

Fakulta elektrotechnická  
Katedra materiálů a technologií

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**  
Ultrazvukové svařování elektrických vodičů

Autor práce: **Bc. Leoš Urbánek**  
Vedoucí práce: **doc. Ing. František Steiner, Ph.D.**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2023/2024

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Leoš URBÁNEK**  
Osobní číslo: **E22N0016P**  
Studijní program: **N0713A060011 Materiály a technologie pro elektrotechniku**  
Téma práce: **Ultrazvukové svařování elektrických vodičů**  
Zadávací katedra: **Katedra materiálů a technologií**

### Zásady pro vypracování

1. Seznamte se s problematikou ultrazvukového svařování elektrických vodičů.
2. Zpracujte rešerši současného stavu v oblasti nastavení svářecích strojů s ohledem na spolehlivost svařovaných spojů.
3. Stanovte faktory nastavení svařování ovlivňující spolehlivost svařovaných spojů.
4. Navrhněte experiment pro stanovení míry vlivu jednotlivých faktorů na spolehlivost spojů a experiment realizujte.
5. Vyhodnoťte realizovaný experiment a navrhněte doporučení pro praxi.


Rozsah diplomové práce: **40-60**  
Rozsah grafických prací: **-**  
Forma zpracování diplomové práce: **elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. Kuncipál, Josef: Teorie svařování, Praha, SNTL, 1996.
2. Elektronické informační zdroje.

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. František Steiner, Ph.D.**  
Katedra materiálů a technologií

Datum zadání diplomové práce: **7. října 2022**  
Termín odevzdání diplomové práce: **24. května 2024**



L.S.

---

**Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.**  
děkan



---

**Prof. Ing. Aleš Hamáček, Ph.D.**  
vedoucí katedry

V Plzni dne 6. října 2023

## **Abstrakt**

Tato diplomová práce je věnována problematice ultrazvukového svařování kovů. V práci naleznete představení metody ultrazvukového svařování kovů (ale také zmínku o využití ultrazvuku na svařování plastů), jejího principu, skladbu ultrazvukového svařovacího zařízení, významné faktory ovlivňující kvalitu výsledného spoje, postup procesu, uplatnění metody v průmyslových odvětvích, zejména pak v automobilovém průmyslu, popis materiálů vhodných k ultrazvukovému svařování nejen kovů, ale i plastů. V praktické části se práce zabývá návrhem experimentu a optimalizací procesu svařování (zejména faktorů svařování) pro vytvoření kvalitního spoje.

## **Klíčová slova**

Ultrazvukové svařování kovů, ultrazvukové svařování plastů, princip ultrazvukového svařování, faktory ultrazvukové svařování kovů, ultrazvuková svářečka, složení ultrazvukové svářečky, aplikace ultrazvukového svařování, optimalizace procesu ultrazvukového svařování, vliv svařovacích faktorů, návrh experimentu

## **Abstract**

This thesis is dedicated to the issue of ultrasonic welding of metals. The work includes an introduction to the method of ultrasonic welding of metals (as well as a mention of the use of ultrasound in welding plastics), its principles, the composition of ultrasonic welding equipment, significant factors influencing the quality of the resulting joint, the welding process, the application of the method in industrial sectors, particularly in the automotive industry, and a description of materials suitable for ultrasonic welding, not only of metals but also plastics. The practical part of the thesis focuses on the design of experiments and the optimization of the welding process (especially the welding factors) to create a high-quality joint.

## **Key Words**

Ultrasonic welding of metals, ultrasonic welding of plastics, principle of ultrasonic welding, factors of ultrasonic welding of metals, ultrasonic welder, composition of ultrasonic welder, applications of ultrasonic welding, optimization of the ultrasonic welding process, influence of welding factors, design of experiment

## **Poděkování**

Prostřednictvím této práce chci poděkovat svému vedoucímu doc. Ing. Františku Steinerovi, Ph.D., který mi poskytoval praktické informace, díky nimž jsem mohl práci dokončit, a zároveň se mě v průběhu snažil motivovat. Tato diplomová práce byla podpořena grantem Studentské grantové soutěže ZČU č. SGS-2024-008 „Materiály a technologie pro elektrotechniku“, za což patří velké poděkování. Děkuji také katedře Materiálů a Technologií, za možnost nahlédnout do útrob laboratoří, kde vznikají v hlavách jejich pracovníků nové nadějně nápady na zlepšení života nejen lidí v technických odvětvích, ale i všech ostatních. Velké díky patří také mé přítelkyni a rodině za nekonečnou podporu a pochopení v těžkých studijních situacích.

# Obsah

Úvod .....	- 1 -
1 Představení ultrazvukového svařování .....	- 2 -
1.1 Ultrazvukové svařování plastů .....	- 3 -
1.2 Ultrazvukové svařování kovů.....	- 4 -
2 Fyzikální princip a instrumentace ultrazvukového svařování .....	- 5 -
2.1 Systém ultrazvukového svařování.....	- 5 -
2.1.1 Ultrazvukový generátor .....	- 7 -
2.1.2 Transducer .....	- 8 -
2.1.3 Booster.....	- 9 -
2.1.4 Roh (sonotroda).....	- 10 -
2.2 Faktory mající vliv na vznik spoje .....	- 12 -
2.2.1 Frekvence.....	- 12 -
2.2.2 Výkon .....	- 12 -
2.2.3 Amplituda .....	- 13 -
2.2.4 Tlak.....	- 13 -
2.2.5 Svařovací čas a energie.....	- 14 -
2.3 Postup svařovacího procesu.....	- 14 -
2.4 Druhy ultrazvukového svařování .....	- 15 -
2.4.1 Bodové svařování .....	- 15 -
2.4.2 Kruhové svařování.....	- 16 -
2.4.3 Švové svařování.....	- 16 -
2.4.4 Liniové svařování .....	- 17 -
2.5 Materiály vhodné pro ultrazvukové svařování .....	- 18 -
2.5.1 Plastové materiály .....	- 18 -
2.5.2 Kovové materiály .....	- 19 -
2.6 Aplikace ultrazvukového svařování kovů .....	- 20 -
2.7 Výhody a nevýhody ultrazvukového svařování oproti tradičním metodám	- 22 -
2.7.1 Výhody metody .....	- 22 -

2.7.2	Nevýhody a limitace metody.....	- 23 -
3	Metoda ultrazvukového svařování v automotive.....	- 25 -
3.1	Výroba karoserií .....	- 27 -
3.2	Baterie elektromobilů .....	- 28 -
3.3	Výroba kabelových svazků.....	- 29 -
4	Optimalizace procesu .....	- 30 -
4.1	Design of Experiments (DoE) .....	- 30 -
4.1.1	Historie metody Design of Experiments (DoE) .....	- 30 -
4.1.2	Popis design of experiments (DoE).....	- 30 -
5	Experiment .....	- 32 -
5.1	Postup experimentu .....	- 32 -
5.1.1	Určení rozsahu experimentu.....	- 33 -
5.1.2	Popis testovaných vzorků .....	- 33 -
5.1.3	Určení faktorů experimentu.....	- 33 -
5.1.4	Faktory a úrovně.....	- 35 -
5.1.5	Experimentální pole.....	- 35 -
5.1.6	Provedení experimentu .....	- 37 -
5.1.7	Vyhodnocení výsledků a grafické znázornění.....	- 42 -
5.1.8	Shrnutí experimentu .....	- 47 -
5.1.9	Doporučení pro budoucí aplikace.....	- 48 -
6	Závěr.....	- 50 -
7	Bibliografie.....	- 52 -



## Seznam symbolů a zkratek

DoE – Design of Experiments (návrh experimentů)

ABS – akrylonitril butadien styren

PZT – olovo-zirkonium-titanová keramika

GMUT – Giant Magnetostrictive Ultrasonic Transducer (Obří magnetostrikční ultrazvukový převodník)

PUT – Piezoelectric Ultrasonic Transducer (Piezoelektrický ultrazvukový převodník)

PVDF – Polyvinylidenfluorid

GMUT – Giant Magnetostrictive Ultrasonic Transducer

GMM – Giant Magnetostrictive Materials (Obří magnetostrikční materiály)

CA/B/P – Celulosové acetáty

PVC – Polyvinylchlorid

PPO – Polyfenylenoxid

N – (Newton) jednotka síly dle soustavy SI

V - (Volt) jednotka elektrického napětí dle soustavy SI

Hz - (Hertz) jednotka kmitočtu dle soustavy SI

μm - (mikrometr) jednotka délky dle soustavy SI

s – (sekunda) jednotka času dle soustavy SI

## Úvod

Tato diplomová práce se věnuje problematice ultrazvukového svařování elektrických vodičů, metodě, která umožňuje vytvoření spolehlivého a pevného spojení dvou vodivých drátů pomocí vysokofrekvenčních vibrací. Metoda je velmi dobře známa pro své zjevné přednosti, mezi ně se řadí zejména absence externích spojovacích materiálů (šrouby, spojky, pájka), vystačí si pouze se samotným spojovaným materiálem. Ultrazvukové svařování je metoda velice rychlá, zabere pouhé desetiny až jednotky sekund, a ohleduplná k spojovanému materiálu, nepředstavuje pro něho takové tepelné zatížení jako jiné metody a nedochází tak k výraznému ovlivnění materiálových vlastností. Její využití se v současné době rozšiřuje do mnoha průmyslových odvětví, jako je automobilový průmysl, letecký a vesmírný průmysl či zdravotnický průmysl. Ultrazvukem vytvořené spoje můžeme spatřit také v elektrotechnice a elektronice. Za vyzdvížení stojí kromě běžného automobilového průmyslu také, kvůli velkému zájmu, rychle se rozšiřující elektromobilový průmysl, kde je tato metoda využívána také pro výrobu baterií, krom dalších elektrických systémů přítomných i v běžných automobilech se spalovacími motory.

Cílem diplomové práce je seznámit čtenáře s teorií metody ultrazvukového svařování elektrických vodičů, s problémy, se kterými se metoda potýká, ale také s jejími přínosy. Dále se budu v praktické části zabývat optimalizací procesu ultrazvukového svařování elektrických vodičů, vlivem nastavovaných faktorů při výrobě na výslednou kvalitu svařovaného spoje a jejich významnosti.

## 1 Představení ultrazvukového svařování

Ultrazvukové svařování je technologie propojování dvou či více různorodých materiálů. Původně byla určena pro svařování plastů, dnes je tato technologie vhodná k svařování téměř veškerých plastů a kovů. Technologie spojování materiálů ultrazvukovým svařováním vytváří spoj prostřednictvím kombinovaného účinku aplikace tlaku kolmého na spojované díly a třecích vibrací části nazývané sonotroda v rozsahu ultrazvukových frekvencí (20 kHz nebo vyšší) na horní straně spojovaných dílů. Materiály se spojí díky vysoko-frekvenčnímu chvění, které je vlivem tření přeměněno na tepelnou energii ve svařovaných materiálech, díky tepelné energii dochází posléze k tání styčných ploch a vzniku pevného spoje. Jedná se tedy o jedinečnou metodu spojení dvou či více prvků, která pro svou realizaci nevyžaduje žádné šrouby, spojky, hřebíky, či adheziva jako jsou pájecí hmoty. [1] [2] [3]



*Obr. 1: Typický spoj vytvořený ultrazvukovým svařováním [4]*

Použití tohoto typu svařování je velice všestranné, používá se hojně při konstrukci elektrických přístrojů, spotřebičů, v automotive, pro výrobu baterií a kabelových spojů, či v textilním průmyslu. Velmi často je tato metoda přítomna právě tam, kde se vyskytují velké výrobní série, jelikož pro každý spoj je potřeba na míru vyrobit jednotlivé komponenty (dáno velikostí spoje, materiálem, individuálními požadavky na spoj), to je považováno za jednu z nevýhod metody, další nevýhodou je omezení rozměry, to znamená že můžeme svařovat pouze relativně malé díly. [1] [2] [3] [5]

Výhody této metody však suverénně přesahují její nevýhody. První velmi vyzdvihovanou výhodou je již zmíněný fakt, že pro ultrazvukové svařování není vyžadován žádný spotřební spojovací materiál jako jsou například pájky, ani jakékoliv spojky, dalšími výhodami jsou vysoká rychlost (desetiny, jednotky sekund), čistota, či nenáročnost na

připojení k elektrické síti (stačí standardní napájení 230 V). Mezi přednosti této metody také počítáme dobrou životnost nástrojů, šetrnost ke svařovaným materiálům (malé tepelné ovlivnění – teplo neproniká do hloubky, působí v místě styku), či fakt že zařízení zabírá málo místa (kompaktnost). Všechny zmíněné výhody a nevýhody budou dále v práci popsány podrobněji. [1] [2] [3]

Ultrazvukové svařování kovů i plastů jsou dvě velmi podobné metody, existují však mezi nimi zásadní rozdíly. Tyto rozdíly si níže popíšeme.

### 1.1 Ultrazvukové svařování plastů

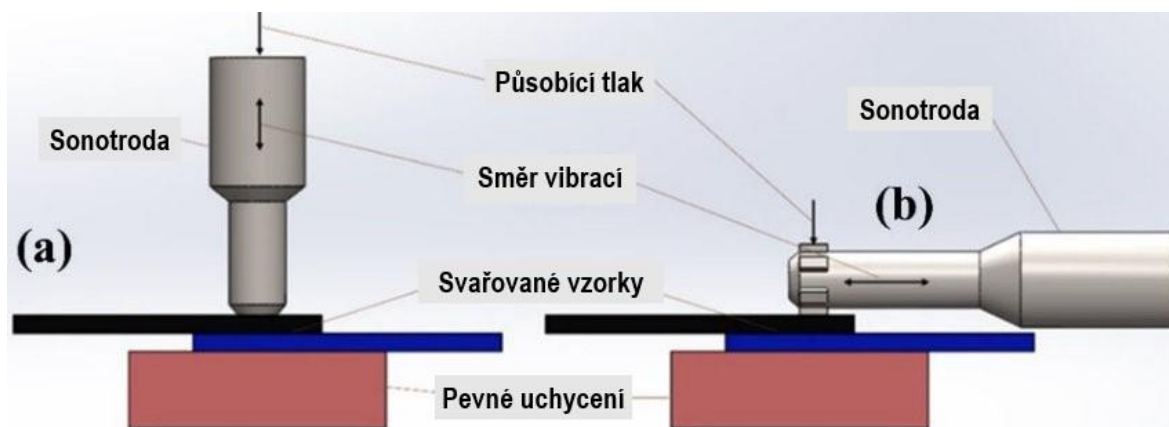
Ultrazvukové svařování u plastů bylo použito dříve než u kovů. Využívá se zde však stejného principu. Využívá se určitého tlaku na spojované povrchy a tření mezi nimi k ohřátí plastů na dostatečně vysokou teplotu, aby se vzájemně spojily. Tato třecí teplota je aplikována prostřednictvím vysokorychlostní vibrace generované sonotrodou. Třením svařovaných materiálů dochází k místnímu generování tepla, to vede k místnímu tání plastu a vytvoření pevného spoje. Záleží zde také na směrovém působení vibrací, u svařování plastů působíme ultrazvukovými vibracemi v kolmém směru na styčné povrchy spojovaných materiálů, to můžeme vidět v části a obrázku č. 2. [6] [7]

Ultrazvukové svařování plastů může značně zjednodušit návrh dílů. Není potřeba velkých ploch nebo otvorů a je možné vytvořit hermeticky uzavřená pouzdra. Tím že eliminujeme upevňovací prvky se snižuje počet dílů a také hmotnost, šetříme tím čas, peníze a prostor ve výrobních prostorách. Výhodou je také čistota této metody, jelikož eliminujeme použití lepidel, zamezí se problémům s jejich mícháním, skladováním a následnou aplikací. [6] [7]

Pro použití ultrazvukového svařování při montáži plastových dílů musí být tyto díly vhodně navrženy, to znamená že musíme zohlednit jak typ materiálů, tak design spoje. Ultrazvukové svařování plastů nejlépe funguje na termoplastických materiálech s amorfni strukturou. Mezi nejjednodušší plastické materiály k ultrazvukovému svařování patří polyfenylenoxid (PPO) a akrylonitril butadien styren (ABS). Naopak, polykrystalická struktura činí polyvinylchlorid (PVC), acetát celulosy (CA/B/P) a polyolefinové materiály obtížnými. Metoda ultrazvukového svařování plastů se používá pro svařování reaktoplastů

i termoplastů. Jako zástupce si zde jmenujeme polyethylen, polypropylen či polystyren. [6] [7]

Využití této metody pro plasty je velmi široké, využívá se hojně v automobilovém průmyslu, zdravotnickém či elektronickém průmyslu, ale také v potravinářském a obalovém průmyslu. Pro úspěšné ultrazvukové svařování je klíčový správný výběr materiálů a designu spojovaných dílů. [6] [8]



*Obr. 2: Rozdíl mezi ultrazvukovým svařování plastů a kovů [9]*

## 1.2 Ultrazvukové svařování kovů

S postupem času se tato metoda aplikovala na kovy, lze s ní svařovat téměř všechny kovy, mezi ty nejčastěji využívané patří ocel, měď, hliník, mosaz, či titan. Svařovat železné kovy může přinášet řadu nebezpečí vzhledem k jejich tvrdosti a hustotě materiálu, která nám ztěžuje přenos materiálu a vytvoření pevného spoje. Metoda je tedy vhodná pro měkčí neželezné kovy, avšak i tvrdší železné kovy lze za použití vhodné instrumentace a nastavení správných parametrů svařovat. Proces svařování kovů je stejný jako u plastů, tedy vlivem působení tlaku a vysokofrekvenčních vibrací generujeme teplo, to nám v místě styku ohřívá spojovaný materiál, dochází k místnímu měknutí materiálu a vytvoření pevného spoje. Zásadním rozdílem od ultrazvukového svařování plastů je směrové působení vibrací, v tomto případě aplikujeme vibrace ve směru rovnoběžném na styčné plochy spojovaných prvků. Kovy se nejčastěji touto metodou svařují v automobilovém či leteckém průmyslu, v elektronice či zdravotnických zařízeních. Vzhledem k tomu, že v této práci se zabýváme ultrazvukovým svařováním kovů, uvedeme si využití této metody v samostatné kapitole. [2] [5] [3]

## 2 Fyzikální princip a instrumentace ultrazvukového svařování

Fyzikální princip ultrazvukového svařování kovů byl zmíněn již výše, ale uvedeme si ho zde znovu. Technologie ultrazvukového svařování využívá dvě síly: statickou sílu, která je aplikována kolmo na rozhraní mezi svařovanými díly, a oscilační sílu generovanou oscilací sonotrody rovnoběžně s povrchem materiálu. Kombinovaný účinek statických a oscilačních sil způsobuje deformaci, která podporuje vznik pevného spoje. Díky působení tlaku, způsobeného statickou silou, a vibrací o frekvenci 20 kHz či vyšší (jedná se o frekvence ultrazvuku), způsobených oscilační silou vzniká tření, to způsobuje přeměnu vysokofrekvenčního chvění na tepelnou energii. Vlivem působení tepelné energie dochází k tání styčných ploch. Kombinací tepla a tlaku, kterým působíme na místo spoje, tak dochází ke vzniku pevného spoje. [1] [2] [3] [4] [10]

V této části diplomové práce si představíme instrumentaci pro správné fungování systému a procesu ultrazvukového svařování. Uvedeme si druhy systémů pro ultrazvukové svařování, představíme si také faktory, které mají vliv na výsledný spoj a uvedeme si základní postup svařovacího procesu.

### 2.1 Systém ultrazvukového svařování

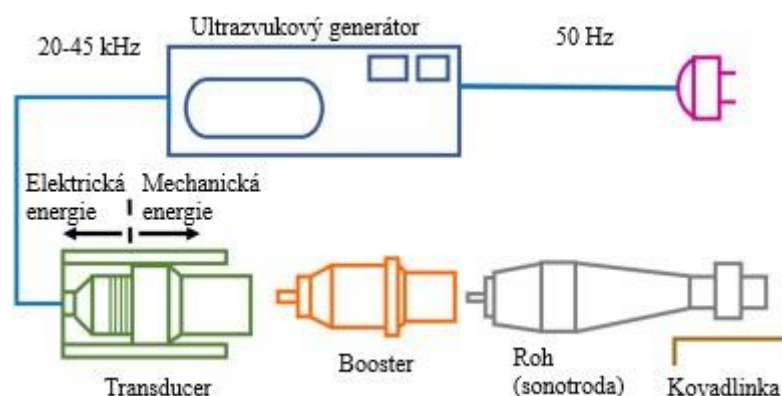
Standardní systém ultrazvukového svařování, který je znázorněn na obrázku č. 3, je sekvenční sestava skládající se z pěti klíčových prvků. Ultrazvukový generátor je základní součástí, která dodává excitační signál během celého procesu svařování. Transducer, nebo také převodník, pak přeměňuje tento signál na vibrace v pásmu ultrazvukových frekvencí, jež jsou nezbytné pro samotný proces. Amplituda těchto vibrací je následně zesílena pomocí zesilovače či boosteru a přenesena do sonotrody (rohu), která slouží jako koncový bod účinku. Systém je uspořádán v tomto předem stanoveném způsobu, aby se dosáhla požadovaná účinnost přenosu ultrazvukového výkonu. Efektivní přenos ultrazvukového výkonu v systému je velice důležitý a závisí na detailním návrhu všech jeho komponent. Když jsou tyto komponenty integrovány dohromady, generují a následně přenášejí ultrazvukové vibrace na požadované místo kovu během výrobního procesu. Během procesu dochází k plastické deformaci materiálu a vzniku třecího tepla vlivem smykových a třecích sil. Elektrická energie se tak přeměňuje na mechanickou energii, umožňující stabilní spojení svařovaných rozhraní. V ultrazvukové svářečce nalezneme ještě další podstatné součásti.

Kromě již zmíněných součástí ultrazvukového generátoru, transduceru, boosteru a sonotrody jsou přítomny ještě další dvě, bez kterých by celkový systém ultrazvukové svářečky nemohl fungovat. Jedná se o strojní lis, mechanický, pneumatický či hydraulický, který vyvíjí sílu, a tak poskytuje potřebný tlak na svařované materiály. Další součástí je kovadlinka, jedná se vlastně o spodní podpůrné uchycení, statická část, jejímž úkolem je pouze fixace svařovaných materiálů vstříc sonotrodě. Tyto dvě součásti si zde nebudeme rozebírat dopodrobna, nicméně je třeba si o nich říci, jelikož jde o neodmyslitelné členy systému. [4] [11] [12]

Mezi renomované značky ultrazvukového svařovacího vybavení patří například švýcarská značka Telsonic, německá firma Schunk, či značky Branson, Sonics, Dukane a Sonobond pocházející ze Spojených států amerických.

Návrh a výběr materiálů komponent ultrazvukového svařovacího systému závisí na zamýšlené oblasti využití. Podrobné znalosti každé součásti jsou zásadní pro robustní návrhy a dosažení požadovaných výsledků.

V této podkapitole si představíme přehled aktuálního stavu výzkumu jednotlivých částí systému, tj. ultrazvukového generátoru, převodníku, zesilovače a rohu (sonotrody).



**Obr. 3: Standardní sestava ultrazvukové svářečky kovů [11]**

## 2.1.1 Ultrazvukový generátor

První z pěti částí systému pro ultrazvukové svařování je tzv. ultrazvukový generátor, také nazývaný jako zdroj ultrazvukové energie, je zařízení, které generuje výkonový signál nezbytný pro provoz systému. Pro dosažení požadované amplitudy v rohu je nutné poskytnout transduceru vysoké napětí. To vyžaduje, aby ultrazvukový generátor transformoval vstupní napájecí signál o standardním napětí a frekvenci na elektrický signál s variabilní frekvencí a vysokým napětím. Když frekvence elektrického pole odpovídá rezonanční frekvenci transduceru, dosahuje transducer maximální účinnosti. Avšak rezonanční frekvence transduceru se může měnit v závislosti na provozních podmínkách, jako jsou teplota a tlak během svařování. Práce mimo rezonanci může výrazně snížit výkon transduceru, což ovlivňuje stabilitu svařování. Aby byla zajištěna kvalita svařování, je důležité, aby ultrazvukový generátor byl schopen přizpůsobit se změnám rezonanční frekvence transduceru. [4] [11] [12]

Ultrazvukový generátor je vlastně robustní schránka, která je napájena z běžné sítě 230 V o frekvenci 50 Hz a přeměňuje vstupní elektrický signál na výstupní elektrický signál o 800–1000 V a 20 kHz. Hlavní části ultrazvukového generátoru zahrnují řídicí jednotku, ochranné obvody a mikroprocesor. Všechny tyto části generátoru jsou umístěny v rozvaděči napájení, pokud jsou přítomny. Výkon generátoru závisí na oblasti aplikace a může se lišit od svařování plastů po kovy. Existují dva běžné typy ultrazvukových generátorů, konvenční a automatické. Konvenční typ vyžaduje ruční ladění jejich rozměrů pro dosažení vhodné rezonance, zatímco automatické ultrazvukové generátory mají vestavěný systém, který automaticky upravuje výstupní frekvenci tak, aby odpovídala přesné rezonanční frekvenci sonotrody. V dnešní době jsou ultrazvukové generátory s frekvencí 20 kHz běžnější při zpracování kovů a svařování než ty s frekvencí 40 kHz. Generátory jsou navrženy tak, aby pracovaly na pásmu specifické frekvence (19 kHz až 21 kHz) spíše než na jednom konkrétním pásmu (20 kHz). Jsou vyráběny digitální ultrazvukové generátory, které usnadňují digitální sledování posunu frekvence. Tyto posuny lze také zobrazit na obrazovce počítače, což umožňuje import dat o posunu frekvence v reálném čase během ultrazvukových aplikací. To zvyšuje vhodnost aplikací pro monitorování a kontrolu v reálném čase. Vestavěný systém pro změnu výkonu v automatických generátorech umožňuje uživatelům pracovat s různými rozsahy výkonů a amplitud. Amplituda získaná z převodníku s frekvencí 20 kHz je obvykle 12–20  $\mu\text{m}$ , což je dále zesíleno zesilovačem a rohem. Automatické generátory jsou také vybaveny inteligentními technologiemi, které



automaticky upravují drobné chyby vznikající v důsledku opotřebení a dalších nepravidelností, zajišťují minimalizaci ztrát energie. Výkon generátorů závisí na specifikacích převodníku. Automatické ultrazvukové generátory také disponují bezpečnostními prvky, jako je automatické vypnutí v případě nehody během poruchy nebo selhání rohu nebo nástroje. [4] [11] [12]

### **2.1.2 Transducer**

Ultrazvukový transducer, nebo také převodník, je řazen bezprostředně za ultrazvukový generátor a má v systému velmi důležitou roli přeměňuje totiž elektrickou energii z ultrazvukového generátoru na vysokofrekvenční mechanické vibrace a naopak. Přesněji vysokofrekvenční elektrický signál, který je tvořen v ultrazvukovém generátoru mění transducer na vysokofrekvenční mechanické vibrace. Transducery jsou navrženy tak, aby dosáhly vibrací buď v podélném nebo kompresním režimu. V průmyslových aplikacích se používají zejména dva hlavní typy transducerů, Piezoelectric Ultrasonic Transducer (PUT) a Giant Magnetostrictive Ultrasonic Transducer (GMUT). V této části si představíme jejich strukturu, použité materiály a metody návrhu obou typů transducerů, jako poslední si zanalyzujeme jejich výhody a nevýhody. PUT může mít problémy při vysokých teplotách, které mohou vést k depolarizaci, proto se zde shrnou možné příčiny tepelného generování. Naopak, u GMUT mohou být elektromechanická konverzní účinnost a přesnost řízení sníženy tepelnými ztrátami a únikem magnetického pole, což vyžaduje proaktivní přístup ke zkoumání možných řešení tohoto problému. Tyto dva hlavní typy si na následujících řádcích blíže představíme. [4] [11]

#### **2.1.2.1 PUT**

V současné době je nejpoužívanějším typem transduceru Piezoelectric Ultrasonic Transducer PUT, který je známý také jako kompozitní tyčový transducer nebo transducer typu Langevin (francouzský fyzik, který jej vytvořil). Jeho základní strukturu představuje předtažený šroub, zadní krycí deska, piezoelektrické listy, elektrodové listy a přední krycí deska. Když piezoelektrické listy obdrží sinusový excitační signál určité frekvence, dochází ke změně vnitřního stavu elektrod piezoelektrických materiálů, což způsobuje deformaci úměrnou intenzitě elektrického pole. Tato deformace pak pohání transducer k vibraci ve směru osy. Piezoelektrické listy jsou obvykle rovnoměrné a polarizační směry dvou sousedních listů jsou opačné. Aby se předešlo jejich prasknutí během deformace, aplikuje se

na ně předpětí pomocí předních a zadních krycích desek a předpět'ových šroubů, čímž jsou udržovány v komprimovaném stavu během vibrace. Důležitým faktorem pro správnou funkci transduceru je i volba materiálů pro piezoelektrické listy. Ty by měly mít vysokou dielektrickou konstantu, elektromechanický vazební koeficient a nízké dielektrické ztráty. Mezi běžně používané piezoelektrické materiály patří piezoelektrické krystaly (například křemenové krystaly), piezoelektrické polymery (například PVDF) a piezoelektrické keramiky (například keramiky z olova, zirkonia a titanu, PZT). Mezi těmito materiály je PZT nejrozšířenější, překonává ostatní vlastnostmi jako je podélná piezoelektrická konstanta, elektromechanický vazební koeficient a nízké dielektrické ztráty. [4] [11]

### **2.1.2.2 GMUT**

Pod pojmem magnetostrikce rozumíme změnu rozměru a tvaru tělesa magnetizovaného materiálu o magnetickém původu. Vzniká v důsledku interakce elektronových spinů atomů feromagnetika s vnějším magnetickým polem, to ve výsledku znamená že se rovnovážně mění vzdálenost atomů v krystalové mřížce. [13]

GMUT transducery jsou schopny poskytovat vibrace v širokém frekvenčním rozsahu (17–23 kHz pro generátor s frekvencí 20 kHz), což poskytuje vyšší flexibilitu při návrhu rohu a úpravách opotřebení. Navíc lze roh znovu použít po jeho přebroušení/nebo obrábění. Hlavním problémem GMUT transduceru jsou elektrické ztráty ve formě tepla, rostou tak dodatečné náklady a je nutno zabývat se i chladícím systémem. [4] [11]

GMUT je vyráběn z GMM, a jeho základní strukturu tvoří předtahovací šroub, zadní kryt, trvalý magnet, cívka, GMM a výstupní konec. Střídavé magnetické pole je generováno v ose transduceru a GMM generuje ultrazvukové vibrace pod vlivem tohoto pole, když je na excitační cívku aplikován ultrazvukový vysokofrekvenční proud. [11]

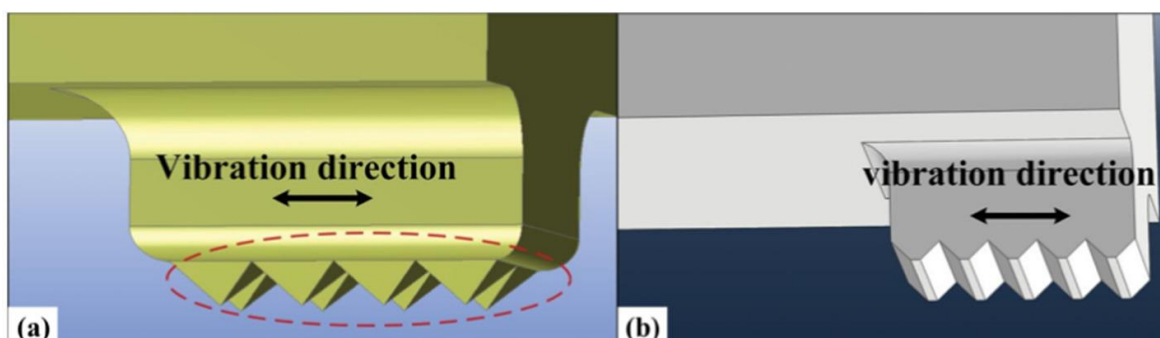
### **2.1.3 Booster**

V pořadí třetí součástí systému je tzv. Booster, taktéž známý jako zesilovač (amplifier) či koncentrátor (concentrator) je **volitelnou součástí** ultrazvukového systému, která se používá, když je zapotřebí nějaká změna amplitudy na konci rohu. Je umístěn mezi transducerem a sonotrodou. Zesilovač plní hned několik úloh, první z úloh vyplývá již z názvu, jedná se hlavní funkci zesilovače, tedy o zesílení amplitudy vibrací jdoucí z transduceru. Transducer má obvykle amplitudu vibrací v jednotkách až desítkách mikrometrů, booster má tedy za úkol tuto amplitudu výrazně zvýšit. Další možnou úlohou

je změna směru vibrací, to je možné díky jeho speciálnímu návržení, díky kterému může pracovat v různých režimech. [4] [11] [12]

#### 2.1.4 Roh (sonotroda).

Sonotroda či roh je část ultrazvukové svářečky, která je v přímém kontaktu se svařovanými objekty, konkrétně tedy se svrchní částí. Ultrazvukový roh, který je také známý jako držák nástroje, slouží k přenosu ultrazvukové vibrace transduceru na povrch vzorků, aby podpořil plastickou deformaci kovových materiálů a vytvořil tak metalurgický spoj. Vzhledem k zanedbatelné amplitudě na koncové ploše transduceru, přibližně 1-100  $\mu\text{m}$ , je roh integrován do svářecího systému tak, aby zvýšil amplitudu ultrazvukových vibrací. Hroty sonotrody by měly pohybovat se svařovaným kusem tak, aby vytvořila co nejvíce relativního pohybu a tím podpořila plastický tok materiálů na rozhraní svaru. Tím se zvětší efektivní oblast spoje a zvýší se pevnost svarového spoje. Současně by se mělo vyhnout ztenčení spoje, což snižuje efektivní plochu, tedy minimální tloušťku spoje. Jak tvar, tak i rozměrová variabilita rohu ovlivňují kvalitu svaru. Roh hranatého spoje je většinou používán pro svařování elektronických součástek a obvykle je navržen ve tvaru klínového úhlu. Většinou se pro povrch sonotrody využívá tvar pyramidální či zubatý. [4] [11] [12]



*Obr. 4: Pyramidální (a) a zubatý (b) tvar sonotrody. [11]*

Materiál rohu je vybrán na základě oblasti jeho konkrétního využití. Například hliník je ideální pro běžné nenáročné aplikace, zatímco ocel nebo titan jsou vhodné pro složité úkoly, kde je zapotřebí vysoký tlak. Materiál rohu by měl mít dobré akustické vlastnosti a vysokou odolnost proti únavě při vysoké oscilační amplitudě. Kromě toho by materiál rohu měl být odolný proti korozi, teple, opotřebení, mít dobré elastické a únavové vlastnosti a vysoké hodnoty tvrdosti a pevnosti. Některé běžně používané materiály rohu jsou titanová

slitina, nerezová ocel, polykrystalický diamant (PCD), hliník a Monel hliníková bronzu. [4]  
[12]

Ve výzkumu dle práce [10] bylo provedeno svařování pomocí pyramidálního a zubatého tvaru sonotrody. Jejich výsledky ukázaly, že pyramidový tvar svařovacího rohu umožňuje lepší plastický tok mezi materiály, tak že nebrání k jeho podélnému posuvu, to vede k účinnějšímu spojení. Moritz a kolektiv experimentálně dokázali, že plastické deformace vyvolané pyramidálními sonotrodami jsou přibližně dvojnásobné ve srovnání se zubatými sonotrodami. Tato zjištění naznačují, že v oblasti ultrazvukového bodového svařování je kvalita svařování s pyramidálním rohem vyšší než se zubatým rohem. Avšak roh pyramidálního tvaru může mít sklon k propíchnutí vzorků při svařování měkčích kovových materiálů, jako jsou slitiny hliníku. To může vést ke snížení efektivní plochy v radiálním řezu spoje nebo k problému svařování přilepeného k rohu. Pro svařování měkčích kovových materiálů byly navrženy válcové svařovací rohy, které nemají hroty. Tyto špičky efektivně předcházejí ztenčení průřezu spoje a zvyšují stabilitu a kvalitu svařování. [2] [4]

I přes to, že pyramidální roh je vhodný pro bodové svařování, není optimální pro drátové svařování. To je způsobeno tím, že kabely obsahují několik drátů dohromady, což může vést k nevyrovnané síle působící na kabely. Proto se pro drátové svařování častěji používá roh ve tvaru pilovitého hrotu. Vliv návrhu rohu na kvalitu ultrazvukového drátového svařování je stále předmětem dalšího zkoumání. [1] [2] [3]

### **Design sonotrody**

Existuje několik teorií návrhu sonotrody. Ale stále chybí jednotné porozumění tohoto návrhu. Primárně se při návrhu rohu používají dva přístupy: přístup tradiční a modelování pomocí metody konečných prvků. Tradiční přístup je založen na aplikaci diferenciálních rovnic, kde je vyvážen rovnováhou nekonečného prvku pod vlivem elastických a setrvačných sil. Délka sonotrody je funkcí jeho pracovní frekvence a nehraje žádnou roli při zesílení oscilace. Pracovní frekvenci lze upravit laděním rohu, což je důležitá část návrhu sonotrody k dosažení rezonance na jejím konci. [2] [4]

## 2.2 Faktory mající vliv na vznik spoje

Vlastnosti spojů, které vznikají ultrazvukovým svařováním, jako jsou mechanické vlastnosti, odolnost proti korozi, elektrická a tepelná vodivost či odolnost proti únavě, jsou ovlivňovány převážně nastavením parametrů svařovacího procesu. Mezi tyto parametry se řadí frekvence ultrazvukového svařování, výkon, amplituda, tlak, čas a energie. [1] [2]

### 2.2.1 Frekvence

Faktor frekvence v ultrazvukovém svařování kovů je charakteristický parametr, který ovlivňuje vlastnosti svařovaného spoje a proces svařování jako celek. Vyjadřuje frekvenci, s jakou se ultrazvukové vibrace přenášejí do materiálů, které se snažíme spojit. Vyšší faktor frekvence obvykle znamená jemnější vibrace, které mohou vést k lepšímu míchání a rovnoměrnějšímu rozložení tepla při svařování. To může vést k vyšší kvalitě spoje a snížení rizika vad. Volba vhodného faktoru frekvence závisí na konkrétních materiálech, tloušťce materiálů, geometrii spoje a požadovaných vlastnostech spoje. Optimalizace faktoru frekvence je důležitá pro dosažení požadovaných výsledků svařování. Různé kovy mohou vyžadovat odlišné faktory frekvence pro optimální svařování. Některé kovy mohou lépe reagovat na vyšší frekvence, zatímco jiné na nižší. Faktor frekvence je také ovlivněn konstrukcí ultrazvukových svařovacích nástrojů a použitými parametry svařování, jako je amplituda a tlaková síla. Často je potřeba provést experimentaci a nastavení různých faktorů frekvence v průběhu procesu svařování, aby se dosáhlo optimálních výsledků pro danou aplikaci. To může zahrnovat změny frekvence během procesu svařování podle specifických požadavků. [1] [2]

### 2.2.2 Výkon

V parametru výkonu v ultrazvukovém svařování kovů se měří množství elektrické energie, která se dodává do ultrazvukového generátoru. Tato energie se poté přeměňuje na mechanický výkon, který vytváří ultrazvukové vibrace nutné pro svařování kovů. Parametr výkonu má přímý vliv na proces svařování. Vyšší výkon znamená, že se dodává více energie do svařovaných materiálů, což může vést k rychlejšímu zahřátí a rychlejšímu svařování. Nižší výkon může vést k pomalejšímu procesu svařování. Správně nastavený výkon je klíčový pro dosažení kvalitního spoje. Příliš nízký výkon může vést k nedostatečnému zahřátí materiálů a slabému spojení, zatímco příliš vysoký výkon může vést k přehřátí a možným vadám spoje. Optimální hodnota výkonu závisí na konkrétní aplikaci, materiálu a tloušťce svařovaných materiálů. Experimentování s různými hodnotami výkonu je důležité

pro dosažení nejlepších výsledků svařování. Parametr výkonu je často nastavován v kombinaci s dalšími parametry svařování, jako je frekvence, amplituda, tlaková síla atd. Optimalizace těchto parametrů společně může vést k dosažení požadovaných výsledků svařování. Vyšší výkon obvykle znamená vyšší spotřebu energie. Proto je důležité najít rovnováhu mezi dostatečným výkonem pro efektivní svařování a minimalizací spotřeby energie. [1] [2]

### **2.2.3 Amplituda**

Amplituda označuje maximální výchylku materiálu ze své rovnovážné polohy v průběhu jednoho cyklu vibrace. V kontextu ultrazvukového svařování kovů se amplituda používá k vyjádření maximálního vychýlení sonotrody během svařovacího cyklu. Amplituda má přímý vliv na proces svařování. Vyšší amplituda znamená větší mechanický pohyb sonotrody, to většinou vede k lepšímu míchání materiálů a lepší penetraci do svařovaného kovu. Nižší amplituda může být vhodná pro jemnější práci, kde je potřeba menší mechanický tlak. Správně nastavená amplituda je klíčová pro dosažení kvalitního spoje. Příliš vysoká amplituda může vést k poškození materiálu nebo nerovnoměrnému svařování, zatímco příliš nízká amplituda může vést k nedostatečné penetraci nebo slabému spoji. Optimální hodnota amplitudy závisí na konkrétní aplikaci, materiálu a geometrii svařovaných dílů. Experimentování s různými hodnotami amplitudy je důležité pro dosažení požadovaných výsledků svařování. [1] [2]

### **2.2.4 Tlak**

V oblasti ultrazvukového svařování kovů odkazuje parametr tlaku na sílu, která je aplikována na svařované materiály během procesu svařování. Tlak zajišťuje přenos kmitů ze svařovacího hrotu (sonotrody) na svařované materiály a potřebné tření na rozrušení oxidických vrstev. Tento tlak je aplikován současně s ultrazvukovými vibracemi a má za cíl zajistit těsný kontakt mezi svařovanými povrchy, což umožňuje efektivnější spojení materiálů. Tlak má obrovský vliv na proces svařování. Správně nastavený tlak umožňuje lepší penetraci materiálů, rovnoměrné rozložení tepla a eliminaci vzduchových mezer mezi svařovanými povrchy. Tlak také pomáhá při udržování konzistence a stability procesu svařování. Příliš vysoký tlak může způsobit též deformaci materiálu. Naopak příliš nízký tlak může vést k nedostatečné penetraci nebo slabému spoji. Je velmi důležité si uvědomit, že příliš vysoký tlak může způsobit pokles amplitudy, zatímco nedostatečný tlak povede ke špatné kvalitě spoje. Optimální hodnota tlaku opět závisí na konkrétním případě, na

použitých materiálech, tloušťce svařovaných dílů a požadovaných vlastnostech spoje. Experimentování s různými hodnotami tlaku je zcela nezbytné pro dosažení požadovaných výsledků svařování. [1] [2]

### **2.2.5 Svařovací čas a energie**

Svařovací čas a energie jsou také důležitými faktory ovlivňujícími svařovací parametry, přičemž řízení času svařování je ekvivalentní řízení vstupní energie svařování. Avšak výstupní výkon svařování obvykle kolísá vzhledem k charakteristikám zatížení, a proto je udržování svařovací energie pro dosažení konzistentní kvality spoje příznivější.

Parametr svařovací čas v oblasti ultrazvukového svařování kovů se rovná době, po kterou jsou svařované materiály vystaveny ultrazvukovým vibracím a tlaku. Jedná se o časový interval, po který je aplikována energie na materiály a probíhá proces svařování. Má podstatný vliv na průběh a výsledky procesu svařování. Správně volený čas umožňuje dostatečnou penetraci materiálů, optimální distribuci tepla a vytvoření pevného a trvanlivého spoje. Pokud je svařovací čas příliš krátký čas může vést k nedostatečné penetraci a slabému spoji, ovšem pokud je svařovací čas příliš dlouhý může způsobit přehřátí materiálů nebo jeho deformaci, přesněji únavové porušení kovů. V závislosti na ostatních parametrech je třeba aby tyto časy byly co možná nejkratší. Jako vždy optimální hodnota času závisí na konkrétních materiálech, tloušťce svařovaných dílů, použité technologii a požadovaných vlastnostech spoje. [1] [2]

### **2.3 Postup svařovacího procesu**

Pro zajímavost si zde uvedeme postup běžného procesu ultrazvukového svařování. Jako cíl si zde dáme pouze jednoduché spojení překryvem dvou měděných vodičů metodou ultrazvukového svařování kovů. Pro postup jsme se inspirovali ze zdroje [14].

**Příprava:** Příprava stroje na umístění a upnutí obrobku. Nastavení parametrů (rozměrů) obrobku.

**Krok 1:** Nutno zkontrolovat správnost elektrických a pneumatických spojů.

**Krok 2:** Upevnění upínače a jeho nastavení tak, aby byl ve správné pozici pro upnutí obrobku. Nutno ujistit se, že je boční plocha rohu kolmá na povrch základny. Upravte upínač na požadovanou šířku obrobku.

**Krok 3:** Nastavení parametrů stroje, frekvence, doby svařování a tlaku.



**Krok 4:** Kontrola a případný zdvih sonotrody, aby byl správný pro svařování.

**Krok 5:** Umístění a upevnění dvou kovových pásů v upínacím zařízení.

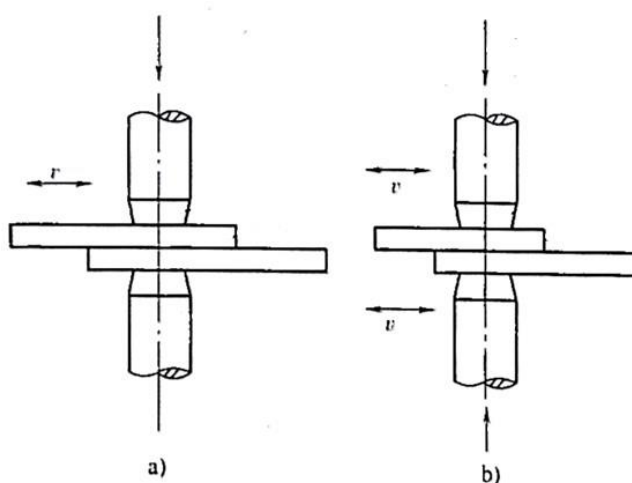
**Krok 6:** Spuštění svařování. Sonotroda klesne dolů, upne horní obrobek na spodní fixní obrobek, provede svařování a vrátí se do výchozí pozice. Tyto operace probíhají podle předem nastavených parametrů.

## 2.4 Druhy ultrazvukového svařování

Existuje několik druhů systémů pro ultrazvukové svařování, ty nejznámější si v této části uvedeme a vysvětlíme. Patří mezi ně bodové, kruhové, švové a liniové svařování. [15] [16] Pro představu si uvedeme alespoň polopateř informace k těmto druhům.

### 2.4.1 Bodové svařování

Bodové svařování neboli spot welding je v současnosti pravděpodobně nejrozšířenější systém ultrazvukového svařování. Během svařování je obrobek svařován pod tlakem z horní a spodní části. Při sériové výrobě, pak může nástroj snadno přecházet mezi jednotlivými místy, kde je požadováno svařování a dokončovat jeden svářecí bod za druhým. Podle způsobu přenosu energie můžeme tento druh svařování rozdělit na jednostranný a oboustranný systém. Jednostranné bodové svařování se vyznačuje tím, že k pohybu dochází pouze na jedné straně, kdyžto u oboustranného bodového svařování se rozpohybuje horní i spodní část svařovaného materiálu. Nejčastěji se však používá právě jednostranného bodového svařování. [15] [16]



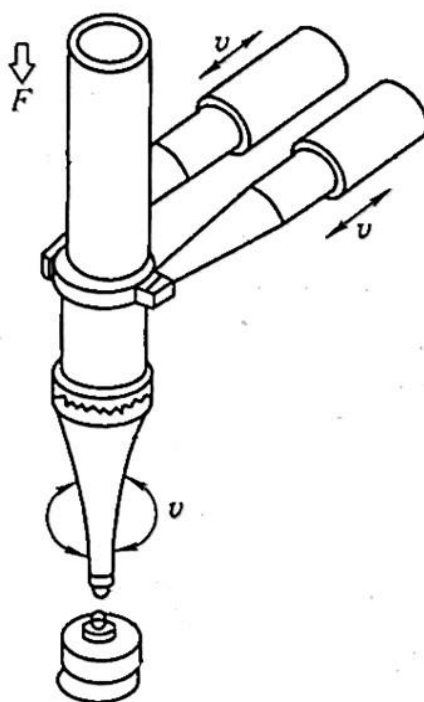
**Obr. 5: Bodové svařování a) jednostranné, b) oboustranné [15]**



Nepojmenované šipky, které na obrázku vidíme v kolmém směru na svařované vzorky značí směr působení přitlačné síly a šipky s označením  $v$  značí směr působení vibrací.

### 2.4.2 Kruhové svařování

Kruhové svařování neboli ring welding je druh svařovacího systému, kde přenos energie využívá torzní vibrační systém. Typ svaru bývá obecně kruhový, může však být také čtvercový, obdélníkový či eliptický. Používá se zejména pro jednorázové vytvoření těsných svarů. [15] [16]

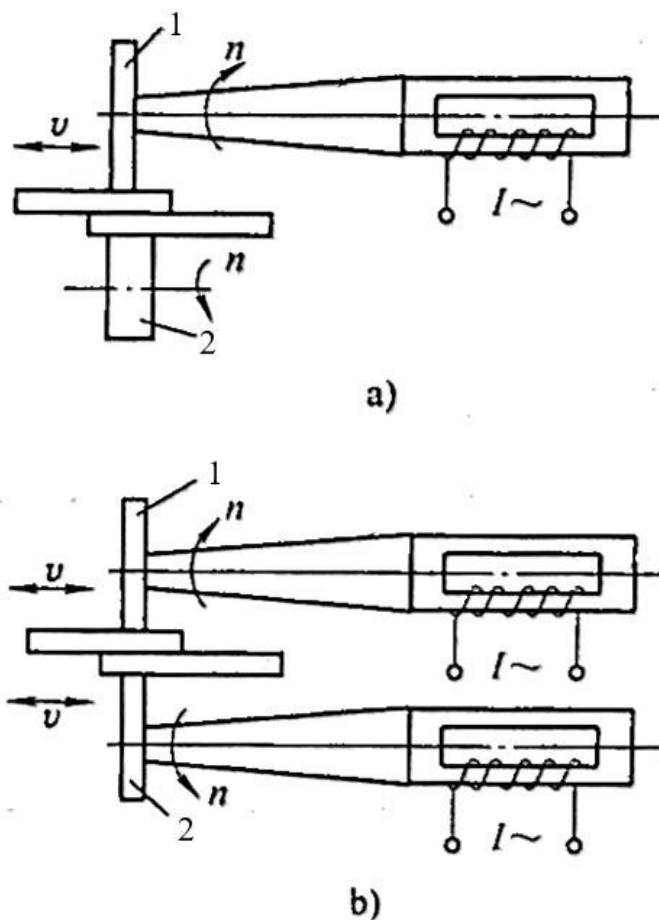


*Obr. 6: Kruhové svařování [15]*

Velká šipka s označením  $F$  značí směr působení přitlačné síly. Šipky označené písmenem  $v$  ukazují směr působení vibrací.

### 2.4.3 Švové svařování

Švové svařování neboli seam welding je druh ultrazvukového svařovacího systému, kdy jsou svařované předměty sevřeny mezi horní a dolní svařovací kotouče a jsou průběžně svařovány tak, aby se tyto dva předměty překrývaly, a tak i jejich svarové body. Takto vzniká souvislý šev, podle kterého se tento druh svařování nazývá. [15] [16]

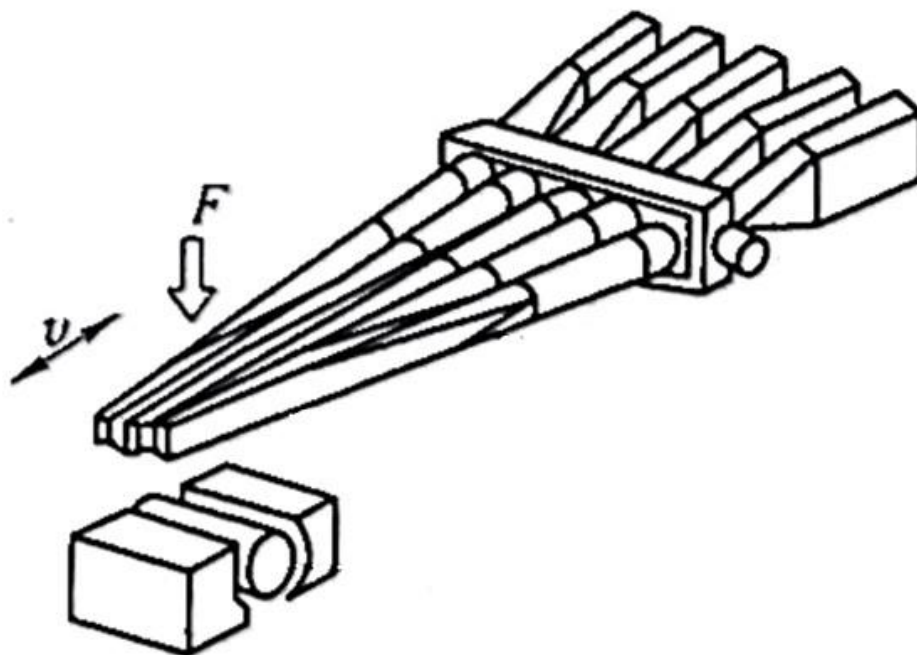


Obr. 7: Švové svařování a) jednostranné b) oboustranné [15]

Číslo 1 a 2 značí kruhovou hlavu svařovacího zařízení (b) a na obrázku a značí číslo 2 pouze pasivní podporu, která se posouvá (otáčí) společně s aktivní hlavou. Písmenem  $I$  je značen budící vysokofrekvenční ultrazvukový proud. Šipky označené písmenem  $n$  značí směr otáčení a šipky s označením  $v$  značí směr působení vibrací.

#### 2.4.4 Liniové svařování

Liniové svařování neboli line welding využívá pro svoji funkci několik sonotrod seřazených vedle sebe tak, aby vytvořily linii (rovný šev) a to během jednoho svařovacího cyklu. Jedná se o modifikaci vylepšující již výše zmíněné bodové svařování. [15] [16]



*Obr. 8: Liniové svařování [15]*

Velká šipka značená písmenem  $F$  symbolizuje přítlačnou sílu (Přesněji její směr) a šipky označené písmenem  $v$  značí směr působení vibrací.

## 2.5 Materiály vhodné pro ultrazvukové svařování

Jak již bylo zmíněno ultrazvukové svařování se používá pro svařování různorodých materiálů, nejžádanější je však svařování kovových a plastových materiálů. Dále se může jednat také o různá skla a keramiku. Okrajově si zde uvedeme, jaké plastové materiály lze touto metodou svařovat a podrobněji se podíváme na materiály kovové.

### 2.5.1 Plastové materiály

U této skupiny se jedná především o spojování termoplastů. Ultrazvukové svařování dvou termoplastických dílů je možné pouze tehdy, pokud jsou chemicky kompatibilní. Pokud díly nejsou chemicky kompatibilní, materiály se sice roztaví, ale nebude mezi nimi potřebná molekulární vazba. Příklad, jak se to nemá dělat je volba materiálů polyethylen a polypropylen, jsou to polokrystalické materiály, a mnoho jejich fyzikálních vlastností je stejných. Nejsou však chemicky kompatibilní, a tak je nemůžeme svařovat dohromady.

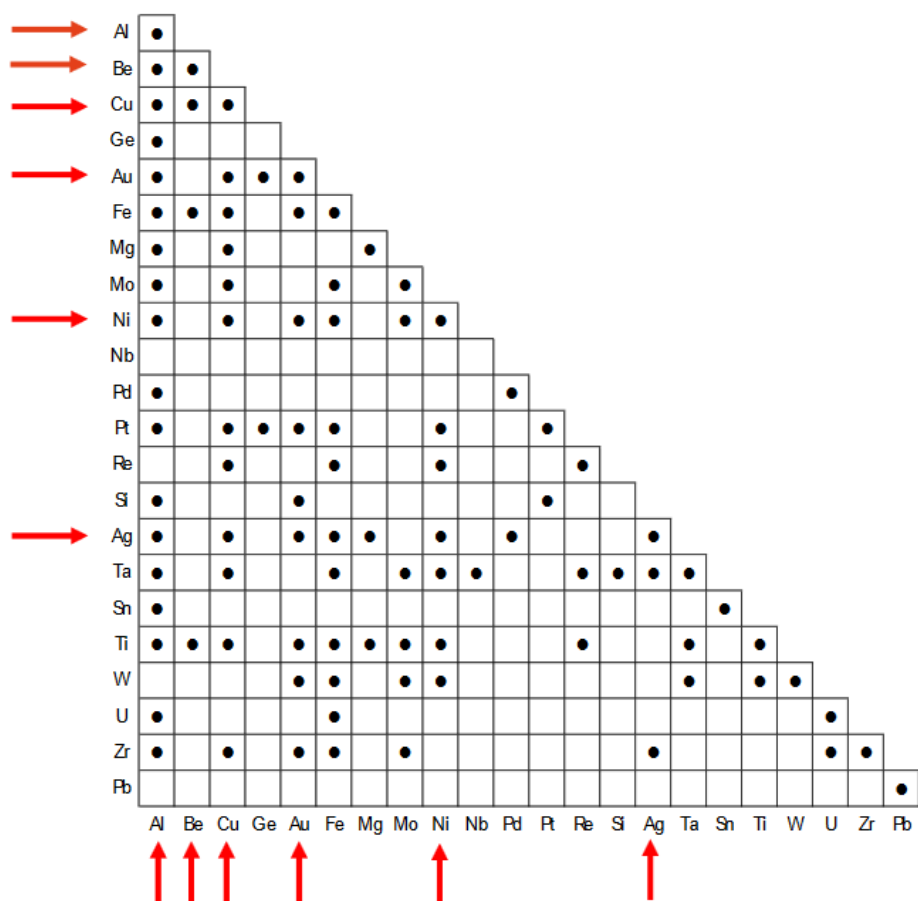
Různé termoplasty mohou být kompatibilní pouze tehdy, pokud je rozdíl jejich teplot tání do  $6\text{ }^{\circ}\text{C}$  a oba mají podobné molekulární struktury. Když jsou dva termoplasty chemicky

kompatibilní pro svařování, ovlivňují svařování ultrazvukem další faktory, jako jsou hygroskopické materiály (které absorbují vlhkost z atmosféry), odmazávací prostředky, maziva atd. Množství upínacího tlaku a intenzita vibrační energie svařovacího stroje ultrazvukem rozhodují o kovu a tloušťce kovu, který lze svařovat. [14]

### **2.5.2 Kovové materiály**

Metodou ultrazvukového svařování lze svařovat kovové materiály o malých tloušťkách, které jsou duktilní a mají nízkou tvrdost, lze svařovat ultrazvukem. Upřednostňované kovové materiály pro ultrazvukové svařování jsou hliník a měď. Kapacita ultrazvukového svařovacího systému určuje kov, který lze svařovat. Proces je omezen na tenké kovové plechy s nízkou tvrdostí, protože vysokoenergetické ultrazvukové svařovací systémy nejsou k dispozici. [14] [17]

Mnoho kovů lze spojit ultrazvukovým svařováním. Možné kombinace materiálů jsou uvedeny na následujícím obrázku (Obr. 9). Materiály nesmí být příliš tlusté a ultrazvukové svařování je nejvhodnější pro měkké kovy, jako jsou neželezné materiály a jejich slitiny, nebo materiály pokryté mědí, zlatem, stříbrem nebo niklem. [14] [17]



*Obr. 9: Vhodné materiály pro metodu ultrazvukového svařování. Červené šipky značí dobře svařitelné materiály, běžně používané kovové kombinace ve výrobních podmínkách. Černé tečky pak značí že schopnost svařování je třeba ověřit svařovací zkouškou. [17]*

## 2.6 Aplikace ultrazvukového svařování kovů

Ultrazvukové svařování kovů je dnes velmi významné v automobilovém průmyslu, kde se využívá pro spojování různých kovových součástí. Například v plechových karosériích se používá pro svařování různých panelů a dílů karoserie dohromady. Tato metoda umožňuje vytvářet pevné a odolné spoje, které jsou odolné vůči vibracím a mechanickému namáhání, což je zásadní vlastnost pro automobilový průmysl. Díky ultrazvukovému svařování je možné dosahovat vysoké rychlosti výroby a zároveň udržovat vysokou kvalitu spojů, což přispívá k efektivitě a konkurenceschopnosti v automobilovém průmyslu. Využitím metody ultrazvukového svařování kovů v automotive sektoru se budeme zabývat ještě v jedné samostatné části. [2] [3] [18] [19]

Dále se ultrazvukové svařování využívá hojně v elektronice, kde se uplatňuje u spojování kovových součástí v elektronických zařízeních. To zahrnuje spojování vodičů, konektorů, spojů a dalších komponent. Tato technologie nám umožňuje dosahovat vysoké přesnosti a spolehlivosti spojů, což je zásadní pro správnou funkci elektronických zařízení. Díky ultrazvukovému svařování lze dosahovat malých rozměrů spojů a minimalizovat tepelné deformace, což je důležité pro zachování integrity citlivých elektronických komponent. [2] [3] [18] [19]

V medicínském průmyslu se ultrazvukové svařování kovů využívá pro výrobu různých lékařských zařízení a implantátů. Tato technologie umožňuje spojování kovových komponentů s vysokou přesností a sterilizací, což je klíčové pro zajištění bezpečnosti a spolehlivosti medicínských zařízení. Ultrazvukové svařování je také vhodné pro výrobu chirurgických nástrojů, kde je nezbytné dosahovat vysoké kvality spojů a minimalizovat riziko kontaminace. [2] [3] [18] [19]

V letectví a kosmonautice se ultrazvukové svařování kovů využívá pro spojování kovových součástí letadel, raket a dalších vesmírných prostředků. Tato technologie umožňuje dosahovat pevných a odolných spojů, které jsou schopné odolávat extrémním podmínkám letu a kosmického prostředí. Díky ultrazvukovému svařování je možné vyrábět lehké a pevné konstrukce, to je klíčové pro dosahování vysoké výkonnosti a efektivity v letectví a kosmonautice. [2] [3] [18] [19]

V energetickém průmyslu se ultrazvukové svařování kovů využívá pro výrobu různých zařízení využívaných pro obnovitelné zdroje energie, jako jsou baterie, solární panely a větrné turbíny. Tato technologie umožňuje dosahovat spolehlivých a odolných spojů, které jsou schopné odolávat nárokům na výkon a provoz v energetickém průmyslu. Díky ultrazvukovému svařování je možné vyrábět efektivní a spolehlivé zařízení pro využití obnovitelných zdrojů energie, což přispívá k udržitelnému rozvoji energetiky. [2] [3]

V obalovém průmyslu se ultrazvukové svařování kovů využívá pro výrobu různých obalů z kovů, jako jsou plechovky, kryty, trubky a další obaly. Tato technologie umožňuje dosahovat pevných a těsných spojů, které jsou schopné odolávat manipulaci a skladování v průběhu distribuce a prodeje. Díky ultrazvukovému svařování je možné vyrábět odolné

a atraktivní obaly z kovů, což přispívá k ochraně produktů a zlepšení jejich prezentace na trhu. [2] [3] [18]

### **2.7 Výhody a nevýhody ultrazvukového svařování oproti tradičním metodám**

Ultrazvukové svařování kovů představuje moderní a efektivní metodu spojování kovů, jako každá metoda s sebou přináší mnohé výhody, ale také nevýhody, záleží na konkrétním způsobu užití. V této kapitole se zaměříme právě na zhodnocení výhod a nevýhod této perspektivní metody spojování materiálů. Tato kapitola poskytuje přehled toho, co ultrazvukové svařování kovů může a nemůže nabídnout v kontextu průmyslových aplikací.

#### **2.7.1 Výhody metody**

Ultrazvukové svařování kovů přináší řadu výhod, které je důležité vzít v úvahu při rozhodování o jeho použití. Mezi jednoznačné výhody patří **minimální deformace materiálu**, protože proces pracuje s nízkými teplotami, což minimalizuje deformace svařovaného a okolního materiálu. Umožňuje nám zachovat fyzikální a jiné vlastnosti svařovaných částí, také umožňuje zachování přesnosti a geometrických rozměrů, není tak potřeba dodatečného opracování. Toto je výrazný rozdíl oproti tradičním metodám svařování, které často vyžadují vysoké teploty a mohou způsobit značné tepelné deformace. Díky tomu je ultrazvukové svařování vhodné pro svařování tenkých plechů, kde je důležitá přesnost a zachování původního tvaru materiálu. Velmi důležité je to také v aplikacích, které mají vysoké nároky na přesnost, jako je výroba elektronických zařízení či lékařských přístrojů. Druhou výhodou je **rychlost a efektivita procesu**. Ultrazvukové svařování může být velmi rychlé, což zvyšuje produktivitu v průmyslových aplikacích a zkracuje výrobní cyklus. To je opět rozdíl oproti některým tradičním metodám, které mohou být časově náročné a také méně efektivní. Třetí výhodou je **schopnost vytvářet velice pevné svarové spoje**, které jsou odolné vůči mechanickému namáhání a otřesům, což zvyšuje celkovou trvanlivost konstrukcí. I když některé tradiční metody mohou také produkovat pevné spoje, ultrazvukové svařování je často považováno za jednu z nejspolehlivějších metod. Dokáže vytvářet spoje o velmi vysoké pevnosti. Podstatnou výhodou je také možnost **svařování malých, jemných a komplexních součástí s vysokou přesností a opakovatelností**. To umožňuje výrobu složitých konstrukcí s minimálními tolerancemi, což je zvláště důležité v precizních průmyslových odvětvích. Metoda ultrazvukového svařování kovů je velmi zajímavá také ekonomicky, jelikož umožňuje efektivní spojování kovových materiálů za použití omezeného množství tepla. To je zvláště užitečné pro obtížně svařitelné kovy nebo

pro svařování různorodých materiálů, kde jiné metody svařování mohou selhat. Proces ultrazvukového svařování je šetrný nejen ekonomicky, ale také ekologicky, protože neprodukuje žádné škodlivé emise jako svařovací kouř nebo plniče. Díky této vlastnosti je ultrazvukové svařování atraktivní zejména pro aplikace, kde je důležitá čistota pracovního prostředí a minimalizace ekologického dopadu. Mezi výhody můžeme započítat také možnost automatizace procesu, kdy pomocí strojového vybavení a vhodného softwaru dokážeme proces velice snadno vyrábět větší množství spojů za sebou. [3] [5] [12] [17] [20] [21] [22] [23]

### **2.7.2 Nevýhody a limitace metody**

I přestože ultrazvukové svařování kovů nabízí velké množství výhod, existují také určité nevýhody, které je třeba brát v úvahu. První nevýhodou je omezená tloušťka materiálu, protože tento proces není ideální pro velmi tlusté materiály, kde může být obtížné dosáhnout dostatečné penetrace a homogenity svaru. To může vést k nedostatečnému spojení a snížení pevnosti svarů. V některých případech tradiční metody, jako je například obloukové svařování, mohou být lépe přizpůsobeny svařování tlustších materiálů. Použitelná tloušťka je závislá na zvoleném materiálu. I přes tuto nevýhodu můžeme svařovat tenké materiály na materiály tlusté. Druhou nevýhodou jsou vysoké náklady na zařízení. Počáteční investice do ultrazvukového svařovacího zařízení může být vysoká, což může omezit dostupnost tohoto procesu pro menší podniky a start-upy. Ve srovnání s některými tradičními metodami svařování mohou být náklady na pořízení a údržbu vyšší, což může ovlivnit rozhodnutí o jeho použití. Další nevýhodou je omezená aplikovatelnost na některé materiály. I když je ultrazvukové svařování efektivní pro širokou škálu kovových materiálů, může být omezeno na určité typy materiálů, jako jsou slitiny s velmi vysokým bodem tání. Metoda ultrazvukového svařování kovů je vhodná pro měkké kovy, to může být omezující při výběru materiálů pro svařování. Omezená aplikovatelnost této metody může vyžadovat použití jiných metod svařování pro tyto specifické aplikace. Další nevýhodou je fakt, že i přesto že frekvence používané při ultrazvukovém svařování jsou nad hranici lidského vnímání, může docházet k náhodným subharmonickým vibracím, které způsobují rušivý zvuk. Je proto nutná ochrana sluchu, zejména při svařování v rozmezí 15 až 20 kHz, kde může docházet k vysokofrekvenčnímu šumu. Nevýhodou je také potřeba zkušené obsluhy. Proces ultrazvukového svařování vyžaduje zkušené operátory, kteří jsou schopni správně nastavit a ovládat svařovací zařízení, aby dosáhli optimálních výsledků. Nedostatek zkušeností obsluhy může vést také k nedostatečným výsledkům svařování a zvýšení rizika vzniku vad



ve svaru. U některých tradičních metod svařování, jako je například obloukové svařování, nemusí být obsluha takto zkušená. Mezi nevýhody, nebo spíše limitace je tvar svaru, má typický vzhled s žebry, ty jsou způsobeny třením a lisováním v průběhu procesu svařování. Tento jev je důsledkem vibrací a tlaku, které jsou aplikovány během svařovacího procesu, a je důležité ho brát v úvahu při posuzování vzhledu a kvality svaru. Mezi limitace také zařadíme fakt, že ultrazvukové svařování je možné pouze pro tzv. překryté spoje, to může představovat omezení použití v některých aplikacích, ve kterých jsou požadovány jiné typy spojů. Při plánování je třeba vzít v úvahu tuto omezenou aplikovatelnost a zvolit vhodný typ spoje. [3] [5] [12] [17] [20] [21] [22] [23]

### 3 Metoda ultrazvukového svařování v automotive

V této diplomové práci se věnujeme zejména ultrazvukovému svařování v oblasti automobilového průmyslu, proto si zde tuto oblast popíšeme ještě detailněji. Na stránkách společnosti Herrmann Ultraschall metodu ultrazvukového svařování v oblasti automotive uvádějí takto: „Ultrazvukové svařování je dobře přizpůsobeno pro velké množství automobilových komponentů, kde jsou vyžadovány vysoké počty dílů a odpovídající pevnost. Mezi ně patří mnoho dílů vyrobených z termoplastických materiálů pro interiérové a exteriérové aplikace, a motorové prostory, ale také z neželezných kovů pro kabelové svazky a lithium-iontové baterie“ [24].

Jelikož jsou plasty jedním z nejpoužívanějších materiálů na světě, nevyhnuly se ani oblasti automotive. Výroba plastových interiérových součástí je jednou z hlavních oblastí využití ultrazvukového svařování. Nekonečné možnosti spojování plastů dělají ultrazvukovou technologii velmi vyhledávanou pro sestavování plastových dílů, Palubní desky, konzole, dveřní panely a další interiérové prvky se často vyrábějí pomocí ultrazvukového svařování, to umožňuje vytvářet pevné a odolné spoje bez narušení povrchu, což je velice žádané pro udržení vzhledu interiéru vozidla. Další důležitou aplikací je výroba světel a světlometů, kde je klíčové dosažení pevných spojů mezi různými plastovými částmi, což zajišťuje jejich spolehlivost a odolnost v průběhu životnosti vozidla. Kromě toho se ultrazvukové svařování využívá i při montáži plastových nárazníků, kde umožňuje vytvoření pevných spojů, které jsou odolné vůči mechanickému namáhání a extrémním povětrnostním podmínkám. Metoda ultrazvukového svařování umožňuje vytvářet pevné a těsné spoje, to umožňuje výrobu také palivových nádrží. Další důležitou aplikací je výroba filtrů a hadic, kde je ultrazvukové svařování využíváno opět k dosažení těsných spojů mezi různými plastovými částmi. Proces ultrazvukového svařování zajišťuje bezporuchový provoz těchto důležitých součástí automobilu, což přispívá k celkové spolehlivosti a výkonu vozidla. Tato technologie tak hraje klíčovou roli při výrobě a spojování různých plastových automobilových komponentů, zajišťuje jejich pevnost, spolehlivost a dlouhou životnost. [25] [26] [27]

Ultrazvukové svařování kovů se v automobilovém průmyslu využívá velice hojně, nejenom pro spojování karosářských dílů, ale také pro další důležité operace. Jedním z těchto využití je spojování elektrických a elektronických komponent, to je obzvlášť důležité

v dnešní době, kdy moderní automobily obsahují stále více elektroniky. Ultrazvukové svařování umožňuje vytvářet spolehlivé spoje mezi vodiči a konektory bez rizika tepelného poškození, což zajišťuje stabilitu a spolehlivost elektrických systémů. Dalším důležitým využitím je výroba baterií pro elektrická vozidla (EV). Vzhledem k stále narůstajícímu zájmu o elektrická vozidla je zcela zásadní spojovat jednotlivé články baterií spolehlivým způsobem, což umožňuje právě ultrazvukové svařování. Tato technika zajišťuje pevné spoje mezi elektrodami a separatorovými materiály (materiály oddělující elektrody, zamezují jejich přímému kontaktu), což je klíčové pro funkčnost baterií. Dále se ultrazvukové svařování využívá při výrobě senzorů a elektronických kontrolních jednotek (ECU). Spolehlivé spoje mezi sensorovými čipy a nosnými materiály jsou základem pro správné fungování senzorů, které měří různé parametry vozidel. Nakonec, tato technika se využívá i pro spojování plastových a kovových komponent, což je důležité při výrobě interiérových a exteriérových dílů vozidel. Spolehlivé a esteticky příjemné spoje bez použití přídavných materiálů jsou klíčové pro kvalitu a vzhled automobilů. Tyto aplikace ukazují, že ultrazvukové svařování kovů hraje v automobilovém průmyslu klíčovou roli při výrobě moderních vozidel s vysokou úrovní spolehlivosti, efektivity a výkonu. [25] [26] [27]



*Obr. 10: Využití ultrazvukového svařování při montáži EV [28]*

### 3.1 Výroba karoserií

Ultrazvukové svařování kovů je klíčovou technikou při výrobě karoserií vozidel. Tato metoda spojování kovů umožňuje vytvářet pevné a těsné spoje mezi různými kovovými plechy, což je základní požadavek pro konstrukci moderních vozidel. V současných karosériích se často kombinují různé materiály, jako jsou ocel, hliník a kompozitní materiály, aby se dosáhlo optimální kombinace pevnosti, lehkosti a odolnosti. Výroba karoserií moderních vozidel je velmi náročný proces, který vyžaduje optimální kombinaci různých materiálů pro dosažení požadovaných vlastností, lehkosti, odolnosti, a bezpečnosti. Často jdou požadované vlastnosti proti sobě a velmi složité najít kompromis. [29] [28]

Tradiční ocel se stále běžně používá pro svou pevnost, odolnost a relativně nízké náklady. Ultrazvukové svařování se často využívá k spojování ocelových plechů pro podlahové panely, boční panely a dveře. S rostoucí důrazem na snižování hmotnosti vozidel se však stále více uplatňují i materiály jako hliník a kompozitní materiály. Hliník nabízí vynikající vlastnosti, jako je nízká hmotnost a vysoká pevnost, a stává se stále populárnějším materiálem pro karosérie automobilů. Ultrazvukové svařování je důležitou technikou pro spojování hliníkových plechů, což umožňuje vytvářet pevné a lehké konstrukce, jako jsou kapoty, blatníky a dveře. Vedle kovů se v automobilovém průmyslu stále více uplatňují také

kompozitní materiály, jako jsou uhlíková vlákna a sklolamináty. Tyto materiály nabízejí vynikající pevnost a lehkost, což je ideální pro konstrukci částí karosérie, které musí být pevné, ale zároveň lehké. Ultrazvukové svařování může být využito i pro spojování těchto kompozitních materiálů s kovovými částmi karosérie, čímž se dosahuje optimální kombinace pevnosti, odolnosti a hmotnosti. [29] [28]

Celkově je ultrazvukové svařování klíčovou technologií pro výrobu karosérií automobilů, protože umožňuje spojování různých materiálů s vysokou pevností, přesností a efektivitou. Díky této technologii se automobilový průmysl může neustále vyvíjet a přinášet inovativní a lehké konstrukce, které splňují požadavky moderních trhů a standardů výkonnosti. [29] [28]

### 3.2 Baterie elektromobilů

V automobilovém průmyslu se ultrazvukové svařování kovů využívá v mnoha aplikacích souvisejících s elektrickými systémy vozidel, jednou z nich jsou baterie. Jednou z klíčových oblastí je výroba bateriových pouzder pro elektrická vozidla. Bateriová pouzdra jsou kritickými komponentami, které zajišťují bezpečné a spolehlivé uložení baterií, jež jsou hlavním zdrojem elektrické energie pro pohon vozidla. Proces výroby bateriových pouzder zahrnuje spojování kovových částí, často hliníkových nebo ocelových plechů, aby se vytvořily pevné a těsné struktury, které ochrání baterie a umožní jejich bezpečné umístění v vozidle. Ultrazvukové svařování přináší výhodu rychlosti, efektivitu a přesnosti při těchto spojovacích operacích. [28]

Během procesu ultrazvukového svařování jsou kovové části pouzder pečlivě umístěny a stlačeny dohromady. Poté je mezi nimi aplikována vibrace, která vytváří teplo a tlak, což způsobuje, že se kovové materiály spojí a vytvoří pevný a homogenní spoj. Tento proces je opakovaný až do dokončení spoje v celé délce nebo obvodu bateriového pouzdra. [28]

Kromě toho se ultrazvukové svařování využívá i při montáži dalších komponentů okolo baterií, jako jsou kontaktní desky, konektory a ochranné obaly. Tato technologie poskytuje efektivní a spolehlivou metodu pro spojování kovových součástí, což je klíčové pro výrobu kvalitních a výkonných bateriových systémů pro elektrická vozidla. [28]

### 3.3 Výroba kabelových svazků

Ultrazvukové svařování kovů se využívá i při výrobě kabelových svazků v automobilech. Tyto kabelové svazky slouží k přenosu elektrické energie a signálů mezi různými částmi vozidla, což zahrnuje propojení mezi senzory, ovládacími jednotkami, osvětlením a dalšími elektrickými komponenty. Použití ultrazvukového svařování umožňuje spojovat kovové dráty a konektory rychle a spolehlivě, což je klíčové pro správnou funkci elektrických systémů vozidla. [30] [31]

Během procesu výroby kabelových svazků jsou kovové dráty a konektory pečlivě umístěny a spojeny dohromady pomocí ultrazvukového svařování. Tento proces zajišťuje pevné a odolné spoje mezi jednotlivými dráty a konektory, což je nezbytné pro spolehlivý přenos elektrické energie a signálů v automobilu. Díky ultrazvukovému svařování se minimalizuje riziko chyb spojení a poruch v elektrických systémech, což přispívá k celkové spolehlivosti a bezpečnosti vozidla. [30] [31]

Kabelové svazky jsou důležitými součástmi moderních vozidel, a proto je klíčové, aby byly spoje mezi kovovými dráty a konektory provedeny co nejspolehlivěji a nejkvalitněji. Ultrazvukové svařování poskytuje účinnou a efektivní metodu pro dosažení těchto cílů, čímž přispívá k celkovému výkonu a spolehlivosti elektrických systémů v automobilech. [30] [31]

## 4 Optimalizace procesu

Optimalizace je z obecného hlediska určitý postup, který používáme pro dosažení nejlepšího možného výsledku. Zde se zabýváme optimalizací procesu ultrazvukového svařování a zaměříme se konkrétně na jednu metodu, která nám může s optimalizací pomoci: DoE.

### 4.1 Design of Experiments (DoE)

Design of Experiments (DoE) neboli v češtině návrh experimentů je speciální metodika, kterou označujeme speciální postup řešení určitých úloh pomocí vhodně navržených a vyhodnocených experimentů. Tento nástroj je důležitý zejména pro optimalizaci procesů, či návrh nových výrobků. V dnešní době se čím dál více používá v průmyslu elektroniky. [32]

#### 4.1.1 Historie metody Design of Experiments (DoE)

Historie této metodiky sahá až do počátků 20. století a za jejího autora je považován Sir R.A. Fisher, který využíval progresivních statistických postupů k zjišťování faktorů působících na růst obilí. Do oblasti průmyslu se tato metoda dostala až v padesátých letech, používala se převážně v chemickém průmyslu. Později se metoda využívala k řízení a zlepšování kvality v dalších odvětvích a dnes je metoda DoE hojně využívána v průmyslu a rozšířila se také do ekonomických sektorů či managementu. [32]

<https://online.stat.psu.edu/stat503/lesson/1/1.1>

#### 4.1.2 Popis design of experiments (DoE)

Design of Experiments (DoE) je velice účinná systematická metoda plánování, realizace a analýzy experimentů s cílem získat spolehlivé a relevantní informace o vlivu různých faktorů na zkoumaný systém, proces, či produkt. Hlavním cílem této systematické metody je optimalizovat výsledky experimentu, díky efektivnímu rozdělení experimentálních podmínek, a minimalizovat vliv náhodných chyb. Nejčastěji se využívá pro nalezení všech příčin problémů a k určení jejich celkové váhy, tedy k určení četnosti jejich výskytu. Dovoluje nám také přesně manipulovat s definovanými faktory a následně analyzovat odezvu produktu. Metoda má velké zastoupení v široké škále odvětví, nevyjímaje průmyslové inženýrství či výrobu, a lze ji využít jak u návrhů, tak u fungujících procesů, pro dosažení jejich zlepšení. Díky tomuto naplánovanému a správně vykonanému

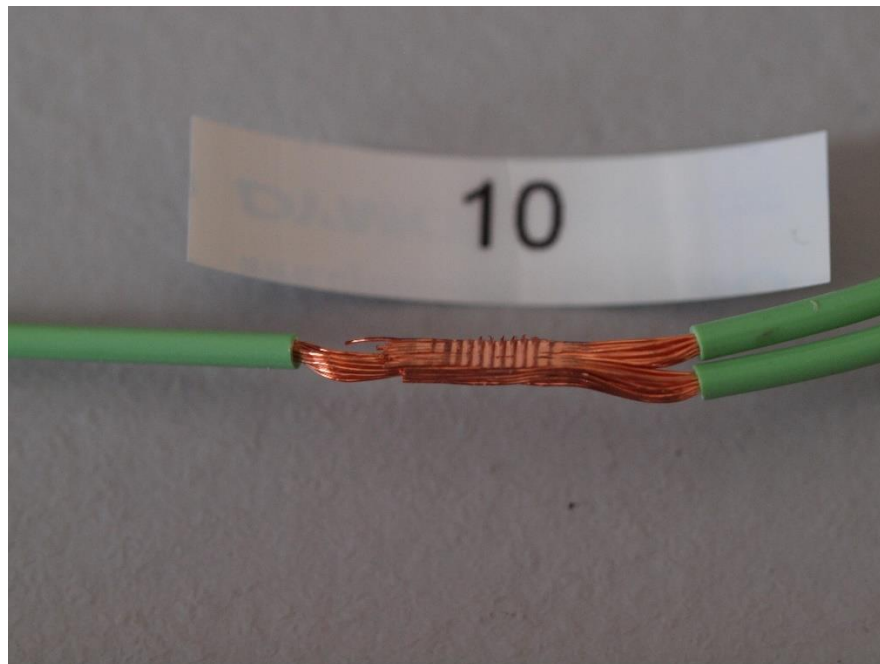
experimentu můžeme získat velké množství potřebných informací o reakci výsledného stavu na jednotlivé faktory. [32] [33]



## 5 Experiment

### 5.1 Postup experimentu

Pro praktickou část této diplomové práce byla zvolena optimalizace procesu ultrazvukového svařování. K optimalizaci procesu jsme přistoupili tak, že jsme vytvořili Design of Experiments, pro který jsme zvolili významné faktory obecně používané v daném procesu svařování a ty jsme do něho následně společně s jejich úrovněmi zapracovali a probíhala podle nich výroba vzorků, které jsme potřebovali k testování. Výroba vzorků proběhla externě ve společnosti Schunk, následně byly tyto vzorky dovezeny na půdu fakulty elektrotechnické ZČU, kde byly testovány. Zaměřili jsme se zejména na pevnost v tahu výsledného svařeného spoje, dle normy VW 60307 se jedná o test odlupování (tzv. peeling force test). V experimentu jsme se snažili manipulací s faktory experimentu dosáhnout co nejvyšší pevnosti pro co nejvyšší stálost a spolehlivost ve výsledném oboru využití. Proto byla pevnost v tahu faktor, podle kterého jsme vyhodnocovali kvalitu svařovaného spoje. Trhání vzorků bylo uskutečněno formou odlupování, tedy tak že se vzorek upnul do trhacího zařízení dvěma vývody, nacházející se na shodné straně, jak je vidět na následujícím obrázku č. 10. Experiment byl proveden v souladu s normou koncernu Volkswagen VW 60307 (Electrical Connections – Ultrasonic Welding on Stranded Conductors).



*Obr. 11: Příklad dodaného testovaného kabelového spojení*

Na obrázcích můžeme vidět názornou ukázkou podoby kabelů. Na obrázku č. 11 je neroztržený kabelový spoj před tahovou zkouškou. Na obrázku 12 a 13 můžeme vidět tento spoj nafocený po tahové zkoušce odlupováním (peeling testu).

### **5.1.1 Určení rozsahu experimentu**

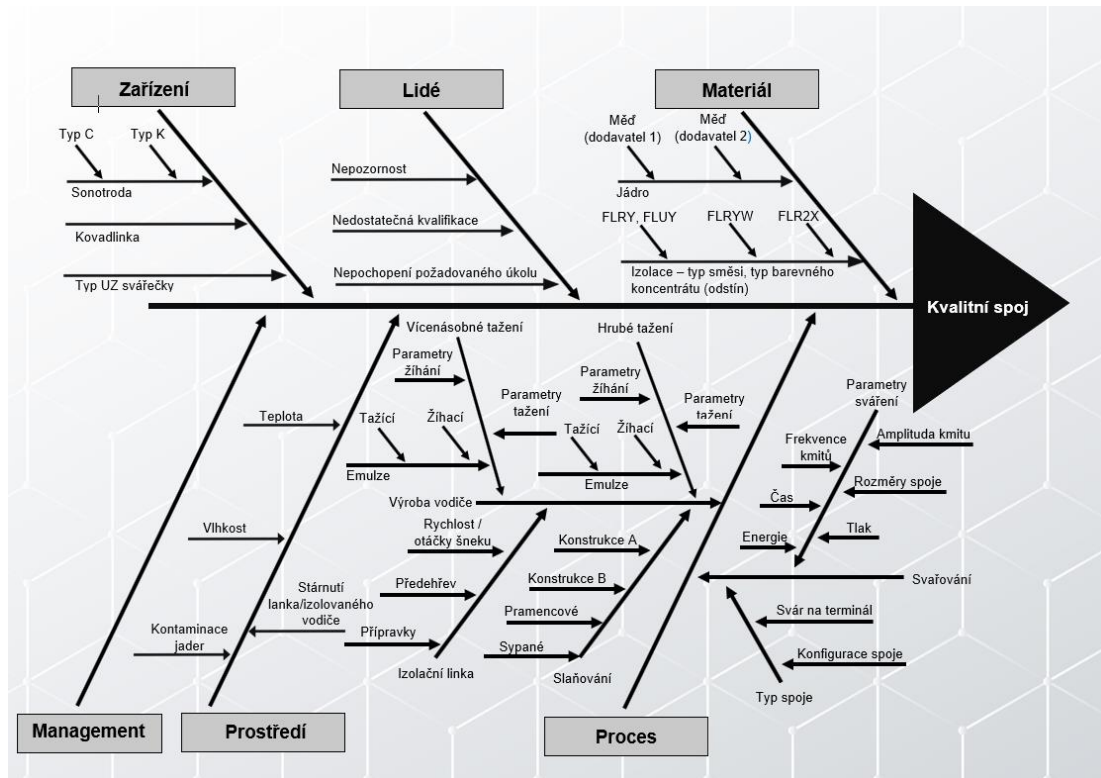
V prvopočátku jsme si museli určit rozsah experimentu, použili jsme na něj externě vyrobené ultrazvukem svařované spoje. Tyto vzorky byly vyrobeny na ultrazvukovém svařovacím stroji ALPHA 20 S výrobce Stapla. Pro získání informace o pevnosti spoje bylo použito zařízení pro tahové zkoušky Exceed 40 od výrobce MTS, do jehož softwaru byly nastaveny zkušební normy koncernu VW. Jednotlivé vzorky do něho byly postupně vkládány a výsledky následně vyhodnoceny.

### **5.1.2 Popis testovaných vzorků**

Jednalo se o měděné kabelové svazky, se třemi vyvedenými kabely, které se dnes běžně používají v automobilovém průmyslu. Jak již bylo zmíněno testování bylo prováděno v souladu s normou koncernu Volkswagen VW 60307 (Electrical Connections – Ultrasonic Welding on Stranded Conductors),

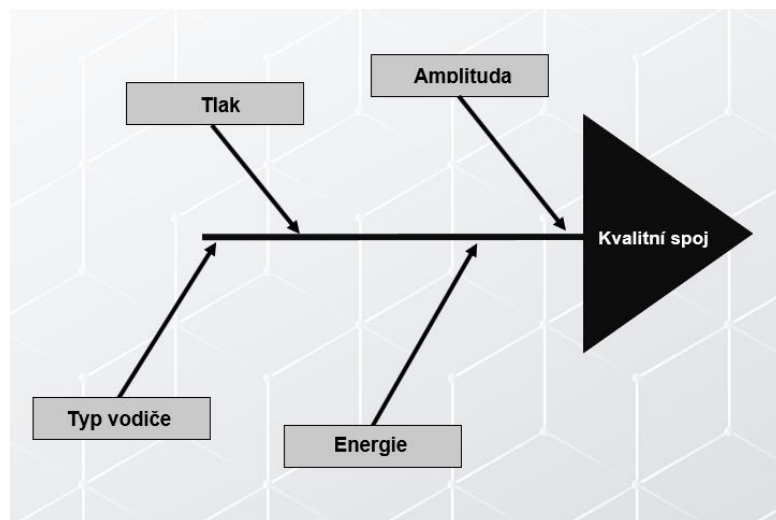
### **5.1.3 Určení faktorů experimentu**

Zpočátku jsme si sepsali všechny faktory mající vliv na výslednou pevnost spoje. Jsou zde zahrnuty faktory jako lidský faktor, zkušenosti obsluhy. Použité materiály, které jsou pro kvalitní spoj stěžejní. Údržba ultrazvukové svářečky. Tyto zmiňované parametry jsou vyobrazeny níže na obrázku č. 11, kde je vykreslen tzv. Ishikawův diagram. Zkoumaných faktorů v této práci je však o něco méně. My jsme se zaměřili na faktory, které se nastavují na ultrazvukovém svařovacím zařízení, ultrazvukové svářečce. Pro experiment jsme totiž potřebovali jasně dané a měřitelné parametry, u kterých můžeme nastavit přesnou hodnotu.



Obr. 12: Ishikawův diagram zobrazující všeobecné faktory mající vliv na kvalitu spoje

Náš test zkoumá faktory, které jsou snadno nastavitelné na svařovacím zařízení. V tomto testu jsou to tlak (působící na materiály v místě spoje), amplituda (výchylka sonotrody), energie a typ vodiče.



Obr. 13: Ishikawův diagram vztažený na naše sledované faktory

### 5.1.4 Faktory a úrovně

Celkový počet faktorů použitých v experimentu je 4. Úrovně faktorů pak byly zvoleny tak, abychom se experimentem dostali k významnosti každého faktoru, úrovně prvních tří faktorů jsme snížili o 10 % a poté naopak zvýšili o 10 % od hodnot nastavovaných ve výrobní praxi. Prvním faktorem je tlak, má dvě úrovně: 2,5 a 3,06, dalším faktorem je amplituda, ta má také dvě úrovně 60 a 80. Třetím faktorem je energie, opět obsahuje dvě úrovně 148 a 182. Posledním faktorem je vodič, zde máme již úrovně 4. U první dvojice vodičů se jedná o vodiče s označením FLRY-B 0,5 H, liší se pouze rozdílnou technologií výroby. Tato dvojice představuje také první dvě úrovně pro faktor „vodič“. V tabulce plánu zkoušek jsme je pro úsporu místa označili jako úroveň 1 a úroveň 2. U následujících dvou úrovní máme znovu dva stejné typy vodičů, které disponují pouze rozdílným typem izolace. První z této dvojice je vodič s označením Mecoline – FLR2X-B 0,5 H, pro úsporu místa jsme tuto úroveň v tabulce plánu zkoušek opět označili pouze číslem 3, jelikož se jedná o třetí úroveň faktoru „vodič“. Jako čtvrtou a poslední úroveň faktoru „vodič“ máme vodič s označením PEX-S – FLR2X-B 0,5 H. V tabulce plánu zkoušek je tato úroveň označena číslem 4.

**Tab. 1: Faktory a úrovně experimentu (DoE)**

	Faktory			
	Tlak - 2 úrovně	Amplituda - 2 úrovně	Energie - 2 úrovně	Vodič - 4 úrovně
Úrovně	2,5	60	148	FLRY-B 0,5 H (1)
				FLRY-B 0,5 H (2)
	3,06	80	182	Mecoline – FLR2X-B 0,5 H
				PEX-S – FLR2X-B 0,5 H

Pokud tyto faktory nejsou mezi sebou dobře nakombinovány, dochází k svaření méně kvalitních spojů s nižší pevností. Tyto spoje se vyznačují

### 5.1.5 Experimentální pole

Pro experiment byly použity tři faktory o dvou úrovních a jeden faktor o čtyřech úrovních. Zvolili jsme experimentální pole, ve kterém máme 32 různých kombinací vstupních faktorů, budeme ho tedy označovat jako L32, toto experimentální pole vidíme v tabulce č. 2. Obecný přehled o faktorech a úrovních můžeme najít v tabulce 1. Do prvního sloupce byl zvolen jako faktor „tlak“ (úrovně 2,5 a 3,06), do druhého „amplituda“ (úrovně 60 a 80), poté „energie“ (úrovně 148 a 182) a do posledního sloupce byl zvolen faktor „vodič“ (úrovně 1, 2, 3, 4). První úroveň faktoru „vodič“ je označena číslem jedna, pod touto úrovní se skrývá

vodič s označením FLRY-B 0,5 H. Úroveň s číslem 2, má vodič s označením FLRY-B 0,5 H, jedná se však o rozdílný proces výroby. Úroveň 3 je vodič s označením Mecoline – FLR2X-B 0,5 H a úroveň s číslem 4 je vodič označený jako PEXS-S – FLR2X-B 0,5 H.

*Tab. 2: Plán zkoušek v experimentálním poli L32*

Test	Faktory/úrovně			
	Tlak	Amplituda	Energie	Vodič
T1	2,5	60	148	1
T2	3,06	60	148	1
T3	2,5	80	148	1
T4	3,06	80	148	1
T5	2,5	60	182	1
T6	3,06	60	182	1
T7	2,5	80	182	1
T8	3,06	80	182	1
T9	2,5	60	148	2
T10	3,06	60	148	2
T11	2,5	80	148	2
T12	3,06	80	148	2
T13	2,5	60	182	2
T14	3,06	60	182	2
T15	2,5	80	182	2
T16	3,06	80	182	2
T17	2,5	60	148	3
T18	3,06	60	148	3
T19	2,5	80	148	3
T20	3,06	80	148	3
T21	2,5	60	182	3
T22	3,06	60	182	3
T23	2,5	80	182	3
T24	3,06	80	182	3
T25	2,5	60	148	4
T26	3,06	60	148	4
T27	2,5	80	148	4
T28	3,06	80	148	4
T29	2,5	60	182	4
T30	3,06	60	182	4
T31	2,5	80	182	4
T32	3,06	80	182	4

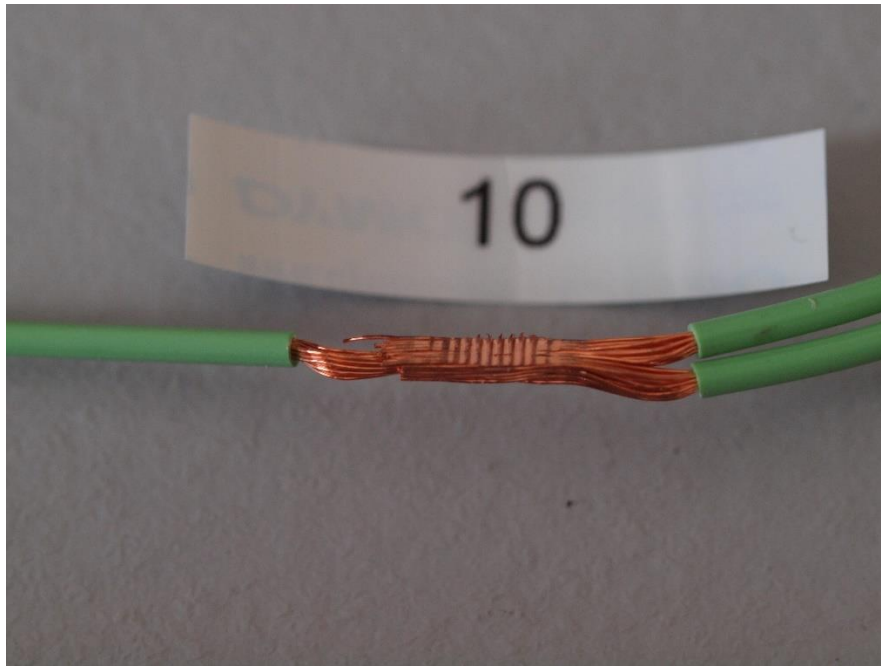
### 5.1.6 Provedení experimentu

Experiment týkající se manipulace se vstupními parametry nastavení svařovacího zařízení (našimi 4 parametry) byl proveden při výrobě přímo v podniku, na již zmíněném ultrazvukovém svařovacím stroji ALPHA 20 S výrobce Stapla. Následné získání informací z tahových zkoušek bylo provedeno v laboratorním prostředí fakulty elektrotechnické ZČU, na přístroji pro tahové zkoušky Exceed 40 výrobce MTS.

Vzniklo 8 sad vzorků kabelových ultrazvukem svařovaných měděných spojů, přičemž v každé sadě byly další 4 podskupiny, jedna podskupina obsahovala 25 vzorků. Při tahových zkouškách byly vzorky ručně vkládány do upevňovacích čelistí zařízení Exceed 40 od výrobce MTS a následně na tomto zařízení byly podrobeny tahové zkoušce. Z testování každého vzorku jsme jako výsledek získali průběh tahové zkoušky a další statistické a mechanické ukazatele, my jsme se však zaměřili zejména na maximální sílu v tahu v jednotkách N. Datové výsledky z tohoto testování byly exportovány ze softwaru MTS, výrobce přístroje pro tahové zkoušky, do tabulkového editoru MS Excel, kde byla získána další základní data o jednotlivých podskupinách. Jako poslední jsme data podrobili zpracování ve statistickém freeware softwaru Develve, kde bylo vytvořeno ideální prostředí pro DoE našeho experimentu.

Na následujících obrázcích můžeme vidět názornou ukázkou podoby kabelů. Na obrázku č. 16 je neroztržený kabelový spoj před tahovou zkouškou. Na obrázku 17 a 18 můžeme vidět tento spoj nafocený po tahové zkoušce odlupováním (peeling testu).

Je nutno také dodat, že vzorky vždy nepraskaly jen v místě spoje, v některých případech došlo k přetržení v samotném kabelu vedoucím do místa spoje.



*Obrázek 14: Testované kabelové spojení před tahovou zkouškou*

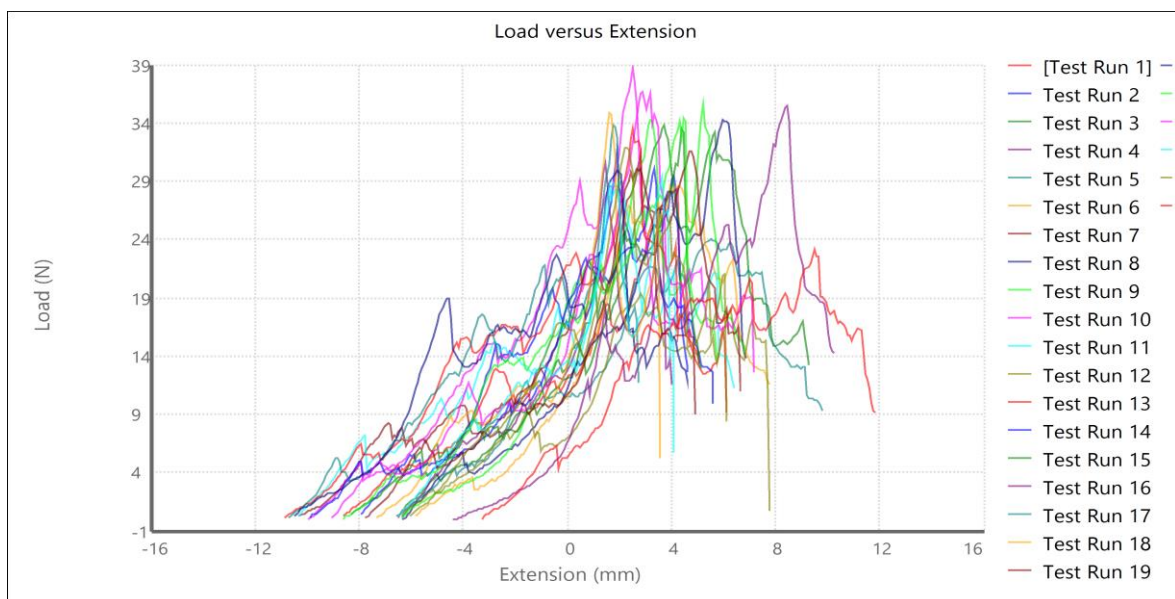


*Obrázek 15: Testované kabelové spojení po roztržení*



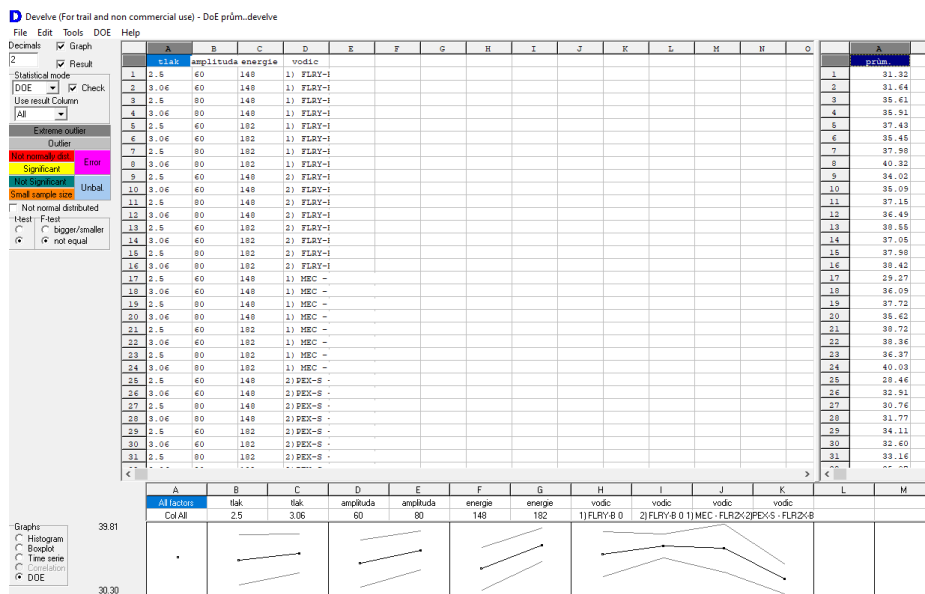


*Obr. 16: Testované kabelové spojení po roztržení*



*Obrázek 17: Tahové charakteristiky pro jednotlivé vzorky v testovacím prostředí MTS*





**Obr. 18: Prostředí programu Develve**

U každého vzorku jsme zjistili maximální sílu, kterou jsme museli vyvinout na jeho přetržení (tahovou pevnost) v jednotkách N, pro každou podskupinu jsme z 25 hodnot vypočítali průměrnou maximální sílu v tahu a také směrodatnou odchylku. S těmito odvozenými hodnotami jsme poté pracovali při vyhodnocování experimentu.

Tab. 3: Výsledky experimentu

Test	Faktory/úrovně				Výsledky
	Tlak	Amplituda	Energie	Vodič	Průměrná hodnota (N)
T1	2,5	60	148	1	31,32
T2	3,06	60	148	1	31,64
T3	2,5	80	148	1	35,61
T4	3,06	80	148	1	35,91
T5	2,5	60	182	1	37,43
T6	3,06	60	182	1	35,45
T7	2,5	80	182	1	37,98
T8	3,06	80	182	1	40,32
T9	2,5	60	148	2	34,02
T10	3,06	60	148	2	35,09
T11	2,5	80	148	2	37,15
T12	3,06	80	148	2	36,49
T13	2,5	60	182	2	38,55
T14	3,06	60	182	2	37,05
T15	2,5	80	182	2	37,98
T16	3,06	80	182	2	38,42
T17	2,5	60	148	3	29,27
T18	3,06	60	148	3	36,09
T19	2,5	80	148	3	37,72
T20	3,06	80	148	3	35,62
T21	2,5	60	182	3	38,72
T22	3,06	60	182	3	38,36
T23	2,5	80	182	3	36,37
T24	3,06	80	182	3	40,03
T25	2,5	60	148	4	28,46
T26	3,06	60	148	4	32,91
T27	2,5	80	148	4	30,76
T28	3,06	80	148	4	31,77
T29	2,5	60	182	4	34,11
T30	3,06	60	182	4	32,6
T31	2,5	80	182	4	33,16
T32	3,06	80	182	4	35,07

Výsledky experimentu jsme vložili do tabulky č. 3, vidíme zde průměrnou maximální hodnotu síly pro sadu testovanou při konkrétním nastavení. Z tabulky můžeme spatřit, že lepších hodnot maximální síly bylo dosaženo při vyšších úrovních amplitudy a energie. V následující části si ukážeme grafy DoE vytvořené v programu Develve, které nám znázorní významnost jednotlivých faktorů

### 5.1.7 Vyhodnocení výsledků a grafické znázornění

Z programu Develve, ve kterém jsme prováděli zpracovávali naměřená data z experimentu, jsme získali následující grafické vyjádření. Vidíme na něm jednotlivé faktory společně s jejich úrovněmi. Přímka, spojující jednotlivé úrovně, vyjadřuje vztah mezi nimi, čím většího sklonu nabývá, tím významnější je rozdíl výsledných hodnot měřených vzorků a vyjadřuje tudíž i významnost jednotlivých faktorů. U prvních tří faktorů, tlaku, amplitudy a energie, vidíme dva body, u posledního faktoru máme body čtyři, jejich počet závisí na počtu úrovní u každého z faktorů. Jeden bod vždy reprezentuje aritmetický průměr z průměrné hodnoty maximální síly v tahu, tyto body spojuje přímka, jejíž sklon (anglicky slope) potřebujeme znát pro určení významnosti každého faktoru.

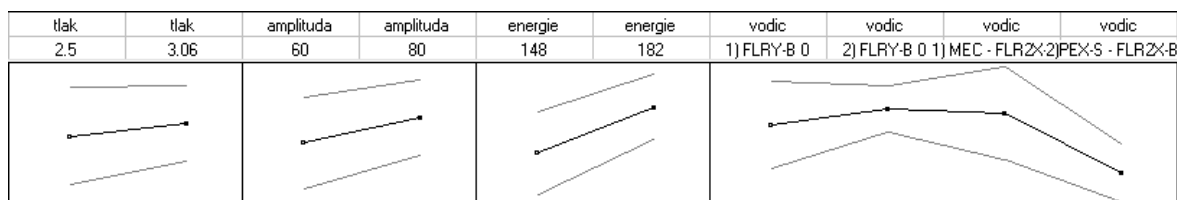
Z tabulky je vidět že nejlepších výsledků bylo dosaženo u testu číslo 8, kdy průměrná síla, která byla na vzorky vyvíjena pro přetržení, byla rovna 40,32 N. Podobně dopadl i test číslo 24, kdy bylo dosaženo síly 40,03 N.

Na následujícím obrázku vidíme grafy efektu úrovní pro jednotlivé faktory. Grafy v tomto formátu jsme dostali přímo ze softwaru Develve. Z důvodu nedostačující kvality tohoto zobrazení, jsme si grafy vylepšili, jak bude následně vidno.

Budeme zde pracovat se směrnicí přímky, tedy lineární funkce, jejíž obecná rovnice vypadá takto:

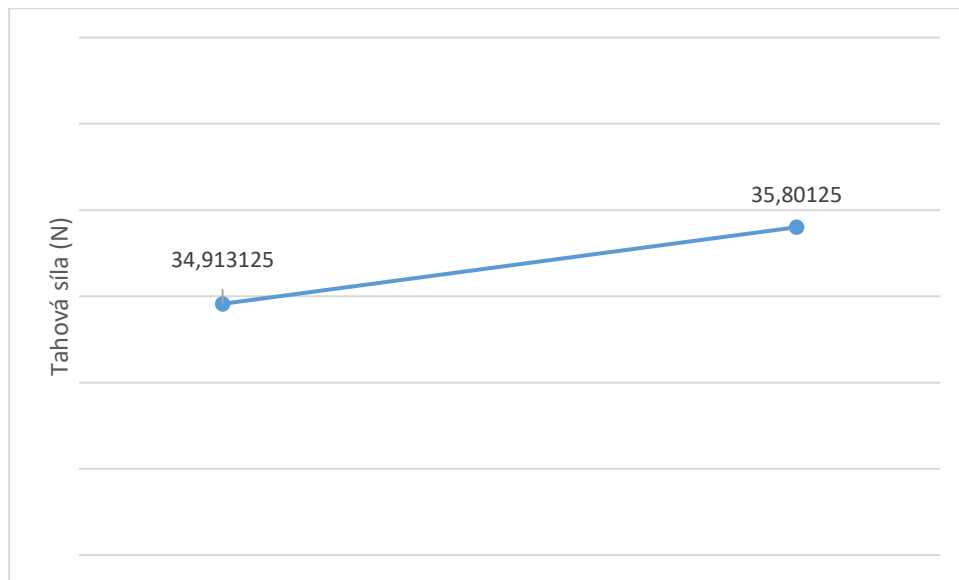
$$f(x) = kx + b \quad (1)$$

Kde koeficient  $k$  je již zmíněnou směrnicí, která určuje strmost funkce (přímky) a koeficient  $b$  je konstanta, která určuje posun v ose  $y$ .



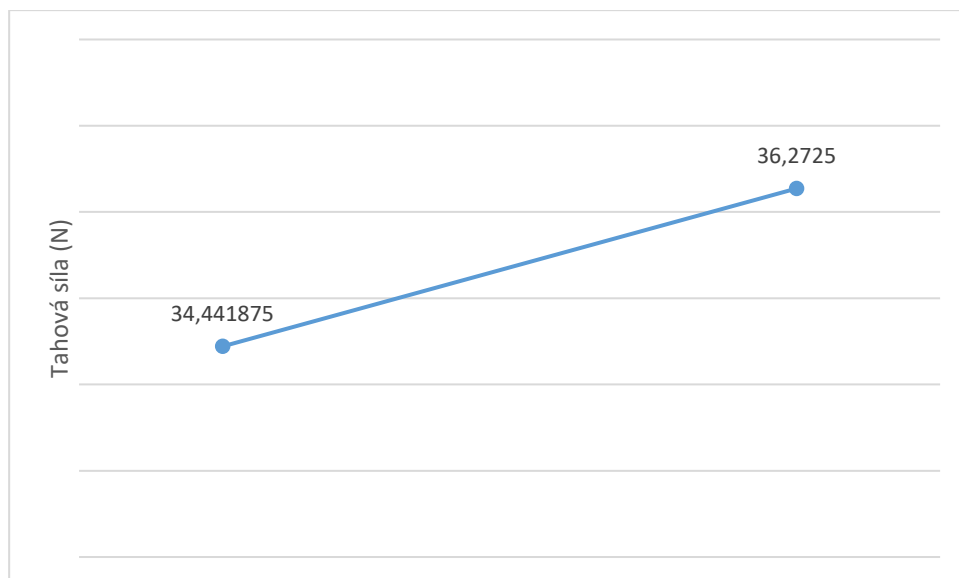
**Obrázek 19: Zobrazení vlivu všech faktorů a jejich úrovní na výslednou pevnost spoje (zobrazeno programem Develve)**

V tabulkovém editoru MS Excel jsme si vykreslili následující grafy efektu úrovní, první graf, který následuje po tomto odstavci, se věnuje faktoru „tlak“. První bod grafu představuje nižší úroveň tlaku tedy hodnotu 2,5. Druhý bod zase představuje úroveň vyšší, hodnotu 3,06.



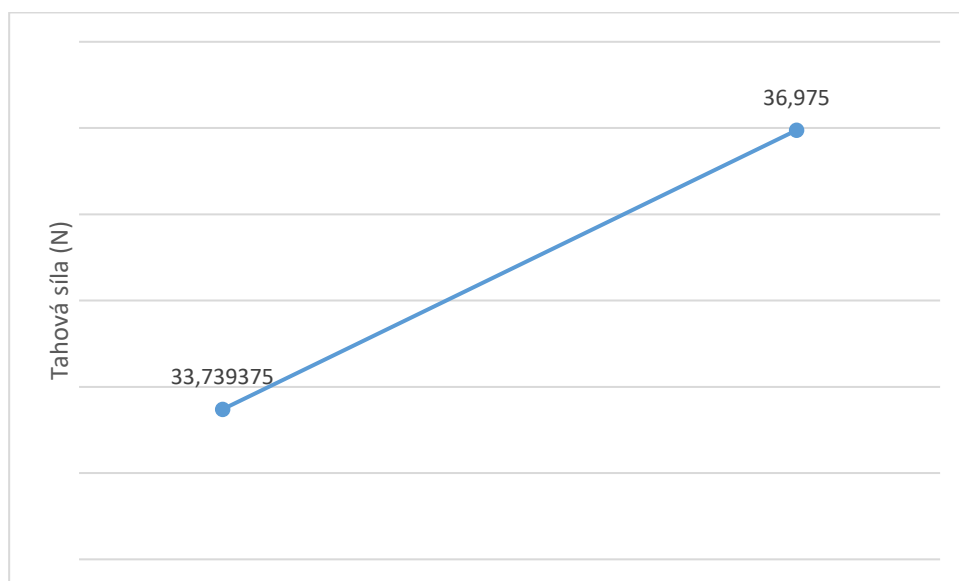
**Obr. 20: Graf efektu úrovní faktoru tlak**

Dalším grafem efektu úrovní je graf faktoru „amplituda“, první bod grafu představuje úroveň amplitudy s hodnotou 60, druhý bod úroveň s hodnotou 80.



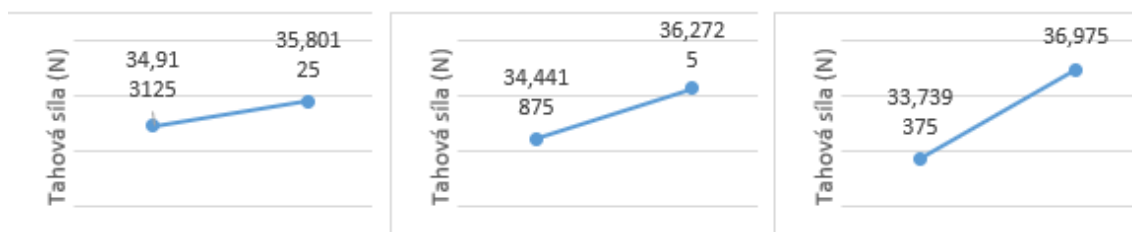
**Obr. 21: Graf efektu úrovní faktoru amplituda**

Posledním faktorem s dvěma úrovněmi je faktor „energie“, jehož interakční graf následuje, první bod představuje úroveň energie s hodnotou 148 a druhý bod úroveň s hodnotou 182.



**Obr. 22: Graf efektu úrovní faktoru energie**

Pro názornější představu o rozdílnosti grafů efektu úrovní faktorů si tyto grafy postavíme vedle sebe (Obr. 19)



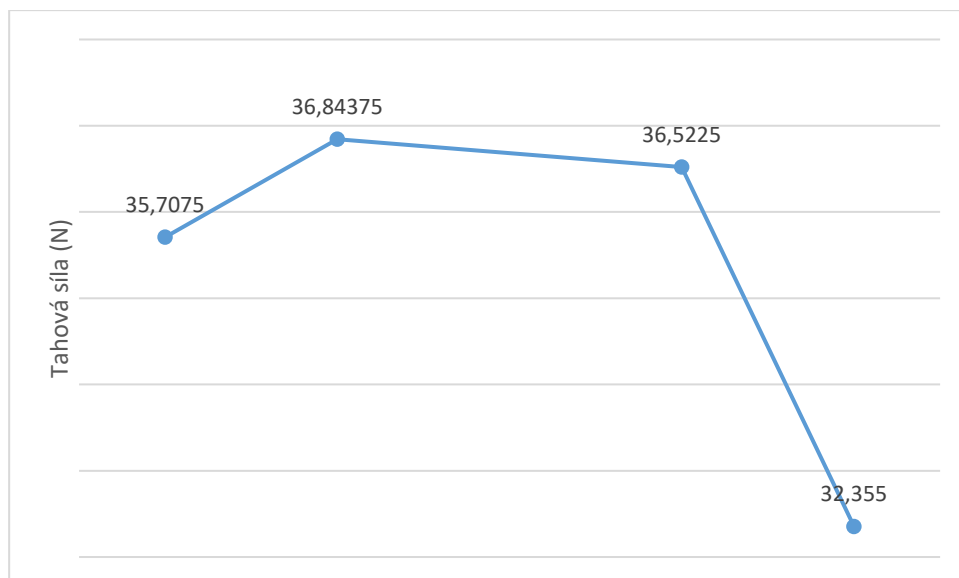
**Obr. 23: Srovnání grafů efektu úrovní faktorů**

U prvních tří faktorů, tedy tlaku, amplitudy a energie můžeme vidět, že zvýšením každého faktoru dosahujeme pokaždé vyšší hodnoty tahové síly, tedy vyšší pevnosti daného svarového spoje. U faktoru „tlak“ je toto navýšení na první pohled nejméně výrazné, průměrná hodnota tahové síly se pohybuje od 34,91 N do 35,8 N. Směrnice přímky je zde 0,444. Z nejmenší strmosti lze již předpokládat že faktor „tlak“ mít s nejvyšší pravděpodobností nejmenší vliv na kvalitu spoje.

Faktor „amplituda“ bude mít od pohledu větší vliv na výsledný spoj. Graf efektu úrovní se jeví mírně strmější než u předchozího faktoru, a to z důvodu výraznější změny hodnoty tahové síly, které jsme u vzorků sledovali. Průměrná hodnota síly v tahu se pohybuje od 34,44 N do 36,27 N, je vidět že rozsah těchto hodnot je širší než u předchozího faktoru „tlak“. Směrnice přímky pro tento faktor vychází 0,915. Graf vykazuje větší strmost, to značí i větší vliv než předchozí faktor.

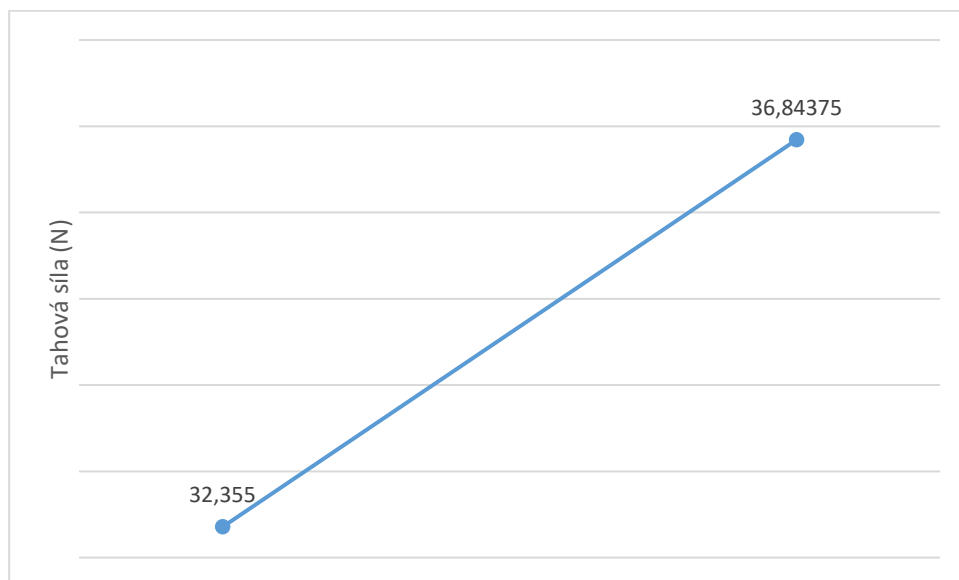
Následuje faktor „energie“ ten má z těchto tří faktorů nejstrmější interakční graf. Pohybuje se v hodnotách od 33,74 N do 36,98 N, to je zatím největší rozsah průměrných hodnot síly v tahu. Směrnice přímky zde vyšla 1,618, tato hodnota je prozatím nejvyšší, říká nám to tedy že z prvních tří zkoumaných faktorů má faktor „energie“ největší vliv na výslednou pevnost spoje. Tento faktor, na své vyšší úrovni, se také vyskytuje u dvou nejvyšších průměrných hodnot tahové síly v celém experimentu, tedy u testů T8 a T24.

Posledním zkoumaným faktorem je faktor „vodič“, tento faktor má hned čtyři úrovně. První úrovní je vodič s označením FLRY-B 0,5 H, druhá úroveň představuje opět vodič s označením FLRY-B 0,5 H, jedná se však o rozdílný proces výroby.



**Obr. 24: Graf efektu úrovní faktoru vodič**

Posledním zkoumaným vlivem faktoru je vliv vodiče, u tohoto faktoru máme 4 úrovně. Pro zjištění sklonu, jako u předchozích faktorů, byly vybrány extrémní hodnoty (Kdy bylo dosaženo nejvyšší průměrné tahové síly), tedy absolutní minimum a maximum. A z těchto dvou hodnot byla již bez obtíží vypočtena směrnice přímky, tedy míra vlivu faktoru.



**Obr. 25: Graf efektu úrovní faktoru vodič**

Koeficient  $k$  či směrnice přímky u tohoto faktoru vychází zcela nejvyšší 2,244. Je zde tedy vidět značný vliv faktoru vodič.

**Tab. 4: Směrnice přímky (koeficient  $k$ ) jednotlivých faktorů.**

	Faktory			
	Tlak	Amplituda	Energie	Vodič
$k (-)$	0,444063	0,915312	1,617813	2,244375

### 5.1.8 Shrnutí experimentu

Realizovaný experiment poskytl poznatky o vlivu jednotlivých faktorů na pevnost svařeného spoje. V průběhu experimentu se testovaly čtyři klíčové faktory: tlak, amplituda, energie a typ vodiče. Každému faktoru byly přiřazeny různé úrovně, které byly nastaveny tak, aby se tímto experimentem zjistila jejich významnost.

#### Faktor tlak:

- Směrnice přímky:  $k = 0,444$
- Výsledek ukazuje, že změna tlaku má nejmenší vliv na pevnost spoje ve srovnání s ostatními faktory. Zvýšením tohoto faktoru docházelo k mírnému nárůstu pevnosti, avšak tento vliv byl ze všech faktorů nejméně výrazný.

#### Faktor amplituda:

- Směrnice přímky:  $k = 0,915$
- Amplituda měla středně velký vliv na sledovanou pevnost spoje, tedy jeho kvalitu. Zvýšením amplitudy se došlo k významnějšímu zvýšení pevnosti spoje ve srovnání s tlakem, ale toto zvýšení bylo stále méně významné, než vliv faktoru energie a vodič.

#### Faktor energie:

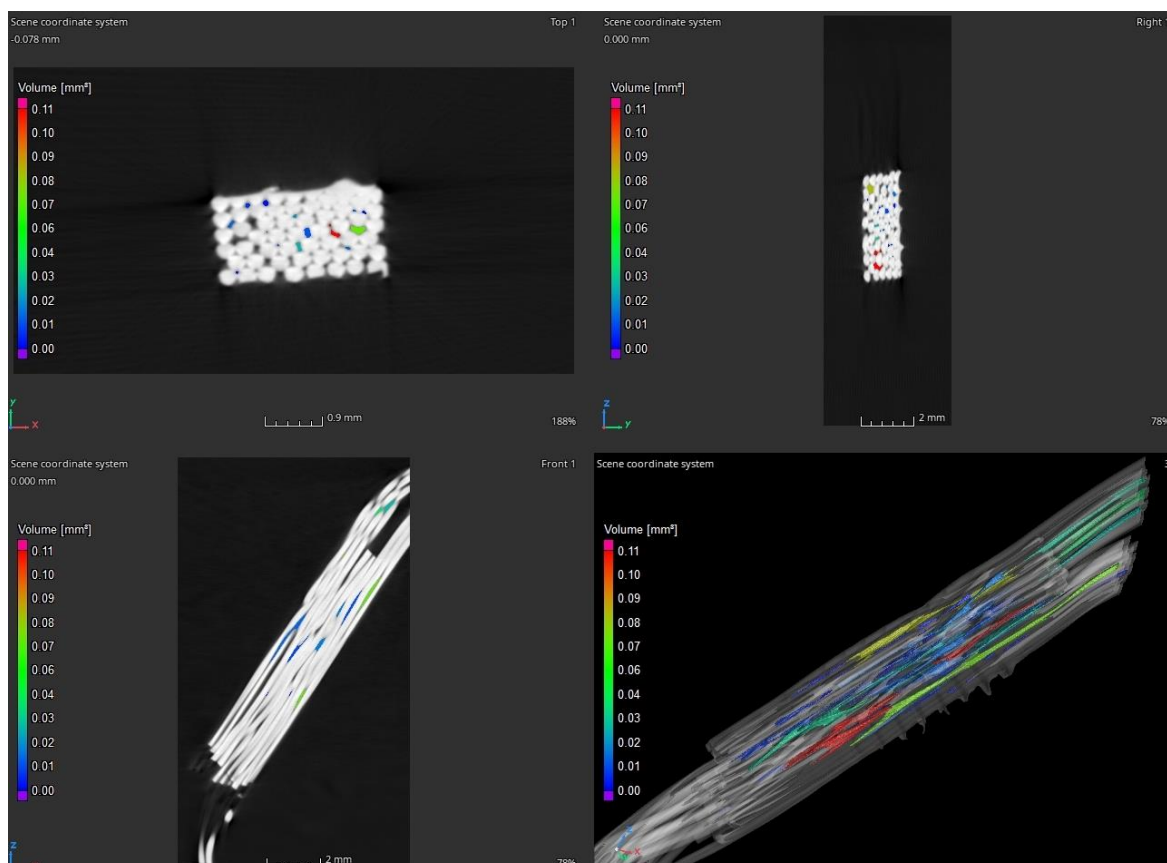
- Směrnice přímky:  $k = 1,618$
- Tento faktor měl významný vliv na pevnost. Zvýšení energie vedlo k největšímu nárůstu pevnosti mezi prvními třemi faktory, tedy faktory s dvěma úrovněmi.

#### Faktor vodič:

- Směrnice přímky:  $k = 2,244$
- Typ vodiče se v tomto experimentu ukázal jako nejsilnější. Rozdíly mezi svařovanými typy vodičů měly na pevnost svařovaného spoje největší dopad.



Je nutno dodat, že pokud tyto faktory nejsou správně nastaveny, dochází ke svaření méně kvalitních spojů s nižší pevností. Tyto spoje nejsou dobře svařeny a vyznačují se tzv. voidy ve svém objemu, jak můžeme vidět na následujících obrázcích nafocených pomocí CT. Tyto voidy znamenají menší styčnou plochu mezi svařovanými materiály, což vede právě k nižší pevnosti.



**Obr. 26: Snímek z CT zobrazující voidy v objemu ultrazvukem svařeného spoje**

### 5.1.9 Doporučení pro budoucí aplikace

Na základě získaných výsledků experimentu si dovoluji uvést následující doporučení pro optimalizaci procesu svařování.

Prvním doporučením je prioritizovat optimalizaci energie a výběru vodiče. Jelikož tyto faktory se na tomto experimentu ukázaly jako nejsilnější, bezesporu se vyplatí další vylepšování a testování ultrazvukem svařovaných spojů právě na základě těchto faktorů. Dalším doporučením je zlepšení nastavení amplitudy. Doladěním faktoru amplituda se může zajistit zlepšení pevnosti. Nemělo by se zapomenout ani na tlak, který je přítomný v procesu

ultrazvukového svařování. Přesto že se v tomto experimentu ukázal jako nejslabší je stále důležité ho nastavit a udržovat v optimálních hodnotách, aby bylo možné dosahovat konzistentních výsledků.

## 6 Závěr

Tato diplomová práce byla věnována problematice ultrazvukového svařování kovů, se speciálním zaměřením na elektrické vodiče. Cílem bylo představit metodu ultrazvukového svařování, analyzovat faktory ovlivňující kvalitu výsledného spoje a učinit kroky optimalizace procesu svařování pro vytvoření kvalitního pevného spoje.

Teoretická část, zahrnuje podrobný popis principu ultrazvukového svařování, skladbu ultrazvukového svařovacího zařízení, představení významných faktorů ovlivňujících kvalitu spoje, představení druhů ultrazvukových svařovacích systémů a zmiňují se také o uplatnění této metody v průmyslu, především v sektoru automotive. Byly popsány různé druhy materiálů vhodných pro ultrazvukové svařování, včetně plastů a kovů, a vysvětleny fyzikální principy této technologie. Došlo zde také k porovnání metody ultrazvukového svařování kovů s tradičními metodami pro spojování kovů a jiných materiálů.

V praktické části této práce jsem se zaměřil na optimalizaci procesu ultrazvukového svařování měděných kabelových svazků. Hlavním cílem bylo identifikovat a analyzovat vliv faktorů, jako jsou tlak, amplituda, energie a typ vodiče, na pevnost výsledného svařeného spoje. Experimentální data byla získána pomocí DoE (Design of Experiments) a následně byla analyzována pomocí statistického softwaru Develve.

Z výsledků experimentu vyplynulo, že faktor tlak má ve srovnání s ostatními faktory nejslabší vliv na pevnost spoje. Směrnice přímkou pro tento faktor vyšla 0,444, což naznačuje malou strmost směrnice přímkou, a tedy i malý vliv faktoru. Dalším faktorem experimentu byla amplituda, ta se ukázala být významnějším faktorem. Zvýšení amplitudy vedlo k výraznějšímu nárůstu pevnosti spoje, to potvrzuje také směrnice přímkou s hodnotou 0,915. Energie ultrazvukového svařování měla ještě větší vliv než amplituda. Z výsledků dále vyplývá, že správné nastavení energie je, pro dosažení vyšší pevnosti, zásadní. To nám opět následně potvrdila směrnice přímkou tohoto faktoru s hodnotou 1,618. Směrnice přímkou grafu efektu úrovně faktoru vodič má hodnotou 2,244, tato hodnota byla ze všech nejvyšší, zcela jasně nám tedy říká, že nejvýznamnějším faktorem celého experimentu je typ vodiče.

Z diplomové práce vyplývá, že ultrazvukové svařování elektrických vodičů je efektivní metodou, která nabízí množství výhod, jako je například rychlost, čistota procesu či absence

přídavných spojovacích materiálů. Závěrem této práce nezbývá nic jiného než doporučit širší uplatnění ultrazvukového svařování v automobilovém průmyslu, aerospace sektoru a dalších průmyslových odvětvích, kde je kladen důraz na kvalitu, efektivitu, spolehlivost a také ekologičnost. Bude potřeba také pokračovat ve výzkumu a vývoji této perspektivní technologie, zejména v oblasti optimalizace procesních parametrů a rozšíření využitelnosti na další typy materiálů a průmyslové procesy.

## 7 Bibliografie

- [1] MOSTAFAVI, Shimaalsadat, Daniel Frank HESSER a Bernd MARKERT. *Detection of terminal oscillation pattern in ultrasonic metal welding*. Aachen, 2019. Technical Paper. Institute of General Mechanics (IAM), RWTH Aachen University.
- [2] AL-SARRAF, Ziad Shakeeb. *A STUDY OF ULTRASONIC METAL WELDING* [online]. Glasgow, 2013 [cit. 2024-05-22]. Dostupné z: <https://theses.gla.ac.uk/4375/>. Thesis. University of Glasgow.
- [3] Ultrasonic welding of metals. In: *Belgian Welding Institute* [online]. 2024 [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: <https://bil-ibs.be/en/ultrasonic-welding-metals>
- [4] *Application of ultrasonic vibrations in welding and metal processing: A status review* [online]. Jinan, 2017 [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1526612517300567?casa\\_token=REAJlarrNOMAAAAA:hui3VyqQ7XStaOjJpcr4AGZ9IR1YbG6mBx143suaPX4zITa0bMs5S1XKpmpIpXhWeGRiPL73Q](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1526612517300567?casa_token=REAJlarrNOMAAAAA:hui3VyqQ7XStaOjJpcr4AGZ9IR1YbG6mBx143suaPX4zITa0bMs5S1XKpmpIpXhWeGRiPL73Q). Article. Institute of Materials Joining, Shandong University.
- [5] Ultrasonic Metal welding. In: *Hermann Ultraschall* [online]. 2024 [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: <https://www.herrmannultraschall.com/en/welding-using-ultrasonics/metal-welding>
- [6] The Basics of Ultrasonic Plastic Welding Technology. In: *Nexpcb* [online]. 2024 [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: <https://www.nexpcb.com/blog/the-basics-of-ultrasonic-welding-technology>
- [7] Ultrasonic Welding for Plastic Parts: Design Considerations. In: *Stelray Plastic Products, Inc.* [online]. 2024 [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: <https://www.stelray.com/blog/ultrasonic-welding-of-plastic-parts-design-considerations>
- [8] Ultrasonic Metal Welder. In: *Sibas Ultrasonics* [online]. 2022 [cit. 2024-05-20]. Dostupné z: <http://www.sibasultrasonics.com/ultrasonic-metal-welder.html>
- [9] *ResearchGate* [online]. c2008-2024 [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/figure/Types-of-Ultrasonic-welding-a-Ultrasonic-Plastic-welding-b-Ultrasonic-metal-welding\\_fig3\\_339883345](https://www.researchgate.net/figure/Types-of-Ultrasonic-welding-a-Ultrasonic-Plastic-welding-b-Ultrasonic-metal-welding_fig3_339883345)

- [10] FENG, M. N. a Z. LUO. Interface morphology and microstructure of high-power ultrasonic spot welded Mg/Al dissimilar joint. *Science and Technology of Welding and Joining* [online]. 2019, 63–78 [cit. 2024-05-20]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1080/13621718.2018.1483598>
- [11] *Ultrasonic system and ultrasonic metal welding performance: A status review* [online]. Changzho, China, 2022 [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1526612522007605>. Article. School of Mechanical Engineering, Hohai University.
- [12] Ultrasonic Welding Process: Principle, Advantages & Disadvantages. In: *SMLease* [online]. 2019 [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: <https://www.smlease.com/entries/manufacturing/ultrasonic-welding-process/>
- [13] SVOBODA, Michal. *Magnetostrikce a její dopady na elektrická zařízení* [online]. Plzeň, 2016 [cit. 2024-05-20]. Dostupné z: <https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/23139/1/BakalarskaPraceSvobodaM.pdf>. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni.
- [14] What Is Ultrasonic Welding? Process In-depth Overview. In: *Workshop Insider* [online]. 2023 [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: <https://workshopinsider.com/ultrasonic-welding/>
- [15] Ultrasonic Welding: Types and Applications Explored. In: *WeldWiki* [online]. <https://weldwiki.com/> [cit. 2024-05-22]. Dostupné z: <https://weldwiki.com/ultrasonic-welding-types-and-applications/>
- [16] Ultrasonic welding: Introduction, types and definitions. In: *Weld World* [online]. 2022 [cit. 2024-05-22]. Dostupné z: <https://theweldings.com/ultrasonic-welding/>
- [17] Ultrasoon lassen van metalen. In: *Alpha* [online]. 2024 [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: <https://www.alpha.be/nl/technologie/21117/ultrasoon-lassen-van-metalen>
- [18] The Guide To Ultrasonic Welding Machines & Tooling. In: *XFurth* [online]. 2022 [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: <https://blog.xfurth.com/ultrasonic-welding-machines-and-tooling#Design>
- [19] Ultrasonic Welding Technology: What is it for?. In: *Tech-sonic* [online]. 2022 [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: <https://tech-sonic.us/ultrasonic-welding-technology/>
- [20] Understanding ultrasonic welding. In: *The Fabricator - The Welder* [online]. 2024 [cit. 2024-05-19]. Dostupné z:

- <https://www.thefabricator.com/thewelder/article/arcwelding/understanding-ultrasonic-welding>
- [21] Ultrasonic-weldingsystems USP. In: *Telsonic Ultrasonics* [online]. 2024 [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: <https://www.telsonic.com/en/products/ultrasonicweldingsystems-usp/>
- [22] Ultrasonic welding applications in the automotive industry. In: *LinkedIn* [online]. 2024 [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: <https://www.linkedin.com/pulse/ultrasonic-welding-applications-automotive-industry-vialautomation>
- [23] Difference Between Ultrasonic Welding vs. Conventional Welding. In: *Tech-sonic* [online]. 2022 [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: <https://tech-sonic.us/ultrasonic-welding-vs-conventional-welding/>
- [24] Automotive. In: *Herrmann Ultraschall* [online]. 2024 [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: <https://www.herrmannultraschall.com/en/branch-solutions/automotive>
- [25] What is Ultrasonic Welding and How Does it Work?. In: *TWI-Global* [online]. 2024 [cit. 2024-05-24]. Dostupné z: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-ultrasonic-welding>
- [26] Sonotrode Design Is Key to Success of Ultrasonic Welding of Automotive Assemblies. In: *Assemblymag* [online]. 2024 [cit. 2024-05-24]. Dostupné z: <https://www.assemblymag.com/articles/93273-sonotrode-design-is-key-to-success-of-ultrasonic-welding-of-automotive-assemblies>
- [27] Ultrasonic Metal Welding. In: *Emerson* [online]. 2024 [cit. 2024-05-24]. Dostupné z: <https://www.emerson.com/en-gb/automation/welding-assembly-cleaning/metal-welding>
- [28] Expanding Ultrasonic Applications In EV's. In: *Telsonic Ultrasonics* [online]. 2024 [cit. 2024-05-24]. Dostupné z: <https://www.telsonic.com/en/news-ultrasonics/detail/article/expanding-ultrasonic-applications-in-evs-1/>
- [29] Ultrasonic Welding Automotive. In: *Herrmann Ultraschall* [online]. 2024 [cit. 2024-05-24]. Dostupné z: <https://www.herrmannultrasonics.com/en-us/applications/automotive>
- [30] Ultrasonic welding of wire harness applications in the automotive industry. In: *Telsonic Ultrasonics* [online]. 2024 [cit. 2024-05-24]. Dostupné z:

- <https://www.telsonic.com/en/news-ultrasonics/detail/article/ultrasonic-welding-of-wire-harness-applications-in-the-automotive-industry/>
- [31] Ultrasonic welding for automotive applications. In: *Ams* [online]. 2024 [cit. 2024-05-24]. Dostupné z: <https://www.automotivemanufacturingsolutions.com/ultrasonic-welding-for-automotive-applications/35011.article>
- [32] Design of Experiments. In: *PennState - Eberly College of Science* [online]. 2024 [cit. 2024-05-22]. Dostupné z: <https://online.stat.psu.edu/stat503/lesson/1/1.1>
- [33] What Is Design of Experiments (DOE)?. In: *ASQ* [online]. 2024 [cit. 2024-05-22]. Dostupné z: <https://asq.org/quality-resources/design-of-experiments>