejných procesních parametrech. Současně je, jako v předchozím případě, uvedena také směrodatná odchylka naměřených hodnot charakterizující opakovatelnost výroby.

Tabulka 8 Výroba šikmých prutů s nakloněnou hubicí

Požadovaný úhel [°]	Úhel natočení hubice [°]	Vyrobený úhel [°]	Požadovaný úhel [°]	Úhel natočení hubice [°]	Vyrobený úhel [°]
35	90	36,1 $\pm$ 0,4	45	90	45,5 $\pm$ 0,3
	75	35,6 $\pm$ 0,4		75	45,2 $\pm$ 0,3
	60	35,4 $\pm$ 0,3		60	45,2 $\pm$ 0,25
	45	35,2 $\pm$ 0,25		45	45,1 $\pm$ 0,15
	35	35,2 $\pm$ 0,2		x	x

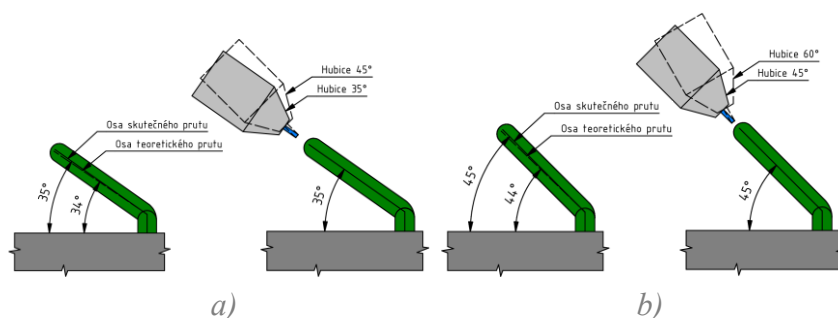
Z naměřených hodnot je patrné, že se snižujícím se úhlem natočení svařovací hubice dochází k postupnému přiblížení úhlu prutu k jeho nastavené hodnotě. Na rozdíl od předchozího případu s kolmou orientací hubice není směr růstu prutu určen pouze polohou navařovacího bodu, ale také orientací hubice. Při jejím naklonění ve směru prutu je přenos roztaveného materiálu směřován blíže k požadované ose růstu, což omezuje vznik úhlové odchylky. Orientace hubice tak přímo ovlivňuje směr depozice materiálu a omezuje vliv lokální geometrie již vytvořeného prutu na směr jeho dalšího růstu. [35] [31]

Z výsledků současně vyplývá také postupné zlepšování opakovatelnosti výroby při snižujícím se úhlu natočení hubice. Při natočení hubice ve směru prutu byla dosažena opakovatelnost přibližně $0,2^\circ$, zatímco při kolmé orientaci hubice dosahovala přibližně $0,4^\circ$.

Z experimentu vyplývá, že požadovaného úhlu prutu lze dosáhnout i při větším natočení svařovací hubice, než odpovídá úhlu prutu, při zachování vysoké přesnosti a opakovatelnosti. Tento přístup zároveň vede ke zmenšení kolizního prostoru svařovací hubice, což je výhodné při výrobě prutových struktur.

Závěrem lze konstatovat, že požadovaného úhlu šikmých prutů v rámci stanovené tolerance lze dosáhnout jak při navařování s kolmou orientací svařovací hubice, tak při její šikmé orientaci (Obr. 5-11). Při kolmé orientaci hubice je však nutné kompenzovat odchylku výsledného úhlu a současně počítat s vyšším rozptylem dosažených hodnot, který se však stále pohybuje v mezích tolerance ze zadání. Naopak při naklonění hubice ve směru prutu bylo dosaženo nejen menší odchylky od požadovaného úhlu, ale také lepší opakovatelnosti, ovšem za cenu vyšší náročnosti výroby při této konfiguraci.

Při hodnocení dosažených hodnot je však nutné zohlednit, že úhly stanovené na základě skenování mohou být zatíženy určitou měřicí chybou. Skenování prutů pod úhlem bylo z důvodu omezeného prostoru obtížné a spodní části prutů nebyly plně zachyceny, což mohlo ovlivnit určení osy prutu provedené metodou aproximace válcové plochy (Gaussian best fit) a tím i výsledné stanovení úhlu.



Obr. 5-11 Nastavení pro dosažení požadovaného úhlu a) 35°, b) 45°

5.4 Experimentální zjištění limitní teploty

V dosavadních experimentech bylo navaření dalšího bodu prováděno až po ochlazení prutu na teplotu okolí. Tím byla omezena akumulace tepla a související geometrické deformace, avšak za cenu výrazného prodloužení výrobního času vlivem nutných prodlev po každém navařovacím cyklu.

Pro zvýšení produktivity výroby bylo proto nutné stanovit maximální přípustnou (limitní) interpass teplotu, při níž lze zahájit další navařování bez zhoršení geometrické přesnosti ve srovnání s navařováním při teplotě okolí.

Experiment byl realizován navařováním prutů při postupně zvyšované teplotě předchozího návaru, přičemž výchozí hodnota byla stanovena na 60 °C. Teplota byla před zahájením každého navařovacího cyklu kontrolována pomocí termokamery. Měření bylo prováděno jak pro vertikální orientaci svařovací hubice, tak pro nakloněnou hubici. Pro každou kombinaci podmínek byly navařeny tři pruty, přičemž vyhodnocení bylo provedeno na základě jejich 3D skenu.

Stanovení limitní teploty bylo provedeno pro pruty s úhlem 35°, jelikož se jedná o nejmenší úhel navařovaný v rámci této práce, u něhož lze očekávat nejvyšší náchylnost k deformacím vlivem akumulace tepla.

Rozsah testovaných teplot je v rozmezí 25 °C (teplota okolí) – 150 °C. Horní hranice byla zvolena s ohledem na hodnoty interpass teplot uváděné v literatuře pro proces WAAM, kde je další vrstva navařována až po ochlazení předchozí vrstvy přibližně na teplotu kolem 100 °C za účelem omezení tepelné akumulace. Zvolený rozsah tak umožňuje posoudit vliv zvýšené tepelné akumulace na stabilitu procesu a výslednou geometrii navařovaných prutů. [39]

V Tabulce 9 a 10 jsou uvedeny průměrné hodnoty výsledného úhlu prutu v závislosti na interpass teplotě. Každá hodnota představuje aritmetický průměr ze tří realizovaných prutů včetně směrodatné odchylky.

Tabulka 9 Úhel prutu 35° při různé interpass teplotě pro navařování s vertikální orientací hubice

Teplota [°C]	25	60	80	100	120	150
Úhel prutu [°]	36,1 ± 0,4	35,9 ± 0,4	35,7 ± 0,3	34,9 ± 0,5	34,3 ± 0,4	-

Tabulka 10 Úhel prutu 35° při různé interpass teplotě pro navařování se skloněnou orientací hubice

Teplota [°C]	25	60	80	100	120	150
Úhel prutu [°]	35,2 ± 0,2	35,1 ± 0,2	35,2 ± 0,1	35,2 ± 0,3	35,3 ± 0,1	35,3 ± 0,25

Z výsledků uvedených v tabulkách 8 a 9 vyplývá, že vliv interpass teploty na výsledný úhel prutu se výrazně liší v závislosti na orientaci svařovací hubice. Při vertikální orientaci hubice dochází se zvyšující se teplotou k postupnému poklesu úhlu prutu z hodnoty 36,1° při 25 °C na 34,3° při 120 °C.

Při teplotě 60 °C dosahuje úhel hodnoty 35,9 ± 0,4°, což představuje mírný pokles oproti hodnotám při pokojové teplotě. Při teplotě 80 °C činí průměrný úhel 35,7 ± 0,3°, přičemž rozdíl oproti 60 °C je relativně malý, avšak je patrný pokračující pokles.

Při dalších zvýšeních interpass teploty na 100 °C a 120 °C dochází k výraznějšímu snížení úhlu prutu, což potvrzuje zhoršování geometrické přesnosti se zvyšující se teplotou. Z tohoto důvodu nebyla teplota 150 °C dále vyhodnocována, jelikož významná změna úhlu byla zřejmá již při 120 °C.

Přestože se při teplotě 80 °C výsledný úhel již odchyluje od hodnot odpovídajících navařování při pokojové teplotě, velikost této odchylky zůstává relativně malá a z hlediska stanovené tolerance akceptovatelná. Současně tato teplota představuje vhodný kompromis mezi zachováním geometrické přesnosti a časovou efektivitou procesu, a proto byla pro tuto konfiguraci stanovena jako limitní interpass teplota 80 °C.

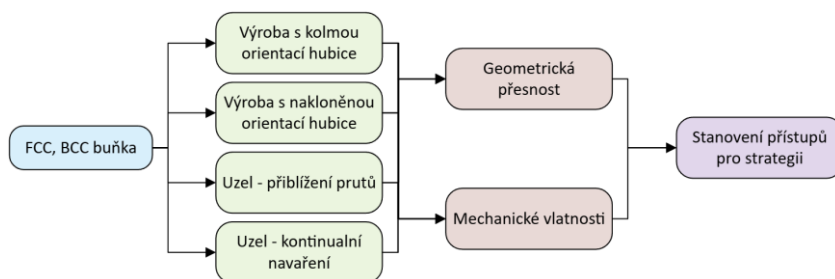
Při navařování s orientací hubice ve směru prutu se výsledný úhel prutu v celém sledovaném rozsahu interpass teplot pohybuje v úzkém intervalu 35,1° až 35,3° bez patrného systematického trendu. Naměřené hodnoty se s malou odchylkou shodují s hodnotami odpovídajícími navařování při pokojové teplotě. Lze proto konstatovat, že v testovaném rozsahu do 150 °C nebyla pro tuto konfiguraci dosažena limitní interpass teplota vedoucí k porušení stanovené geometrické tolerance. Drobné odchylky lze přičíst nepřesnostem vzniklým při skenování a následném vyhodnocení.

5.5 Výroba buněk prutových struktur

Kapitola popisuje výrobu buněk prutových struktur typu BCC a FCC s délkou hrany 30mm. Výroba bude realizována při kolmé i nakloněné orientaci svařovací hubice, zároveň budou testovány oba způsoby tvorby uzlového bodu. Buňky byly navařovány při dodržení stanovené limitní interpass teploty.

Následně bude hodnocena geometrická přesnost a mechanické vlastnosti vyrobených buněk, kdy budou vzájemně porovnány všechny kombinace dané orientací svařovací hubice a strategií tvorby uzlového bodu.

Výstupem kapitoly bude podklad pro navazující část práce zaměřenou na volbu přístupů pro vyvíjenou strategii výroby prutových struktur.

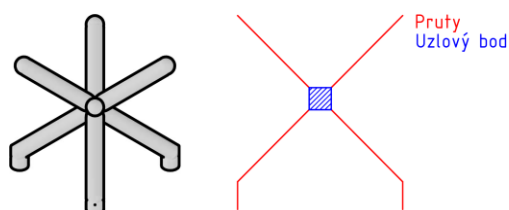


Obr. 5-12 Výroba buněk prutových struktur

5.5.1 Výroba buňky typu BCC

Geometrie jednotkové buňky typu BCC je tvořena pruty vedenými po tělesových úhlopříčkách jejího referenčního krychlového objemu. Tyto pruty propojují rohové body buňky s jejím středovým bodem. Z hlediska výroby lze tuto geometrii rozdělit na pruty a uzlové body, ve kterých dochází k jejich vzájemnému napojení (Obr. 5-13).

Stejně jako v předchozí kapitole byly buňky navařovány na kolmý prut o výšce 5 mm, čímž je simulována výroba buněk v celých strukturách.



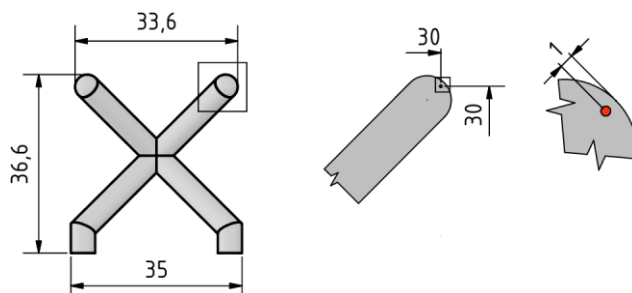
Obr. 5-13 Buňka BCC (vlevo), rozdělení na pruty a uzlový bod (vpravo)

Rozměry buňky

Ačkoli je buňka situována v krychli o hraně 30 mm, její skutečné rozměry jsou ovlivněny výrobní technologií a průměrem prutů. Dolní šířka buňky činí 35 mm, což odpovídá délce hrany krychle 30 mm zvětšené o dvojnásobek poloměru prutu.

Horní šířka buňky je menší a dosahuje přibližně 33,6 mm. Tento rozdíl souvisí s výrobou šikmých prutů navařováním po bodech. Nejvyšší bod prutu je sice navržen v rohu referenční buňky o hraně 30 mm, avšak vlivem výškového přírůstku posledního návaru vzniká skutečné zakončení prutu přibližně o 1 mm nad touto polohou. Poloha prutu je tak posunuta vůči teoretické geometrii a výsledný rozměr je navíc ovlivněn půlkulovým zakončením prutu, které při navařování vzniká.

Ze stejných důvodů se liší také celková výška buňky. Ta dosahuje přibližně 36,5 mm, přičemž tato hodnota zahrnuje také spodní vertikální prut o výšce 5 mm.



Obr. 5-14 Teoreticky přesné rozměry buňky BCC upravené pro výrobu WAAM

Požadavky na přesnost vyrobených buněk

V rámci hodnocení přesnosti vyrobených buněk je sledována jejich rozměrová přesnost. Ta je posuzována jako odchylka od teoretických rozměrů a hodnocena v toleranci $\pm 5\%$, což u buňky o hraně 30 mm odpovídá $\pm 1,5$ mm.

Dalším sledovaným parametrem je návaznost prutů v uzlovém bodě. Hodnocena je na základě jejich vzájemné polohy a úhlové odchylky. Jako přijatelná je považována polohová odchylka do 1 mm, což odpovídá výšce jednoho návaru.

Pro úhlovou odchylku mezi navazujícími pruty je za vyhovující považována hodnota do 3° . Z hlediska opakovatelnosti navařování samostatných prutů by přitom postačovala tolerance přibližně do 1° , vycházející z experimentálně stanovené hodnoty $\pm 0,4^\circ$.

U prutů navazujících v rámci celé struktury však dochází k dalším vlivům, které se u samostatně navařovaných prutů neprojevují. Dolní pruty mohou být ovlivněny přechodovým jevem v oblasti napojení mezi vertikálním a šikmým prutem, který se vzhledem k omezené délce prutu plně neustálí. Horní pruty jsou navařovány na vytvořený uzel, který nepředstavuje ideálně rovinný ani geometricky přesně definovaný podklad, což může ovlivnit počáteční směr navařování a vést k úhlovým odchylkám. Z těchto důvodů byla zvolena širší tolerance do 3° , která lépe odpovídá reálné geometrické přesnosti vyrobené struktury.

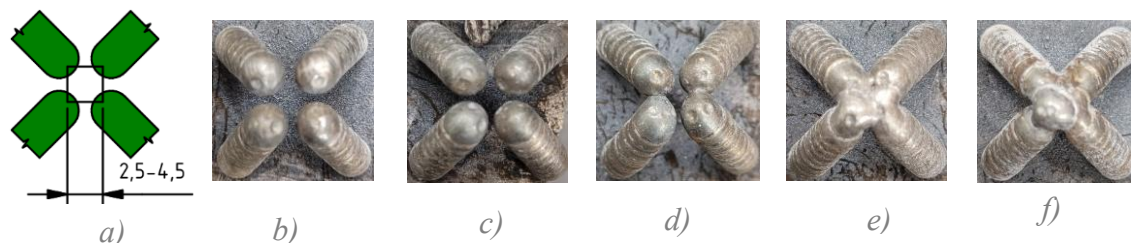
Během výroby jsou rozměry vyrobených buněk průběžně kontrolovány posuvným měřítkem s přesností 1:50, zatímco návaznost prutů je kontrolována pouze vizuálně. Podrobné vyhodnocení geometrické přesnosti je provedeno ze skenů až po vyrobení všech buněk.

Parametry výroby uzlů při kolmé orientaci hubice

Před výrobou buněk prutových struktur bylo nutné experimentálně stanovit parametry výroby jejich uzlových bodů. Testována byla šířka uzlového bodu a rychlost pohybu hubice při kontinuálním navařování.

Při přibližování prutů k uzlovému bodu dochází vlivem jejich nenulového průměru k vzájemnému kontaktu ještě před dosažením ideální polohy uzlu. V rešeršní části práce byl pro zjednodušený případ dvojice prutů uveden vztah umožňující výpočet vzdálenosti skutečného spojení prutů od ideální polohy uzlu. V případě uzlu buňky typu BCC lze tento vztah aplikovat na dvojici sousedních prutů, které se v oblasti uzlu setkávají jako první. V jejich lokální 2D projekci svírají tyto pruty symetrický úhel $\alpha = 45^\circ$. Po dosazení parametrů odpovídajících vyráběné geometrii prutů ($D = 5$ mm, $\alpha = 45^\circ$) vychází hodnota 2,5 mm, což odpovídá polovině vzdálenosti mezi osami prutů v ideálním geometrickém modelu uzlu.

Ve skutečnosti však pruty nemají ideálně válcové zakončení a jejich horní část má přibližně kulový tvar vznikající během navařování, takže ke spojení dochází při menší vzdálenosti. Na základě tohoto předpokladu byla jako výchozí hodnota šířky uzlu zvolena 4,5 mm. Tato hodnota byla následně experimentálně ověřena a postupně upravována na základě výsledků zkušebních výrob (Obr. 5-15).



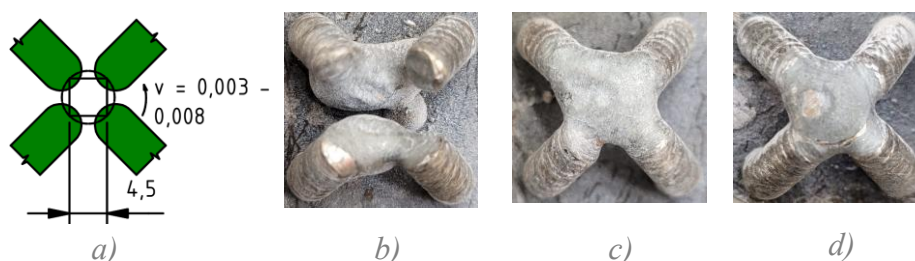
Obr. 5-15 Nastavení šířky uzlu BCC, a) Schéma uzlu, b) Šířka 4,5mm, c) 4mm, d) 3,5mm, e) 3mm, f) 2,5mm

Z výsledků experimentu lze pozorovat, že při šířce 2,5 mm dochází k výraznému hromadění materiálu v oblasti uzlu. Při šířce 3 mm se pruty spolehlivě spojují bez nadměrné akumulace materiálu. Při šířce 3,5 mm dochází pouze k částečnému spojení prutů, zatímco při šířkách 4 mm a 4,5 mm již pruty zůstávají oddělené.

Na základě těchto výsledků byla pro oba způsoby uzlového bodu zvolena odlišná šířka uzlu. Pro způsob založený na přiblížení prutů byla jako nejvhodnější zvolena šířka 3 mm, která umožňuje jejich spolehlivé spojení bez nadměrného hromadění materiálu. Pro kontinuální navaření uzlového bodu byla zvolena šířka 4,5 mm, která poskytuje dostatečný prostor pro vytvoření uzlu dodatečným navařením materiálu.

Po stanovení šířky uzlu pro kontinuální navařování bylo dále nutné určit rychlost pohybu hubice při výrobě tohoto uzlu. Trajektorie pro navaření uzlu byla tvořena kružnicí opsanou čtverci o šířce uzlového bodu.

Jako výchozí byla zvolena rychlost 0,005 m/s, která byla převzata z experimentů při navařování plošných dílů na VUT v Brně. V rámci experimentu byly porovnávány rychlosti 0,003 m/s, 0,005 m/s a 0,008 m/s (Obr. 5-16).



Obr. 5-16 Nastavení rychlosti kontinuálního uzlu BCC a) Trajektorie výroby kontinuální vrstvy, b) Rychlost 0,003m/s, c) 0,005m/s, d) 0,008

Při rychlosti 0,003 m/s docházelo k nadměrnému přívodu tepla a materiálu, což vedlo k přetavení a kolapsu struktury. Rychlost 0,005 m/s umožnila stabilní vytvoření uzlového bodu se zvýšeným objemem materiálu v oblasti uzlu. Při rychlosti 0,008 m/s docházelo ke spojení prutů, avšak objem materiálu v oblasti uzlu byl menší.

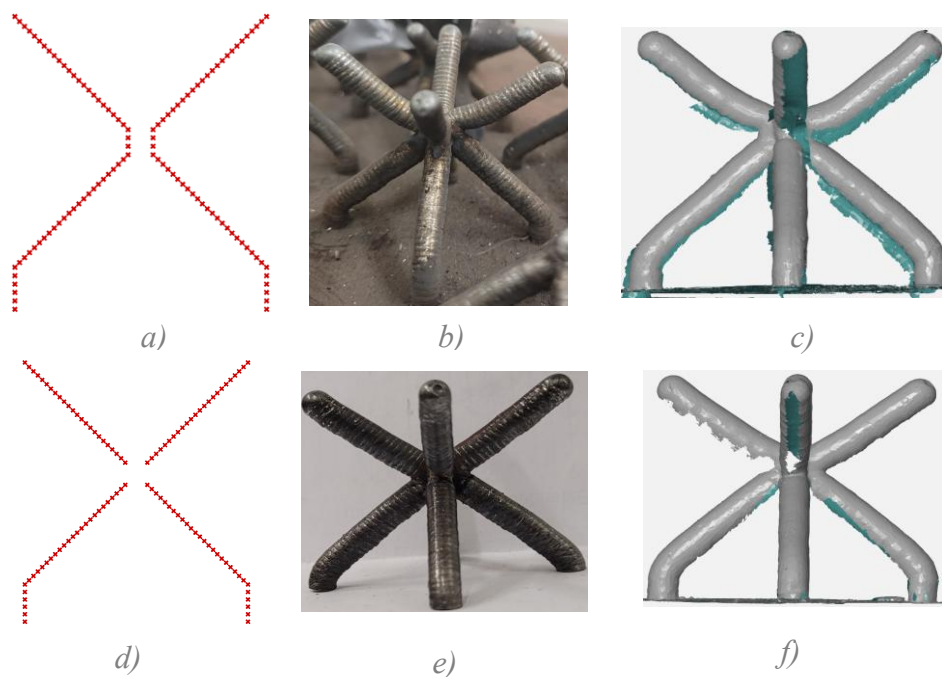
Na základě provedených experimentů byla zvolena rychlost 0,005 m/s, která zajišťuje stabilní vytvoření uzlového bodu při zvýšeném materiálovém propojení jednotlivých prutů.

Výroba buňky při kolmé orientaci hubice

Při výrobě buňky s uzlem tvořeným přiblížením prutů byl uzlový bod tvořen vstupujícími a vystupujícími pruty a dvěma vertikálně orientovanými návary umístěnými nad sebou (Obr. 5-14a). Tyto návary vznikly rozdělením geometrie podle výšky jednoho návaru. Při jejich navařování však docházelo k překrývání a hromadění materiálu, čímž se skutečná výška uzlového bodu zvětšila oproti návrhu. K tomu mohla přispět i skutečnost, že vertikální návary nebyly navařovány na geometrii odpovídající samostatnému prutu, ale na již vytvořený uzlový bod s odlišným tvarem a jejich výsledná výška tak mohla být vyšší.

Vlivem zvýšeného uzlu se první návary horních prutů neukládaly na jeho vrchol, ale opíraly se o jeho boky. Toto nesprávné počáteční podepření následně vedlo k odchylce polohy prutů, a vyrobená buňka proto nesplňovala požadované rozměry a návaznost prutů (Obr. 5-17b, c).

Z tohoto důvodu byl výrobní program upraven odstraněním vertikálních návarů v oblasti uzlového bodu (Obr. 5-14d). Touto úpravou se omezilo hromadění materiálu při tvorbě uzlu a zlepšily se podmínky pro navázání horních prutů. Buňka vyrobená po této úpravě již vykazovala odpovídající rozměry i vizuálně lepší návaznost prutů (Obr. 5-17e, f).

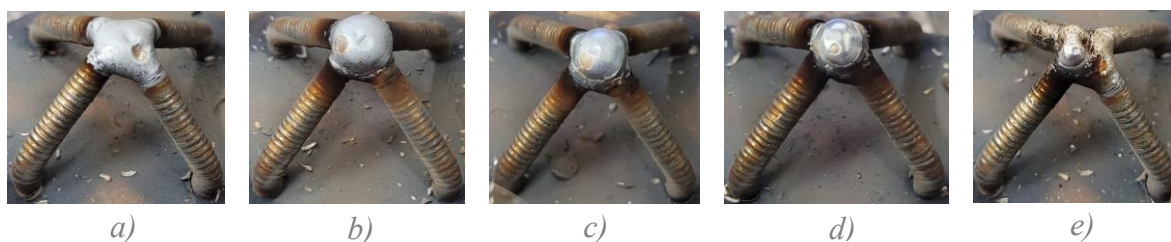


Obr. 5-17 BCC buňka – přiblížení prutů, kolmá hubice a) Původní návrh – body navařování, b) Foto, c) Sken, d) Optimalizovaný návrh – body navařování, e) Foto, f) Sken

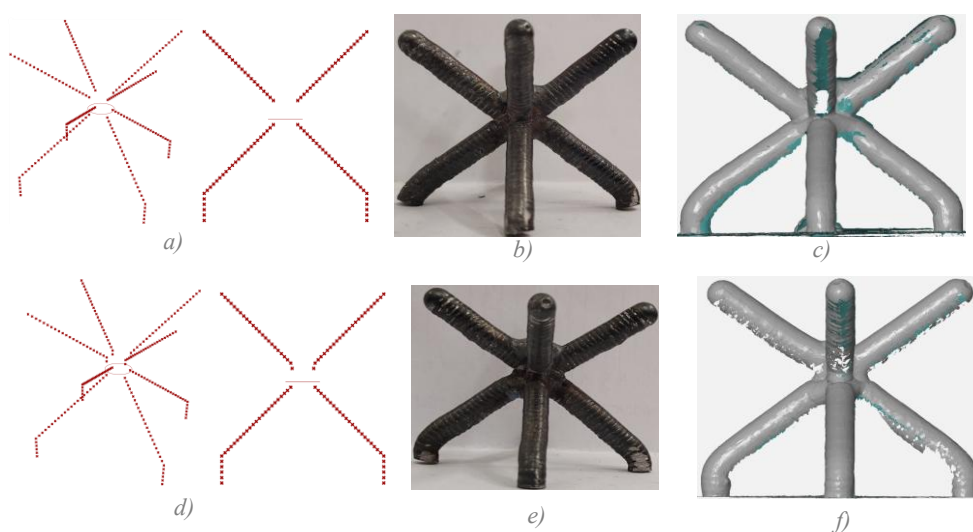
Po ověření výroby uzlového bodu přiblížením prutů byla testována výroba uzlu kontinuální formou. Buňka byla nejprve navařena podle dříve stanovených parametrů, tedy při šířce uzlu 4,5 mm a rychlosti navařování 0,005 m/s (Obr. 5-19a). Při analýze vyrobené buňky bylo zjištěno, že jedna kontinuálně navařená vrstva nemá dostatečnou výšku pro zajištění plynulé návaznosti prutů v oblasti uzlu (Obr. 5-19b, c).

Z tohoto důvodu bylo testováno navýšení uzlového bodu pomocí druhé kontinuální vrstvy. Při použití rychlosti 0,005 m/s však došlo k výraznému zvýšení uzlu a vytvoření kulového profilu povrchu. Obdobné chování bylo pozorováno také při vyšších rychlostech navařování 0,008 m/s a 0,012 m/s (Obr. 5-18b, c, d). Vzniklý tvar nebyl vhodný pro navařování navazujících prutů, jelikož mohl způsobit zapálení oblouku na nesprávném místě a tím zhoršit geometrickou přesnost buňky. Jako vhodnější řešení byla proto zvolena kombinace jedné kontinuálně navařené vrstvy a následné vrstvy tvořené vertikálními návary (Obr. 5-18e). Tato úprava umožnila navýšit uzlový bod bez vytvoření kulového povrchu, čímž vytvořila vhodnější podmínky pro navázání horních prutů. Rozteč vertikálních návary byla při výrobě nastavena na 4 mm, aby byla omezena nespojitost v oblasti uzlu (Obr. 5-19d).

Buňka vyrobená s touto úpravou již vykazovala plynulou návaznost prutů v a zároveň splňovala požadované geometrické rozměry v rámci stanovené tolerance (Obr. 5-19e, f).



Obr. 5-18 a) První kontinuální vrstva, b) druhá kontinuální vrstva 0,005m/s, c) 0,008 m/s, d) 0,012 m/s, e) Vrstva vertikálních bodů



Obr. 5-19 BCC buňka – kontinuální vrstva, kolmá hubice a) Původní návrh – body navařování, b) Foto, c) Sken, d) Optimalizovaný návrh – body navařování, e) Foto, f) Sken

Parametry výroby uzlů při šikmé orientaci hubice

U nakloněné orientace svařovací hubice může docházet při přibližování k uzlovému bodu ke kolizi mezi hubicí a již vyrobenými pruty. Tyto kolize je nutné predikovat a případně se jim vyhnout.

Pro predikci kolizí byl vytvořen program, ve kterém lze sledovat vzájemnou pozici svařovací hubice a vyráběných prutů při výrobě (Obr. 5-20a). Jako výchozí úhel hubice byla nastavena hodnota 45° , která nabízí výhodný kompromis mezi dosažitelnou přesností a omezením kolizního prostoru.

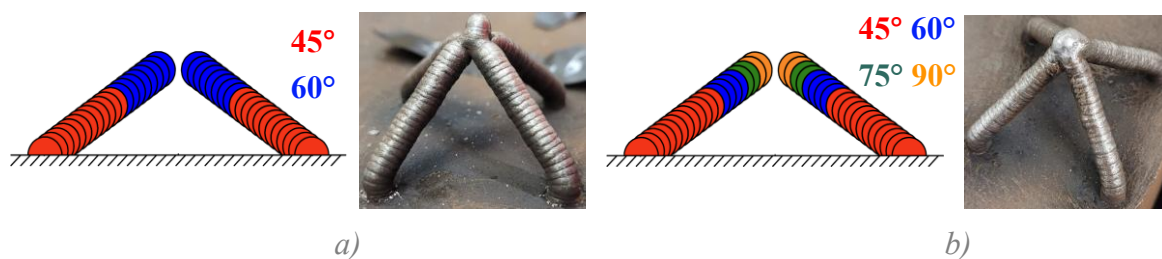
Na základě analýzy bylo zjištěno, že pro zajištění bezkolizní výroby je nutné změnit orientaci hubice na 60° , a to 8 návarů před dosažením uzlového bodu. Tento počet návarů byl určen pro kritičtější případ uzlu o šířce 3 mm a následně použit i pro kontinuální uzel o šířce 4,5 mm. Ověření tohoto nastavení při výrobě je znázorněno na Obr. 5-20b.



Obr. 5-20 Vyhnutí se kolizi a) Simulace v programu, b) Test při výrobě

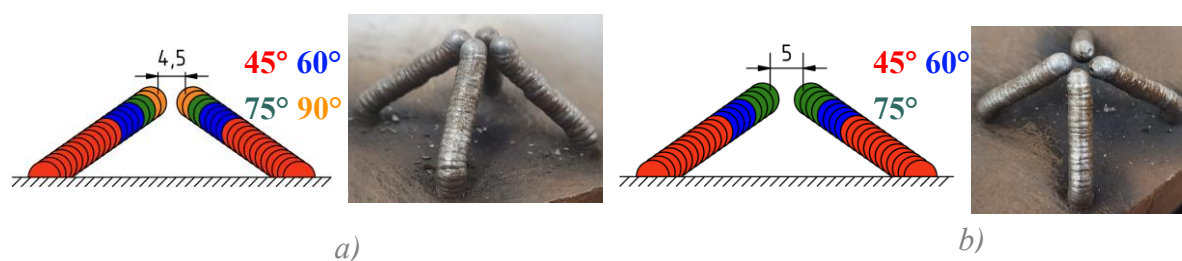
Natočení hubice na 60° zamezilo kolizi, při přibližování k uzlovému bodu však docházelo k nežádoucímu přeskočení svařovacího oblouku na sousední úhlopříčný prut, který se vlivem malé vzdálenosti od kontaktní špičky stal nejbližším vodivým povrchem pro zapálení oblouku. V místě přeskočení vznikl nežádoucí návar, na který následně navazovaly další, což vedlo ke zhoršení geometrie a nutnosti zastavení výroby (Obr. 5-21a).

Aby bylo tomuto jevu zamezeno, je nutné při přibližování k uzlovému bodu postupně měnit orientaci hubice. Experimentálně bylo zjištěno, že vhodným doplněním je změna orientace hubice na 75° 4–2 vrstvy před uzlem a na 90° v posledních 2 vrstvách před uzlem. Tento postup byl ověřen při výrobě uzlu o velikosti 3 mm (Obr. 5-21b).



Obr. 5-21 a) Zapálený oblouk na úhlopříčném prutu, b) Úprava orientace hubice pro zamezení chybného zapálení oblouku

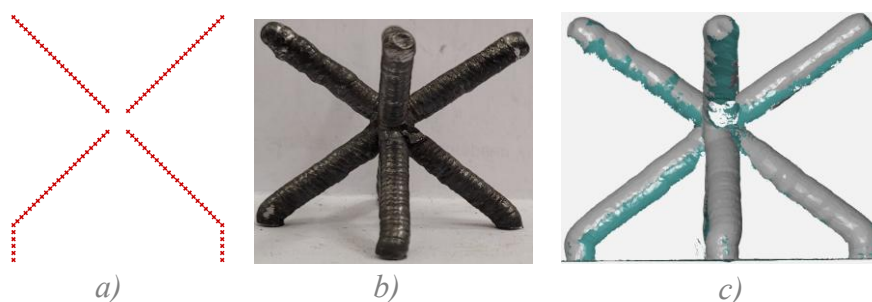
V případě kontinuálně vyráběného uzlu je navařování v okolí uzlového bodu při orientaci hubice 90° nevhodné, protože vede ke změně orientace prutu, která není vhodná pro navazující výrobu kontinuální vrstvy (Obr. 5-22a). Z tohoto důvodu byla upravena šířka uzlového bodu na 5 mm. Při této šířce bezpečně postačuje orientace hubice 75° na zamezení špatného zapálení oblouku (Obr 5-22b).



Obr. 5-22 a) Uzel 4,5mm při 90° hubice, b) Uzel 5mm při 75° hubice

Výroba buňky při šikmé orientaci hubice

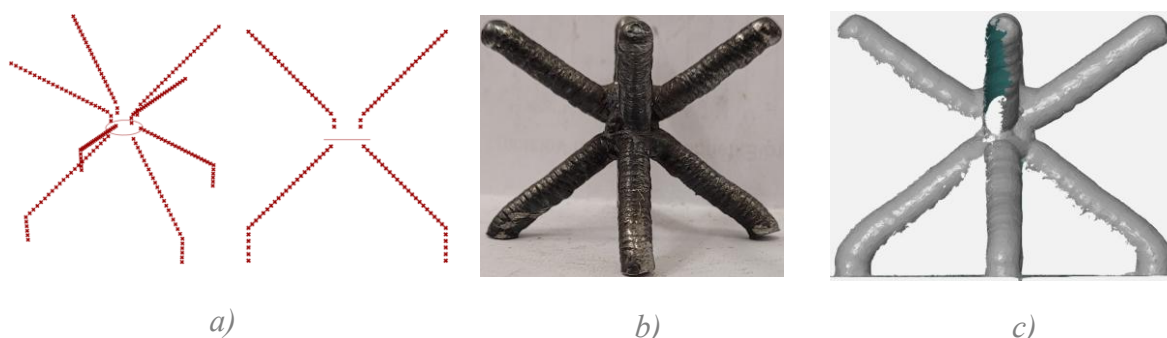
Buňka s uzlovým bodem tvořeným přiblížením prutů byla vyrobena při stejných parametrech jako při výrobě s kolmou orientací hubice, tedy bez použití vertikálních návarů v uzlu (Obr. 5-23).



Obr. 5-23 BCC buňka – přiblížení prutů, šikmá hubice a) Body navařování, b) Foto, c) Sken

Takto vyrobená buňka vykazuje plynulou návaznost prutů v oblasti uzlového bodu a současně splňuje požadované geometrické rozměry v rámci stanovené tolerance.

Při výrobě buňky s kontinuálním navařením uzlového bodu je oproti výrobě s kolmou orientací hubice přidána jedna vrstva vertikálních návarů (Obr. 5-24a). Tato úprava je provedena pro zachování návaznosti prutů při rozšíření uzlového bodu (Obr. 5-24b, c). Vertikální návary v uzlu jsou navařovány při rozteči 4 mm, aby bylo zlepšeno jejich spojení.



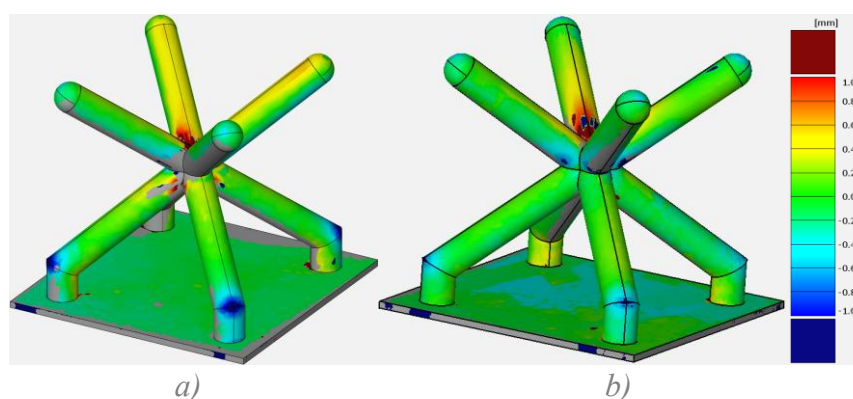
Obr. 5-24 BCC buňka – kontinuální vrstva, šikmá hubice a) Body navařování, b) Foto, c) Sken

Buňka vyrobená touto strategií vykazuje odpovídající rozměry v rámci tolerance a zároveň lze pozorovat návaznost prutů v oblasti uzlového bodu.

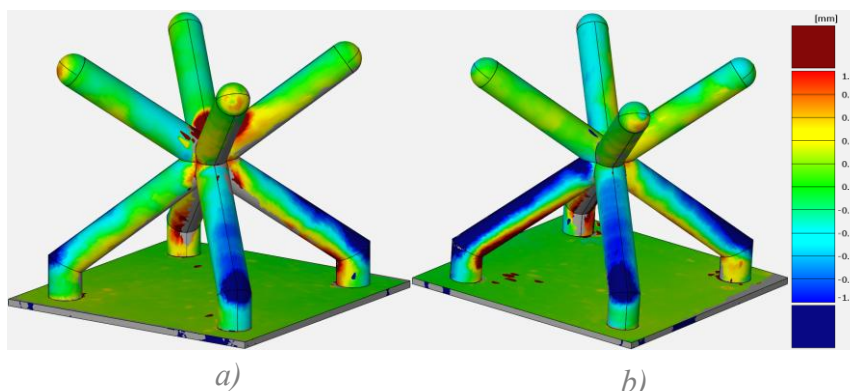
Přesnost vyrobených buněk

Přesnost vyrobených buněk je hodnocena z hlediska rozměrové přesnosti a návaznosti prutů. Rozměrová přesnost je posuzována porovnáním vyrobených buněk s referenční buňkou o teoreticky přesných rozměrech pro výrobu WAAM (kap. Rozměry buňky), zatímco návaznost prutů je hodnocena na základě vzájemné polohy a orientace navazujících prutů v oblasti uzlového bodu.

Porovnání vyrobených buněk s modelem přesné buňky je znázorněno na Obr. 5-25, 5-26.



Obr. 5-25 Rozměrová přesnost BCC buňky s kolmou hubicí a) Kontinuálně navařený uzel, b) Uzel tvořený přiblížením bodů



Obr. 5-26 Rozměrová přesnost BCC buňky se šikmou hubicí a) Kontinuálně navařený uzel, b) Uzel tvořený přiblížením bodů

Tabulka 11 uvádí rozsah naměřených odchylek rozměrů buňky od nominálních hodnot ve směru XY a výšky Z. Hodnoceny jsou pouze horní pruty, protože u nich se projevuje vliv zvolené strategie výroby na výslednou geometrii.

Tabulka 11 Rozměrové odchylky vyrobených BCC buněk od nominálních rozměrů

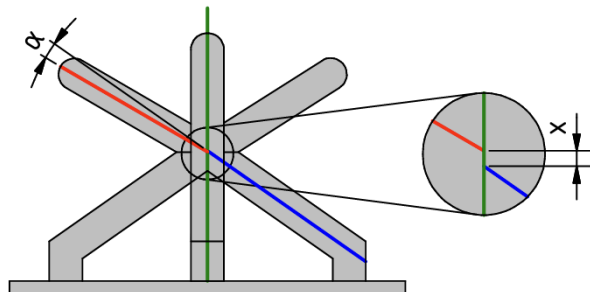
Orientace hubice	Strategie uzlu	Odchylka od nominální hodnoty		
		x	y	z
Kolmá hubice	Přiblížení	$(-0,5) \div (-0,4)$	$(-0,6) \div (-0,1)$	$(-0,4) \div 0,2$
	Kontinuální	$(-0,5)$	$(-0,3) \div (-0,2)$	$(-0,3) \div 0,3$
Šikmá hubice	Přiblížení	$0,5 \div 0,7$	$0,6$	$(-0,4) \div (-0,2)$
	Kontinuální	1	$0,6 \div 0,7$	$(-0,2) \div (0,1)$

U všech testovaných buněk jsou zachovány vnější rozměry nepřesahující stanovenou toleranci zadání. Lze pozorovat, že buňky vyrobené s šikmou orientací hubice dosahují větších odchylek od nominálních rozměrů. Důvod těchto odchylek bude vysvětlen později v kapitole.

Z hlediska opakovatelnosti výroby lze konstatovat, že buňky vyrobené se šikmou orientací hubice vykazují stabilnější výsledky. Tento trend odpovídá poznatkům z předchozích experimentů, kde byla u šikmé orientace hubice rovněž pozorována vyšší opakovatelnost. Nicméně opakovatelnost při kolmé orientaci hubice je také dostatečná a neporušuje stanovené odchylky.

Rozdíly mezi jednotlivými strategiemi výroby uzlu jsou z hlediska celkových rozměrů relativně malé a nevykazují výrazný vliv na výslednou rozměrovou přesnost buňky.

Návaznost prutů v oblasti uzlového bodu byla hodnocena pomocí posunu os navazujících prutů a pomocí úhlové odchylky navazujících prutů (Obr. 5-27). Pro oba pruty byly samostatně určeny jejich osy. Následně byla definována referenční rovina procházející oblastí uzlu, kolmá na nominální směr měřených prutů. Vzdálenost průsečíků obou os s touto rovinou byla použita jako míra polohové odchylky návaznosti prutů.



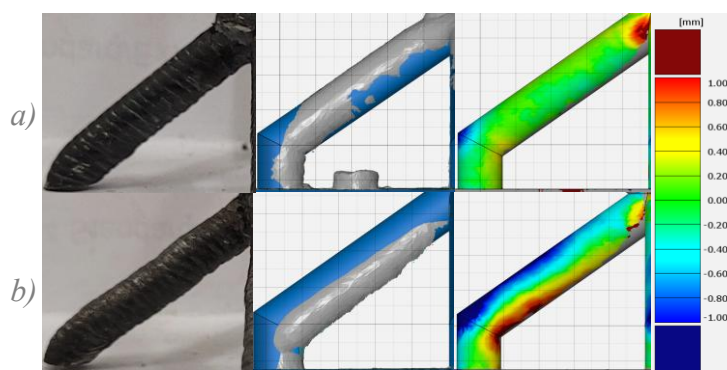
Obr. 5-27 Vyhodnocení návaznosti

Tabulka 12 Návaznost prutů vyrobených BCC buňek

Orientace hubice	Strategie uzlu	Úhel [°]	Posun os (x) [mm]
Kolmá hubice	Přiblížení	2,8 ÷ 3,8	0,7 ÷ 1,1
	Kontinuální	1,6 ÷ 2,2	0,1 ÷ 0,2
Šikmá hubice	Přiblížení	2,1 ÷ 3	0,6 ÷ 0,8
	Kontinuální	2,2 ÷ 2,6	0,3 ÷ 0,5

Z výsledků vyplývá, že návaznost prutů je ovlivněna jak orientací svařovací hubice, tak způsobem tvorby uzlového bodu. Úhlová odchylka i posun os je v obou případech orientace hubice lepší u kontinuálního uzlu. Při porovnání orientace hubice pro tento uzel vykazuje lepší hodnoty návaznosti kolmá hubice, přičemž z předchozích kapitol je zjištěno, že šikmá orientace by měla vykazovat lepší výsledky, ovšem při této konfiguraci dochází k chybě s nepřesným zapálením oblouku. Nepřesné zapálení oblouku spočívá v tom, že oblouk není iniciován přesně na vrcholu předchozího prutu, ale na jeho nižší části, což je způsobeno orientací hubice vůči vertikálnímu prutu. Tato chyba se výrazně neprojevila v úhlové odchylce, protože mohla ovlivnit spodní i horní navazující prut podobným způsobem. Projevila se tak spíše lokálním posunem uzlu než zhoršením vzájemného úhlu prutů.

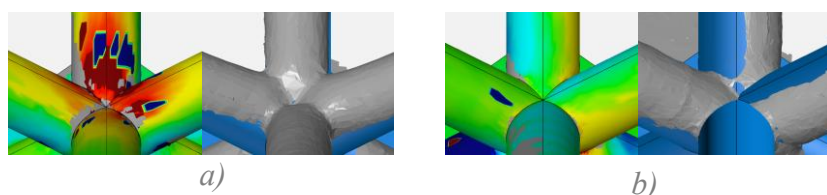
Při následném navařování po definované trajektorii se tento počáteční posun promítá do celkového tvaru prutu. Prut je tak vůči ideální poloze mírně vychýlen (Obr. 5-28), což se projeví odchylkou jeho úhlu a zvětšením jeho rozměru v rovině XY.



Obr. 5-28 Prut pod úhlem navařený a) Při kolmé orientaci hubice, b) Při šikmé orientaci hubice

U varianty s přiblížením prutů vzniká mírně zvýšený uzlový bod, zejména při kolmé orientaci hubice (Obr. 5-29a), což vede ke zvětšení úhlu mezi pruty a posunu jejich os. Zvýšení uzlu je způsobeno akumulací materiálu v oblasti uzlového bodu, ke které dochází i přes odebrání vertikálních vrstev. V důsledku toho je prut navázán ve vyšší poloze, než odpovídá nominální geometrii, což vede ke zhoršení jeho počátečního úhlu. Tento efekt by bylo možné omezit úpravou bodů navařování v oblasti uzlu.

U šikmé orientace hubice se tento efekt projevuje méně (Obr. 5-29b), protože prut je navařován z boku a jeho založení není tolik ovlivněno výškou uzlového bodu. Současně tomu napomáhají odchylky způsobené nepřesným zapálením oblouku, kdy může být prut iniciován na nižší části povrchu oproti plánované poloze.



Obr. 5-29 Uzel tvořený přiblížením prutů vyrobený a) kolmou hubicí, b) šikmou hubicí

U kontinuálně navařeného uzlu nedochází k ovlivnění návaznosti prutů zvýšenou výškou uzlového bodu. U šikmé orientace hubice se ale projevují odchylky způsobené změnami orientace hubice a nepřesným zapálením oblouku, které posun os zhoršují.

Při měření se výrazně neprojevila přechodová oblast mezi vertikálním a šikmým prutem a zároveň se neprojevil ani vyšší uhel při navařování s kolmou hubicí. Ovšem tento problém by se mohl objevit u rozměrnějších buněk, kde by bylo nutné jej kompenzovat.

Nepřesnosti spojené se strategií přiblížení prutů budou řešeny až na základě celkového zhodnocení způsobů uzlů pro výrobu. To bude vycházet z výsledků mechanických zkoušek, posouzení náročnosti výroby a složitosti programového řízení.

Mechanické zkoušky budou provedeny na buňkách vyrobených v aktuálním stavu geometrické přesnosti, přičemž se nepředpokládá, že zjištěné geometrické odchylky jsou natolik významné, aby znemožnily jejich vzájemné porovnání.

Mechanické vlastnosti navařených buněk

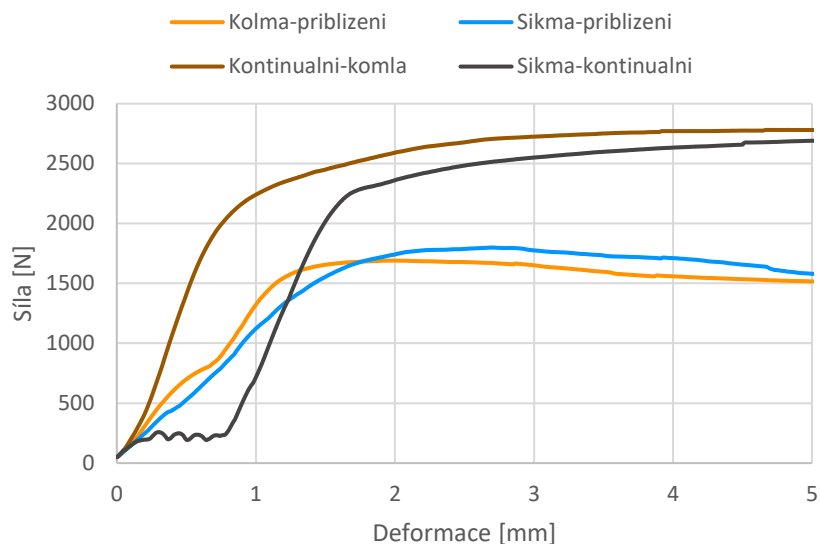
Vyrobené buňky byly podrobeny tlakovým zkouškám na univerzálním zkušebním stroji. Testovány byly oba způsoby tvorby uzlu v obou orientacích svařovací hubice, vždy na třech vzorcích. Pro porovnání byly vyhodnoceny modul pružnosti v tlaku a mez kluzu $R_{p0,2}$ %, přičemž hodnoty uvedené v tabulce 13 představují průměr ze tří měření.

Tabulka 13 Mechanické vlastnosti navařených buněk BCC

Orientace hubice	Strategie uzlu	E [MPa]	$R_{p0,2\%}$ [MPa]
Kolmá hubice	Přiblížení	44,4	1,28
	Kontinuální	91	1,67
Šikmá hubice	Přiblížení	45,3	1,33
	Kontinuální	82,2	1,73

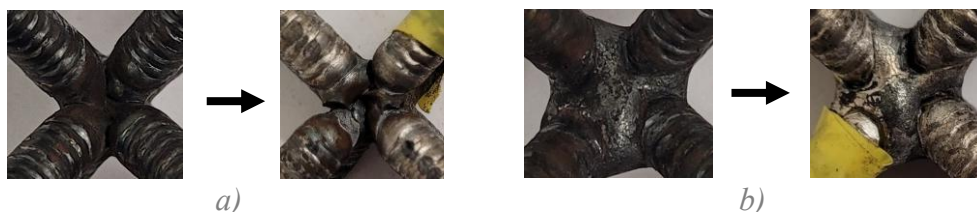
Z výsledků vyplývá, že kontinuálně navařený uzel dosahuje v obou orientacích svařovací hubice vyšších hodnot modulu pružnosti i meze kluzu než uzel tvořený přiblížením prutů. U kolmé hubice se modul pružnosti zvýšil z 44,4 MPa na 91 MPa a mez kluzu z 1,28 MPa na 1,67 MPa. U šikmé hubice se modul pružnosti zvýšil z 45,3 MPa na 82,2 MPa a mez kluzu z 1,33 MPa na 1,72 MPa.

Při porovnání orientace hubice v rámci stejné strategie jsou u varianty s přiblížením prutů mechanické vlastnosti velmi podobné, a vliv orientace hubice je proto v tomto případě malý. U kontinuálně navařeného uzlu se výraznější rozdíl projevil u modulu pružnosti, který byl vyšší při kolmé orientaci hubice. Hodnoty meze kluzu jsou u obou orientací hubice velmi blízké. Rozdíl v modulu pružnosti může souviset s geometrií a návazností prutů, případně také s přípravou vzorků před zkouškou. U vzorků se šikmou orientací hubice a kontinuálně navařeným uzlem je v počáteční části zatěžovací křivky patrný nerovnoměrný nárůst síly, pravděpodobně způsobený postupným dosedáním vzorku. Tento jev ovlivnil počáteční část zatěžovací křivky, a tím mohl ovlivnit i velikost modulu pružnosti.



Obr. 5-30 Výsledek mechanické zkoušky buněk typu BCC

Poškození uzlových bodů se liší v závislosti na použité strategii jejich výroby. Při zatížení dochází nejprve k deformaci dolních prutů, v důsledku čehož dochází k deformaci a poškození samotného uzlového bodu. U kontinuálně navařeného uzlu se toto poškození projevuje uvolněním prutů z kontinuální vrstvy (Obr. 5-31b), zatímco u strategie přiblížení dochází k přetržení spojení mezi sousedními pruty (Obr. 5-31a). Tento rozdíl souvisí s geometrií uzlu, kdy kontinuální strategie vytváří spojení na větší ploše, zatímco u přiblížení je spojení pouze lokální. To je v souladu s naměřenými mechanickými vlastnostmi, kdy kontinuální uzly vykazují vyšší tuhost i mez kluzu.



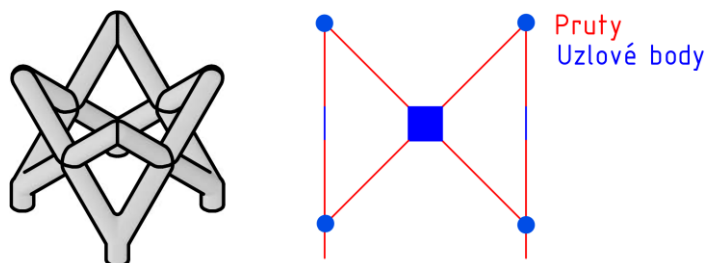
Obr. 5-31 Mechanismus porušení uzlu buněk BCC a) Uzel vytvořený přiblížením prutů, b) Kontinuálně vyrobený uzel

5.5.2 Výroba buňky typu FCC

Geometrie buňky FCC je tvořena pruty ve směru stěnových úhlopříček krychle, které propojují rohové body buňky se středy přilehlých stěn. Z hlediska výroby lze tuto geometrii opět rozdělit na pruty a uzlové body (Obr. 5-32). Oproti buňce typu BCC je základní buňka FCC tvořena uzly, které spojují dva pruty, a to v rozích a ve středech stěn.

Při tvorbě celé prostorové struktury však dochází i ke vzniku uzlových bodů, ve kterých se propojují čtyři pruty (podobně jako BCC). Tyto uzly vznikají v místech napojení sousedních buněk. Výroba těchto uzlových bodů bude řešena až v následující části práce při výrobě celých struktur.

Stejně jako v předchozí kapitole byly buňky navařovány na kolmý prut o výšce 5 mm, čímž byla simulována výroba buněk v rámci celých prutových struktur.



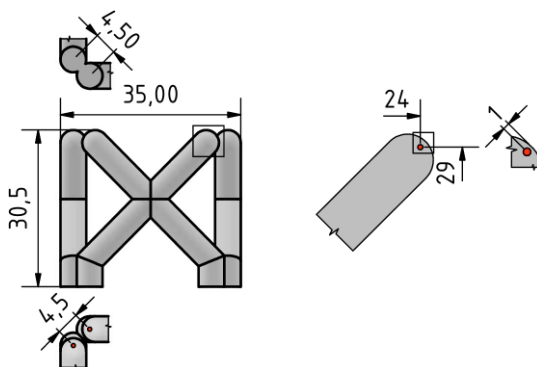
Obr. 5-32 Buňka FCC (vlevo), rozdělení na pruty a uzlové body (vpravo)

Rozměry buňky

Geometrie buňky byla upravena s ohledem na výrobu celých struktur. Rohové body byly připraveny pro kontinuální navaření uzlového bodu. Úprava spočívala ve vytvoření dostatečného prostoru pro kontinuální navaření, čehož bylo dosaženo rozdělením prutů s roztečí 4,5 mm.

Aby byla zachována geometrie buňky s pruty pod úhlem 45° , bylo nutné upravit rozměry krychle, ve které je buňka definována, konkrétně její výšku z původních 30 mm na 24 mm. Tato úprava byla nutná z důvodu posunutí rohových bodů pro přípravu na napojení sousedních buněk, kdy dochází ke zkrácení ve směru stěny o 3 mm na každé straně. Celkové zmenšení výšky pro zachování úhlu prutů tak činí 6 mm.

Po provedení těchto úprav dosahuje výsledná šířka buňky 35 mm a výška 30,5 mm (Obr. 5-33). Důvod této výšky byl obdobně vysvětlen v kapitole věnované výrobě buňky BCC.



Obr. 5-33 Teoreticky přesné rozměry buňky FCC upravené pro výrobu WAAM

Požadavky na přesnost vyrobených buněk

Požadavky na přesnost buněk typu FCC vycházejí z kritérií definovaných pro buňku typu BCC, tedy rozměrová přesnost $\pm 1,5\text{mm}$ (pro buňku 30 mm) a návaznost prutů v oblasti uzlových bodů do 1 mm s maximálním uhlém mezi pruty 3° .

Parametry výroby uzlů při kolmé orientaci hubice

Podobně jako u buňky typu BCC je i zde před samotnou výrobou nutné experimentálně nastavit parametry pro tvorbu uzlového bodu, konkrétně šířku uzlu a rychlost pohybu robota při navařování kontinuálního uzlu.

Rozsah testované šířky uzlu byl zvolen po vzoru buňky typu BCC, tedy (2,5–4,5) mm (Obr. 5-34). Vzhledem k tomu, že buňka je tvořena shodnými stěnami, byla v rámci experimentů vyráběna pouze jedna stěna.



Obr. 5-34 Nastavení šířky uzlu FCC, a) Schéma uzlu, b) Šířka 4,5mm, c) 4mm, d) 3,5mm, e) 3mm, f) 2,5mm

Z fotografií navařených uzlů je patrné, že při šířce 2,5 mm dochází ke spojení prutů, avšak zároveň k hromadění materiálu v uzlu. U šířky 3 mm dochází rovněž ke spojení prutů, přičemž hromadění materiálu je menší. Naopak u šířek uzlu 3,5 mm, 4 mm a 4,5 mm již k propojení prutů nedochází. U uzlu o šířce 3,5 mm lze pozorovat lokální spojení, které však vzniklo pravděpodobně náhodným přeskokem oblouku a nelze jej proto považovat za plnohodnotné.

Na základě výsledků byla pro strategii přiblížení prutů zvolena šířka 3 mm, která umožňuje spolehlivé spojení bez výrazného hromadění materiálu. Pro kontinuální navaření uzlu byla zvolena šířka 4,5 mm.

Při experimentálním stanovení rychlosti výroby kontinuální vrstvy byly, stejně jako u buňky BCC, testovány rychlosti 0,003 m/s, 0,005 m/s a 0,008 m/s (Obr. 5-35b, c, d). Délka navařovací dráhy byla nastavena na 7 mm (Obr. 5-35a), což odpovídá přibližně 1 mm přesahu od středů prutů. Tato hodnota vychází ze zkušeností s kontinuální vrstvou při výrobě buňky typu BCC, kde kruhová trajektorie přesahuje šířku uzlového bodu přibližně o 1 mm.



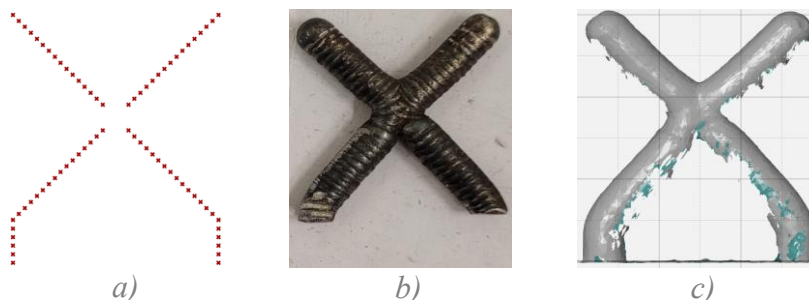
Obr. 5-35 Nastavení rychlosti kontinuálního uzlu FCC a) Trajektorie výroby kontinuální vrstvy, b) Rychlost 0,003m/s, c) 0,005m/s, d) 0,008

Stejně jako v předchozím případě vedla rychlost 0,003 m/s k přetavení struktury v důsledku nadměrného přívodu tepla. Naopak při rychlostech 0,005 m/s a 0,008 m/s bylo dosaženo spolehlivého spojení prutů. Pro další práci byla zvolena rychlost 0,005 m/s, protože v oblasti uzlu vytváří větší objem materiálu a tím i předpoklad robustnějšího spojení.

Výroba buňky při kolmé orientaci hubice

V rámci zkrácení výrobních časů byla při experimentu vyráběna pouze jedna stěna buňky.

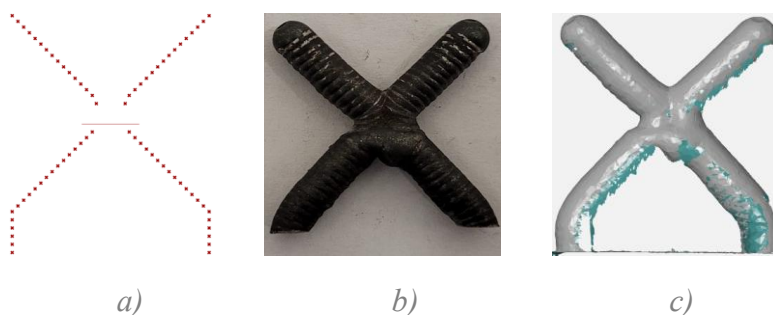
Při výrobě uzlu způsobem přiblížení prutů byla použita upravená geometrie bez vertikálních návarů na základě zkušeností z výroby buňky typu BCC (Obr. 5-36a).



Obr. 5-36 Stěna FCC buňky vyrobené kolmou hubicí s uzlem přiblížením prutů – a) Body navařování, b) Navařená stěna buňky, c) Sken stěny buňky

Tato navařená buňka (Obr. 5-36b, c) vyhovuje z hlediska rozměrů i vizuální kontroly návaznosti prutů.

U buňky s kontinuálním navařením uzlového bodu je uzel tvořen jednou kontinuální vrstvou a jednou vrstvou vertikálních návarů, které jsou navařeny s roztečí 4 mm, aby se zabránilo vzniku nespojitosti v uzlu (Obr. 5-37a).



Obr. 5-37 Stěna FCC buňky vyrobené kolmou hubicí s kontinuálně navařeným uzlem – a) Body navařování, b) Navařená stěna buňky, c) Sken stěny buňky

Takto navařená buňka (Obr. 5-37b, c) splňuje rozměrovou přesnost i návaznost prutů.

Parametry výroby uzlů při šikmé orientaci hubice

Stejně jako u buňky typu BCC je i zde prvním krokem identifikace kolizních míst a návrh změn orientace hubice pro jejich eliminaci. V rámci analýzy je svařovací hubice orientována pod úhlem 60° , který byl v předchozí části stanoven jako úhel zajišťující přesnou orientaci vyrobených prutů při současném omezení kolizního prostoru. Tato analýza byla provedena pro uzel o šířce 3 mm.

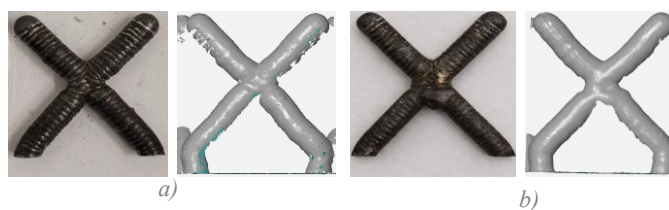
Analýza ukázala, že v této konfiguraci nehrozí kolize mezi hubicí a navařovaným prutem (Obr. 5-38a). To bylo následně ověřeno i experimentálně, přičemž se neprojevil ani problém se zapálením oblouku na nesprávném místě při uzavírání uzlu (Obr. 5-38b).



Obr. 5-38 Analýza kolize plošného uzlu FCC buňky a) Simulace, b) Výroba

Výroba buňky při nakloněné orientaci hubice

Při výrobě se šikmou orientací hubice byly buňky vyráběny se stejným nastavením jako při kolmé orientaci. U strategie přiblížení prutů měl uzel šířku 3 mm a byl bez vertikálních bodů. V případě strategie kontinuálního navaření měl uzel šířku 4,5 mm a byl tvořen jednou kontinuální vrstvou a jednou vrstvou vertikálních bodů.

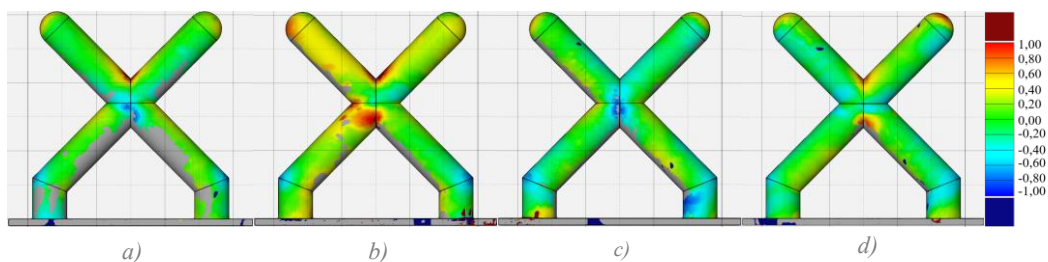


Obr. 5-39 Stěna FCC buňky vyrobené se šikmou hubicí a) Kontinuální uzel, b) Přiblížení prutů uzel

Vyrobené buňky (Obr. 5-39) z hlediska rozměrů i návaznosti prutů vyhovují požadavkům.

Přesnost vyrobených buněk

Přesnost je hodnocena, stejně jako u BCC, na základě rozměrové přesnosti a návaznosti prutů. Na Obr. 5-40 je znázorněno porovnání navařených stěn buněk se stěnou referenční buňky (kap. Rozměry buňky).



Obr. 5-40 Rozměrová přesnost buňky FCC a) Přiblížení prutů – kolmá hubice, b) Kontinuální spojení – kolmá hubice, c) Přiblížení prutů – šikmá hubice, d) Kontinuální spojení – šikmá hubice

Tabulka 14 uvádí odchylky od nominálních rozměrů, přičemž hodnoceny jsou horní pruty. Měření bylo provedeno vždy na třech stěnách vyrobených při stejných parametrech.

Tabulka 14 Rozměrové odchylky vyrobených FCC buněk od nominálních rozměrů

Orientace hubice	Strategie uzlu	Odchylka od nominální hodnoty	
		x	y
Kolmá hubice	Přiblížení	0,6 ÷ 1	0,2 ÷ 0,4
	Kontinuální	0,8 ÷ 1	0,2 ÷ 0,3
Šikmá hubice	Přiblížení	0,4 ÷ 0,6	0,2 ÷ 0,4
	Kontinuální	0,6 ÷ 0,8	0,4 ÷ 0,6

U všech testovaných buněk se naměřené odchylky pohybují v rámci tolerance stanovené zadáním. Lze však pozorovat, že odchylky ve směru X jsou ve všech případech výrazné, což ukazuje na přítomnost systematické chyby ve výrobním procesu. Přesná příčina této odchylky nebyla v rámci práce jednoznačně identifikována. Její vliv na výslednou geometrii se ukáže až při výrobě celých struktur, kde bude případně řešena vhodnou optimalizací výrobních parametrů.

Dále byla posuzována návaznost prutů před a za uzlovým bodem. Hodnocení probíhalo stejným způsobem jako u BCC. Výsledky měření jsou uvedeny v tabulce 15.

Tabulka 15 Odchylyky návaznosti prutů FCC buněk od nominálních rozměrů

Orientace hubice	Strategie uzlu	Úhel [°]	Posun os (x) [mm]
Kolmá hubice	Přiblížení	$4 \div 5,4$	$0,1 \div 0,3$
	Kontinuální	$3,4 \div 5,2$	$0,1 \div 0,4$
Šikmá hubice	Přiblížení	$1,2 \div 2,3$	$0,3 \div 0,4$
	Kontinuální	$0,6 \div 2,4$	$0,1 \div 0,4$

Při hodnocení výsledků lze pozorovat, že úhlová odchylka navazujících prutů u buněk typu FCC je ovlivněna především orientací svařovací hubice, zatímco vliv strategie výroby uzlového bodu je méně výrazný.

U buněk vyrobených s kolmou orientací hubice lze pozorovat systematicky vyšší úhel mezi pruty. Tento jev může být způsoben zvýšenou náchylností na přechodový stav a zároveň menší délkou prutu pro ustálení úhlu ve srovnání s buňkami typu BCC.

Na rozdíl od buněk navařených s kolmou hubicí, buňky vyrobené se šikmou hubicí mají úhel mezi pruty ve stanovené toleranci. Při výrobě v této konfiguraci se na rozdíl od BCC buňky neprojevuje problém se špatným zapálením oblouku. Návaznost os prutů je u všech buněk vyhovující.

Stejně jako u buněk typu BCC budou provedeny mechanické zkoušky na buňkách v aktuálním stavu geometrické přesnosti.

Mechanické vlastnosti navařených buněk

Stejně jako buňky BCC byly také buňky FCC podrobeny tlakové zkoušce na univerzálním zkušebním stroji. Testovány byly buňky vyrobené oběma strategiemi tvorby uzlu v obou orientacích svařovací hubice. Zkoušky byly prováděny na plných buňkách, přičemž pro každou variantu byly testovány tři vzorky. Hodnocen byl modul pružnosti v tlaku a mez kluzu $R_{p0,2}$ %. V tabulce 16 jsou uvedeny průměrné hodnoty naměřené pro jednotlivé varianty.

Tabulka 16 Mechanické vlastnosti navařených buněk FCC

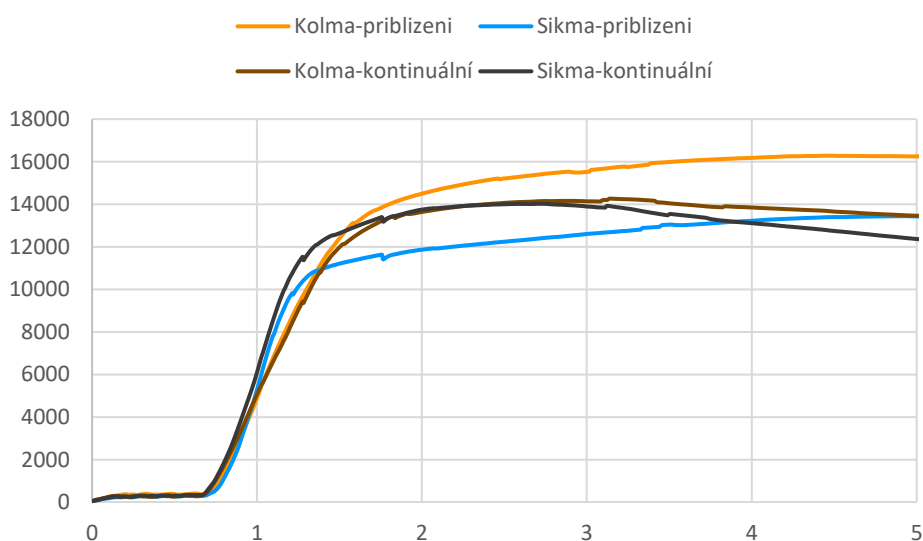
Orientace hubice	Strategie uzlu	E [MPa]	Rp_0,2% [MPa]
Kolmá hubice	Přiblížení	536,6	10,5
	Kontinuální	540,6	9,65
Šikmá hubice	Přiblížení	705,4	8,52
	Kontinuální	713,5	9,3

Z výsledků uvedených v Tabulce 16 vyplývá, že orientace svařovací hubice měla výraznější vliv na modul pružnosti než samotná strategie tvorby uzlu. U obou strategií byly vyšší hodnoty modulu pružnosti naměřeny při šikmé orientaci hubice. U strategie přiblížení prutů vzrostl modul pružnosti z 536,6 MPa na 705,4 MPa, u kontinuálního uzlu z 540,6 MPa na 713,5 MPa. Tento trend odpovídá lepší návaznosti prutů při šikmé orientaci hubice.

Vliv strategie tvorby uzlu na modul pružnosti byl méně výrazný. Kontinuální uzel vykazoval pouze mírně vyšší hodnoty než strategie přiblížení prutů, a to v obou orientacích hubice. Z hlediska tuhosti tedy mezi oběma strategiemi nebyl zjištěn zásadní rozdíl.

U meze kluzu nebyl pozorován jednoznačný trend. Při kolmé orientaci hubice byla vyšší hodnota naměřena u strategie přiblížení prutů, zatímco při šikmé orientaci u kontinuálního uzlu. Rozdíly mohou souviset s lokální geometrií uzlu, návazností prutů i variabilitou procesu WAAM. Pro přesnější vyhodnocení by bylo vhodné provést zkoušky na větším počtu vzorků.

Na začátku zatěžovacích křivek je patrná oblast s velmi malým nárůstem síly, která pravděpodobně souvisí s postupným dosedáním vzorku mezi tlačné desky zkušebního stroje a vymezováním počátečních vůlí před vlastním zatěžováním buňky.



Obr. 5-41 Výsledek mechanické zkoušky FCC buněk

Mechanismus deformace uzlového bodu je u obou strategií jeho výroby v počáteční fázi zatěžování velmi podobný (Obr. 5-42). Deformace je iniciována v oblasti uzlu a probíhá ohybovou deformací prutů vycházejících z uzlu. Tento shodný průběh počáteční deformace odpovídá i naměřeným mechanickým vlastnostem, kdy se hodnoty meze kluzu u jednotlivých variant výrazně neliší.



Obr. 5-42 Deformace buňky FCC – Přiblížení prutů (vlevo), Kontinuální navaření (vpravo)

5.6 Výběr přístupů pro výrobu prutových struktur

Kapitola na základě výsledků předchozí části hodnotí přístupy k výrobě prutových struktur z hlediska geometrické přesnosti, opakovatelnosti, mechanických vlastností, nároků na vybavení pracoviště, složitosti programového řízení a časové náročnosti výroby. Výstupem kapitoly je stanovení orientace svařovací hubice a způsobu tvorby uzlového bodu pro výrobu struktur.

Posouzení geometrické přesnosti

Z hlediska geometrické přesnosti všechny hodnocené varianty buněk typu BCC i FCC splnily stanovené požadavky na rozměrovou přesnost. Rozdíly mezi jednotlivými přístupy se projeví především v návaznosti prutů v oblasti uzlového bodu. U buněk typu BCC byla kolmá orientace svařovací hubice příznivější z hlediska rozměrové přesnosti. Z hlediska návaznosti prutů však výsledek závisel také na strategii tvorby uzlu. Nejlepších výsledků bylo dosaženo při kombinaci kolmé orientace hubice a kontinuálně navařeného uzlu. U strategie přiblížení prutů byla naopak návaznost příznivější při šikmé orientaci hubice, protože se zde méně projevilo zvýšení uzlového bodu způsobené akumulací materiálu. Při šikmé orientaci hubice se objevoval lokální posun počátku navařování v důsledku nepřesného zapálení oblouku, jeho vliv však nebyl tak významný jako vliv zvýšeného uzlového bodu při kolmé orientaci hubice. U kontinuálně navařeného uzlu se tento jev již projevil výrazněji a vedl ke zhoršení prostorové orientace navazujících prutů.

U buněk typu FCC se rozdíly v rozměrové přesnosti mezi kolmou a šikmou orientací hubice výrazněji neprojevíly a všechny hodnocené varianty se pohybovaly v rámci stanovené tolerance. Z hlediska návaznosti prutů byla příznivější šikmá orientace hubice, při níž byly dosaženy menší úhlové odchylky, zatímco u kolmé orientace tyto odchylky již překračovaly stanovenou mez. Vliv strategie výroby uzlu byl u buněk typu FCC méně výrazný než vliv orientace hubice, rozdíly mezi strategií přiblížení prutů a kontinuálním navařením uzlu byly v rámci stejné orientace hubice zanedbatelné. Posun os navazujících prutů byl u všech variant vyhovující.

Posouzení opakovatelnosti výroby

Opakovatelnost výroby byla ve většině sledovaných případů příznivější při šikmé orientaci svařovací hubice, u níž byl pozorován menší rozptyl naměřených hodnot. Tento trend se projevil již při výrobě samostatných prutů a následně i při výrobě buněk. Současně však ani při kolmé orientaci hubice nedocházelo k odchylkám, které by vedly k překročení stanovených tolerancí zadání, a i její opakovatelnost lze proto považovat za vyhovující. Vliv strategie tvorby uzlu byl ve srovnání s orientací hubice méně výrazný a z provedených experimentů nevyplynulo, že by některá z hodnocených strategií jednoznačně vykazovala lepší opakovatelnost výroby.

Posouzení mechanických vlastností

Vliv způsobu tvorby uzlového bodu a orientace svařovací hubice závisí na typu buňky i na hodnocené veličině. U buněk typu BCC vedlo kontinuální navaření uzlu v obou orientacích hubice ke zvýšení modulu pružnosti i meze kluzu oproti strategii přiblížení prutů. Při kolmé orientaci hubice se modul pružnosti zvýšil přibližně o 105 % a mez kluzu přibližně o 30 %. Při šikmé orientaci hubice vzrostl modul pružnosti přibližně o 81 % a mez kluzu přibližně o 30 %. U buněk typu FCC se vliv způsobu tvorby uzlu projevil méně výrazně. Kontinuálně navařený uzel zde v obou orientacích vedl pouze k mírnému zvýšení modulu pružnosti, přibližně o 1 %. U meze kluzu nebyl trend jednoznačný. Při kolmé orientaci hubice byla hodnota u kontinuálního uzlu přibližně o 8 % nižší než u přiblížení prutů, zatímco při šikmé orientaci byla přibližně o 9 % vyšší. Z mechanického hlediska se tedy přínos kontinuálně navařeného uzlu jednoznačně projevil u buněk BCC, zatímco u buněk FCC byl jeho vliv méně výrazný a závisel na sledované veličině.

Vliv orientace svařovací hubice nebyl obecně jednoznačný. U buněk BCC byly u uzlu přiblížení prutů hodnoty mechanických vlastností při obou orientacích hubice velmi blízké, rozdíl modulu pružnosti činil přibližně 2 % a rozdíl meze kluzu přibližně 4 %. U kontinuálně navařeného uzlu dosáhla kolmá orientace hubice přibližně o 11 % vyššího modulu pružnosti než orientace šikmá, zatímco mez kluzu byla při šikmé orientaci přibližně o 4 % vyšší. U buněk FCC vedla šikmá orientace hubice v obou způsobech výroby uzlu k vyšším hodnotám modulu pružnosti, a to přibližně o 30 % u přiblížení prutů a přibližně o 32 % u kontinuálně navařeného uzlu. Hodnoty meze kluzu však při šikmé orientaci hubice nevykazovaly jednoznačné zlepšení. U přiblížení prutů byla mez kluzu přibližně o 19 % nižší než při kolmé orientaci, u kontinuálně navařeného uzlu přibližně o 4 % nižší. Z mechanického hlediska tedy nelze určit obecně výhodnější orientaci svařovací hubice, protože její vliv se lišil podle typu buňky, způsobu tvorby uzlu a sledované mechanické veličiny.

Nároky na vybavení pracoviště

Požadavky na vybavení pracoviště závisí na orientaci svařovací hubice během výroby. Výroba s šikmou orientací hubice je na vybavení pracoviště náročnější, protože vyžaduje polohování hubice nebo vyráběné struktury do požadovaných úhlů. Při polohování hubice je nezbytné využití průmyslového robotického ramene a vzhledem k požadovanému úhlu jejího natočení také doplňkového rotačního stolu. Alternativně lze využít naklápací stůl, při němž může pro pohyb hubice postačovat i tříosý stroj. V obou případech je však výrobní prostor omezen rozměry použitého polohovadla.

Výroba s kolmou orientací hubice je z tohoto hlediska méně náročná, protože nevyžaduje doplňkové polohovací osy a může být realizována i na tříosém stroji. Výrobní prostor je v tomto případě omezen pouze dosahem robota nebo pracovním prostorem stroje, a je tedy větší než při výrobě se šikmou orientací hubice.

Strategie tvorby uzlového bodu se z hlediska nároků na vybavení pracoviště neprojevuje, obě varianty lze realizovat na stejném typu pracoviště bez dodatečných požadavků na jeho technické vybavení.

Složitost programového řízení

Složitost programového řízení je ovlivněna orientací svařovací hubice i strategií tvorby uzlového bodu. Výroba s kolmou orientací hubice představuje jednodušší přístup, protože vychází z jednotného nastavení orientace nástroje v celém průběhu výroby. Naproti tomu při nakloněné orientaci hubice je nutné měnit natočení nástroje podle směru jednotlivých prutů. Při využití rotačního nebo naklápacího stolu se navíc složitost řízení dále zvyšuje, protože je nutné provádět transformace souřadnic s ohledem na dodatečné osy.

Do celkové složitosti programu se promítá také strategie tvorby uzlového bodu. U strategie přiblížení prutů zůstává princip výroby shodný s výrobou samotných prutů, takže uzlovou oblast lze zahrnout do stejné logiky generování bodů a trajektorií. Kontinuální tvorba uzlu naopak vyžaduje samostatné definování trajektorie v oblasti uzlu a odlišné řízení navařovacího procesu, které se v této části liší od běžné výroby prutů.

Časová náročnost výroby

Časová náročnost výroby je ovlivněna nutností dodržení limitní interpass teploty mezi navařováním na jednom prutu. Při výrobě se šikmou orientací hubice bylo experimentálně zjištěno, že lze udržovat výrazně vyšší interpass teplotu bez zhoršení geometrické přesnosti, což může vést ke zkrácení čekacích dob na ochlazení mezi jednotlivými svařovacími cykly. Tento přínos se však projeví především u menších struktur. S rostoucí velikostí struktury se rozdíl mezi oběma orientacemi hubice postupně snižuje, protože roste počet návarů v jedné výškové úrovni, a tím i časový interval mezi opakovaným navařováním na stejném prutu.

Významný vliv na časovou náročnost má také strategie tvorby uzlového bodu. Kontinuální tvorba uzlu je časově náročnější, protože při souvislém hoření oblouku dochází k vyššímu tepelnému zatížení oblasti uzlu, a proto je před pokračováním výroby nutné zařadit delší dobu chlazení. Strategie přiblížení prutů je z tohoto hlediska příznivější, protože tepelné zatížení uzlové oblasti je nižší a doba ochlazení se blíží režimu navařování jednotlivých návarů prutu. I v tomto případě však v oblasti uzlu dochází ke vzájemnému tepelnému ovlivnění prutů, které výrobní čas prodlužuje. Oproti kontinuální tvorbě uzlu je však tento nárůst méně výrazný.

5.6.1 Výběr orientace hubice pro výrobu

Posouzení jednotlivých kritérií ukazuje, že šikmá orientace svařovací hubice je příznivější z hlediska opakovatelnosti výroby a u menších struktur také z hlediska časové náročnosti. Současně je tato varianta náročnější na vybavení pracoviště i na programové řízení.

Kolmá orientace hubice je naopak méně náročná na realizaci. U buněk typu BCC byly při této orientaci dosaženy příznivější výsledky z hlediska rozměrové přesnosti i návaznosti prutů. Také mechanické vlastnosti buněk BCC neprokázaly jednoznačnou nevýhodu kolmé orientace. U strategie přiblížení prutů byly hodnoty při obou orientacích velmi podobné a u kontinuálně navařeného uzlu byl při kolmé orientaci dosažen vyšší modul pružnosti. U buněk typu FCC byla z hlediska návaznosti prutů příznivější orientace šikmá, která vedla k menším úhlovým odchylkám. Tento rozdíl se projevil také v mechanických vlastnostech, zejména ve vyšších hodnotách modulu pružnosti při šikmé orientaci hubice, ovšem hodnoty meze kluzu při šikmé orientaci nevykazovaly jednoznačné zlepšení.

Pro další výrobu byla zvolena kolmá orientace svařovací hubice. Tato varianta sice nepředstavuje nejlepší řešení ve všech hodnocených kritériích a u buněk FCC byly při šikmé orientaci dosaženy příznivější výsledky z hlediska návaznosti prutů i modulu pružnosti, pro oba typy buněk však poskytuje použitelné výsledky. Zároveň je méně náročná na vybavení pracoviště i programové řízení. Její významnou výhodou je také možnost výroby rozsáhlejších struktur bez omezení daného velikostí otočného nebo naklápěcího stolu. Nevýhodou této varianty je naopak systematicky větší úhlová odchylka navařených prutů, kterou bude při výrobě větších buněk nutné zohlednit a případně kompenzovat.

5.6.2 Výběr způsobu výroby uzlového bodu

Vhodnost způsobu tvorby uzlového bodu závisí na charakteru konkrétního uzlu. Z mechanického hlediska se přínos kontinuálně navařeného uzlu výrazně projevil u prostorových uzlů typu BCC, kde vedl k podstatnému zvýšení modulu pružnosti i meze kluzu. U plochých uzlů typu FCC nebyl vliv strategie tak jednoznačný. Kontinuálně navařený uzel v obou orientacích hubice vedl pouze k mírnému zvýšení modulu pružnosti, zatímco u meze kluzu nebyl zjištěn jednotný trend.

Posouzení geometrické přesnosti ukazuje, že vliv strategie tvorby uzlového bodu závisí na typu buňky. U buněk typu BCC bylo nejlepších výsledků dosaženo při kontinuální tvorbě uzlu, zatímco u buněk typu FCC byly rozdíly mezi způsoby malé.

Do celkového hodnocení proto dále vstupuje složitost programového řízení a časová náročnost výroby. Strategie přiblížení prutů představuje jednodušší řešení jak z hlediska generování trajektorií, tak z hlediska tepelného zatížení uzlové oblasti, a tedy i výrobního času. Kontinuální tvorba uzlu je naopak programově i časově náročnější.

Na základě celkového posouzení byla proto pro výrobu uzlů, do kterých vstupují dva pruty, zvolena strategie přiblížení prutů. U těchto uzlů se mechanické vlastnosti obou strategií výrazně nelišily a nebyl zjištěn jednoznačný mechanický přínos kontinuálního navaření, který by převážil vyšší složitost programového řízení a větší časovou náročnost. Pro výrobu prostorových uzlů spojujících tři a více prutů byla naopak zvolena strategie kontinuálního navaření, protože zde přináší výrazné zlepšení mechanických vlastností, které převyšuje nevýhodu vyšší programové i časové náročnosti.

6 DETAILNÍ NÁVRH

V rámci detailního návrhu bude řešen vývoj generátoru výrobních dat a jeho testování při výrobě testovacích struktur.

6.1 Generátor výrobních dat

Výrobní strategie byla implementována do parametrického modelu v prostředí Grasshopper. Tento model umožňuje automatizované generování výrobních příkazů pro robotické pracoviště a umožňuje tak přípravu výrobních dat bez nutnosti ručního programování. Jeho funkce je schematicky znázorněna na Obr. 6-1.

Vstupem je CAD model obálky, která má být vyplněna prutovou strukturou. Po jeho načtení je na základě zvolené základní roviny určena orientace dílu vůči výrobní platformě. Následně je definována poloha objektu v soustavě XYZ, tedy umístění na pracovním stole a výšková pozice vzhledem k výšce platformy. Geometrie je poté rozdělena na buňky zvolené velikosti a na základě výběru typu struktury (BCC nebo FCC) je objem vyplněn odpovídajícím uspořádáním prutů.

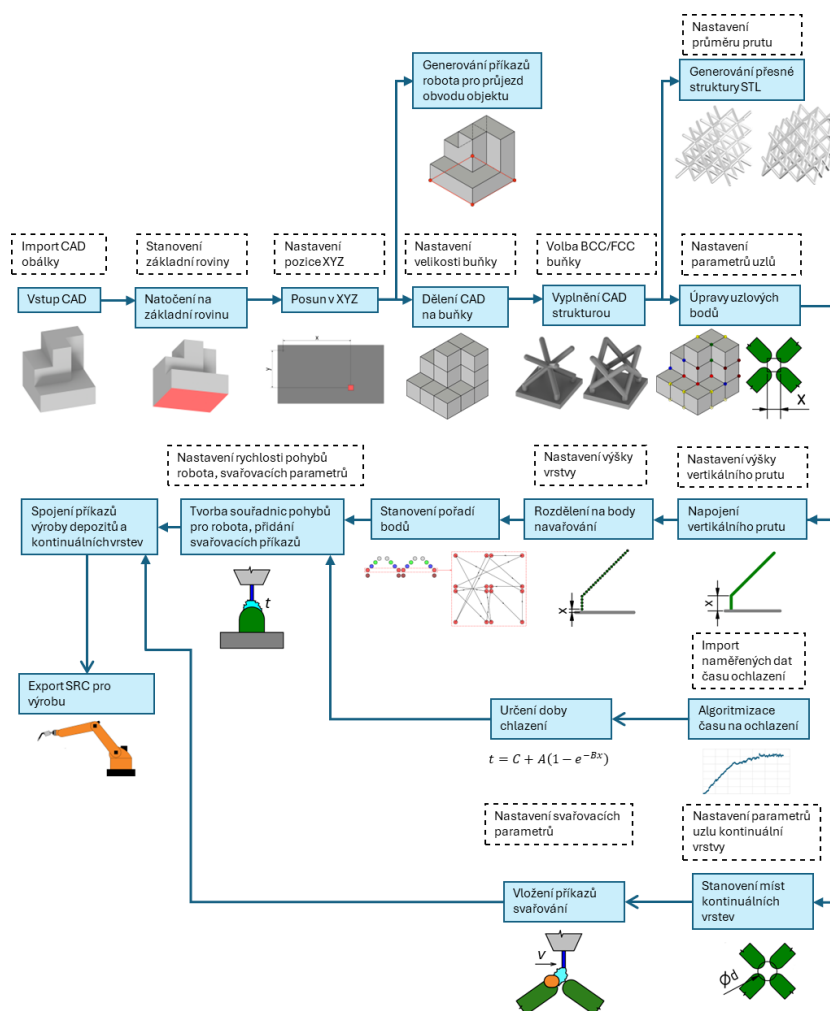
V rámci takto vytvořené struktury jsou identifikovány různé typy uzlových bodů a dojde k nastavení jejich parametrů pro výrobu. Následně dochází k doplnění vertikálních prutů pro zdiv struktury od platformy pro její bezpečné oddělení. Všechny pruty jsou poté rozděleny podle výšky návaru na jednotlivé výrobní body představující místa navařování.

Body jsou organizovány do úrovně podle souřadnice Z. Uvnitř úrovně je provedeno jejich uspořádání s cílem omezit navařování prostorově blízkých bodů bezprostředně po sobě, čímž se snižuje lokální akumulace tepla.

Na základě uspořádaných bodů jsou generovány příkazy pro robotické pracoviště, které zahrnují jak trajektorii pohybu, tak řízení svařovacího procesu. Součástí tohoto kroku je i nastavení časových prodlev mezi navařovacími cykly. Tyto časy vycházejí z experimentálně získaných dat časů ochlazování v závislosti na výškové úrovni.

Paralelně probíhá druhá větev zaměřená na kontinuální vrstvy uzlových bodů. Jsou identifikovány uzly, do kterých má být vložena kontinuální vrstva. Jsou nastaveny její geometrické parametry a na jejich základě jsou generovány odpovídající příkazy řídící trajektorii pohybu robota včetně příkazů řízení svařovacího zdroje. Přičemž proběhne i optimalizace jejich pořadí. Prodleva mezi jednotlivými kontinuálními vrstvami je v nastavena na 30 s, tato hodnota může být upravena na základě experimentálního ověření. Výsledné příkazy jsou sloučeny s příkazy bodového navařování.

Podrobný návod k použití programu je přílohou této práce. Následující podkapitoly se věnují popisu klíčových částí generátoru – stanovení pořadí bodů, úpravě uzlů a řízení teploty.



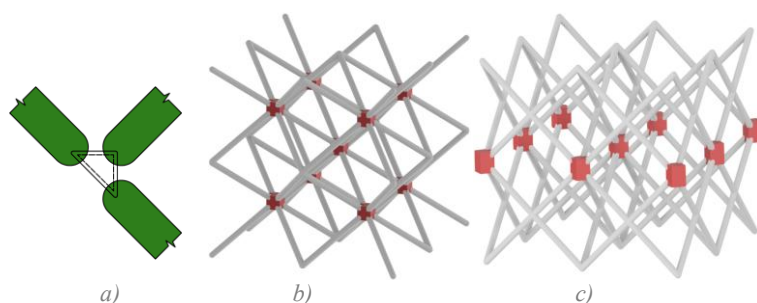
Obr. 6-1 Schéma funkce generátorů výrobních dat

6.1.1 Úpravy uzlových bodů

Úpravou uzlových bodů se rozumí nastavení geometrických parametrů uzlu pro výrobu. Hodnoty parametrů byly zvoleny na základě předchozí kapitoly. U uzlů vyráběných přiblížením prutů je šířka uzlového bodu nastavena na 3 mm, zatímco u uzlů s kontinuální vrstvou je nastavena na 4,5 mm. Samostatnou skupinu přitom tvoří uzly dotýkající se platformy. Do těchto uzlů pruty nevstupují pod úhlem, ale kolmo k platformě, a proto je i u nich nastavena šířka 4,5 mm, aby nedocházelo k vzájemnému překrývání vrstev sousedních prutů.

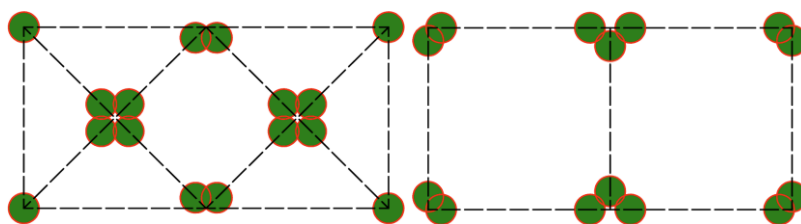
Nastavení výšky uzlového bodu se ale pro struktury BCC a FCC liší. U struktur BCC odpovídá výška uzlu jeho šířce. U struktur FCC je však nutné výšku uzlu upravit tak, aby byla zachována požadovaná geometrie. Tento rozdíl souvisí s odlišnou geometrií uzlů ve strukturách BCC a FCC. Zatímco u BCC odpovídá tvar uzlu spojujícího buňky pravidelnému objemu, u FCC je nutné zohlednit sklon navazujících prutů 45° , což vede k požadavku na větší výšku uzlu. Z tohoto důvodu je u uzlů spojujících jednotlivé FCC buňky doplněna jedna další vertikální vrstva.

Na rozdíl od samotných buněk se v celých strukturách vyskytují také kontinuální uzly tvořené třemi pruty. Trajektorie navaření tohoto uzlu vychází z koncových bodů prutů vstupujících do uzlového bodu. Je tvořena trojúhelníkem vzniklým spojením těchto bodů, odsazeným o 0,5 mm. Hrany této trajektorie jsou zaobleny poloměrem 0,5 mm (Obr. 6-2b).



Obr. 6-2 a) Trajektorie kontinuální vrstvy tří prutů, b) Kontinuální uzly BCC, c) Kontinuální uzly FCC

Úpravy uzlových bodů se promítají do výsledných rozměrů struktury (Obr. 6-3). Při zavedení rozteče prutů do oblasti uzlu a současném zachování jejich původního směru je nutné posunutí uzlového bodu ve směru os navazujících prutů. Tato úprava se následně projeví změnou vnějších rozměrů struktury a představuje tak omezení navrženého řešení.



Obr. 6-3 Úprava uzlových bodů BCC (vpravo), FCC (vlevo)

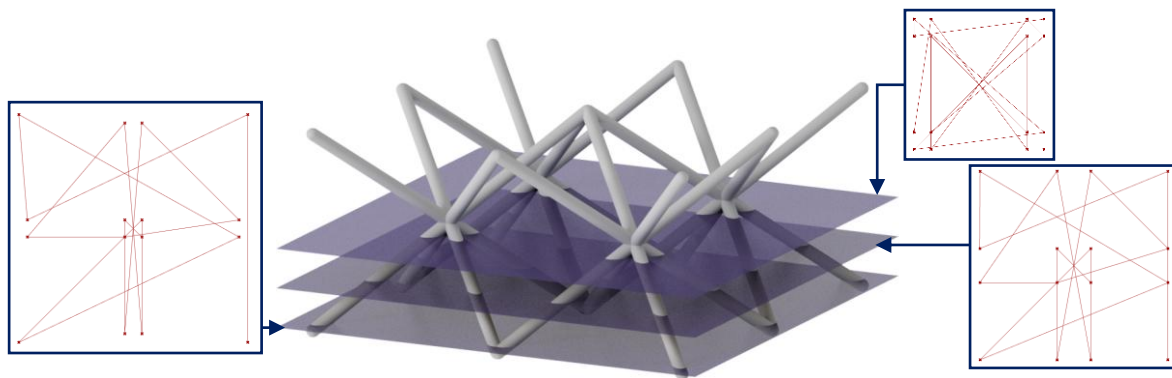
6.1.2 Stanovení pořadí výroby návarů

V prvním kroku jsou body rozděleny podle výšky v ose Z do jednotlivých úrovní. Pro každou úroveň je následně pomocí skriptu v jazyce Python určeno pořadí výroby. Cílem je omezit bezprostřední navařování prostorově blízkých bodů, a tím dosáhnout rovnoměrnějšího rozložení tepla v rámci vyráběné úrovně.

Algoritmus využívá princip krátkodobé paměti, ve které je uloženo několik naposledy vyrobených bodů. Při výběru dalšího bodu je upřednostněn bod, který se nachází v blízkosti co nejmenšího počtu bodů uložených v paměti. Za blízké jsou považovány body vzdálené méně než 10 mm. Počet sledovaných bodů je určen parametrem paměti algoritmu.

V první úrovni je nejprve zvolen počáteční bod a poté jsou ostatní body seřazeny tak, aby se co nejvíce omezilo navařování sousedních bodů za sebou. Takto získané pořadí je následně použito jako referenční pro další úrovně. V nich se body řadí podle nejbližších bodů z první úrovně. Toto přiřazení se v každé úrovni provádí znovu podle aktuální polohy bodů. Pokud se tedy poloha bodu vlivem geometrie struktury změní, změní se i jeho místo v pořadí výroby.

Výsledné pořadí tak není pevně dané pouze první úrovní, ale přizpůsobuje se skutečnému uspořádání bodů v jednotlivých úrovních. Díky tomu je možné zachovat podobnou logiku výroby v celé struktuře a tím omezit vznik míst s nadměrnou tepelnou akumulací. Stejný princip řazení je použit také u kontinuálních vrstev uzlových bodů, kde algoritmus určuje jejich pořadí tak, aby se po sobě nenařovaly prostorově blízké uzly.



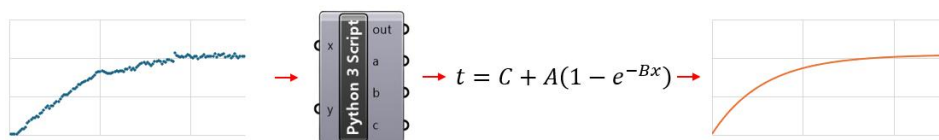
Obr. 6-4 Řazení bodů do úrovní a optimalizace jejich posloupnosti v úrovních

6.1.3 Řízení tepelné akumulace během výroby

Pro řízení tepelné akumulace byl navržen algoritmus, který určuje časové prodlevy mezi výrobou jednotlivých návarů. Hodnoty těchto prodlev byly odvozeny z experimentu, při němž byl navařován samostatný prut a v jednotlivých úrovních byla sledována doba potřebná k poklesu interpass teploty na stanovenou limitní hodnotu. Měření probíhalo až do dosažení ustáleného stavu, kdy se potřebná doba chlazení mezi dalšími návary již neměnila. Tento stav nastal přibližně po 110 návarech, přičemž doba chlazení se ustálila na hodnotě 104 s.

Naměřená data jsou do generátoru zadána ve formě bodů vyjadřujících závislost mezi pořadím úrovně a dobou chlazení. Pro jejich vyhodnocení byl vytvořen skript v jazyce Python, který těmito body prokládá aproximační funkci. Vstupem této funkce je pořadí úrovně a výstupem odpovídající čas potřebný k ochlazení na limitní teplotu (Obr. 6-5).

Vypočtené časy jsou rozděleny s ohledem na počet bodů v úrovni. Ve spojení s algoritmem pro stanovení pořadí výroby bodů je tak zajištěno, že další bod na daném prutu je navařen až po uplynutí doby potřebné k jeho ochlazení na požadovanou teplotu.

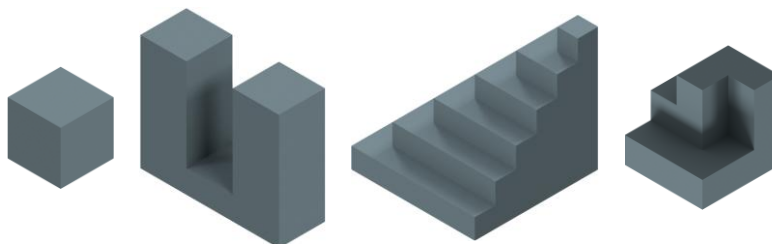


Obr. 6-5 Aproximace času chlazení v závislosti na výškové úrovni

6.1.4 Ověření generátoru výrobních dat

Generátor výrobních dat je navržen pro hranolovité součásti s kolmými stěnami. Uvažovány jsou přitom pouze geometrie, jejichž průřez se ve směru výroby nemění nebo se zmenšuje.

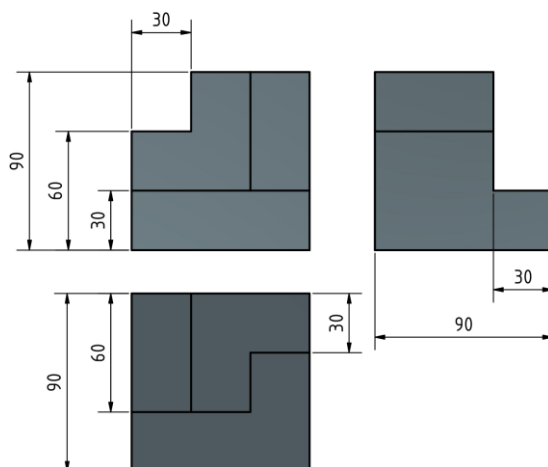
V rámci ověření funkčnosti generátoru byly testovány různé vstupní geometrie odlišné velikosti a tvarové složitosti (Obr. 6-6). Posuzována byla správnost rozdělení objektu na buňky, identifikace a úpravy uzlových bodů, dělení na body pro navařování, určení polohy a nastavení kontinuálních vrstev, řazení bodů v jednotlivých úrovních, spojování příkazů pro navařování bodů i kontinuálních vrstev a nastavení časových prodlev. Ověření bylo provedeno na úrovni generovaných dat bez následné fyzické výroby.



Obr. 6-6 Testovací objekty

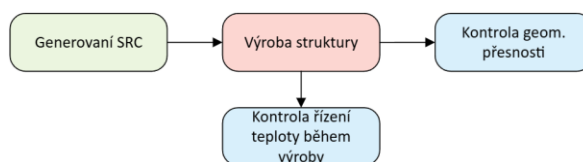
6.2 Výroba testovacích struktur

Pro výrobu k hlubšímu ověření funkčnosti generátoru byla zvolena geometrie objektu 4. Tento objekt představuje vhodný kompromis mezi velikostí a výrobním časem. Jeho tvar umožňuje ověřit správnost generování dat pro různé typy uzlových bodů a geometrických přechodů.



Obr. 6-7 Geometrie obálky vyráběné testovací struktury

Vyrobeny byly dvě struktury – jedna tvořena buňkami BCC a druhá buňkami FCC. V průběhu výroby byla průběžně měřena teplota za účelem ověření funkčnosti navrženého řízení tepelné akumulace. Po dokončení výroby byla součást naskenována a následně byla posouzena její geometrická přesnost porovnáním s teoreticky přesnou strukturou. Na základě těchto vyhodnocení proběhne optimalizace nastavení generátoru.



Obr. 6-8 Vyhodnocení testovacích struktur

6.2.1 Kontrola tepelné akumulace v průběhu výroby

Způsob řízení tepelné akumulace založený na časových prodlevách byl ověřován na struktuře typu FCC. Tato struktura byla zvolena proto, že obsahuje více typů uzlových bodů tvořených přiblížením prutů i kontinuálním navařením. Díky tomu představovala vhodný případ pro ověření tepelného chování při různých způsobech tvorby uzlů.

V počáteční fázi výroby a v nižších úrovních struktury se řízení teploty ukázalo jako funkční. Nastavené časové prodlevy byly v těchto místech dostatečné, protože teplo se z uzlových oblastí odvádělo rychleji a vzájemné tepelné ovlivňování prutů spojených v uzlu se výrazněji neprojevovalo. S rostoucí výškou struktury se však ochlazování zpomalovalo a teplota v oblasti uzlů se udržovala delší dobu. Začalo se tak výrazněji projevovat sdílení tepla mezi pruty vycházejícími ze stejného uzlu, jak je patrné z Obr. 6-9a. V důsledku toho teplota před dalším navařováním narůstala i při optimalizovaném pořadí výroby a nastavených časových prodlevách. Ve vyšších částech struktury dosahovala interpass teplota přibližně 130 °C (Obr. 6-9c), a proto musela být výroba opakovaně přerušována za účelem dochlazení struktury na limitní teplotu.

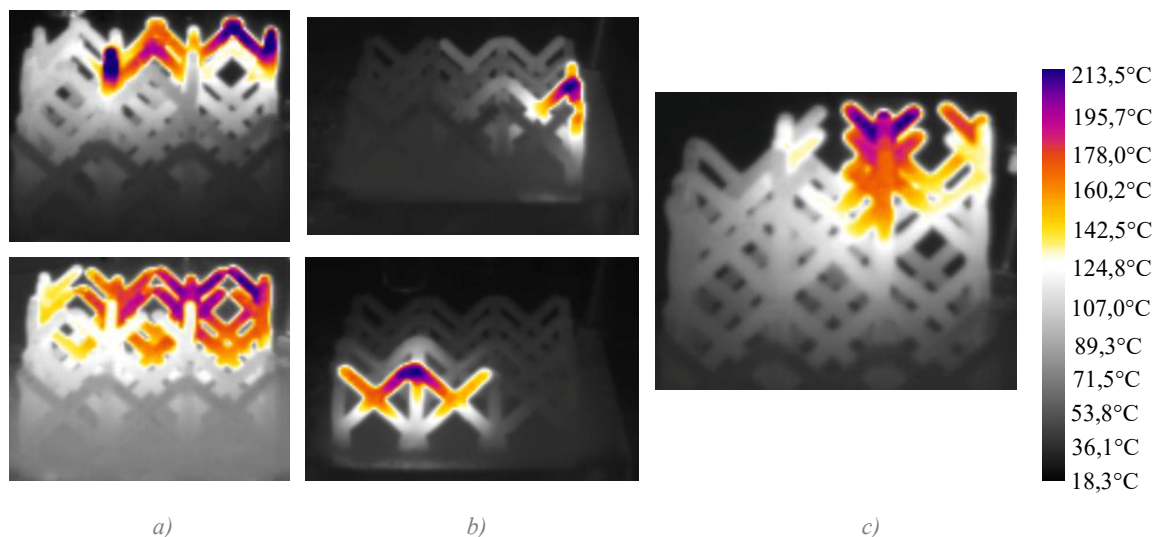
Při výrobě kontinuálních vrstev bylo zjištěno, že doba potřebná k ochlazení závisí na jejich výškové poloze ve struktuře. V první úrovni činila přibližně 80 s, ve druhé úrovni 100 s a v dalších úrovních již dosahovala 120 s. Původně pevně nastavená doba chlazení 30 s se proto ukázala jako nedostatečná, protože poslední navařená kontinuální vrstva nebyla před přechodem zpět na navařování po bodech ochlazená na limitní teplotu. Rozsah tepelného pole při výrobě kontinuální vrstvy je znázorněn na Obr. 6-9b.

Pro zachování požadované interpass teploty bude proto upraven generátor tak, aby po dokončení všech kontinuálních vrstev v jedné úrovni zařadil prodlevu pro jejich celkové dochlazení. Pro všechny úrovně bude jednotně nastavena hodnota 120s. Zároveň bude ponechána prodleva 20 s mezi jednotlivými kontinuálními vrstvami, která umožní částečné ochlazení struktury během jejich výroby.

Obdobný přístup by bylo možné uplatnit i při výrobě prutů, tedy vložit po dokončení všech návarů v dané úrovni prodlevu pro jejich ochlazení. Toto řešení však není z hlediska výrobního času příliš vhodné, protože úrovní tvořených body je podstatně více než úrovní kontinuálních vrstev a dodatečné prodlevy by výrobu výrazně zpomalily. Přesto bude tento způsob do generátoru implementován jako volitelná možnost. Ačkoliv neodstraní vzájemné tepelné ovlivňování prutů vycházejících ze stejného uzlu, měl by omezit překračování stanovené limitní teploty mezi jednotlivými úrovněmi.

Z výsledků vyplývá, že časové prodlevy stanovené pouze na základě navařování samostatného prutu nejsou pro řízení tepelného chování celé struktury dostačující. Pro přesnější nastavení by bylo nutné podrobněji experimentálně popsat šíření přenosu tepla při výrobě celé struktury, zejména tepelné ovlivňování prutů v uzlových bodech a ohřev při výrobě kontinuálních vrstev. Nejúčinnějším řešením do budoucna by byl systém založený na termovizním snímání a automatickém vyhodnocování teplotního pole, který by umožnil přesnější a univerzálnější řízení procesu pouze na základě stanovené limitní teploty.

Na obrázcích níže lze sledovat vzájemné tepelné ovlivnění prutů vycházejících z uzlového bodu, rozsah teplotního pole při výrobě kontinuální vrstvy a zvýšenou interpasovou teplotu ve vyšších částech struktury.



Obr. 6-9 a) Tepelné ovlivnění prutů v uzlu, b) Rozsah tepelného pole kontinuální vrstvy, c) Velikost interpass teploty ve vyšších úrovních struktury

6.2.2 Přesnost vyrobených struktur

Přesnost vyrobených struktur byla hodnocena porovnáním s teoreticky přesnou strukturou. Tato referenční geometrie však nezohledňuje úpravy uzlových bodů ani výrobu po vrstvách technologií WAAM. Zjištěné odchylky proto nevyjadřují pouze výrobní nepřesnost, ale také rozdíl mezi teoretickým a skutečně vyrobeným tvarem struktury.

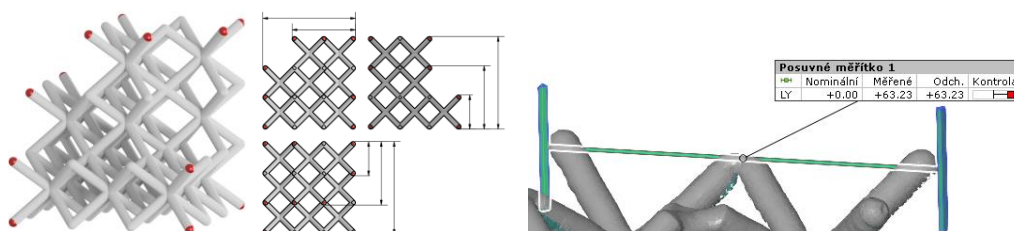
Hodnocení bylo z tohoto důvodu rozděleno do dvou částí. Nejprve byla posouzena poloha prutů, celkový tvar struktury a její vnější rozměry. V této části bylo sledováno, zda nedochází k systematickému posunu struktury nebo ke kumulaci odchylek ve směru růstu. Následně byly vyhodnoceny rozdíly mezi teoretickou geometrií a skutečným tvarem, které vznikly v důsledku technologických úprav nutných pro výrobu.



Obr. 6-10 Vyrobené struktury – BCC (vlevo), FCC (vpravo)

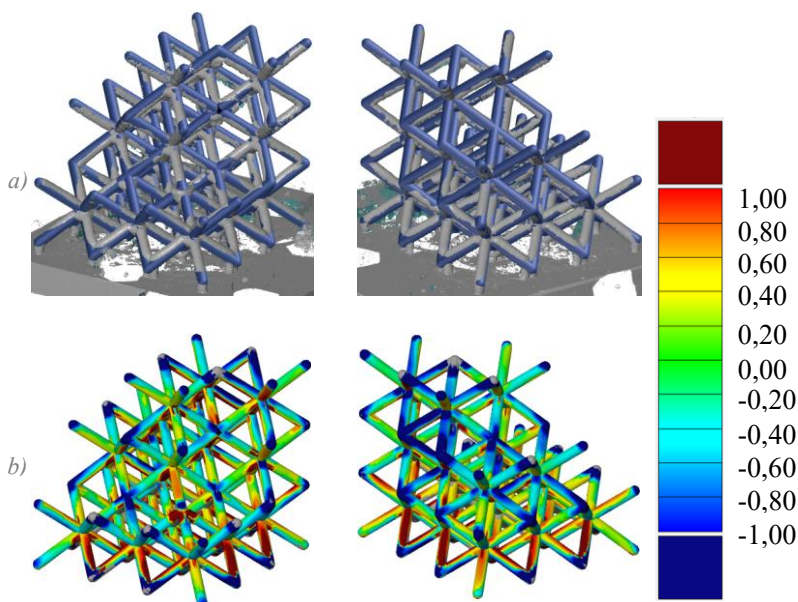
Přesnost BCC struktury

Vnější rozměry BCC struktury byly měřeny na rohových prutech, které nejsou ovlivněny úpravou uzlových bodů (Obr.6-11 vlevo). Naměřené hodnoty však nebyly porovnávány s rozměry teoreticky přesné struktury, ale s rozměry odvozenými z očekávané geometrie jednotkové buňky WAAM, uvedené v kapitole 5.5.1. U rozměrů přes více buněk byla referenční hodnota stanovena jako rozměr jedné této buňky zvětšený o nominální velikost navazujících buněk. Na základě měření (Obr. 6-11 vpravo) bylo zjištěno, že hodnocené vnější rozměry splňují stanovený požadavek na přesnost.



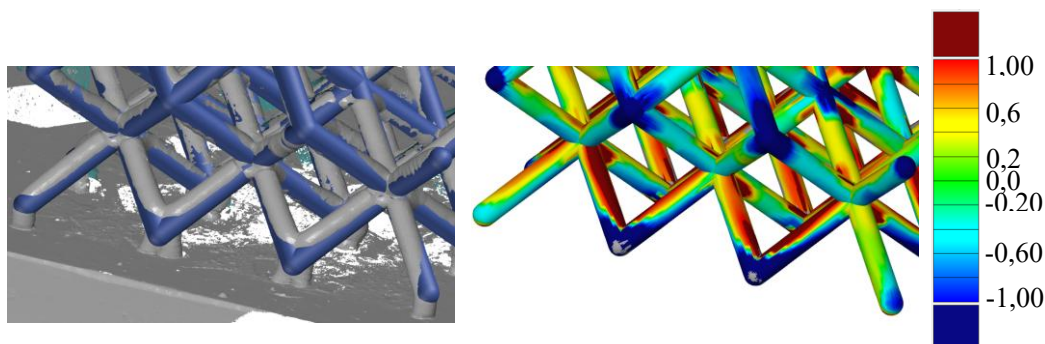
Obr. 6-11 Vnější rozměry struktury BCC (vlevo), měření vnějších rozměrů (vpravo)

Následně byly posouzeny odchylky vyrobené geometrie v porovnání s referenční geometrií pomocí vzájemného překrytí (Obr. 6-12a) a barevné mapy odchylek (Obr. 6-12b). Toto porovnání sloužilo k ověření celkového tvaru struktury, polohy prutů a k určení oblastí, ve kterých se projevují největší odchylky. Z překrytí je patrné, že poloha prutů odpovídá uspořádání BCC buněk. Odchylky vůči referenční geometrii mají převážně lokální charakter a nebyl zjištěn globální posun celé struktury.



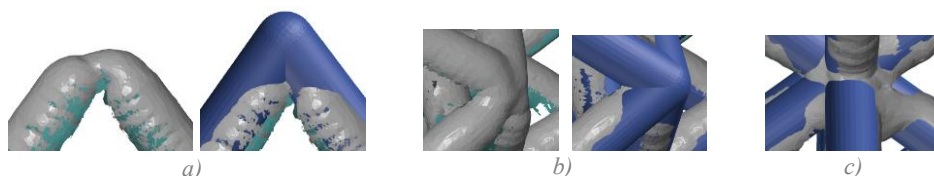
Obr. 6-12 BCC struktura – a) Porovnání přesné a vyrobené struktury, b) Mapa odchylek vyrobené struktury

Největší odchylky se projeví u buněk navazujících na vertikální pruty vycházející z platformy, které byly oproti referenční geometrii vyšší (Obr. 6-13). Toto zvýšení bylo způsobeno hromaděním materiálu při výrobě sousedních vertikálních prutů. Na základě tohoto zjištění byla navržena úprava generátoru výrobních dat spočívající ve zvětšení vzdálenosti mezi těmito pruty na 5mm.



Obr. 6-13 Detail buněk BCC navazujících na platformu – Porovnání přesné a vyrobené struktury (vlevo),
Odchylky vyrobené struktury od přesné (vpravo)

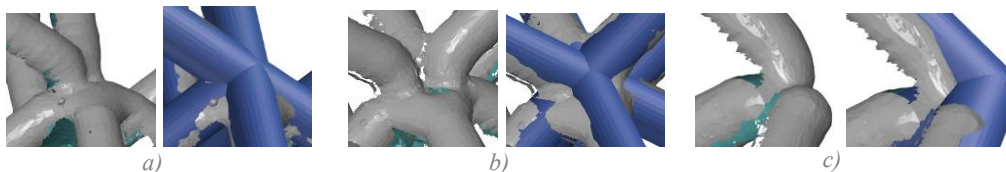
Dále byly hodnoceny uzlové oblasti, ve kterých se skutečná geometrie nejvíce liší od teoretického modelu. Tyto rozdíly nelze vždy považovat za výrobní nepřesnost, jelikož geometrie uzlů byla záměrně upravena pro potřeby výroby. U hranových a plošných uzlů se tato úprava projevuje posunutím ve směru navazujících prutů (Obr. 6-14a, b), u některých uzlů pak také lokálním zvětšením objemu materiálu vlivem kontinuální vrstvy (Obr. 6-14c). Do stejného typu odchylek patří i menší délka rohových prutů, daná charakterem WAAM výroby a postupným navařováním po úrovních.



Obr. 6-14 a) Úprava hranového uzlu obálky, b) Úprava uzlu na boku obálky, c) Kontinuální vrstva uzlu

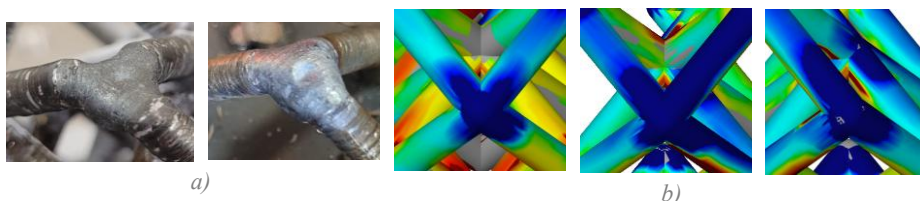
Při hodnocení uzlových oblastí bylo rozlišováno, zda se rozdíl vůči referenční geometrii omezuje pouze na samotný uzel, nebo zda se přenáší také do navazujících prutů. Pokud zůstává poloha vstupujících i vystupujících prutů vůči referenční geometrii zachována, lze odchylku v místě uzlu považovat za důsledek technologické úpravy pro výrobu. Naopak zvýšení odchylky navazujících prutů poukazuje na nevhodné nastavení výrobních parametrů uzlu parametrů.

Pro jednoznačnou identifikaci typů uzlů je zavedeno značení ve tvaru a/b , kde a označuje počet dolních prutů vstupujících do uzlu a b počet horních prutů z uzlu vystupujících. U uzlů, kde je počet horních prutů menší, než počet prutů dolních ($a > b$), se objevuje nespojitost uzlové oblasti (Obr. 6-15). Ta je způsobena výrobou po vrstvách, kdy jsou vrstvy materiálu vytvářeny pouze v místech, kde navazují další pruty. V částech uzlu, z nichž pruty dále nepokračují, tak nevzniká materiálové překrytí, což vede ke vzniku této nespojitosti.



Obr. 6-15 Nespojitost prutu v uzlu a) 4/2, b) 4/3, c) 2/1

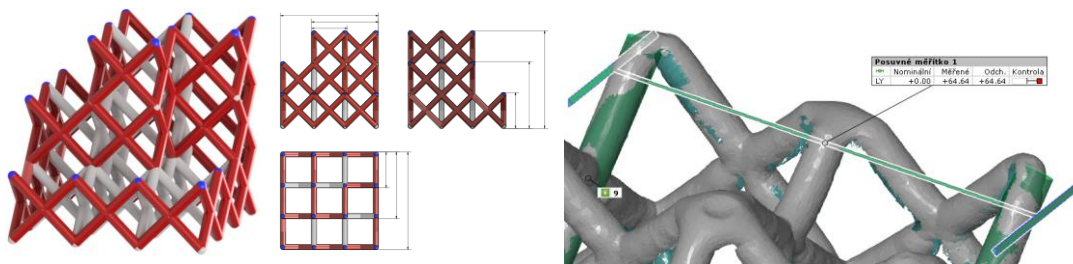
U uzlů 3/x bylo zjištěno, že jeho původní velikost 4,5 mm vede při kontinuálním navařování k lokálnímu přetavení uzlové oblasti a ke zmenšení výšky uzlu. Z tohoto důvodu byla jejich velikost v generátoru upravena na 4 mm a následně ověřena (Obr. 6-16a). Další odchylka byla pozorována u uzlů 2/x, u kterých docházelo k poklesu navazujícího prutu po průchodu uzlem. Tato chyba se projevila zvýšenou odchylkou v ose Z a ukazuje, že v tomto případě se rozdíl vůči referenční geometrii nepřenese pouze do tvaru uzlu, ale také do navazující části prutu (Obr. 6-16b). Pro omezení této odchylky byla šířka uzlu v generátoru výrobních dat upravena na 2,5 mm.



Obr. 6-16 a) Úprava uzlu 3/x, b) Akumulace odchylek v uzlu 2/x

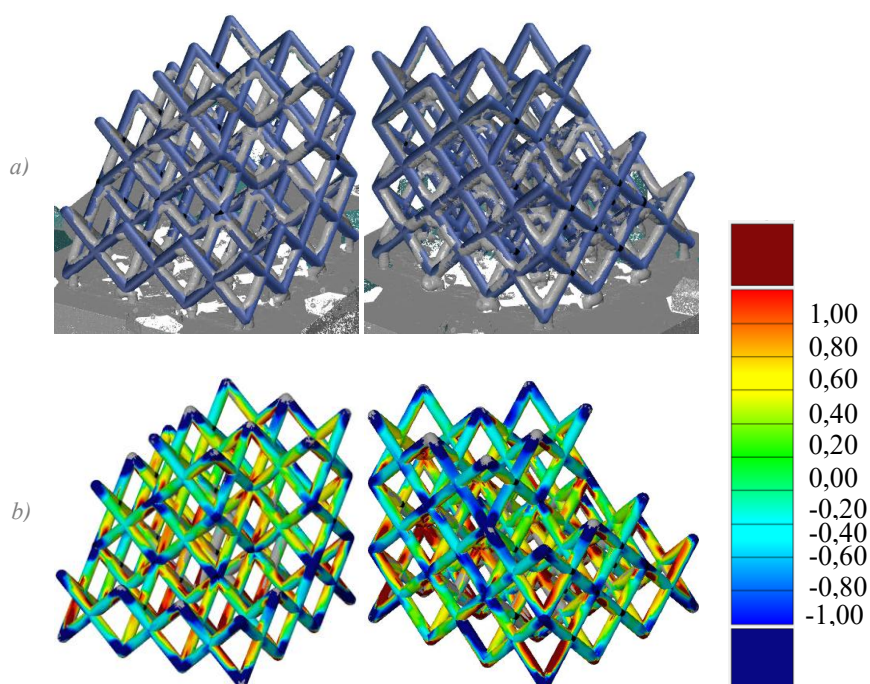
Přesnost FCC struktury

Vnější rozměry FCC struktury byly hodnoceny na rozměrech mezi stěnami buněk. Tyto rozměry nejsou ovlivněny úpravou uzlových bodů a odpovídají teoreticky přesné FCC buňce. Pro komplexnější posouzení byla doplněna také kontrola výšky struktury (Obr. 6-17 vlevo), která je již ovlivněna úpravou uzlů. Referenční hodnota výšky byla stanovena z geometrie FCC buňky uvedené v kap. 5.5.2. Měřením bylo zjištěno, že posuzované rozměry splňují požadavek na přesnost definovanou v cíli práce (Obr. 6-17 vpravo).



Obr. 6-17 Vnější rozměry struktury FCC (vlevo), měřené vnějších rozměrů (vpravo)

Vyrobená FCC struktura byla dále porovnána s teoreticky přesnou strukturou pomocí překrytí povrchů přesné a vyrobené struktury (Obr. 6-18a) a mapy odchylek tohoto překrytí (Obr. 6-18b). Z porovnání je patrné, že odchylky se ani v tomto případě neprojevují rovnoměrně v celém objemu struktury, ale soustřeďují se především do lokálních oblastí.



Obr. 6-18 FCC struktura – a) Porovnání přesné a vyrobené struktury, b) Mapy odchylek vyrobené struktury

Odchylka je patrná u buněk navazujících na platformu, které jsou oproti teoreticky přesné struktuře lokálně vyšší. U FCC struktury se tento jev projevuje v oblasti krajních uzlů tvořených dvěma pruty. Stejně jako u BCC struktury souvisí tato odchylka s větší výškou prutů vlivem vzájemného ovlivnění při výrobě.

Dalším zdrojem odchylek jsou uzlové oblasti. I zde se uplatňují stejné principy jako u BCC struktury, tedy odlišnost skutečné geometrie uzlu od teoreticky přesné struktury v důsledku úpravy uzlových bodů pro výrobu a vliv kontinuální vrstvy. Obdobně jako u BCC struktury se i u FCC projevují nespojitosti uzlové oblasti u uzlů, kde je počet horních prutů menší než počet prutů dolních.

V oblasti uzlů 2/2 byly pozorovány lokální odchylky, jejichž charakter se v různých částech struktury opakuje. Z detailního posouzení však nevyplyvá jednoznačný trend systematické kumulace těchto odchylek ve směru růstu struktury. Odchylky se sice mohou v jednotlivých případech přenášet do navazujících prvků, jejich průběh však není v celé struktuře jednotný.

Při hodnocení FCC struktury se současně potvrdilo, že úprava navržená na základě vyhodnocení BCC struktury, spočívající ve zmenšení velikosti uzlů 3/x z 4,5 mm na 4 mm, vedla k omezení lokálního přetavení uzlové oblasti.

Z hodnocení přesnosti vyplývá, že BCC i FCC struktury splňují požadavek na přesnost vnějších rozměrů a jejich celkové uspořádání odpovídá návrhu. Odchylky měly převážně lokální charakter a objevovaly se hlavně v okolí platformy a v uzlových oblastech. Část z nich byla dána samotným charakterem WAAM výroby a úpravami uzlů, část však souvisela s nastavením generátoru výrobních dat. Na základě hodnocení proto byly vybrané parametry generátoru upraveny.

6.3 Výroba demonstračního dílu

Po ověření výrobní strategie na zkušebních strukturách byla provedena výroba demonstračního dílu. Cílem bylo ověřit praktické využití navržené strategie na velkorozměrové součásti s konkrétní funkcí. Jako demonstrační díl byl zvolen podstavec prezentačního stolu. CAD obálka dílu a odpovídající model prutové struktury jsou znázorněny na Obr. 6-19a a Obr. 6-19b.

Prutová struktura byla navařována na plechový polotovár, který tvoří základnu dílu. Na horní část vyrobené struktury byl po dokončení výroby přivařen druhý plech sloužící k uchycení dřevěné desky. Pro výrobu byla zvolena struktura tvořená buňkami typu BCC.

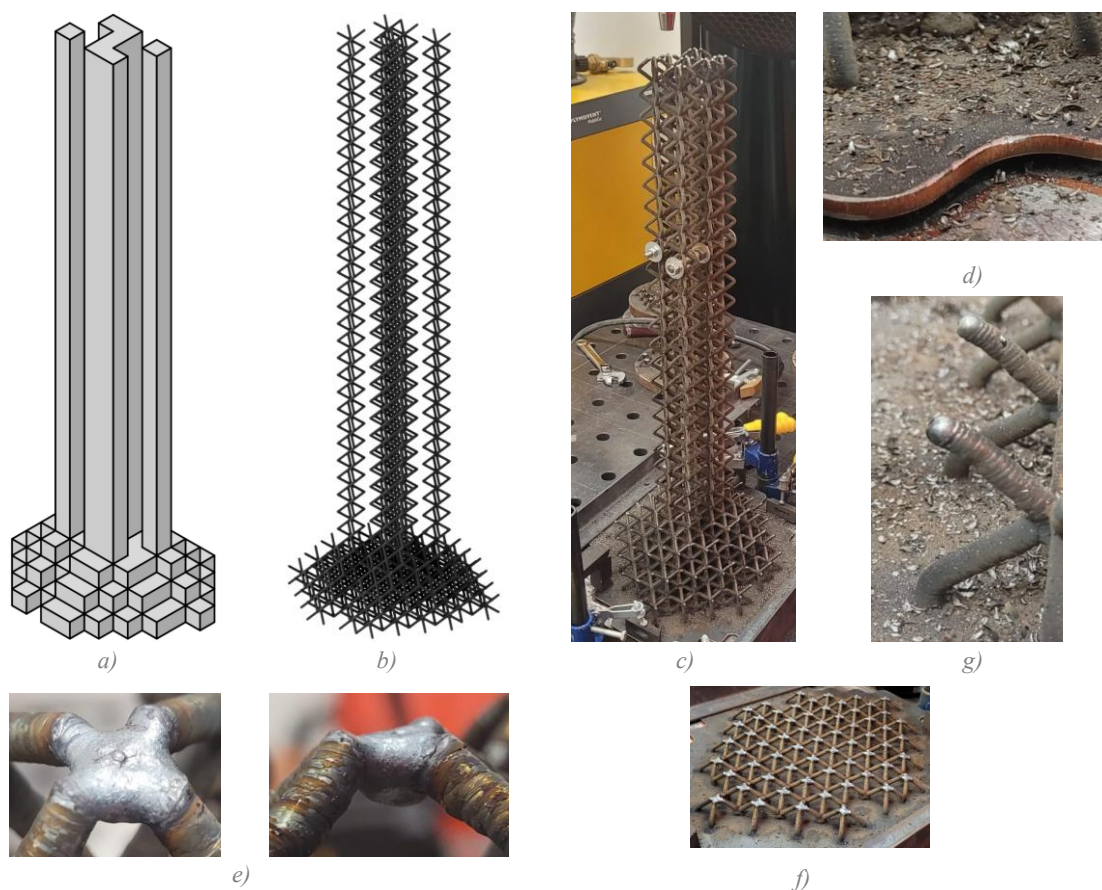
Podstavec prezentačního stolu má výšku přibližně 1 m a ve výškovém směru je tvořen 33 buňkami. Výroba zahrnovala přibližně 59 000 bodových návarů a 575 kontinuálních vrstev. Celková doba výroby dosáhla přibližně 165 hodin. Celková výška vyrobeného dílu byla oproti návrhové hodnotě nižší přibližně o 1,5 mm.

V průběhu výroby se projeví problémy, které nebyly pozorovány při výrobě jednotkových buněk ani zkušebních struktur. U kontinuálních vrstev docházelo k lokálnímu přetečení navařeného materiálu (Obr. 6-19e). Tento jev pravděpodobně souvisel s kombinací více faktorů. Kontinuální vrstvy byly navařovány do uzlů, ve kterých se spojovaly pruty vycházející z rozdílných typů uzlových spojů. Vlivem lokálních odchylek od ideální geometrie tak mohlo dojít k nepřesnému umístění prutů v oblasti uzlu, což následně ovlivnilo tvar a stabilitu navařované kontinuální vrstvy. Dalším faktorem by mohl být horší odvod tepla ve vyšších částech struktury, který mohl ovlivnit chování lázně během navařování.

Další problém spočíval ve stabilitě sloupové části, která je v průřezu tvořena pouze jednou buňkou. Ve vyšších úrovních výroby docházelo při navařování k jejímu mírnému vychylování a vibracím vlivem kontaktu se svařovací hubicí. Z tohoto důvodu musela být v průběhu výroby zpevněna připojením k širší části profilu (Obr. 6-19c). Během výroby došlo také k prohnutí základního plechu vlivem tepelného zatížení (Obr. 6-19d), což se projevilo zakřivením některých prutů převážně v první vrstvě buněk (Obr. 6-19g).

Hlavním omezením výroby byla vysoká časová náročnost procesu a citlivost některých částí dílu na deformaci základního plechu. Pro zlepšení výsledné geometrie by bylo vhodné dále zkoumat důvod přetečení kontinuálních vrstev a upravit jejich výrobní parametry. Přetečení kontinuálních vrstev se projevilo především zhoršením návaznosti některých prutů v oblasti uzlu, celkové rozměry struktury však výrazně neovlivnilo a výroba demonstračního dílu mohla být úspěšně dokončena. U tohoto dílu se tedy jednalo zejména o lokální zhoršení vzhledu a kvality napojení. U dílů s vyššími nároky na mechanické zatížení by však bylo vhodné kvalitu těchto napojení dále zlepšit, protože může ovlivňovat chování uzlových oblastí při zatížení.

I přes popsané nepřesnosti byla potvrzena použitelnost vyvinutých strategií pro výrobu velkorozměrových prutových struktur technologií WAAM.



Obr. 6-19 a) CAD obálka podstavce stolu, b) Model přesné struktury podstavce stolu, c) Výroba podstavce stolu, d) Ohyb základního plechu, e) Přetečení kontinuálního uzlu, f) Výroba první úrovně buněk, g) Zakřivení prutů vlivem ohnutí plechu

7 DISKUZE

7.1 Vývoj výrobní strategie

Cílem práce bylo navrhnout a ověřit strategii výroby prutových struktur BCC a FCC technologií WAAM. Návrh strategie vycházel z postupného řešení jednotlivých částí výrobního procesu.

Základním předpokladem pro vývoj strategie bylo dosažení stabilního růstu prutu s požadovaným výškovým přírůstkem. Zvolená sada svařovacích parametrů tento požadavek splnila, avšak parametry prvních úrovní bylo nutné upravit kvůli odlišnému chování bodů navařovaných na platformu. Svařovací parametry byly zvoleny s ohledem na geometrii prutu a omezení tepelného vstupu. Tento přístup je vhodný z hlediska tvarové stability, neověřuje však kvalitu spojení mezi jednotlivými návary. Pro úplnější posouzení by bylo vhodné doplnit mechanické a metalografické hodnocení samostatných prutů vyrobených při různých úrovních tepelného vstupu.

Ověření výroby šikmých prutů ukázalo, že obě testované orientace svařovací hubice lze při zvolených svařovacích parametrech použít k dosažení požadovaného úhlu prutu. U kolmé orientace hubice se však projevil systematický rozdíl mezi nastaveným a skutečně vyrobeným úhlem, kdy vyrobené pruty dosahovaly vyšších hodnot, než bylo zadáno v programu. Tuto odchylku bylo možné v testovaném rozsahu kompenzovat úpravou vstupního úhlu, představuje však určité omezení této konfigurace. Současně nelze na základě provedených zkoušek jednoznačně určit, jak by se kolmá orientace hubice chovala při jiných úhlech prutů nebo při větším objemu jednotlivých návárů. Při větším objemu svarové lázně by tato konfigurace mohla být náchylnější k deformacím vlivem gravitace než orientace hubice ve směru osy prutu.

Při hodnocení zvolených aspektů výrobní strategie je nutné zohlednit, že jejich ověření bylo provedeno pro jednu zvolenou velikost jednotkové buňky. Zvolené parametry strategie, tedy orientace svařovací hubice i způsob tvorby uzlových bodů, lze proto považovat za experimentálně potvrzené především pro testovaný rozměr buňky. Při přechodu na výrazně větší nebo menší buňky by bylo vhodné provést doplňkové ověření a případně upravit některé parametry generátoru. U větších buněk by se mohly více projevit úhlové odchylky prutů, protože stejná odchylka sklonu vede při větší délce prutu k většímu posunu jeho koncového bodu. Tento vliv by bylo možné kompenzovat již při generování výrobních dat, například úpravou polohy koncových bodů prutů. Se změnou rozměru buňky by se zároveň mohl změnit i poměrný vliv jednotlivých způsobů tvorby uzlu na mechanické vlastnosti, zejména vlivem odlišné délky prutů a charakteru deformace. U menších buněk by bylo vhodné věnovat pozornost především přechodovému stavu při navařování prutů, protože kratší délka prutu nemusí poskytovat dostatečný prostor pro ustálení směru jeho růstu.

Pokud by se u větších buněk ukázalo, že úhlové odchylky při kolmé orientaci hubice již nejsou přijatelné, bylo by možné uvažovat o použití šikmé orientace hubice. Tato varianta však přináší vyšší nároky na programové řízení, vyžaduje řešení kolizních situací a při výrobě rozměrnějších struktur může být omezena velikostí použitého rotačního stolu. U menších buněk by naopak mohl omezený prostor pro pohyb šikmo orientované hubice zvyšovat riziko kolizí, případně její použití zcela znemožnit.

Řízení tepelné akumulace bylo založeno na stanovení limitní interpasové teploty a odpovídajících časových prodlev mezi jednotlivými návary. Tato teplota byla určena podle geometrické stability prutů. V práci však nebyl hodnocen její vliv na mechanickou soudržnost mezi jednotlivými návary. Z tohoto důvodu nelze jednoznačně posoudit, zda je zvolená hodnota vhodná také z hlediska kvality mechanické soudržnosti. Do budoucna by bylo vhodné doplnit mechanické zkoušky vzorků navařovaných při různých interpass teplotách.

7.2 Ověření generátoru výrobních dat na zkušebních strukturách

Navržená výrobní strategie byla implementována do generátoru výrobních dat vytvořeného v prostředí Grasshopper. Generátor převádí vstupní CAD obálku požadovaného dílu na výrobní body a následně na SRC kód určený pro robotické pracoviště.

Ověření na zkušebních strukturách ukázalo, že časové prodlevy stanovené z jednodušších experimentů nebyly ve vyšších úrovních struktury dostatečné. Generátor byl proto doplněn o možnost dodatečného dochlazení jednotlivých výškových úrovní struktury.

Ve srovnání s generátory popsány v dostupné literatuře je přínosem vytvořeného řešení především jeho parametrický charakter a možnost zasahovat do jednotlivých částí výrobní strategie. Publikované přístupy rovněž pracují s převodem CAD geometrie na výrobní data, z dostupných popisů však není zřejmé, zda umožňují samostatně nastavovat různé typy uzlových bodů, nebo do generování zahrnovat řízení tepelné akumulace. V tomto směru je vytvořený generátor otevřenějším nástrojem, protože umožňuje měnit rozměry buňky, svařovací parametry a parametry uzlových oblastí.

Z hlediska další použitelnosti je výhodou, že generátor neobsahuje pouze část pro přípravu výrobních dat výsledné struktury, ale také pomocné části pro generování dat k ověřovacím experimentům. Ty umožňují připravit výrobu zkušebních prutů, prutů pod úhlem a testování uzlových oblastí při změně velikosti buňky nebo průměru prutu. Ve spojení s postupem popsáním v této práci tak generátor tvoří ucelený základ pro přenastavení strategie na jiné výrobní parametry.

Výhodou prostředí Grasshopper je jeho názornost a možnost rychlých úprav parametrů, což je vhodné zejména při experimentální výrobě. Pro běžné průmyslové použití by však bylo vhodné vytvořit jednodušší uživatelské rozhraní nebo převést hlavní části algoritmu do samostatného nástroje. Tím by se snížilo riziko chyb při nastavování parametrů a generátor by byl použitelnější i pro uživatele bez znalosti prostředí Grasshopper.

7.3 Ověření použitelnosti strategie na demonstračním dílu

Po ověření výrobní strategie na testovacích strukturách byla provedena výroba demonstračního dílu. Cílem této části bylo posoudit, zda lze navrženou strategii použít také při výrobě rozměrnější součásti o větší výšce. Výroba demonstračního dílu tak představovala přechod od zkušebních struktur k prakticky využitelnému celku.

Demonstrační díl potvrdil, že vytvořený generátor výrobních dat i navržená výrobní strategie umožňují přípravu a realizaci výroby rozměrnější prutové struktury. V rámci výroby bylo nutné vygenerovat a realizovat rozsáhlý výrobní program zahrnující přibližně 59 000 bodových návarů a 575 kontinuálních vrstev. Celková doba výroby dosáhla přibližně 165 hodin.

Při výrobě se však zároveň projeví problémy, které se u menších struktur neprojevovaly. Jednalo se zejména o lokální nepřesnosti v uzlových oblastech, deformaci základního plechu a vysokou časovou náročnost výroby. Tyto skutečnosti ukazují, že přechod od testovacích struktur k větším dílům nelze chápat pouze jako zvětšení měřítka. S rostoucím počtem návarů, výškou struktury a délkou výroby se výrazněji projevují vlivy, které u menších vzorků nebyly problematické.

Výroba demonstračního dílu potvrdila technologickou proveditelnost navržené strategie, ale zároveň ukázala její současné limity. Výsledná výška dílu byla oproti návrhové hodnotě přibližně o 1,5 mm nižší. Vzhledem k celkové výšce přibližně 1 m však šlo o malou relativní odchylku, která neomezila demonstrační účel dílu. Díl nebyl mechanicky testován jako plně funkční konstrukční součást. Pro další využití by proto bylo vhodné doplnit mechanické zkoušky větších struktur jako celku, například z hlediska tlakové únosnosti, stability deformace nebo schopnosti pohlcovat energii při zatížení.

Další vývoj by se mohl zaměřit zejména na přesnější řízení tepelné akumulace, například pomocí online řízení teploty v kombinaci s aktivním chlazením, a na další optimalizaci uzlových oblastí. Vhodné by bylo také ověřit navržený postup pro jiné velikosti buněk, jiné průměry prutů a případně další materiály. Tím by bylo možné lépe posoudit, do jaké míry je strategie přenositelná mimo konkrétní podmínky ověřené v této práci.

8 ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo navrhnout a ověřit strategii výroby prutových struktur typu BCC a FCC technologií WAAM. Strategie měla definovat způsob navařování prutů, postup výroby návarů, tvorbu uzlových bodů, orientaci svařovací hubice a řízení akumulace tepla.

V rámci práce byly stanoveny svařovací parametry umožňující stabilní růst prutu. Následně byla ověřena výroba šikmých prutů při kolmé i nakloněné orientaci svařovací hubice. Na základě výroby jednotkových buněk BCC a FCC byly porovnány jednotlivé výrobní varianty z hlediska geometrické přesnosti, mechanických vlastností a technologické náročnosti.

Výsledná výrobní strategie je založena na bodovém navařování šikmých prutů při kolmé orientaci svařovací hubice, výrobě struktury po jednotlivých výškových úrovních a řízeném pořadí navařování bodů s ohledem na omezení lokální tepelné akumulace. Pro jednodušší uzly se dvěma pruty v dolní části uzlu byla zvolena strategie přiblížení prutů, zatímco pro uzly s větším počtem dolních prutů byla zvolena strategie kontinuálního navaření. Řízení tepelné akumulace bylo řešeno pomocí časových prodlev mezi navařovacími cykly.

Na základě navržené strategie byl vytvořen parametrický generátor výrobních dat v prostředí Grasshopper. Generátor převádí CAD model obálky požadované struktury na výrobní SRC kód pro robotické pracoviště, nastavuje uzlové oblasti, určuje pořadí navařování a zahrnuje časové prodlevy pro omezení tepelné akumulace.

Výroba zkušebních struktur BCC a FCC potvrdila, že navrženou strategii lze použít pro struktury tvořené větším počtem navazujících buněk a různými typy uzlových bodů. Vyrobené struktury splnily požadavek na přesnost vnějších rozměrů $\pm 1,5\text{mm}$ a nebyla u nich pozorována systematická chyba vedoucí k postupnému zhoršování geometrie ve směru růstu. Zjištěné odchylky měly převážně lokální charakter a projevovaly se zejména v oblasti uzlových bodů. Současně se ukázalo, že při výrobě celé struktury je nutné upravit řízení tepelné akumulace, zejména u kontinuálně navařovaných vrstev. Na základě výsledků byly upraveny vybrané parametry uzlových bodů a doplněny prodlevy na chlazení během výroby.

Závěrečným ověřením byla výroba demonstračního dílu, která zahrnovala přibližně 59 000 bodových návarů a 575 kontinuálních vrstev, přičemž celková doba výroby dosáhla přibližně 165 hodin. Ověřením na demonstračním dílu byla potvrzena technologická proveditelnost navržené strategie i při výrobě rozměrnější prutové struktury. Výsledkem práce je navržená a experimentálně ověřená výrobní strategie rozměrných prutových struktur technologií WAAM a současně generátor výrobních dat pro automatizovanou přípravu výroby.

Další rozvoj tématu by mohl směřovat k rozšíření mechanických zkoušek, zejména k hodnocení větších struktur jako celku. Vhodné by bylo také ověřit vliv interpass teploty na soudržnost jednotlivých návarů, zpřesnit řízení tepelné akumulace a ověřit použitelnost navržené strategie pro jiné velikosti buněk, průměry prutů nebo materiály.

9 VÝSLEDKY PODLE RIV



Vysoké učení technické v Brně
Fakulta strojního inženýrství

Velkorozměrová prutová struktura vyrobená technologií WAAM - prezentační stůl



Apollo ID: 211650
Datum: 21.5.2026
Typ výsledku: G - funkční vzorek
Autoři: Bc. Martin Kouba, Ing. Jakub Slavíček

Technický popis:

Funkční vzorek představuje velkorozměrovou prutovou strukturu ověřující strategii výroby kovových BCC struktur vyráběných technologií WAAM. Struktura tvoří nosnou část prezentačního stolu a je přivařena ke spodnímu a hornímu ocelovému plechu a dále doplněna přišroubovanou dřevěnou stolovou deskou. Celek slouží jako demonstrační díl ověřující technologickou proveditelnost výroby velkorozměrových kovových prutových struktur metodou WAAM.

Základní technické parametry

Materiál: Ocelová slitina G3Si1

Výška: 1002 mm bez dřevěné desky, 1052 mm včetně dřevěné desky

Hmotnost: 13,05 kg bez dřevěné desky, 18,4 kg včetně dřevěné desky

Počet bodových návarů: 58 786

Čas výroby: 165 hodin

Způsob realizace

Funkční vzorek byl vyroben robotickým navařováním technologií WAAM-CMT. Řídicí SRC kód pro výrobu prutové struktury byl generován v prostředí Rhino–Grasshopper. Jako spodní podstava stolu byl použit laserem vyřezaný ocelový plech, na který byla postupně navařena prostorová BCC prutová struktura zakončená horním ocelovým plechem. Kovová část funkčního vzorku byla následně doplněna pracovní deskou z hoblované jasanové fošny připevněnou k ocelové části sestavy pomocí konstrukčních vrutů.

Výsledky zkoušek, použití

Mechanické zkoušky jednotkových buněk a posouzení rozměrové přesnosti vyráběných struktur jsou popsány v diplomové práci hlavního autora funkčního vzorku: KOUBA, Martin. Vývoj strategií pro výrobu prutových struktur technologií WAAM. Brno, 2026, 116 s. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí diplomové práce Ing. Jakub Slaviček.

Vazba na projekt

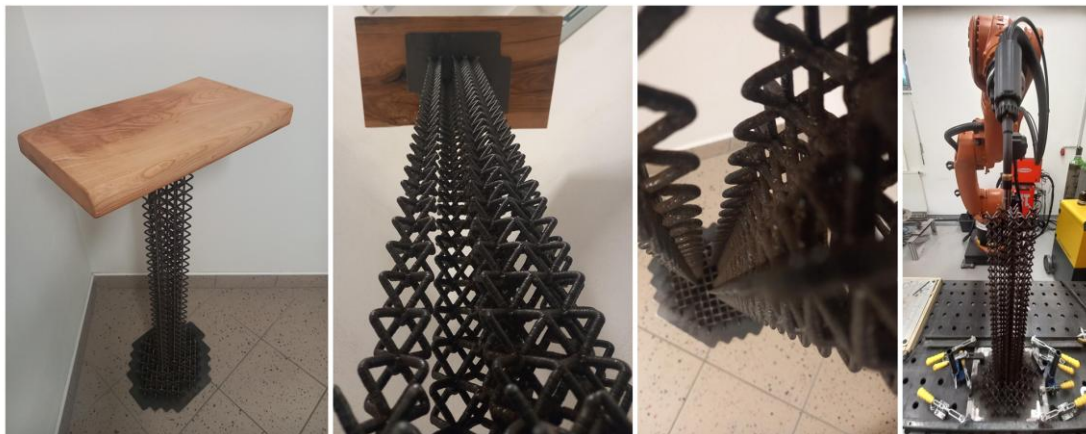
FSI-S-26-9073 – Výzkum a vývoj materiálů a struktur připravených aditivními procesy.

Umístění

D5/121 FSI VUT v Brně, Technická 2

Kontaktní osoba

Ing. Jakub Slaviček, Jakub.Slavicek1@vut.cz

Fotografická dokumentace

Prohlašuji, že popsáný výsledek naplňuje definici uvedenou v Příloze č. 2 Metodiky hodnocení výsledků výzkumu, experimentálního vývoje a inovací pro rok 2026, a že jsem si vědom důsledků plynoucích z porušení § 14 zákona č. 130/2002 Sb. (ve znění platném od 1. července 2009). Prohlašuji rovněž, že na požádání předložím technickou dokumentaci výsledku.

Ing. Jakub Slaviček

10 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. KOUL, Parankush a SIDDARAMU, Yashavanth. A Review of Wire Arc Additive Manufacturing. Online. International Journal of Scientific Research in Modern Science and Technology. 2025, roč. 4, č. 8, s. 01-32. ISSN 2583-7605. Dostupné z: <https://doi.org/10.59828/ijrmst.v4i8.353>. [cit. 2026-03-22].
2. BALDAUF, Moritz; LOHRER, Philipp; HAUSER, Tobias; JAUER, Lucas a SCHLEIFENBAUM, Johannes H. Camera-based measurement and control of the contact tip to work distance in wire arc additive manufacturing. Online. Progress in Additive Manufacturing. 2024, vol. 9, no. 3, s. 565-574. ISSN 2363-9512. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s40964-024-00655-4>. [cit. 2026-03-22].
3. JING, Chenchen; MAO, Hao; XU, Tianqiu; WU, Qianru; LIU, Bin et al. Fabricating 316 L stainless steel unsupported rods by controlling the flow of molten pool via wire arc additive manufacturing. Online. Journal of Materials Processing Technology. 2023, vol. 319, s. 118066. ISSN 0924-0136. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2023.118066>. [cit. 2026-03-22].
4. MÜLLER, Johanna; GRABOWSKI, Marcel; MÜLLER, Christoph; HENSEL, Jonas; UNGLAUB, Julian et al. Design and Parameter Identification of Wire and Arc Additively Manufactured (WAAM) Steel Bars for Use in Construction. Online. Metals. 2019, vol. 9, no. 7, s. 725. ISSN 2075-4701. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/met9070725>. [cit. 2026-03-22].
5. YU, Ziping; DING, Donghong; PAN, Zengxi; LI, Huijun; LU, Qinghua et al. A strut-based process planning method for wire arc additive manufacturing of lattice structures. Online. Journal of Manufacturing Processes. 2021, vol. 65, s. 283-298. ISSN 1526-6125. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.03.038>. [cit. 2026-03-22].
6. TREUTLER, Kai a WESLING, Volker. The Current State of Research of Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM): A Review. Online. Applied Sciences. 2021, vol. 11, no. 18, s. 8619. ISSN 2076-3417. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/app11188619>. [cit. 2026-03-22].
7. RODRIGUES, Tiago A.; DUARTE, V.; MIRANDA, R. M.; SANTOS, Telmo G. a OLIVEIRA, J. P. Current Status and Perspectives on Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM). Online. Materials. 2019, vol. 12, no. 7, s. 1121. ISSN 1996-1944. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/ma12071121>. [cit. 2026-03-22].
8. ROSLI, Nor Ana; ALKAHARI, Mohd Rizal; ABDOLLAH, Mohd Fadzli bin; MAIDIN, Shajahan; RAMLI, Faiz Redza et al. Review on effect of heat input for wire arc additive manufacturing process. Online. Journal of Materials Research and Technology. 2021, vol. 11, s. 2127-2145. ISSN 2238-7854. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.02.002>. [cit. 2026-03-22].

9. ŠOULÁK, Petr. Porovnání TOO metod svaování TIG, MAG a CMT. Brno, 2017. 45s, CD. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brn , Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie svaování a povrchových úprav. Vedoucí práce Ing. Jaroslav Kubíček.
10. WANG, Tianqi; ZHOU, Xu a ZHANG, Hongyu. Control of forming process of truss structure based on cold metal transition technology. Online. Rapid Prototyping Journal. 2021, vol. 28, no. 2, s. 204-215. ISSN 1355-2546. Dostupné z: <https://doi.org/10.1108/rpj-12-2020-0314>. [cit. 2026-03-22].
11. ZHANG, Haorui; HUANG, Junjin; LIU, Changmeng; MA, Yongsheng; HAN, Yafeng et al. Fabricating Pyramidal Lattice Structures of 304 L Stainless Steel by Wire Arc Additive Manufacturing. Online. Materials. 2020, vol. 13, no. 16, s. 3482. ISSN 1996-1944. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/ma13163482>. [cit. 2026-03-22].
12. YU, Ziping; PAN, Zengxi; DING, Donghong; POLDEN, Joseph; HE, Fengyang et al. A practical fabrication strategy for wire arc additive manufacturing of metallic parts with wire structures. Online. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2021, vol. 115, no. 9-10, s. 3197-3212. ISSN 0268-3768. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07375-x>. [cit. 2026-03-22].
13. ZHANG, Yazhou; GAO, Ming; LU, Yang a DU, Wenbo. Deposition geometrical characteristics of wire arc additive-manufactured AA2219 aluminium alloy with cold metal transfer pulse advance arc mode. Online. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2022, vol. 123, no. 11-12, s. 3807-3818. ISSN 0268-3768. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s00170-022-10460-4>. [cit. 2026-03-22].
14. WALDSCHMITT, Benedikt a LANGE, Jörg. Robot supported Wire Arc Additive Manufacturing – Using dot by-dot printing for lattice column structures. 2024.
15. GROSSI, Niccolò; LAZZERI, Flavio a VENTURINI, Giuseppe. Deposition Strategies for Bar Intersections Using Dot-by-Dot Wire and Arc Additive Manufacturing. Online. Journal of Manufacturing and Materials Processing. 2025, vol. 9, no. 3, s. 77. ISSN 2504-4494. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/jmmp9030077>. [cit. 2026-03-22].
16. ABBASZADEH, Masoud; CARVALHO, Gustavo H. S. F. L.; CAMPATELLI, Gianni a GROSSI, Niccolò. Thermal modeling and experimental validation of dot-by-dot wire arc additive manufacturing. Online. Progress in Additive Manufacturing. 2025, vol. 10, no. 12, s. 11683-11695. ISSN 2363-9512. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s40964-025-01309-9>. [cit. 2026-03-22].

17. BAGLIVO, Luca; AVALLONE, Giovanni; CASO, Marco; D'ARCANGELO, Simone; BENNI, Akshay Ashok et al. Design and prototyping wire arc additively manufactured aluminum alloy lattice structures. Online. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2024, vol. 135, no. 7-8, s. 3747-3764. ISSN 0268-3768. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s00170-024-14734-x>. [cit. 2026-03-22].
18. YU, Ziping; PAN, Zengxi; DING, Donghong; RONG, Zixuan; LI, Huijun et al. Strut formation control and processing time optimization for wire arc additive manufacturing of lattice structures. Online. Journal of Manufacturing Processes. 2022, vol. 79, s. 962-974. ISSN 1526-6125. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.05.043>. [cit. 2026-03-22].
19. JING, Chenchen; MAO, Hao; XU, Tianqiu; WU, Qianru; LIU, Bin et al. Fabricating 316 L stainless steel unsupported rods by controlling the flow of molten pool via wire arc additive manufacturing. Online. Journal of Materials Processing Technology. 2023, vol. 319, s. 118066. ISSN 0924-0136. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2023.118066>. [cit. 2026-03-22].
20. MAO, Hao; LIU, Changmeng; LING, Xue; XU, Hanwen; XIE, Jiawei et al. Effects of arc waveforms on morphology, microstructure, and properties of unsupported bars in wire and arc additive manufacturing. Online. Journal of Materials Processing Technology. 2025, vol. 337, s. 118722. ISSN 0924-0136. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2025.118722>. [cit. 2026-03-22].
21. LEARY, Martin; MAZUR, Maciej; ELAMBASSERIL, Joe; MCMILLAN, Matthew; CHIRENT, Thomas et al. Selective laser melting (SLM) of AlSi12Mg lattice structures. Online. Materials & Design. 2016, vol. 98, s. 344-357. ISSN 0264-1275. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.02.127>. [cit. 2026-03-22].
22. LI, Yuhua; JIANG, Deyu; ZHAO, Rong; WANG, Xin; WANG, Liqiang et al. High Mechanical Performance of Lattice Structures Fabricated by Additive Manufacturing. Online. Metals. 2024, vol. 14, no. 10, s. 1165. ISSN 2075-4701. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/met14101165>. [cit. 2026-03-22].
23. KRASCHEWSKI, Kevin; PHILIPOT, Gregory P. a KOCHMANN, Dennis M. A mixed-order quasicontinuum approach for beam-based architected materials with application to fracture. Online. Computational Mechanics. 2024, vol. 77, no. 1, s. 35-54. ISSN 0178-7675. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s00466-024-02528-7>. [cit. 2026-03-22].
24. TAO, Wenjin a LEU, Ming C. Design of lattice structure for additive manufacturing. Online. In: 2016 International Symposium on Flexible Automation (ISFA). IEEE, 2016, s. 325-332. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/isfa.2016.7790182>. [cit. 2026-03-22].

25. XIE, Binglin; LI, Xinyue; ZHAO, Xinyu a HU, Nan. Tunable properties and responses of architected lattice-reinforced cementitious composite components induced by versatile cell topology and distributions. Online. *Composite Structures*. 2023, vol. 312, s. 116850. ISSN 0263-8223. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2023.116850>. [cit. 2026-03-22].
26. LIU, Liqiang; LIU, Yue; LIU, Yi; WANG, Junfa; WANG, Longquan et al. Microstructure and Properties of 316L Lattice/Al Composites Fabricated by Infiltration with Different Aspect Ratios of Lattice. Online. *Coatings*. 2026, vol. 16, no. 1, s. 50. ISSN 2079-6412. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/coatings16010050>. [cit. 2026-03-22].
27. XU, Tianqiu; CUI, Yanan; MA, Shuyuan; WANG, Jiachen a LIU, Changmeng. Exploring the inclined angle limit of fabricating unsupported rods structures by pulse hot-wire arc additive manufacturing. Online. *Journal of Materials Processing Technology*. 2021, vol. 295, s. 117160. ISSN 0924-0136. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2021.117160>. [cit. 2026-03-22].
28. RADEL, S.; DIOURTE, A.; SOULIÉ, F.; COMPANY, O. a BORDREUIL, C. Skeleton arc additive manufacturing with closed loop control. Online. *Additive Manufacturing*. 2019, vol. 26, s. 106-116. ISSN 2214-8604. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.01.003>. [cit. 2026-03-22].
29. Laghi, Vittoria (2021) Study of innovative steel 3D-printing process for structural engineering applications, [Dissertation thesis], Alma Mater Studiorum Università di Bologna. Dottorato di ricerca in Monitoraggio e gestione delle strutture e dell'ambiente - sehm2, 33 Ciclo. DOI 10.48676/unibo/amsdottorato/9726.
30. LI, Yongjie; YU, Shengfu; CHEN, Ying; YU, Runzhen a SHI, Yusheng. Wire and arc additive manufacturing of aluminum alloy lattice structure. Online. *Journal of Manufacturing Processes*. 2020, vol. 50, s. 510-519. ISSN 1526-6125. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.12.049>. [cit. 2026-03-22].
31. RODRIGUES, Tiago A.; DUARTE, V.; MIRANDA, R. M.; SANTOS, Telmo G. a OLIVEIRA, J. P. Current Status and Perspectives on Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM). Online. *Materials*. 2019, vol. 12, no. 7, s. 1121. ISSN 1996-1944. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/ma12071121>. [cit. 2026-03-22].
32. BIELER, Sören a WEINBERG, Kerstin. Energy absorption of sustainable lattice structures under static compression. Online. *Meccanica*. 2025, vol. 60, no. 8, s. 2533-2547. ISSN 0025-6455. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s11012-025-02003-4>. [cit. 2026-03-22].
33. LAGHI, Vittoria; PALERMO, Michele; GASPARINI, Giada a TROMBETTI, Tomaso. Computational design and manufacturing of a half-scaled 3D-printed stainless steel diagrid column. Online. *Additive Manufacturing*. 2020, vol. 36, s. 101505. ISSN 2214-8604. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101505>. [cit. 2026-03-22].

34. ABE, Takeyuki a SASAHARA, Hiroyuki. Layer geometry control for the fabrication of lattice structures by wire and arc additive manufacturing. Online. Additive Manufacturing. 2019, vol. 28, s. 639-648. ISSN 2214-8604. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.06.010>. [cit. 2026-03-22].
35. CUNNINGHAM, C.R.; FLYNN, J.M.; SHOKRANI, A.; DHOKIA, V. a NEWMAN, S.T. Invited review article: Strategies and processes for high quality wire arc additive manufacturing. Online. Additive Manufacturing. 2018, vol. 22, s. 672-686. ISSN 2214-8604. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.06.020>. [cit. 2026-03-22].
36. ANDRADE, David; ZHU, Carlos; MIRANDA, Hélio a RODRIGUES, Dulce. Metallic 2D and 3D re-entrant honeycomb auxetics produced by WAAM. Online. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2024, vol. 135, no. 11-12, s. 5733-5745. ISSN 0268-3768. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s00170-024-14863-3>. [cit. 2026-03-22].
37. MÜLLER, Johanna; GRABOWSKI, Marcel; MÜLLER, Christoph; HENSEL, Jonas; UNGLAUB, Julian et al. Design and Parameter Identification of Wire and Arc Additively Manufactured (WAAM) Steel Bars for Use in Construction. Online. Metals. 2019, vol. 9, no. 7, s. 725. ISSN 2075-4701. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/met9070725>. [cit. 2026-03-22].
38. DING, Donghong; PAN, Zengxi; CUIURI, Dominic a LI, Huijun. A multi-bead overlapping model for robotic wire and arc additive manufacturing (WAAM). Online. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. 2015, vol. 31, s. 101-110. ISSN 0736-5845. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2014.08.008>. [cit. 2026-03-22].
39. KLOBČAR, Damjan; LINDIČ, Maja a BUŠIĆ, Matija. Wire arc additive manufacturing of mild steel. Online. Materials and Geoenvironment. 2018, vol. 65, no. 4, s. 179-186. ISSN 1854-7400. Dostupné z: <https://doi.org/10.2478/rmzmag-2018-0015>. [cit. 2026-03-27].

11 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

11.1 Seznam použitých zkratk

WAAM	Wire Arc Additive Manufacturing
2D	dvourozměrný
3D	trojrozměrný
BCC	Body-Centred-Cube
FCC	Face-Centred-Cube
BCCZ	Body-Centred-Cube doplněná o svislé pruty
FCCZ	Face-Centred-Cube doplněná o svislé pruty
FBCCZ	kombinovaná topologie obsahující prvky FCC, BCC a svislé pruty
CNC	Computer Numerical Control
GTAW	Gas Tungsten Arc Welding
GMAW	Gas Metal Arc Welding
CMT	Cold Metal Transfer
CAD	Computer-Aided Design
CAM	Computer-Aided Manufacturing
SRC	formát programu pro robotické pracoviště KUKA
STL	formát polygonálního 3D modelu
GOM	software pro vyhodnocení 3D skenů

CT	Computed Tomography
VUT	Vysoké učení technické v Brně
WFS	Wire Feed Speed

11.2 Seznam použitých symbolů a veličin

b	[mm]	Vzdálenost kontaktu prutů od teoretického uzlu
D	[mm]	Průměr prutu
α	[°]	Úhel prutu
F_{σ}	[N]	Síla povrchového napětí
F_G	[N]	Tíhová síla
F_a	[N]	Síla svařovacího oblouku
θ	[°]	Úhel natočení vůči směru působení gravitace
WFS	[m/min]	Rychlost podávání drátu
t	[s]	Čas navařování / doba hoření oblouku
U	[V]	Svařovací napětí
I	[A]	Svařovací proud
HI	[J]	Tepelný vstup
x, y, z	[mm]	Odchyłky ve směrech os
E	[MPa]	Modul pružnosti v tlaku
$R_{\{p0,2\}}$	[MPa]	Smluvní mez kluzu při plastické deformaci 0,2 %

12 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2-1 2D prutová struktura a) Čtvercová, b) Trojúhelníková, c) Hexagonální [23]	16
Obr. 2-2 Buňka typu a) BCC, b) BCCZ, c) FCC, d) FCCZ, e) F2BCCZ [21]	16
Obr. 2-3 Tlakový diagram 3D prutových struktur [21]	17
Obr. 2-4 Použití prutových struktur – a) Odlehčené konstrukce [33], b) Kineticky absorbující konstrukce [32], c) Hybridní systémy [25]	18
Obr. 2-5 Pracoviště WAAM s využitím tříosého stroje (vlevo) [3], průmyslového robota (vpravo) [2]	19
Obr. 2-6 Svařovací metoda a) GTAW [7], b) GMAW [9], c) Princip CMT [9].....	21
Obr. 2-7 Rozměry návaru v závislosti na a) WFS, b) Času navařování, c) WFS a Času navařování [12].....	23
Obr. 2-8 Kontinuální navařování s pulsním řízením proudu [3]	25
Obr. 2-9 a) Navařovaná plocha v délce pro různé pulzní frekvence, b) Pruty navařené při různých pulzních frekvencích [20]	26
Obr. 2-10 Stékání svarového kovu vlivem působení gravitačního zrychlení [27]	28
Obr. 2-11 a) Rovnováha sil působících na svarovou lázeň, b) Změna orientace navařovaného prutu.....	29
Obr. 2-12 Analýza kolize (vlevo) [10], Vyhnutí se kolizi (vpravo) [5]	30
Obr. 2-13 Spojení prutů před dosažením teoretického uzlu [15]	31
Obr. 2-14 Výroba uzlového bodu a) Přiblížením prutů [15], b) S centrálním bodem [15], c) Kontinuálním navařením [17], d) Po prutech [12].....	32
Obr. 2-15 Interpass teplota pro dobu mezi navařováním a) 5s, b) 10s, c) 15s ,d) 20s [18]	34
Obr. 2-16 Kontrola akumulovaného tepla pomocí termokamery	35
Obr. 2-17 Strategie výroby prutových struktur.....	35
Obr. 2-18 Strategie autora Yu 2021 a) Výrobní zařízení, b) Prostředí generátoru výrobních dat, c) Vyrobená 2D struktura, d) vyrobená 3D struktura, e) Výroba uzlových bodů [5]..	36
Obr. 2-19 Strategie autora Abe 2019 a) Výrobní zařízení, b) Struktura CAM systému (generátoru výrobních dat) c) CAD obálka, vložená prutová struktura, vizualizace, vyrobená struktura, d) Kontrola geom. přesnosti [34]	37
Obr. 2-20 Strategie autora Youngjie 2020 a) Výroba po bodech, b) Výroba po úrovních, c) Rozdělení struktury na pruty a uzly, d) Navařená struktura, e) Způsob výroby uzlových bodů, f) Detail na uzlový bod [30]	38

Obr. 4-1 Strom cílů a omezení	45
Obr. 4-2 Technická funkční analýza (Glass box)	46
Obr. 4-3 Návrh postupu řešení práce	47
Obr. 4-4 Kontinuální navařování po segmentech (vlevo), navařování po bodech (vpravo)	48
Obr. 4-5 Vertikálně orientovaná hubice (vlevo), hubice orientovaná ve směru osy prutu (vpravo)	49
Obr. 5-1 Schéma použitého pracoviště	54
Obr. 5-2 Postup stanovení svařovacích parametrů.....	54
Obr. 5-3 Platformy s navařenými pruty – a) Fotografie, b) Sken, c) Schéma navařeného prutu	55
Obr. 5-4 Měřené rozměry (vlevo), měření v programu GOM Inspect (vpravo).....	56
Obr. 5-5 Závislost průměru prutu na svařovacích parametrech	56
Obr. 5-6 Závislost průměrné výšky návaru na svařovacích parametrech	57
Obr. 5-7 Měření po 5 návarech (vlevo), Fotografie navařených prutů (vpravo)	58
Obr. 5-8 a) První návar (0,05s), b) Druhý návar (0,08s), c) Třetí návar (0,4s), d) Schéma výsledku optimalizace	59
Obr. 5-9 Testování výroby šikmých prutů.....	60
Obr. 5-10 Operativní měření úhloměrem při výrobě (vlevo), Měření v GOM Inspect (vpravo)	61
Obr. 5-11 Nastavení pro dosažení požadovaného úhlu a) 35°, b) 45°	63
Obr. 5-12 Výroba buněk prutových struktur.....	65
Obr. 5-13 Buňka BCC (vlevo), rozdělení na pruty a uzlový bod (vpravo).....	66
Obr. 5-14 Teoreticky přesné rozměry buňky BCC upravené pro výrobu WAAM.....	66
Obr. 5-15 Nastavení šířky uzlu BCC, a) Schéma uzlu, b) Šířka 4,5mm, c) 4mm, d) 3,5mm, e) 3mm, f) 2,5mm	68
Obr. 5-16 Nastavení rychlosti kontinuálního uzlu BCC a) Trajektorie výroby kontinuální vrstvy, b) Rychlost 0,003m/s, c) 0,005m/s, d) 0,008	68
Obr. 5-17 BCC buňka – přiblížení prutů, kolmá hubice a) Původní návrh – body navařování, b) Foto, c) Sken, d) Optimalizovaný návrh – body navařování, e) Foto, f) Sken	69
Obr. 5-18 a) První kontinuální vrstva, b) druhá kontinuální vrstva 0,005m/s, c) 0,008 m/s, d) 0,012 m/s, e) Vrstva vertikálních bodů	70

Obr. 5-19 BCC buňka – kontinuální vrstva, kolmá hubice a) Původní návrh body navařování, b) Foto, c) Sken, d) Optimalizovaný návrh – body navařování, e) Foto, f) Sken	70
Obr. 5-20 Vyhnutí se kolizi a) Simulace v programu, b) Test při výrobě	71
Obr. 5-21 a) Zapálený oblouk na úhlopříčném prutu, b) Úprava orientace hubice pro zamezení chybného zapálení oblouku	72
Obr. 5-22 a) Uzel 4,5mm při 90° hubice, b) Uzel 5mm při 75° hubice	72
Obr. 5-23 BCC buňka – přiblížení prutů, šikmá hubice a) Body navařování, b) Foto, c) Sken	72
Obr. 5-24 BCC buňka – kontinuální vrstva, šikmá hubice a) Body navařování, b) Foto, c) Sken	73
Obr. 5-25 Rozměrová přesnost BCC buňky s kolmou hubicí a) Kontinuálně navařený uzel, b) Uzel tvořený přiblížením bodů	73
Obr. 5-26 Rozměrová přesnost BCC buňky se šikmou hubicí a) Kontinuálně navařený uzel, b) Uzel tvořený přiblížením bodů	74
Obr. 5-27 Vyhodnocení návaznosti	75
Obr. 5-28 Prut pod úhlem navařený a) Při kolmé orientaci hubice, b) Při šikmé orientaci hubice	76
Obr. 5-29 Uzel tvořený přiblížením prutů vyrobený a) kolmou hubicí, b) šikmou hubicí. 76	
Obr. 5-30 Výsledek mechanické zkoušky buněk typu BCC	78
Obr. 5-31 Mechanismus porušení uzlu buněk BCC a) Uzel vytvoření přiblížením prutů, b) Kontinuálně vyrobený uzel	78
Obr. 5-32 Buňka FCC (vlevo), rozdělení na pruty a uzlové body (vpravo)	79
Obr. 5-33 Teoreticky přesné rozměry buňky FCC upravené pro výrobu WAAM	79
Obr. 5-34 Nastavení šířky uzlu FCC, a) Schéma uzlu, b) Šířka 4,5mm, c) 4mm, d) 3,5mm, e) 3mm, f) 2,5mm	80
Obr. 5-35 Nastavení rychlosti kontinuálního uzlu FCC a) Trajektorie výroby kontinuální vrstvy, b) Rychlost 0,003m/s, c) 0,005m/s, d) 0,008	80
Obr. 5-36 Stěna FCC buňky vyrobené kolmou hubicí s uzlem přiblížením prutů – a) Body navařování, b) Navařená stěna buňky, c) Sken stěny buňky	81
Obr. 5-37 Stěna FCC buňka vyrobené kolmou hubicí s kontinuálně navařeným uzlem – a) Body navařování, b) Navařená stěna buňky, c) Sken stěny buňky	81
Obr. 5-38 Analýza kolize plošného uzlu FCC buňky a) Simulace, b) Výroba	82

Obr. 5-39 Stěna FCC buňka vyrobené se šikmou hubicí a) Kontinuální uzel, b) Přiblížení prutů uzel.....	82
Obr. 5-40 Rozměrová přesnost buňky FCC a) Přiblížení prutů – kolmá hubice, b) Kontinuální spojení – kolmá hubice, c) Přiblížení prutů – šikmá hubice, d) Kontinuální spojení – šikmá hubice	83
Obr. 5-41 Výsledek mechanické zkoušky FCC buněk	85
Obr. 6-1 Schéma funkce generátorů výrobních dat	92
Obr. 6-2 a) Trajektorie kontinuální vrstvy tří prutů, b) Kontinuální uzly BCC, c) Kontinuální uzly FCC	93
Obr. 6-3 Úprava uzlových bodů BCC (vpravo), FCC (vlevo).....	93
Obr. 6-4 Řazení bodů do úrovní a optimalizace jejich posloupnosti v úrovních.....	94
Obr. 6-5 Aproximace času chlazení v závislosti na výškové úrovni	95
Obr. 6-6 Testovací objekty.....	95
Obr. 6-7 Geometrie obálky vyráběné testovací struktury	96
Obr. 6-8 Vyhodnocení testovacích struktur	96
Obr. 6-9 a) Tepelné ovlivnění prutů v uzlu, b) Rozsah tepelného pole kontinuální vrstvy, c) Velikost interpass teploty ve vyšších úrovních struktury	98
Obr. 6-10 Vyrobené struktury – BCC (vlevo), FCC (vpravo)	98
Obr. 6-11 Vnější rozměry struktury BCC (vlevo), měření vnějších rozměrů (vpravo).....	99
Obr. 6-12 BCC struktura – a) Porovnání přesné a vyrobené struktury, b) Mapa odchylek vyrobené struktury	99
Obr. 6-13 Detail buněk BCC navazujících na platformu – Porovnání přesné a vyrobené struktury (vlevo), Odchylky vyrobené struktury od přesné (vpravo)	100
Obr. 6-14 a) Úprava hranového uzlu obálky, b) Úprava uzlu na boku obálky, c) Kontinuální vrstva uzlu	100
Obr. 6-15 Nespojnost prutu v uzlu a) 4/2, b) 4/3, c) 2/1.....	101
Obr. 6-16 a) Úprava uzlu 3/x, b) Akumulace odchylek v uzlu 2/x	101
Obr. 6-17 Vnější rozměry struktury FCC (vlevo), měření vnějších rozměrů (vpravo)...	102
Obr. 6-18 FCC struktura – a) Porovnání přesné a vyrobené struktury, b) Mapy odchylek vyrobené struktury	102
Obr. 6-19 a) CAD obálka podstavce stolu, b) Model přesné struktury podstavce stolu, c) Výroba podstavce stolu, d) Ohyb základního plechu, e) Přetečení kontinuálního uzlu, f) Výroba první úrovně buněk, g) Zakřivení prutů vlivem ohnutí plechu	104

13 SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Přehled používaných svařovacích parametrů pro navařování po bodech	24
Tabulka 2 Přehled používaných svařovacích parametrů pro kontinuální navařování	27
Tabulka 3 Přehled atributů produktu (C – Cíle, O – Omezení, F – Funkce, P – Prostředek)	42
Tabulka 4 Způsoby výroby uzlových bodů.....	50
Tabulka 5 Vlastnost navařovaného materiálu	53
Tabulka 6 Kombinace svařovacích parametrů splňující požadavek výšky a průměru návaru	58
Tabulka 7 Výroba šikmých prutů s kolmou orientací hubice	61
Tabulka 8 Výroba šikmých prutů s nakloněnou hubicí	62
Tabulka 9 Úhel prutu 35° při různé interpass teplotě pro navařování s vertikální orientací hubice	64
Tabulka 10 Úhel pruty 35° při různé interpass teplotě pro navařování se skloněnou orientací hubice	64
Tabulka 11 Rozměrové odchylky vyrobených BCC buněk od nominálních rozměrů	74
Tabulka 12 Návaznost prutů vyrobených BCC buněk	75
Tabulka 13 Mechanické vlastnosti navařených buněk BCC	77
Tabulka 14 Rozměrové odchylky vyrobených FCC buněk od nominálních rozměrů.....	83
Tabulka 15 Odchylky návaznosti prutů FCC buněk od nominálních rozměrů	84
Tabulka 16 Mechanické vlastnosti navařených buněk FCC	85

14 SEZNAM PŘÍLOH

P1.....Generátor výrobních dat

P2.....Robotické pracoviště

P3.....Návod pro generátor výrobních DAT