

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 3911T016 Materiálové inženýrství a strojírenská
metalurgie

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Technologický postup výroby sonotrody pro ultrazvukové svařování

Autor: **Bc. Jan TRČKA**

Vedoucí práce: **Ing. Soňa BENEŠOVÁ, Ph.D.**

Akademický rok 2019/2020

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

V Plzni dne:

.....

podpis autora

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Trčka	Jméno Jan	
STUDIJNÍ OBOR	3911T016 „Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie“		
VEDOUČÍ PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Benešová, Ph.D.	Jméno Soňa	
PRACOVIŠTĚ	ZČU - FST - KKS		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Technologický postup výroby sonotrody pro ultrazvukové svařování		

FAKULTA	Strojní	KATEDRA	KMM	ROK ODEVZD.	2020
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	69	TEXTOVÁ ČÁST	69	GRAFICKÁ ČÁST	0
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK) ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	Diplomová práce je zaměřena na problémy v technologii svařování ultrazvukem, konkrétně na svařovací nástroje - sonotrody. Současné nástroje jsou poruchové a nákup nových nástrojů z používaných materiálů je velmi nákladný. Práce mapuje kompletní technologický postup výroby nové sonotrody z kované rychlořezné nástrojové oceli. Tento materiál by měl mít přínosy v oblastech vedení ultrazvukové vlny, mechanických vlastností a také by měl být ekonomicky přijatelnější.
KLÍČOVÁ SLOVA ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE	sonotroda, ultrazvuk, svařování ultrazvukem, zpracování nástrojové oceli, reverzní kování

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	Surname Trčka	Name Jan	
FIELD OF STUDY	3911T016 "Materials Engineering and Engineering Metallurgy"		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Benešová, Ph.D.	Name Soňa	
INSTITUTION	ZČU - FST - KKS		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Technological process of produce sonotrode for ultrasonic welding.		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	KMM	SUBMITTED IN	2020
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	69	TEXT PART	69	GRAPHICAL PART	0
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	The diploma thesis is focused on problems in the ultrasonic welding technology, especially on welding tools - sonotrodes. The current tools are faulty and buying a new tools from used materials is very expensive. The work contains the complete technological process of production of the new sonotrode from forged high-speed tool steel. This material should have benefits in the areas of ultrasonic conduction, mechanical properties and should also be more economically acceptable.
KEY WORDS	Sonotrode, ultrasonic, ultrasonic welding, tool steel processing, reverse forging

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucí diplomové práce Ing. Soně Benešové, Ph.D. a konzultantovi Ing. Josefovi Skleničkovi, Ph.D. za cenné rady, trpělivost, ochotu a čas, který mi při tvorbě práce poskytli. Dále děkuji rodičům za velkou podporu během celého mého studia.

Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů	1
Úvod.....	3
1.Ultrazvukové svařování s použitím sonotrod, další aplikace ultrazvuku.	4
1.1Podstata zvuku a ultrazvuku	4
1.2Rychlost šíření ultrazvukové vlny	7
1.3Útlum ultrazvukových vln	7
1.3.1 Útlum v tuhých látkách	7
1.3.2 Vliv velikosti zrna na útlum ultrazvukové vlny.....	8
1.4 Svařování ultrazvukem	10
1.4.1 Princip svařování	10
1.4.2 Přeměna elektrické energie na mechanické kmitání.....	11
1.5 Uplatnění svařování ultrazvukem	13
1.5.1 Princip svařování kovů	14
1.5.2 Svaření drátu s plechem stupňovitou sonotrodou [7]	14
1.5.3 Svařování plastů	15
1.6 Princip a druhy sonotrod.....	17
1.6 Teplota a napětí na rozhraní svaru [8]	21
2.Materiály pro sonotrody, příprava polotovaru kováním.....	22
2.1 Ocel W. Nr. 1.3343 [14]	23
2.2 Ocel W. Nr. 1.3243 [15]	24
2.3 Tvařitelnost rychlořezných ocelí.....	25
2.4 Očekávaný přínos kování.....	27
2.5 Stupeň prokování [38]	28
3.Návrh tvaru sonotrody s využitím numerické simulace na základě změřené rychlosti ultrazvuku, výpočet napětí a pracovní frekvence	29
3.1Využití numerické simulace [25].....	29
3.2Práce v softwaru	30
3.3Určení vstupních parametrů pro materiál [26].....	31
4.Obrábění rychlořezných ocelí	32
4.1 Obrobitelnost nástrojových ocelí	32
4.2 Obrábění tvrdých materiálů [40].....	33
4.3 Řezné materiály	34
5. Tepelné zpracování, rizika při TZ	35
5.1 Tepelné zpracování rychlořezných nástrojových ocelí	35
5.2 Rizika při TZ nástrojových ocelí	37
5.3 Tepelné zpracování ve vakuu.....	38
5.4 Vliv legujících prvků použité oceli na tepelné zpracování [29].....	39
6. Výroba špičky technologií vyjiskřování.....	39

6.1 Princip, výhody a parametry	40
6.2 Nástrojové elektrody	41
6.3 Výměna dielektrika	43
6.4 Elektrojiskrová hloubička	43
8. Motivace a problematika	44
9. Příprava polotovaru kováním	45
10. Návrh a simulace geometrie sonotrody	47
10.1 Naměřené hodnoty rychlosti ultrazvuku a vstupní data	48
10.2 Návrh geometrie a vlastní simulace	48
11. Obrábění na finální tvar, parametry a způsob obrábění	53
12. Tepelné zpracování sonotrody	58
12.1 Použité zařízení [32]	59
12.2 Parametry tepelného zpracování	60
13. Výroba špičky elektroerozivním obráběním	61
14. Ověření	62
14.1 Ověření frekvence	62
14.2. Analýza	63
14.3 Ověření posunutí	64
15. Diskuze výsledků	66
Závěr	69
Použitá literatura:	70

Seznam použitých zkratk a symbolů

T – doba kmitu [s]

F – frekvence [Hz]

λ – vlnová délka [μm]

α – činitel útlumu [dB/m]

α_1 – útlum pohlcením [dB/m]

α_2 – útlum rozptylem (odrazem) [dB/m]

\bar{D} – střední velikost zrna [μm]

t_m – bod tání [$^{\circ}\text{C}$]

P_k – stupeň prokování [-]

A – pēchovací ekvivalent [-]

P – stupeň pēchování [-]

K – stupeň prodlužování [-]

k – počet pēchovacích operací [-]

F_p – průřez napēchovaného ingotu [mm^2]

F_k – průřez výkovku po prodloužení [mm^2]

E – modul pružnosti v tahu [Pa]

c_p – rychlost podélné vlny ultrazvuku [m/s]

ρ – hustota [kg/m^3]

μ – Poissonovo číslo [-]

c_s – rychlost příčné vlny ultrazvuku [m/s]

G – modul pružnosti ve smyku [Pa]

v – řezná rychlost [m/min]

f – posuv [mm/ot]

a – hloubka třísky [mm]

n – otáčky [ot/min]

c – rychlost ultrazvuku [m/s]

t – čas [s]

T – teplota [$^{\circ}\text{C}$]

I – elektrický proud [A]

U – napětí [V]

Úvod

Diplomová práce je zaměřena na moderní technologii svařování ultrazvukem. Požadavky na výrobu jsou čím dál větší a k tomu se musí přizpůsobit i technologie. Nejproblémovější jsou samotné svařovací nástroje, tzv. sonotrody. V současnosti je nejpoužívanější materiál sonotrod ocel vyráběná práškovou metalurgií, která je ovšem velmi nákladná. Vzhledem k poměrně vysokému opotřebení a poruchovosti sonotrod se hledá varianta, která by prodloužila životnost sonotrod.

Účelem této práce je objasnit teoretické základy svařování ultrazvukem a samotné fungování sonotrod. Dále se práce zabývá jednotlivými technologiemi, kterými bude sonotroda vyrobena. Velký důraz je kladen na technologii kování, díky které vznikne velmi jemnozrnná struktura s rovnoměrně rozloženými karbidy.

Jako materiály pro výrobu sonotrody jsou zvoleny dva typy rychlořezné nástrojové oceli, které mají chemické složení velmi podobné používané oceli vyráběné práškovou metalurgií. Jejich výhodou je právě velmi jemnozrnná prokovaná struktura, která by měla mít pozitivní vliv na šíření a stabilitu ultrazvukové vlny.

Praktická část diplomové práce detailně popisuje celý průběh výroby kované sonotrody. V této části práce jsou popsány všechny technologie včetně použitých parametrů při výrobě. Poslední částí diplomové práce je samotné ověření vyrobené sonotrody, kdy je kovaná sonotroda porovnávána s funkční komerční sonotrodou.

1. Ultrazvukové svařování s použitím sonotrod, další aplikace ultrazvuku.

Technologie svařování ultrazvukem se v posledních dvaceti letech stala velmi používaným způsobem spojení materiálů. Široké spektrum použití našla tato technologie při konstrukci elektrických přístrojů, domácích spotřebičů a v automobilovém či textilním průmyslu, kde se vyskytují velké výrobní série. [41]

1.1 Podstata zvuku a ultrazvuku

Zvuk je mechanická vlna, kterou vyvolává nucené periodické kmitání jednotlivých částic. Pro šíření této vlny je vždy potřeba médium, které může být ve formě kapaliny, plynu nebo pevné látky. Vlna se šíří pomocí kmitání jednotlivých atomů a molekul. Nedochozí k žádnému transportování materiálu, ale kmitající atomy a molekuly naráží na sousední částice, které se díky srážkám dále rozkmitávají. Tato reakce je uskutečněna díky vazebným silám mezi částicemi. Každá částice kmitá s různou výchylkou a fázovou rychlostí. Částice se postupně rozkmitávají celým materiálem a vzniká vlna, která se šíří rychlostí danou vlastnostmi prostředí a typu vlny. Rozeznáváme různé typy vln. [4] [19]

Postupná vlna vzniká tehdy, když se částice rozkmitávají postupně se zpožděním (nejsou ve stejné fázi). Zároveň musí kmitat stejnou amplitudou. Částice prostředí mohou kmitat ve směru kolmém, nebo shodném se směrem šířením vln. Podle toho rozlišujeme příčné nebo podélné postupné mechanické vlnění. [4]

Stojatá vlna vzniká interferencí dvou oddělených stejných vln, které jsou navzájem polarizované. Vlny kmitají ve stejné fázi a šíří se proti sobě. Opačný směr pohybu jedné z vln vzniká díky odrazu postupného vlnění od pevné překážky. [6]

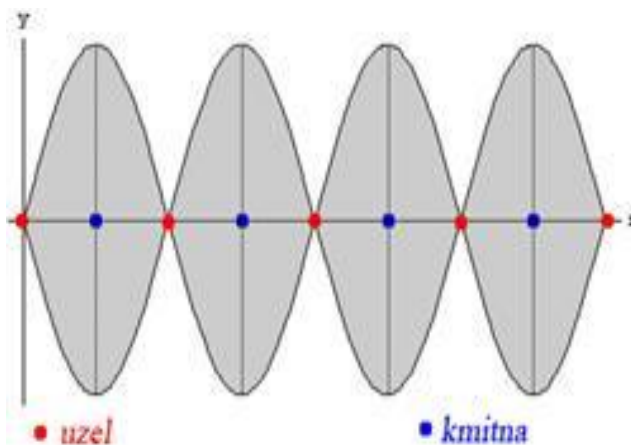
Kmitání molekul se pravidelně opakuje. Čas, za který se kmit uskuteční, se nazývá doba kmitu (někdy perioda) a značí se T . Počet kmitů za jednu sekundu určuje frekvenci f , která je udávána v Hz. [4]

$$T[s] = 1/f[Hz] \quad (1) \quad [1]$$

Vzdálenost jednoho kmitu určuje vlnovou délka λ , která je závislá na frekvenci f a rychlosti šíření zvukové vlny v daném prostředí c . [35]

$$\lambda[m] = c \left[\frac{m}{s} \right] * T[s] = c \left[\frac{m}{s} \right] / f[Hz] \quad (2) \quad [35]$$

Na obr. 1 je znázorněn průběh stojatého vlnění. Svislá osa znázorňuje amplitudu výchylky a vodorovná čas. Body, které mají stále nulovou amplitudu výchylky, se nazývají uzly. Naopak body, které mají maximální amplitudy výchylky, se nazývají kmitny. Poloha těchto uzlů a kmiten se nemění. Ostatní body kmitají s různou amplitudou výchylky. Vzdálenost sousedních kmiten (nebo uzlů) je $\lambda/2$ (polovina vlnové délky). [4]



Obr. 1: Stojatá vlna [6]

Netlumené kmitání má konstantní výchylku a nemusí být dodávána žádná energie. Ve většině případů musí být dodávána energie, která se ztrácí díky odporu prostředí. S ubývající energií se zmenšuje pouze amplituda výchylky, nebo amplituda i doba kmitu. Tento jev je označen jako tlumené kmitání. [1] [4]

Ultrazvuk je forma akustické energie, která je umístěna nad slyšitelným rozsahem frekvence. Obvykle se udává minimální frekvence 20 000 Hz. Zajímavé jevy, které lze připsat ultrazvuku, zejména v jeho rané historii, vyvolaly mnoho podnětů k jeho použití. Mnoho návrhů se v minulém století ukázalo jako praktické v různých oblastech vědy a průmyslu. Všechny tyto praktické aplikace těžily z nedávných technologických pokroků v elektronice a informatice. [5]

Ultrazvukové procesy zahrnují úvahy o jevech, jako je šíření vln, chemické reakce, tepelné účinky plynoucí z absorpce energie, účinky přičitatelné kavitaci a další faktory související s napětím, třením a hybností. Jakákoli úspěšná aplikace ultrazvuku musí být spojena s praktickými způsoby s některými akustickými vlastnostmi nebo vlastnostmi ozářeného média ultrazvukem. [5]

Ultrazvuková energie je akustická energie a akustické principy platí pro jakýkoli aspekt její studie nebo použití. Existuje mnoho typů akustických vln. Šíří se médiem jako sled

mechanických akcí a reakcí. Akustická vlna je generována jakoukoli silou, která produkuje oscilační vibrace v kontinuálním médiu. Vibrace jsou přenášeny z prvku na prvek, díky jeho setrvačným a elastickým vlastnostem, rychlostí odpovídající rychlosti zvuku v médiu. Hmotnost prvku je určena jeho objemem a hustotou média. Amplituda pohybu prvku je určena silami, které na něj působí, jeho hmotností a elastickými podmínkami, které jej obklopují. Tyto principy jsou zásadní pro vývoj a pochopení chování ultrazvuku. [5]

Energie v akustickém systému se rovněž řídí zákonem zachování energie. Zákon zachování energie uvádí, že energii nelze vytvořit ani zničit. Vlna procházející médiem ztrácí energii do média různými absorpčními mechanismy. Rozptýlená energie není zničena, ale je změněna; to znamená, že kinetická energie se mění na tepelnou energii. [5]

Ultrazvukové vlny šířící se prostředím mohou být několika druhů, které se významně liší způsobem pohybu částic prostředí vzhledem ke směru postupu vlny. Nejběžnější a nepoužívanější jsou vlny podélné a příčné. [35]

Při podélné vlně částice prostředí kmitají přímočaře ve směru šíření vlny (obr. 2). Během tohoto pohybu vzniká střídavé zhušťování (komprese) a zředování částic prostředí, při čemž dochází i ke střídavé změně jeho objemu. Tyto vlny se pokládají za nejdůležitější, protože se mohou šířit jakýmkoliv prostředím. Jedinou podmínkou je velikost daného prostředí, které je musím být dostatečně velké vzhledem k vlnové délce λ . [35]



Obr. 2: Podélná vlna [35]



Obr. 3: Příčná vlna [35]

Příčné vlny se opět mohou šířit v prostředí větším, než je vlnová délka λ a zároveň v prostředí, které odolává namáhání ve smyku, tj. pouze v prostředí tuhém. Tyto vlny kmitají kolmo na směr šíření vlny (obr. 3). Při šíření příčných vln se nemění objem prostředí. Rychlost šíření je vždy menší než u vln podélných, a proto mají při stejné frekvenci vždy kratší vlnovou délku než podélné vlny. [35]

1.2 Rychlost šíření ultrazvukové vlny

Rychlost šíření ultrazvukové vlny závisí na typu prostředí, ve kterém se šíří. Každé prostředí má jiné mechanické vlastnosti a prostup ultrazvukové vlny je tak rozdílný. Dalším důležitým parametrem je samotný typ ultrazvukové vlny. [35]

V tuhém prostředí se vyskytují oproti plynům a kapalným látkám mnohem vyšší meziatomární síly, a proto je zde možné přenášet i smykové namáhání. V důsledku toho jsou pevné látky jediné, které mohou přenášet všechny typy ultrazvukových vln. Některé tuhé látky jsou anizotropické, což způsobuje, že rychlost šíření ultrazvukové vlny závisí i na orientaci krystalů. U izotropických materiálů se rychlost šíření se změnou směru nemění. [35]

Rychlost šíření v čistých kapalinách závisí na tlaku a hustotě prostředí. Kapaliny nekladou žádný odpor proti smykovému namáhání, a proto se v nich může šířit pouze vlna podélná. Jedinou výjimkou jsou kapaliny s vysokou viskozitou. S měnící se teplotou kapaliny se mění i rychlost šíření ultrazvukové vlny. Se stoupajícím tlakem se rychlost šíření ultrazvukové vlny v kapalině nepatrně zvyšuje, přibližně 0,1% na 1 MPa. Rychlost šíření ultrazvukové vlny v roztocích je závislá na poměru přítomných složek. [35]

1.3 Útlum ultrazvukových vln

Podstatný vliv na rychlost šíření ultrazvukové vlny má útlum v materiálu. Útlum způsobuje odražení či pohlcování energie a tím snižuje energii procházející ultrazvukové vlny.

1.3.1 Útlum v tuhých látkách

Při šíření ultrazvukové vlny prostředím klesá její energie v závislosti na vzdálenosti od ultrazvukového zdroje a na vlastnostech prostředí. Příčiny tohoto poklesu jsou: [35]

- Pohlcování (absorpce) ultrazvukových vln. V tomto případě se mechanická energie mění na tepelnou v důsledku vnitřního tření kmitajících částic.
- Odraz, lom, rozptyl a ohyb. Tento druh útlumu se vyskytuje především v nehomogenních a polykrystalických prostředích. Jeho příčinou je dopad ultrazvukových vln na jednotlivá rozhraní v nehomogenní látce.

V tuhých látkách se obecně uplatňují ztráty pohlcováním i rozptylem a činitel útlumu α je dán součtem dílčích útlumů a udává se v decibelech na metr:

$$\alpha = \alpha_1 + \alpha_2 \quad [\text{dB/m}] \quad (3) \quad [35]$$

Kde α_1 je útlum pohlcováním, při kterém se mechanická energie kmitů mění na tepelnou a α_2 je útlum rozptylem, při kterém se ultrazvuková energie ztrácí v důsledku odrazu a lomu do různých směrů. Vyskytuje se několik typů tohoto útlumu: [35]

- Rayleighův rozptyl – rozptyl na částicích, které jsou podstatně menší než vlnová délka zvukové vlny. Z částic se šíří všemi směry kruhové vlnoplochy, které mezi sebou interferují. Z tohoto důvodu se ke zdroji vrátí podstatně menší množství vyslané energie.
- Stochastický rozptyl – nahodilý rozptyl. Při vlnové délce přibližně stejné, jako je střední velikost zrna. Roste úměrně se zvyšující se střední velikostí zrna
- Difúzní rozptyl – ultrazvuk proniká (difunduje) mezi jednotlivými krystaly. Dochází k útlumu v každém zrně a ztráty jsou maximální, pokud se vlnová délka blíží ke střední velikosti zrna.

Útlum podélných vln je větší než vln příčných, protože dochází k adiabatickým změnám objemu. Ve většině tuhých látek je útlum způsobený pohlcováním úměrný velikosti frekvence ultrazvuku. [35]

1.3.2 Vliv velikosti zrna na útlum ultrazvukové vlny

Největší vliv na velikost útlumu má vztah mezi délkou vlny λ a střední velikostí zrna struktury \bar{D} . [35].

V oblasti $\lambda \ll \bar{D}$ dochází k pohlcování ultrazvuku v každém zrně. Pokud jsou na hranicích zrna vyloučené různé látky, např. uhlík, může docházet i k útlumu odrazem. Při vyšších teplotách stoupá útlum. U kovů majících vysokou rychlost šíření ultrazvuku se toto zvýšení útlumu obvykle projevuje až při teplotách nad 200 °C. V prostředí s nižší hodnotou šíření ultrazvuku se zvýšený útlum projevuje při teplotách nižších. [35]

Při délce vlny λ porovnatelné se střední velikostí zrna $\lambda \approx \bar{D}$ dochází k tzv. stochastickému rozptylu, kdy ztráty rostou úměrně s velikostí zrna \bar{D} . Poměrně úzký rozsah stochastického rozptylu přechází do oblasti rozptylu difúzního, který nastává při $\lambda < \bar{D}$. [35]

Je-li délka vlny mnohem delší než střední velikost zrna ($\lambda \gg \bar{D}$), nastává tzv. Rayleighův rozptyl, jehož mezní hranicí je poměr $\lambda \geq 2\pi\bar{D}$. Potom je činitel útlumu dle:

$$\alpha \cong \alpha_1 f + \alpha_2 f^4 \quad (4) \quad [35]$$

Kde α_1 jsou ztráty pohlcováním a α_2 ztráty rozptylem.

Při nízkých frekvencích je délka vlny mnohonásobně větší než velikost zrna, proto převažuje útlum pohlcováním ($\alpha_1 \gg \alpha_2$). Ztráty při Rayleighově rozptylu jsou úměrné třetí mocnině střední velikosti zrna. [35]

$$\alpha \approx \bar{D}^3 \quad (5) \quad [35]$$

V jemnozrnných materiálech může nastat útlum rozptylem, pokud se v materiálu vyskytují póry, mikrotrhliny, vměstky a jiné nehomogenity. Konkrétně u nástrojů pro svařování ultrazvukem mohou být zdrojem mikrotrhlin nepatrné chyby ve struktuře a nehomogenity materiálu. V takových místech se absorbuje větší množství energie, které vede k vysokému lokálnímu ohřevu a podporuje tak růst dalších mikrotrhlin. Tímto způsobem dochází k vyšší únavě materiálu, která končí až mechanickým porušením nástroje. [36]

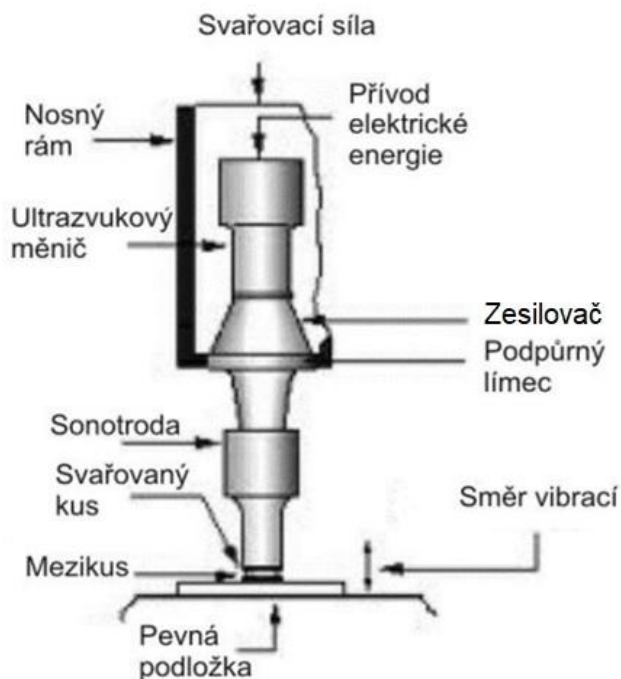
Tento negativní jev pro ultrazvukové nástroje se úspěšně praktikuje pro urychlení únavového porušení v oblastech mechanického zkoušení. [36]

S hodnotou útlumu souvisí i samotný výběr materiálu pro sonotrodu. Nejnížší hodnoty útlumu ultrazvukové energie se vyskytují u hliníku a některých jeho slitin (např. dural) a titanu a jeho slitin. Těchto hodnot lze dosáhnout i u ocelí, které ale musí být vhodným způsobem tepelně zpracované a dostatečně protvářené. [36]

Nevhodně zpracovaná ocel, litina, mosaz a další materiály mají koeficient absorpce desetkrát vyšší. Ještě vyšší koeficienty tlumení vykazují cín, olovo, guma a plasty. Z tohoto důvodu se v ultrazvukové technice tyto materiály nedoporučují pro šíření ultrazvukových vln. V materiálech s vysokou absorpcí ultrazvukové energie se vytváří mnoho tepla, které má za následek rozrušení součástí. Tento ohřev se však cílevědomě používá při ultrazvukovém svařování termoplastů, kde napomáhá roztavení a svaření součástí. [36]

1.4 Svařování ultrazvukem

Ultrazvukové svařování kovů (USMW) je spojovací proces, ve kterém jsou dva kovové vzorky spojené s použitím ultrazvukových vibrací pod mírným tlakem. Vibrace jsou aplikovány na rozhraní mezi vzorky svaru. USMW je jednou z nejrozšířenějších používaných pokročilých metod pro svařování barevných kovů, jako je hliník, měď, nikl, zlato a stříbro. Odstraňuje většinu tradičních problémů svařovací techniky, které vznikají při tavení kovu působením tepla. [7]



Obr. 4: Schéma svařovací soustavy [4]

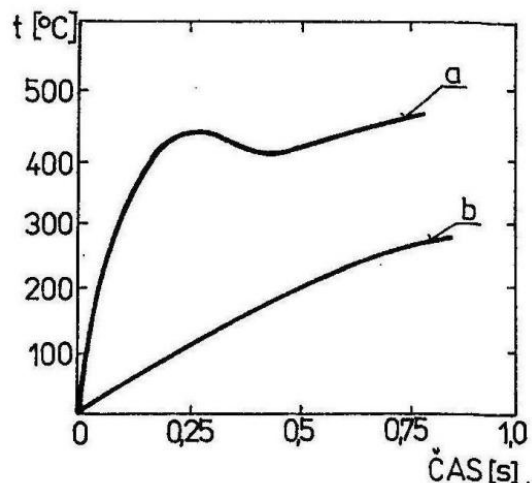
1.4.1 Princip svařování

Ultrazvukové svary jsou vyráběny bez spotřebního materiálu, jako je pájka nebo výplně, které by se běžně používaly v konvenčních spojovacích procesech. Pro typy spojů ultrazvukového svařování existují určitá omezení. Omezení se týká především spojování neželezných kovů a plastů. [8]

Svařovací systém se většinou skládá z pěti základních komponent. Jsou to převodník, měnič, zesilovač, sonotroda a pevná podložka (kovadlinka). Kmitání je vedeno celou svařovací soustavou (obr. 4). Soustava začíná převodníkem, který zvyšuje standardní elektrické napětí na požadované pracovní frekvence. V měniči se tento proud mění na mechanické kmitání pomocí magnetostrikčního nebo piezoelektrického jevu (viz kapitola 1.4.2). Posilovač modifikuje amplitudu vibrací aplikovaných na sonotrodu. Kmitání se mechanicky přenáší přenosovými články (tzv. vlnovody) až na svařovací nástroj. Ze svařovacího nástroje, tzv. sonotrody, putují mechanické kmity rovnou do svařovaného materiálu. Svařované součásti jsou připevněny na podložce. [10] [7]

Základními typy svarových spojů jsou hlavně bodové a švové, následované méně používanými kruhovými a tvarovými typy. Ultrazvukové svařování se provádí ve dvou základních svařovacích režimech: [3] [11]

- Velká amplituda a malá přitlačná síla (obr. 5a) – při tomto režimu dochází k rychlému nárůstu teploty a velkým plastickým deformacím. V případě kovů je difúze značně urychlená vysokou teplotou a dochází k růstu zrna. [11] [3]
- Malá amplituda a velká přitlačná síla (obr. 5b) - tímto způsobem vznikají spoje s lepšími pevnostními vlastnostmi. Teplota se zvyšuje pomaleji. [11] [3]



Obr. 5: Závislost teploty na době ultrazvukového svařování [11]

Při stejných podmínkách mohou tedy vzniknout dva naprosto rozdílné svary z hlediska mechanických vlastností. Tento rozdíl vznikne pouze změnou poměru amplitudy a přitlačné síly. [11]

Samotný proces svařování je charakterizován základními parametry. Nejdůležitější je amplituda kmitů. Se zvyšující amplitudou je možné svařit větší tloušťky materiálu a zároveň roste pevnost spojů. Hodnota amplitudy bývá 10 – 50 μm . Celý proces by se neobešel bez přitlačné síly, která zabezpečuje přenos ultrazvukových kmitů ze sonotrody na svařované materiály. Zároveň zajišťuje podmínky tření a samotné rozrušení oxidových vrstviček. Tlak na hrot se používá 40 až 120 MPa. [11] Frekvence ultrazvukových kmitů udává počet kmitů za jednotku času. Při vyšších frekvencích se sonotroda zahřívá, zvyšují se ztráty a zmenšuje se amplituda. [3] Poslední parametr je doba svařování, která výrazně ovlivňuje kvalitu svarového spoje. Doba svařování bývá několik desetin sekundy, maximální časy jsou do 4 sekund. Opět záleží na svařovaném materiálu a hlavně jeho tloušťce. [11] Při delší době svařování hrozí přehřátí materiálu, které způsobí výrazný pokles pevnosti. [3]

1.4.2 Přeměna elektrické energie na mechanické kmitání

První součástí svařovací soustavy je napájecí zdroj (*generátor*), který převádí 50 – 60 Hz síťové napětí na požadovaný vysokonapěťový signál frekvence (obvykle 20 KHz). Jejich výkon se pohybuje v rozsahu od 100 do 6 000 W. U novějších modelů generátorů lze frekvenci měnit okamžitě během svařování. [37]

Měníče tvoří podstatnou část každého ultrazvukového zařízení. V ultrazvukové technologii se většinou používají elektroakustické měniče, výjimečně mechanické měniče. [36]

Mechanické ultrazvukové zdroje jsou poměrně málo rozšířené a používají se pouze u některých aplikací šíření ultrazvukových vln v plynném a kapalném prostředí. Jsou to v podstatě mechanicko-akustické měniče, které mění kinetickou energii rychle tekoucích plynů nebo kapalin na ultrazvukovou energii. Mezi tyto měniče patří zejména píšťaly a sirény. [36]

Ultrazvukové elektroakustické měniče jsou převodníky, které mění elektrickou energii na ultrazvukovou nebo naopak. K přeměně energie využívají fyzikální principy, mezi které patří jevy magnetostrikční, piezoelektrický, elektrodynamický a elektromagnetický. V oblasti svařování ultrazvukem se používá převážně měnič piezoelektrický, méně pak měnič magnetostrikční. [36]

Magnetostrikční jev využívá deformace některých feromagnetických látek v magnetickém poli. Elektrický proud budí v měniči magnetické pole, některé látky se deformují a vzniká tak akustická vlna. Proud, kterým se budí magnetické pole, je přímo úměrný síle deformující materiál. Tyto měniče mají malou účinnost, proto se využívají právě v oblasti ultrazvuku.[9] Mezi používané feromagnetické materiály se řadí železo, nikl, kobalt a jejich slitiny. [36]

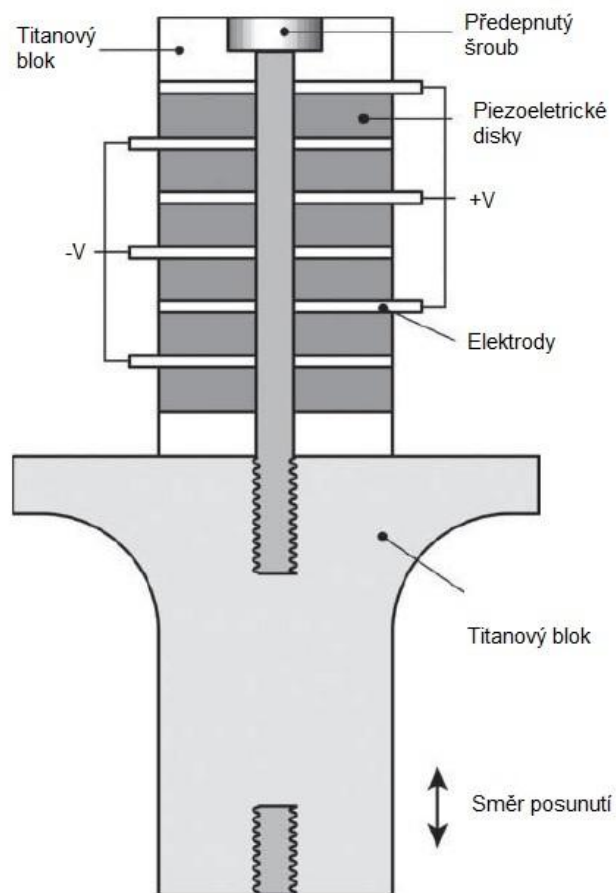
Pro magnetostrikční jádra se používají tvrdé, tj. keramické ferity, které jsou vhodné i pro trvalé magnety. Nevýhodou feritových jader je jejich křehkost, proto se používají spíše v ultrazvukové měřicí technice pro nižší výkony. Ferity však snášejí značné teplotní zatížení, a to až do 400 °C. [35]

Piezoelektrický jev je pro technologie využívající ultrazvuk mnohem důležitější. Látky s přirozenými piezoelektrickými vlastnostmi, jako např. křemen a turmalín, se vyskytují ve formě krystalů a jejich ionty tvoří krystalovou mřížku. Při deformaci krystalu se negativní a pozitivní ionty posunou tak, že každý element krystalu získá dipólový moment a na celém krystalu vznikne elektrický náboj. Tento jev se nazývá přímý piezoelektrický jev. [35]

V technologii svařování ultrazvukem se využívá nepřímý piezoelektrický jev, který vzniká v obráceném pořadí oproti jevu přímému. V elektrickém poli dochází k mechanické deformaci krystalu, která je úměrná velikosti vstupního elektrického napětí. Piezoelektrické krystaly jsou anizotropické, proto je důležitý směr elektrického napětí vůči osám krystalu. [35]

Samotný převodník (obr. 6) se skládá z řady piezoelektrických keramických (PZT) disků, které jsou vloženy mezi dva kovové bloky, obvykle titanové. Mezi disky se nachází úzký kovový plátek, který tvoří elektrodu. Měnič je napájený elektrickým proudem sinusového průběhu prostřednictvím tenkých elektrod a na každém piezoelektrickém disku probíhá cyklická deformace, která vytváří mechanické kmitání. [37]

Z důvodu špatných mechanických vlastností v tahu je středem piezoelektrických disků veden většinou titanový šroub, který slouží k předepnutí soustavy měniče. [37]



Obr. 6: Schéma piezoelektrického měniče [37]

Úkolem posilovače je přenést mechanické kmitání z měniče na sonotrodu. Jeho primárním účelem je zesílení mechanických vibrací produkovaných měničem. Druhým účelem je poskytnout montážní bod pro připevnění sonotrody.

Zesilovače, které mění amplitudu, jsou obrobena s rozdílnou hmotností na obou stranách zesilovače. Pokud je konec s nižší hmotností připevněn k sonotrodě, amplituda se zvýší. V opačném připevnění zesilovače dochází ke snížení amplitudy. Velikost zvýšení amplitudy je úměrná rozdílu hmotností na obou stranách zesilovače.

1.5 Uplatnění svařování ultrazvukem

V současné době je svařování ultrazvukem velmi používanou technologií, především pro sériovou výrobu. Tento typ spojů se vyskytuje v mnoha průmyslových aplikacích, jako jsou automobilové komponenty, převody, přípojnice, pojistky, jističe, zapalovací moduly, kontakty a další. [7]

1.5.1 Princip svařování kovů

Ultrazvukové svařování má schopnost svařovat kovy rozdílné teploty tání, které normálně tvoří ve svaru křehké slitiny. Dále spoje, které jsou blízko součástí citlivých na teplo. [8]

Vzhledem ke způsobu svaření, je tato metoda podobná metodě třecí, nebo způsobu svařování za studena. Teplo je vyvoláno třením, které způsobuje kmitání. Toto teplo není dostatečně vysoké, aby došlo k roztavení svařovaného materiálu. Způsobuje difúzi atomů, pohyb dislokací a vakancí. To vše probíhá přibližně při 60% teploty tavení svařovaných materiálů a bez přídavného materiálu. [11]

Svarový spoj má 3 fáze:

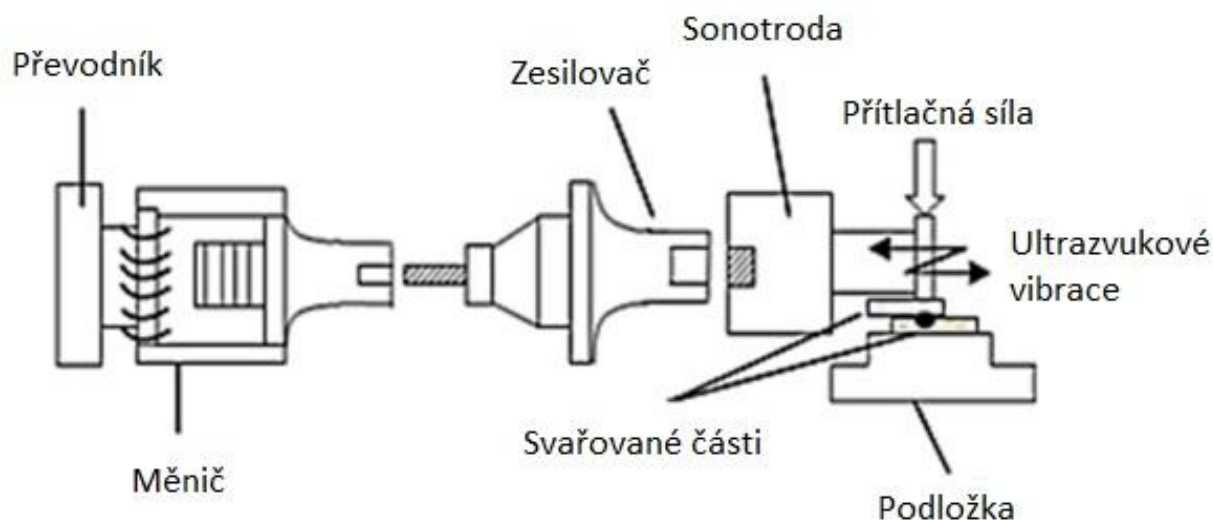
- Tvorba kontaktů – začíná působení meziatomových sil, přesněji Van Der Waalsových vazeb
- Tvorba aktivních center svaru – mřížkové poruchy začínají působit s polem elastických deformací
- Objemové procesy – Nastávají po utvoření aktivních center svaru. V oblasti styku materiálů se tvoří pevné vazby (mikrosvary), které jsou doprovázeny difúzními procesy, relaxací napětí, rekrystalizačními jevy apod. [3] [11]

Z makroskopického pohledu tření způsobené kmitáním narušuje vznik oxidů. Pokud by k tomuto narušení nedošlo, svarový spoj by nemohl vzniknout. Zároveň se zarovnávají povrchové nerovnosti a teplota stoupá. Při ustálení teploty vznikají vazební plochy, které se rozšíří po celé svařované ploše a vzniká svarový spoj. [3]

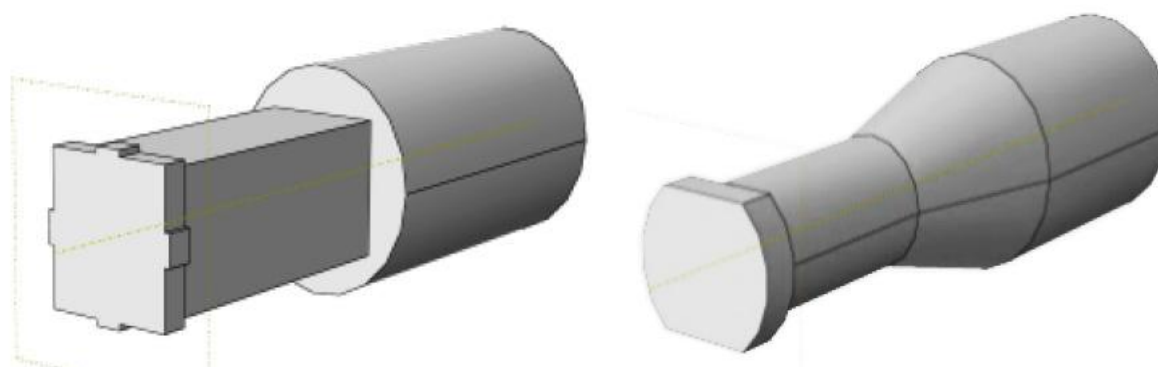
1.5.2 Svaření drátu s plechem stupňovitou sonotrodou [7]

Ultrazvukové svařování drátu k plechu je názorným příkladem této technologie. Svařovací soustava se skládá z klasických komponent s tím rozdílem, že sonotroda je uložena axiálně (obr. 7).

Pro vytvoření požadované přitlačné síly je zde použit pneumatický systém. Kvalita spoje je ovlivněna geometrií svaru, čistotou povrchu a svařovacími parametry. Pro tento případ jsou použity dva typy stupňovitých sonotrod odlišného tvaru. Typ I je stávající tradiční sonotroda s odlišným tvarem průřezu a jeho náhlou změnou, běžně používaná pro spojování kovového drátu s kovovým plechem. Typ II je sonotroda stejného průřezu s jeho postupnou změnou pomocí zužujícího se profilu uprostřed sonotrody (obr. 8).



Obr. 7: Schéma přístroje [7]



Obr. 8: Vlevo stupňovitá sonotroda typ I, vpravo stupňovitá sonotroda typ II [7]

Hladiny napětí u sonotrody typu II jsou až o 57% nižší než u sonotrody typu I. Toto snížení napětí je způsobeno postupnou změnou průřezu ve středu sonotrody a vede k prodloužení životnosti nástroje. Dále má tvar sonotrody vliv i na pevnost v tahu svarového spoje. Opět pomocí sonotrody typu II je pevnost v tahu o 37% větší.

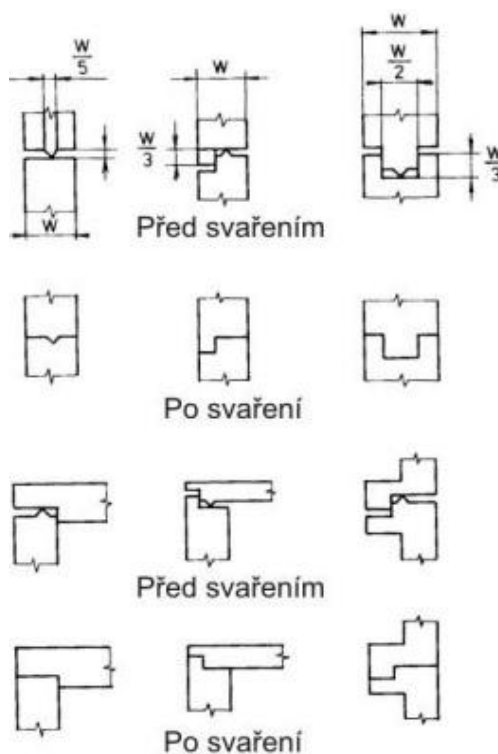
1.5.3 Svařování plastů

Pro svařování plastů je proces krajně odlišný. Část energie ultrazvuku je rozptýlena díky mezimolekulárnímu tření, což má za následek vznik frikčního tepla. Toto teplo roztaví materiál v místě svaru, po přerušení vibrací roztavený materiál opět ztuhne a vytvoří spojení. [10] [37] Celý děj trvá několik desetin sekundy. [11]

Čím blíže je zdroj vibrací ke spoji, tím menší je ztráta energie absorpcí. Pokud je vzdálenost od zdroje ke spoji menší než 6,4 mm (0,25 palce), proces je označován jako „svařování v blízkém poli“. To se používá pro krystalické látky a materiály s nízkou tuhostí, které mají

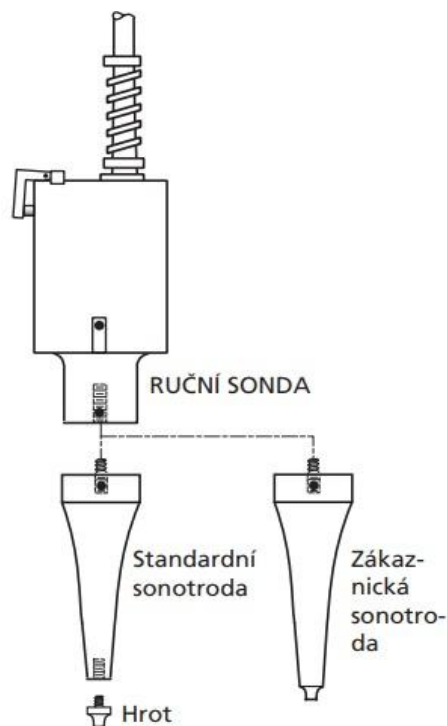
schopnost vysoce absorbovat energii. Pokud je vzdálenost mezi zdrojem a spojem větší než 6,4 mm, jedná se o „svařování na dálku“, které se využívá pro amorfní a vysoce tuhé materiály s nízkou schopností absorpce energie. [37]

Nejvíce se ultrazvukové svařování používá pro svařování termoplastů. V tomto případě je výhodné speciálně upravit svařované plochy, kdy se na jednu plochu vytvoří klín a druhá zůstává rovná (viz obr. 9). [11] [3]



Obr. 9: Plochy pro ultrazvukové svařování plastů [3]

Jednodušší svary lze provádět i ručně bez potřeby automatizace. Na obr. 10 je příklad ruční svařovací soustavy. Kabel přivádí elektrickou energii do měniče, který vytváří mechanické kmitání. Pomocí zavrtného šroubu je připojena sonotroda, která soustředí energii do místa svaru. Sonotrody se vyrábí ploché pro švové svařování, nebo s hrotem, které se používají pro bodové svařování. Hroty mohou být pevné nebo vyměnitelné, opatřené závitem. Vyměnitelné hroty se dají měnit podle svařovaného materiálu, v seriové výrobě se však nedoporučují. [10] Z důvodu vyšší hmotnosti svařovací soustavy se většinou nepřidává zesilovač. Vyšší hmotnost soustavy vede k horší manipulaci.

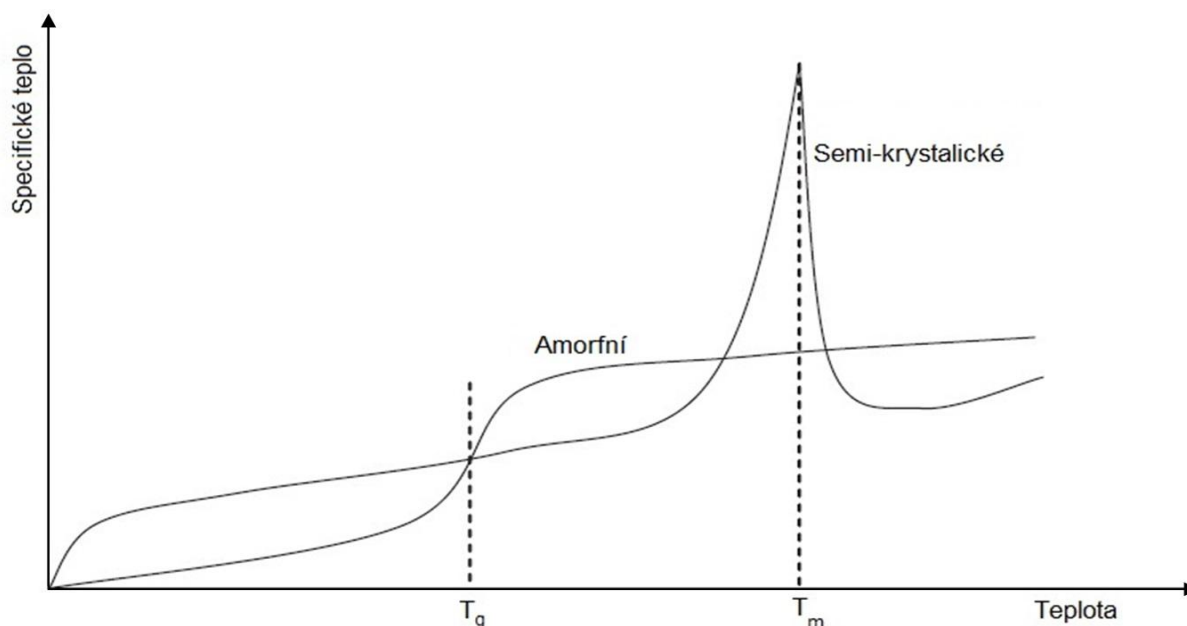


Obr. 10: Ruční sonotroda a hrot [10]

Velký vliv na průběh svařování má struktura polymeru. Amorfní polymery mají náhodně uspořádanou strukturu a taví se postupně v širokém teplotním rozsahu (obr. 11). Dosáhnou bodu skelného přechodu a poté kapalného roztaveného stavu. Tuhnutí je také postupné. Amorfní polymery přenášejí ultrazvukové vibrace efektivně a může tak být použita široká škála podmínek zpracování. [37]

Semi-krystalické plasty se vyznačují oblastmi uspořádané molekulární struktury. Pro rozrušení

těchto oblastí je potřeba velké teplo. Bod tání T_m (obr. 11) je ostrý a dochází k opětovnému tuhnutí, jakmile teplota mírně poklesne. V pevném stavu semi-krytalické molekuly absorbují velké množství energie, proto je nutná vysoká amplituda pro svařování. [37]



Obr. 11: Specifické teplo amorfních a semi-krytalických polymerů [37]

1.6 Princip a druhy sonotrod

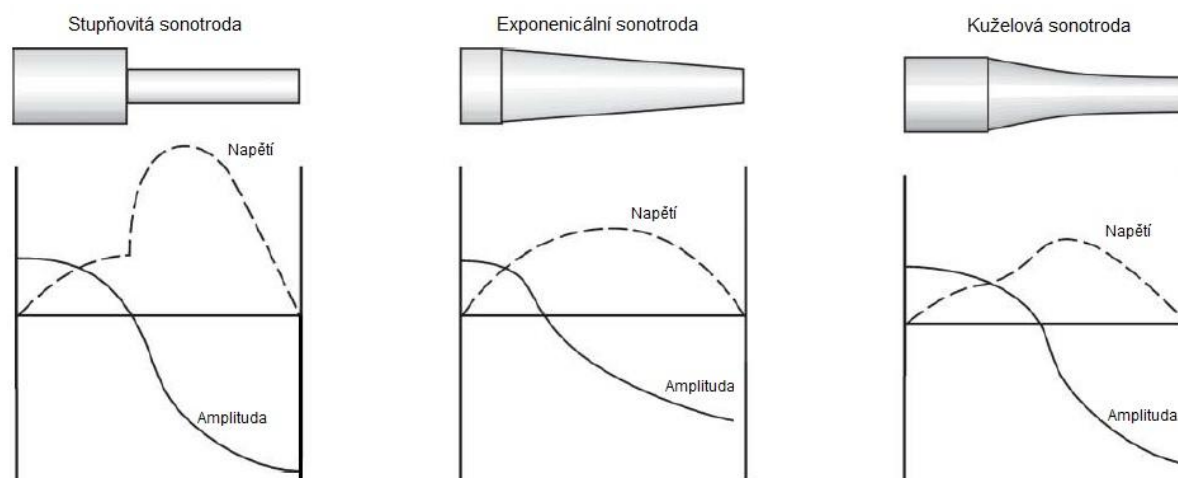
Hlavní funkcí sonotrody je přenos a koncentrace ultrazvukových vibrací na místě, kde mají být materiály svařeny. Základním požadavkem sonotrody je získání optimální amplitudy vibrací na rozhraní svaru. Podoba sonotrody je ovlivňována mnoha faktory jako tvar, velikost, profil a materiál. Volba materiálu určuje především rychlost šíření ultrazvuku v sonotrodě. Kvůli dynamické povaze sonotrody jsou prováděny činnosti ke studiu dynamických charakteristik sonotrody. Základní modální vlastnosti, jako jsou přirozené frekvence a tvarové formy sonotrod, jsou navrhovány pomocí analytických metod a metod analýzy konečných prvků. Sonotrody jsou ve většině případů vyráběny z hliníku, titanu nebo tvrzené oceli. [7]

Hliník je materiál, který lze snadno obrobit a který má výborné akustické vlastnosti. Z těchto důvodů se používá pro svařování velkých dílů a pro výrobu nových prototypů sonotrod. Jeho nevýhodou jsou špatné únavové vlastnosti a povrchová tvrdost. Z tohoto důvodu není výhodné používat hliníkové sonotrody pro dlouhodobé použití. Jeho životnost může být zvýšena přidáním povrchové vrstvy na bázi chromu nebo niklu. [7]

Titan má dobrou tvrdost, únavovou pevnost a výborné akustické vlastnosti. Jeho nevýhodami jsou však obtížná zpracovatelnost a vysoké náklady. Po přidání povlaku na bázi karbidů je možné prodloužit životnost titanové sonotrody. [7]

Ocelové sonotrody se považují za nejuniverzálnější. Jejich akustické vlastnosti jsou po vhodném protváření a tepelném zpracování srovnatelné s titanem či hliníkem. Z hlediska únavové pevnosti jsou mírně za titanem, ale z ekonomické stránky jsou ocelové sonotrody výhodnější. [7]

Odchytky ve struktuře materiálu znemožňují správné naladění, které se provádí pomocí elektronického měření frekvence. S rostoucí frekvencí klesá amplituda vibrací, roste vnitřní namáhání celé svařovací soustavy a její opotřebení. Vyšší frekvence se používají při svařování menších dílů, které by vysokou amplitudu vibrací nevydržely. Právě z hlediska frekvence se svařování ultrazvukem dělí na nízkofrekvenční (20 kHz) a vysokofrekvenční (40 kHz). Podle tvaru mohou být sonotrody rozděleny na stupňovité, exponenciální nebo kuželové. Jejich tvary, průběh napětí a průběh amplitudy sonotrodou je znázorněn na obr. 12. [10]

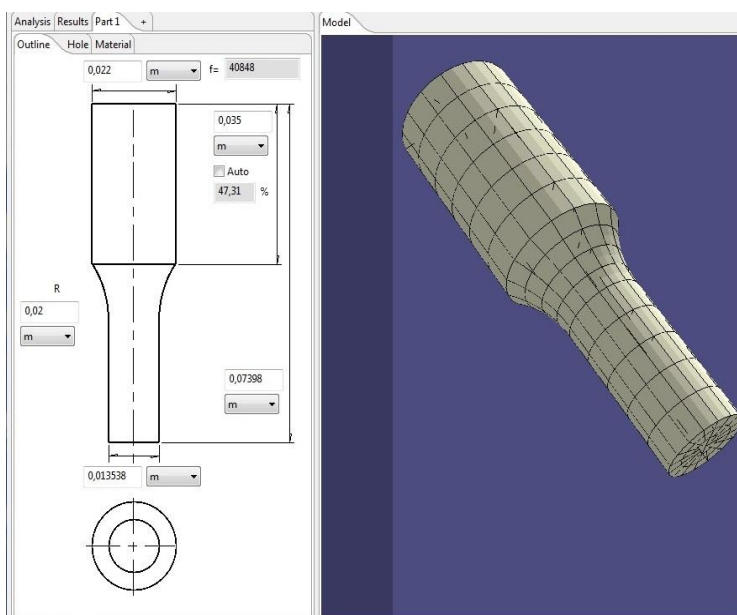


Obr. 12: Průběh amplitudy a napětí různými typy sonotrod [37]

Stupňovité sonotrody - stupňovitý profil sonotrod (obr. 13) se používá v různých ultrazvukových aplikacích svařování kovů. Stupňová sonotroda nabízí mnoho výhod, jako jsou vyšší zisk amplitudy, snadnost výroby a prodloužená životnost. Výhodné je navrhnout sonotrodu s vyšším ziskem amplitudy při zachování co nejmenší úrovně napětí v sonotrodě. Kritický aspekt konstrukce sonotrody pro ultrazvukové svařování kovů je rezonanční frekvence. Sonotroda musí odpovídat pracovní frekvenci ultrazvukového převodníku. Při

návrhu sonotrody je důležité zvážit nejdůležitější vlastnosti, jako jsou pracovní frekvence, materiál a rozměry sonotrody. [7]

Přechod mezi rozdílnými průměry sonotrody se nachází v blízkosti uzlového bodu, kde v důsledku náhlé změny průřezu dochází k vysoké koncentraci napětí. Pokud je sonotroda vystavena nadměrné amplitudě, může v tomto přechodu dojít až k selhání a destrukci sonotrody. [37]



Obr. 13: Stupňovitá sonotroda [12]

Délka sonotrod se odvíjí od vlnové délky. Celková délka se může rovnat celé nebo polovině velikosti vlnové délky λ . Sonotroda s poloviční vlnou se obvykle používá pro ultrazvukové svařování kovů, výhodou je úspora materiálu a snížení výrobních nákladů. [7]

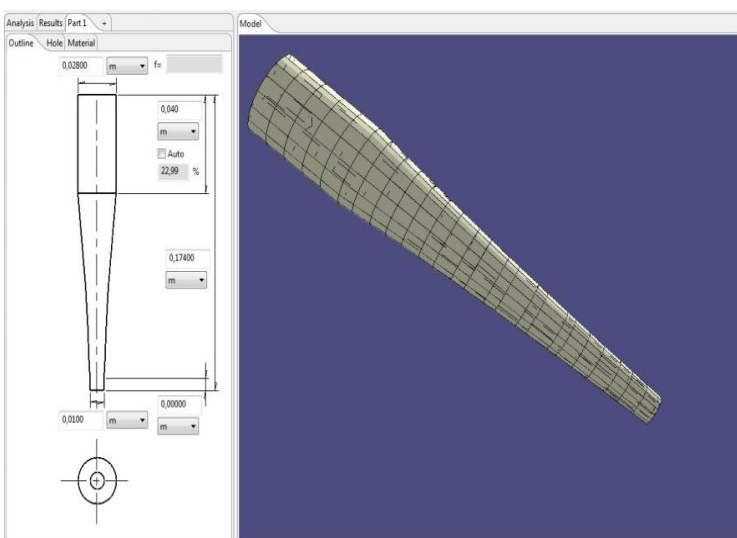
Délka části pro upínání a délka celková jsou definovány nezávisle na sobě. V těle sonotrody může být jednoduchý otvor nebo jádro. [12]

Plocha průřezu je obvykle na větším a menším konci v poměru 2:1 pro ocel a v poměru 3:1 pro titan. [7] Samotná sonotroda má schopnost zesílit vstupní frekvenci v poměru až 9:1. [37]

Exponenciální sonotrody – jejich

průřez se mění exponenciálně s délkou sonotrody (obr. 14). Tento hladký přechod rozloží napětí na větší délku a snižuje tak koncentraci napětí v jednom místě, což má pozitivní vliv na životnost sonotrody. [37]

Exponenciální sonotrody mají nižší schopnost zesílit vstupní frekvenci, proto se obecně používají pro nižší amplitudy. [37]

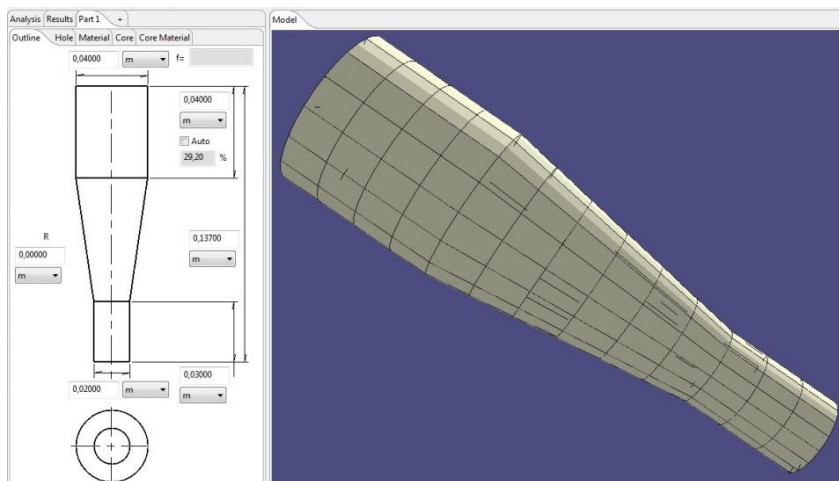


Obr. 14: Exponenciální sonotroda [12]

Tvar je definovaný pomocí dvou objemů s válcovou částí, které jsou spojeny exponenciální křivkou. Vstupní a výstupní celkové délky jsou definovány nezávisle na sobě. Opět je možné vytvoření jednoduchého vnitřního profilu nebo jádra. Vnitřní otvory mohou být také slepé. [12]

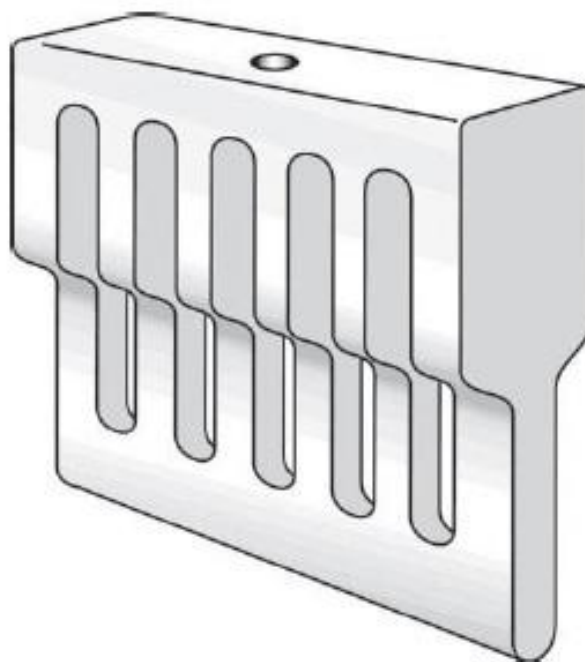
Kuželové sonotrody - jsou v podstatě stupňovité sonotrody s postupnějším přechodem přes uzlový bod (obr. 15). Nabízejí vysoké zesílení amplitudy při nízkých koncentracích napětí. [37]

Sonotroda je definovaná dvěma objemy válců, které jsou spojené částí ve tvaru komolého kužele. Délka vstupní části, výstupní části i celkové délky jsou definovány nezávisle na sobě. Opět možnost vnitřního profilu včetně slepých otvorů nebo jádra. [12]



Obr. 15: Kuželová sonotroda [12]

Větší svařovací sonotrody (obvykle větší než 90 mm na šířku nebo průměr) mají přidáné vybrání ke snížení celkového napětí způsobeného horizontálními vibracemi. Vybrání ve skutečnosti rozděluje velké sonotrody na jednotlivé menší sonotrody a zajišťuje stejnou amplitudu po celé šířce sonotrody. Dále napomáhá ke snížení vnitřního napětí. (obr. 16). Větší složená sonotroda lze použít v případech, kde probíhá více svařovacích operací současně. Je důležité, aby byla celá sonotroda akusticky vyvážená a symetrická.



Obr. 16: Svařovací sonotroda s vybráním [37]

1.6 Teplota a napětí na rozhraní svaru [8]

Měření teploty generované v oblasti svaru je důležité pro stanovení okolí svaru ovlivněné teplem a množství vyvinuté teploty. Vyvinutá teplota ve svaru je více než 40% teploty tání svařovaného materiálu.

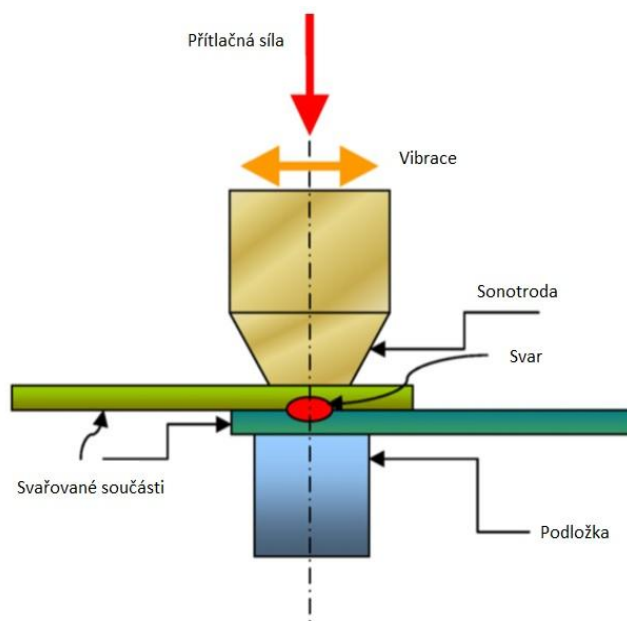
Během svařování ultrazvukem se teplo vytváří na svarovém rozhraní a okolí, jakož i na horní ploše sonotrody v důsledku plastické deformace a tření. Obr. 17 ukazuje situaci při svařování.

Výroba tepla a následná změna teploty má významný dopad na vlastnosti svařovaného spoje.

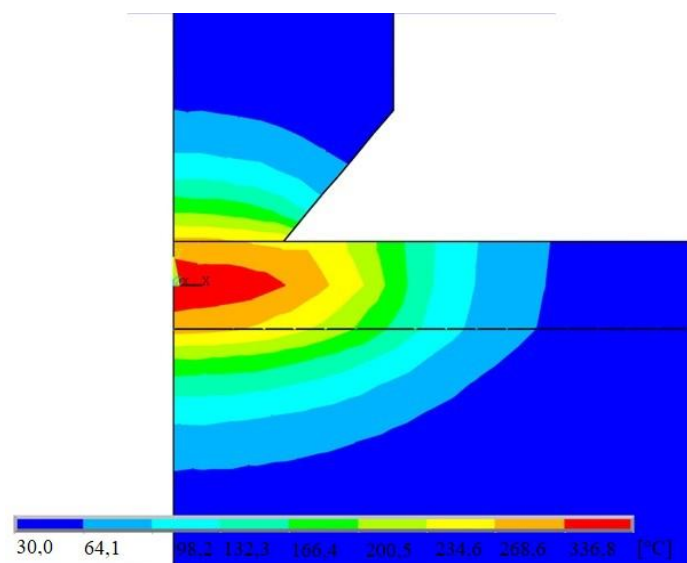
V počáteční fázi svařování dochází k plastické deformaci na rozhraní mezi sonotrodou a svařovanou součástí, zatímco špička nebo vroubkování na sonotrodě zapadá do povrchu součásti. Tímto procesem se začíná vytvářet teplo. Typický svařovací cyklus je 20 až 25 krát delší než počáteční fáze, proto tato zahřívací fáze na sonotrodě bývá zanedbána.

Na začátku svařovacího cyklu se vytváří deformační ostrůvky, které se vyskytují náhodně napříč deformační zónou. Dále se v deformační zóně zvyšuje teplota. Rychlost zvyšování teploty je závislá na tepelné vodivosti svařovaného materiálu. Celková energie vyvinutá na všech ostrůvcích je rovnoměrně rozdělena po celém objemu deformační zóny.

Názorný příklad rozložení teploty ve svaru je na obr. 18. Jedná se o svařování hliníkových součástí. V tomto případě je použita upínací síla 1 600 N a maximální získaná teplota je 336 °C. Maximální teploty



Obr .17: Schéma průběhu svařování [8]

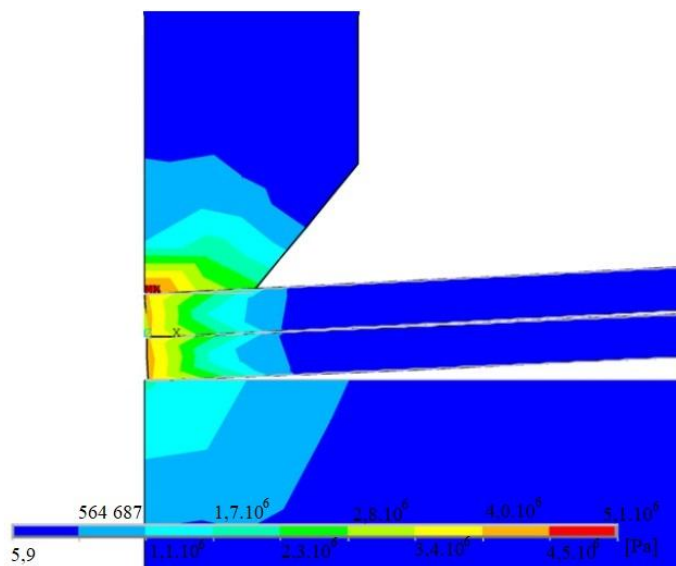


Obr. 18: Průběh teploty ve svařovaných součástích [8]

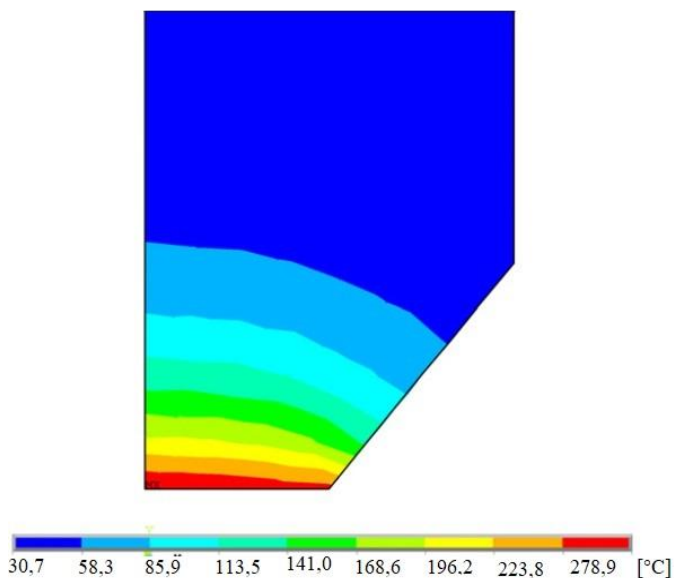
bývá dosaženo v místě, kde se nejvíce soustředí energie ultrazvuku. Mimo svar má soustava teplotu okolí 30 °C. Tepelně ovlivněná oblast v součásti je v tomto případě přibližně 30 mm od místa svaru.

Obr. 19 ukazuje rozložení napětí. Součást má snahu se během procesu odchýlit od podložky. Z tohoto důvodu je důležité svařované součásti dostatečně upevnit. K tomu se ve většině případů používá různých upínacích přípravků. Dalším důležitým faktorem je velikost upínací síly. Při jejím zvýšení se zvyšuje i napětí uvnitř svařované součásti.

Průběh teploty přímo v sonotrodě je znázorněn na obr. 20. Tepelně ovlivněná oblast v sonotrodě je poměrně malá. Je to způsobeno především špatnou tepelnou vodivostí nástrojové oceli, ze které je sonotroda vyrobena.



Obr. 19: Průběh napětí ve svařovaných součástích [8]



Obr. 20: Průběh teploty v sonotrodě [8]

2. Materiály pro sonotrody, příprava polotovaru kováním

Pro sonotrody byly zvoleny oceli W. Nr. 1.3343 (ČSN 19 830) a W. Nr.1.3243 (ČSN 19 852), které patří do kategorie rychlořezných ocelí pro práci za studena. Hutní výroba polotovarů z rychlořezné oceli je technologicky náročná. Ocel se převážně vyrábí v elektrických obloukových pecích. Pro menší objemy vyráběné oceli se osvědčily i pece indukční. Výroba probíhá přetavením tříděného odpadu a následnou přísadou legur pro docílení požadovaného chemického složení, následuje odlévání do kokil. [13]

Pro tvářenou rychlořeznou ocel je typická vláknitá struktura. Řádky tvoří komplexní karbidy chromu, wolframu, molybdenu a vanadu různých velikostí. Rychlořezné oceli jsou obtížně tvařitelné za tepla. [13]

Po tváření za tepla následuje vždy pozvolné chladnutí a žihání. Rychlořezné oceli jsou kalitelné na vzduchu a při rychlém ochlazení z dotvářecích teplot mohou vznikat kalicí trhliny. [13]

2.1 Ocel W. Nr. 1.3343 [14]

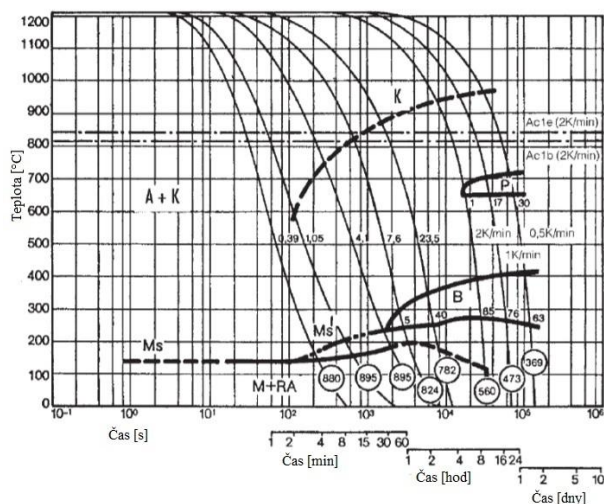
Ocel W. Nr. 1.3343 je ekvivalentem oceli ČSN 19 830 nebo EN ISO HS6-5-2. Ocel se řadí k výkonným rychlořezným ocelím s velkou odolností proti opotřebení a proti popuštění. Obvykle se používá na značně namáhané nástroje k obrábění materiálu se střední a vyšší pevností, např. výkonné frézy, vrtáky, závitníky apod.

Prvek	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	W
Hmotnost [%]	0,80-0,88	≤ 0,45	≤ 0,45	3,80-4,50	4,70-5,20	1,70-2,10	5,90-6,70

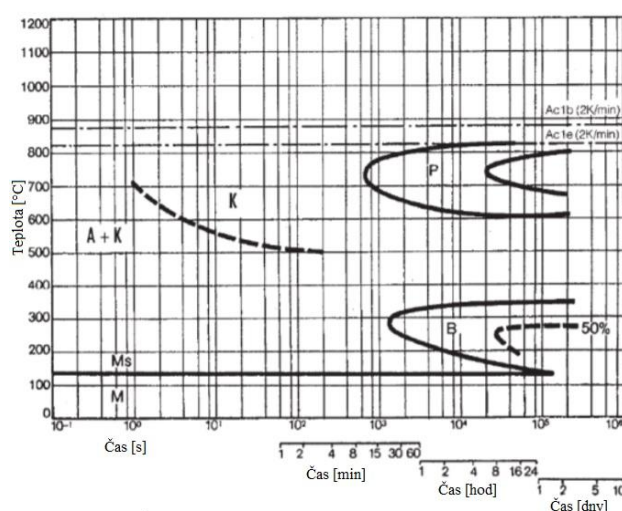
Tab. 1: Chemické složení oceli W. Nr. 1. 3343 (ČSN 19 830)

Operace	Teplota [°C]	Max. tvrdost
Tváření	900 – 1150	-
Žihání na měkko	780 – 820	270 HB
Kalení	1150 – 1250	66 HRC
Popouštění	520 - 640	61 HRC

Tab. 2: Doporučené teploty tepelného zpracování pro ocel W. Nr. 1.3343 (ČSN 19 830)



Obr. 21: ARA diagram oceli W. Nr. 1.3343 [14]



Obr. 22: IRA diagram oceli W. Nr. 1.3343 [14]

2.2 Ocel W. Nr. 1.3243 [15]

Ocel W. Nr. 1.3243 je ekvivalentem oceli ČSN 19 852 nebo EN ISO HS6-5-2-5. Jedná se o vysoce výkonnou rychlořeznou ocel s přísadou 5% kobaltu. Tato ocel má zvýšenou tvrdost při vyšších teplotách a zvýšenou odolnost proti popuštění. Při vyšší tvrdosti je i dostatečně houževnatá.

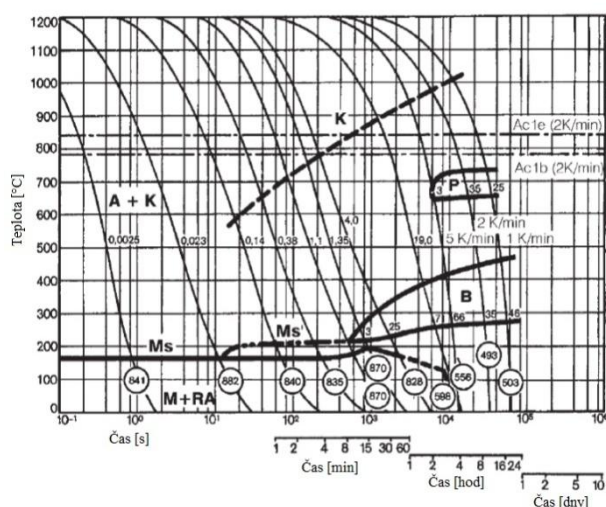
Nejčastější použití je pro soustružnické a hoblovací nože určené pro obrábění materiálů o vyšší pevnosti a houževnatosti. Je vhodná i pro obrábění austenitických korozivzdorných ocelí. Dále pro frézy, vrtáky, závitníky a výkonné nástroje pro obrábění dřeva a kompozitních materiálů.

Prvek	C	Si	Mn	Co	Cr	Mo	V	W
Hmotnost [%]	0,80 - 0,88	≤ 0,45	≤ 0,45	4,50 - 5,00	3,80 - 4,50	4,70 - 5,20	1,70 - 2,10	5,90 - 6,70

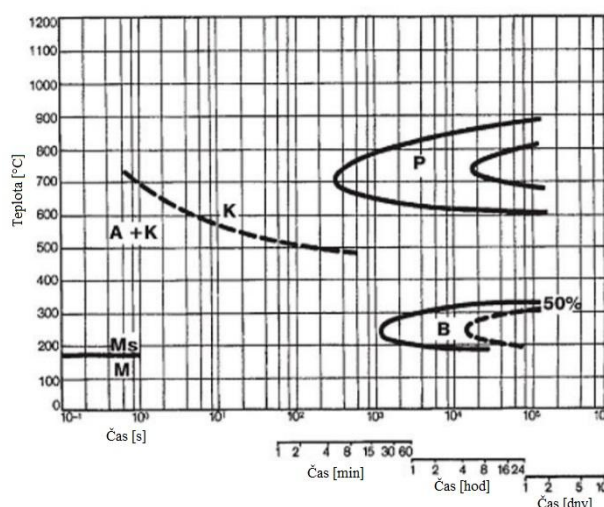
Tab. 3: Chemické složení oceli W. Nr. 1.3243 (ČSN 19 852)

Operace	Teplota [°C]	Max. tvrdost
Tváření	900 – 1100	-
Žíhání na měkko	770 – 840	270 HB
Kalení	1200 – 1260	66 HRC
Popouštění	550 - 580	61 HRC

Tab. 4: Doporučené teploty tepelného zpracování pro ocel W. Nr. 1.3243 (ČSN 19 852)



Obr. 23: ARA diagram oceli W. Nr. 1.3243 [15]



Obr. 24: IRA diagram oceli W. Nr. 1.3243 [15]

2.3 Tvařitelnost rychlořezných ocelí

Rychlořezné oceli patří mezi obtížně tvařitelné materiály s úzkým rozsahem tvářecích teplot. Vyznačují se velkým množstvím ostrohranných karbidů různých typů (viz tab. 5). Některé z nich se během tváření rozpustí, jiné zůstanou a během tváření se pouze drtí, rozlamují a přemísťují. [16] [17]

Typ karbidu	Tvrdość [HV 0,1]	Prvky (M)	Charakteristika
M_3C	900 - 1000	Fe, Mn	Karbid cementického typu, je relativně měkký
$M_{23}C_6$	1000 - 1000	Cr	Při ohřevu na kalící teplotu se zcela rozpustí, chrom přechází do tuhého roztoku a zvyšuje prokalitelnost oceli
M_6C	1200 - 1300	W	Při ohřevu na kalící teplotu se zčásti rozpustí v austenitu, zčásti zůstává zachován a omezuje růst urna austenitu
M_7C_3	1600 - 1800	Cr	Relativně vysoká tvrdość
M_2C	1700 - 1900	W, Mo	Precipitují ve struktuře při popouštění na teplotu 500 – 600 °C
MC (M_4C_3)	2200 - 3000	V	Jemné, velmi tvrdé karbidy, které se při austenitizaci jen zčásti rozpustí a zabraňují zhrubnutí austenitického zrna. Dále precipitují ve struktuře při popouštění na 500 – 600 °C

Tab. 5: Typy karbidů a jejich charakteristika [17] [28]

Přítomnost nerozpuštěných karbidů ve struktuře během kování zabraňuje růstu austenitického zrna a jeho zhrubnutí. Při překročení horní kovací teploty dochází k rozpuštění karbidů a hrozí rychlé zhrubnutí zrna. Během poklesu teploty dochází k zvyšování přetvárné pevnosti a ke vzniku nehomogenního teplotního pole způsobené nízkou tepelnou vodivostí rychlořezné oceli, které zvyšuje riziko trhlin při tváření. Dolní kovací teplota 900 °C souvisí s transformací austenitu na ferit. Dle rovnovážného diagramu pro ocel W. Nr. 1.3343 s obsahem 0,9 % uhlíku (obr. 25), dochází k transformaci přibližně při teplotě 870 °C. Při kování pod dolní kovací teplotou se k velkému napětí způsobenému vnějšími silami a nehomogenním rozložením teplotního pole přidává ještě napětí transformační. [16] [17]

Během tváření za tepla dochází k rekrytalizaci základní austenitické matrice, karbidy ovšem nerekrystalizují, pouze se přemísťují ve směru toku materiálu, rozlamují se a drtí na menší. Tento jev v případě toku materiálu v jednom směru vede ke vzniku vláknitosti a k rozdílným mechanickým vlastnostem tvářené oceli v různých směrech. Tento stav je zejména pro obráběcí nástroje nežádoucí. [16]

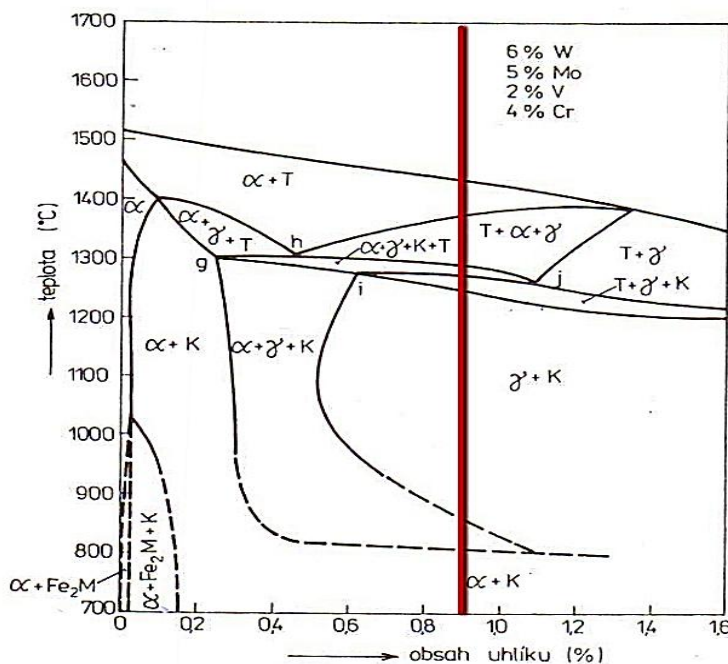
Rychlořezné oceli se vyznačují vysokým deformačním odporem hodnot 160 – 200 MPa při teplotě

1 100 °C. Vysoký deformační odpor způsobuje strmý gradient napjatosti v závislosti na velikosti deformace a geometrii kusu. S tím opět souvisí riziko lomového porušení. [17]

Vlastnímu tváření předchází ohřev na tvářecí teplotu. Režim ohřevu se skládá obvykle z předehřevu a vlastního ohřevu na tvářecí teplotu. Některé druhy ocelí vyžadují pozvolný ohřev při stupňovitě se zvyšující teplotě. Dále je nutno dbát na rovnoměrné rozložení teploty v celém průřezu ohřívaného dílu po dosažení tvářecí teploty. Zejména během kování větších průřezů jsou nutné opakované přihřevy. Po každém novém přihřevu má následovat dostatečně velký úběr. [24]

Po tváření následuje dostatečně pomalé chladnutí. Řada nástrojových ocelí je kalitelná na vzduchu a pnutí vzniklé strukturálními přeměnami může vést při rychlém chladnutí ke vzniku trhlin. Ochlazování z dotvářecí teploty proto probíhá buď v pomalu stápné peci, nebo ve vhodném izolačním zásypu. [24]

Při tváření za tepla nelze docílit, aby povrch výkovku byl zcela bez různých nedokonalostí (otlaků, rýh apod.) nebo v extrémním případě povrchových vad (necelistvostí). Povrchová vrstva bývá také do určité hloubky oduhličena. Výrobce proto stanovuje tzv. minimální přídavky na opracování. Teprve odstraněním vrstvy, která odpovídá přídavku na opracování, se získá bezvadný povrch bez oduhličené vrstvy. U výkovků je obvyklé udávat tzv. „čistý



Obr. 25: Rovnovázný fázový diagram pro ocel W. Nr. 1.3343 (ČSN 19 830) [17]

rozměr“, kdy se po opracování očekává povrch bez vad a oduhličení. Výrobce pak podle jeho výrobních možností stanoví „kovářský“ rozměr, kam započítá i přírůstek na opracování. [24]

Nesprávným postupem tváření nebo vychlazování výkovku mohou vnikat vnitřní vady (různé druhy necelistvostí). Proto se hotové výkovky kontrolují i na vnitřní vady. Nejčastější je zkouška ultrazvukem. [24]

2.4 Očekávaný přínos kování

Pro nástroje z rychlořezných ocelí je velmi důležitý stav výchozího polotovaru pro další operace. Tento stav je udán jak metalurgickými pochody, tak i mechanickým zpracováním. Ingoty z nástrojových ocelí se kovají jednak pro získání požadovaného tvaru a rozměrů, ale v tomto případě je velmi důležitým cílem kování úprava struktury oceli. Jde především o rozbití karbidického síťoví po hranicích austenitických zrn. [30]

Při jednosměrném kování dochází k výrazné vláknitosti karbidické fáze, vzniká tzv. anizotropie a polotovar má rozdílné vlastnosti napříč a podél vláken. Anizotropie má výrazný vliv na životnost tvarově složitějších nástrojů, kdy během dlouhodobého namáhání přispívá k destrukci díky křehkému porušení. Vlákňitost karbidické fáze má dále negativní vliv na podíl zbytkového austenitu, který zhoršuje konečné vlastnosti materiálu. [30]

Pro zabránění karbidické vláknitosti je nutné zařadit dostatečný počet operací pýchování – prodlužování a dosáhnout tak vysokého stupně prokování. [30]

Zde je pro kování použita technologie reverzního kování. Tato technologie je kombinace tvářecích operací, kdy je polotovar kován takovým způsobem, aby směr hlavního toku probíhal postupně ve všech třech osách polotovaru a v následující operaci byl směr hlavního toku opačný, než v některé z předcházejících operací. Částice kovu se po dokončení kování dostanou do přibližně stejných poloh, které zaujímaly před počátkem tváření. [31]

Použitím technologie reverzního kování vzniká velmi jemnozrná struktura, obsahující rovnoměrně rozmístěné velmi malé karbidy. Kromě vysokého stupně prokování dochází tedy i k potlačení tvorby vláknitosti struktury.

Takto protvářená struktura by měla mít pozitivní vliv na rychlost šíření ultrazvuku v materiálu a na stabilitu ultrazvukové vlny během svařování.

2.5 Stupeň prokování [38]

Díky několikanásobnému prokování dochází k vysokému stupni deformace, ze kterého plyne i vysoký stupeň prokování. Pro výpočet stupně prokování existuje několik metod.

Dle Elfmarka (ČSN 420276)

$$P_k = A^k * P^k * K \quad (6)$$

Kde P_k – stupeň prokování

A – pēchovací ekvivalent (volí se v rozmezí 0,7 až 0,9)

P – stupeň pēchování (poměr průřezů plasticky pētvořeného pēípravku a původního polotovaru)

K – stupeň prodlužování (poměr příčných průřezů původního polotovaru a výkovku)

k – počet pēchovacích operací

Dle Plzeňských kováren

$$P_k = \frac{F_p}{F_k} \geq 3,1 \quad (7)$$

Kde F_p – průřez napēchovaného ingotu [mm²]

F_k – průřez výkovku po prodloužení [mm²]

V pēípadē opakovaného pēchování se pomēry napēchovaného průřezu a průřezu po prodlužování mezi sebou násobí.

Pro dosažení dlouhé životnosti a spolehlivosti nástrojů z rychlořezné oceli je požadován vysoký stupeň prokování. Při výpočtu dle Elfmarka je to $P_k \geq 10$ a pomocí výpočtu dle Plzeňských kováren $P_k \geq 15$.

3. Návrh tvaru sonotrody s využitím numerické simulace na základě změřené rychlosti ultrazvuku, výpočet napětí a pracovní frekvence

Tvar sonotrody je ovlivněn důležitými parametry. Materiál sonotrody má přímý vliv na rychlost šíření ultrazvukové vlny sonotrodou a tím i na její tvar. Další důležitou funkcí je frekvence, na které sonotroda reálně pracuje. Tyto parametry jsou zahrnuty v numerických simulacích.

3.1 Využití numerické simulace [25]

Pro návrh geometrie sonotrody je používán program Sonoanalyzer od společnosti PowerUltrasonics. Tento program umožňuje numerické simulace založené na metodě konečných prvků. Na základě vložených dat program simuluje napětí v sonotrodě, průběh kmitání sonotrodou a frekvenci, při které sonotroda pracuje.

Samotná práce v softwaru Sonoanalyzer by se dala přirovnat ke speciálnímu webovému prohlížeči. Zapisuje požadavky uživatele (tvar modelu, rozměry a vlastnosti materiálu) do dotazu a odešle jej do brány serveru.

Brána serveru odešle dotaz na databázový server nebo na server konečných prvků (FEA), záleží na výběru uživatele. Databázový server vrátí odpověď obvykle během několika sekund, ale existují určitá omezení:

- Předpokládané frekvence jsou o něco méně přesné, než pro úplné výsledky přes server konečných prvků (FEA).
- Některé speciální režimy nemusí být zahrnuty.
- Rozsah rozměrů a materiálových vlastností je menší

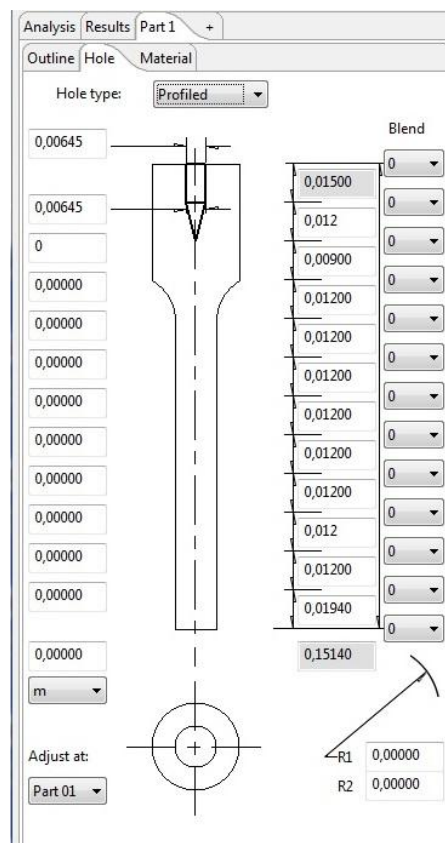
Tato metoda je založena pro rychlou, spíše předběžnou analýzu za předpokladu, že se zadaná sonotroda vejde do povoleného rozsahu rozměrů.

Úplná analýza konečných prvků (FEA) trvá obvykle 20 až 40 sekund, ale může i déle v závislosti na modelu a rozměrech. Výhodou této analýzy je, že zobrazuje více režimů a nabízí nejlepší možnou přesnost.

Pro některé modely se složitější geometrií je k dispozici pouze metoda konečných prvků (FEA). Například uživatelsky definovaná sonotroda v axiálním režimu (obr. 26) má svou geometrii definovanou třinácti průměry a dvanácti délkami. S tolika možnými vstupy je rozsah geometrie obrovský a sestavení výsledku z databázového serveru není praktické.

Všechny výsledky jsou ukládány do mezipaměti v bráně serveru, takže pokud se stejný dotaz použije podruhé, odpověď se vrátí okamžitě.

Podrobnější popis uživatelského rozhraní v programu Sonoanalyzér je popsán v mé bakalářské práci s názvem „Měření ultrazvukových parametrů kované nástrojové oceli“. [26]



Obr. 26: Uživatelsky definovaná sonotroda [25]

3.2 Práce v softwaru

Analýza

V první části softwaru se volí typ analýzy. Základní typy módů jsou rozděleny na radiální nebo axiální. Každý mód je dále rozdělený do analýzy pro jednotlivé modely. V první části se řeší základní informace o modelu, jako jsou jméno, třída a zdroj dat, na základě kterých bude model vyhodnocen.

Rozměry

V druhé části se zadávají přesné rozměry návrhu sonotrody. Rozměry mohou být zadávány v milimetrech, metrech nebo palcích.

Materiál

Ve třetí části se vybírá druh materiálu sonotrody. Software obsahuje nadefinované materiály. Vybrat si lze z oceli, hliníku nebo titanu. Poslední možností je uživatelsky definovaný materiál. V tomto případě si uživatel vyplní všechny parametry svého materiálu, kterými jsou modul pružnosti v tahu, hustota materiálu a Poissonova konstanta. Na základě těchto informací software vypočítá rychlost šíření podélné vlny ultrazvuku ve směru rovnoběžném a kolmém k ose sonotrody.

Výsledky

V poslední části probíhá vyhodnocení zadaných parametrů. Nejdříve se musí potvrdit změny tlačítkem „recalculate“ (přečítat) a po načtení se spustí animace. Pomocí přepínání módu se může měnit typ ultrazvukových vln. Výstupem je také vypočtená hodnota frekvence, na kterou by se měla sonotroda ve skutečnosti naladit.

3.3 Určení vstupních parametrů pro materiál [26]

Na základě změřených rychlostí ultrazvukové vlny v podélném i příčném směru se určí další parametry pro materiál. Všechny následující parametry jsou potřebné k úspěšnému určení pracovní frekvence sonotrody a napětí v sonotrodě.

Modul pružnosti v tahu

$$c_p = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \Rightarrow E = c_p^2 * \rho \quad (8)$$

c_p – rychlost šíření ultrazvuku podélné vlny [m/s]

E – modul pružnosti v tahu [Pa]

ρ – hustota materiálu [kg/m³]

Poissonovo číslo

$$\mu = \frac{c_p^2 - 2 * c_s^2}{2 * (c_p^2 - c_s^2)} \quad (9)$$

μ – Poissonovo číslo [-]

c_p – rychlost šíření podélné vlny ultrazvuku [m/s]

c_s – rychlost šíření příčné vlny ultrazvuku [m/s]

Modul pružnosti ve smyku

$$G = \rho * c_s^2 \quad (10)$$

G - modul pružnosti ve smyku [Pa]

c_s – rychlost šíření příčné vlny ultrazvuku [m/s]

ρ – hustota materiálu [kg/m³]

4. Obrábění rychlořezných ocelí

Z hlediska technologie obrábění je obrobitelnost základní vlastností materiálu. V obecném smyslu ji lze definovat jako míru schopnosti daného materiálu být efektivně zpracován některou z metod obrábění. Je hlavním činitelem, který ovlivňuje volbu řezných podmínek pro funkci nástroje při všech metodách obrábění. [39]

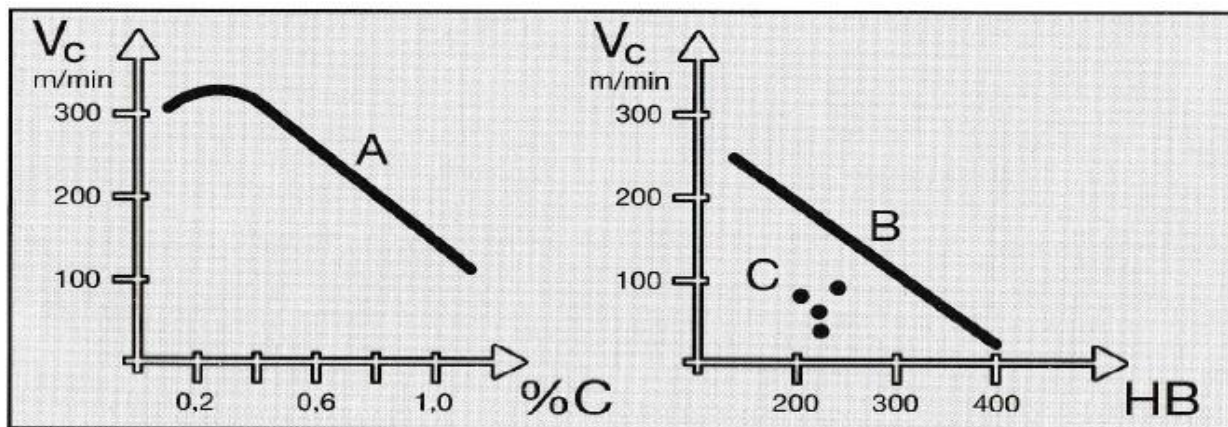
4.1 Obrobitelnost nástrojových ocelí

Na nástrojové oceli jsou vždy kladeny vysoké požadavky ohledně mechanických vlastností. Následující příklady vystihují požadavky a vlastnosti materiálu, které mají negativní vliv na obrobitelnost. [40]

- Vysoká rázová houževnatost materiálu, vysoký stupeň čistoty materiálu → nepříznivé utváření třísky
- Vysoká odolnost proti opotřebení, větší výskyt tvrdých vměstků, vysoký stupeň tvrdosti → krátká trvanlivost břitu nástroje

Při výrobě nástrojů z rychlořezné nástrojové oceli se nejprve určuje, jaké vlastnosti, tvary, přesnost a konečnou úpravu tyto nástroje mají mít. Do této úvahy se započtou i náklady a životnost. Tvrdost, pevnost a obsah legujících prvků jednotlivých materiálů určují zcela rozdílné podmínky, za kterých budou obráběny. [40]

Stupeň tvrdosti obrobku bezprostředně ovlivňuje obrobitelnost. Na obr. 27 jsou znázorněny křivky vlivu tvrdosti na řeznou rychlost. Křivka A znázorňuje vliv obsahu uhlíku. Přímka B znázorňuje vliv množství tvrdých a abrazivních vměstků v materiálech, v případě relativně malého procentuálního podílu vměstků v materiálu. Body C pak udávají pozici materiálů, které obsahují vysoké procento vměstků. [40]



Obr. 27: Vliv obsahu uhlíku a tvrdosti na obrobiteľnosť [40]

Typickými vlastnosťmi rýchlořezných nástrojových ocelí, ktoré sa prejví na obrobiteľnosti a měly by být pro praxi obrábění analyzovány, jsou: [40]

- Celková a povrchová tvrdost
- Množství a druh vměstků
- Houževnatost
- Tvrdost zatepla, zpevnění zastudena a pevnost
- Homogenita struktury
- Typ a množství legujících prvků
- Tepelné zpracování, struktura materiálu a chemické složení
- Zbytkové napětí v materiálu

4.2 Obrábění tvrdých materiálů [40]

Za tvrdé materiály pro obrábění se obvykle považují obrobky s tvrdostí přibližně 50 až 60 HRC. V minulosti byla jedinou možností obrábění těchto materiálů technologie broušení nebo obrábění při extrémně nízkých řezných rychlostech. V současné době mohou být i nejtvrší materiály třískově obráběny.

Volba nástroje pro obrábění tvrdých materiálů je ovlivňována přísnými požadavky, které jsou určovány obrobkem. V této oblasti se mohou vyskytnout problémy s velmi rychlým opotřebením břitu nástroje, tvorbou trhlin nebo vydrolováním břitu. Pro splnění všech požadavků obrábění byly vyvinuty speciální řezné materiály, mezi které patří hlavně určité druhy keramiky a kubický nitrid bóru.

Největší problémy při obrábění tvrdých materiálů jsou:

- Vysoké teploty v oblasti řezání
- Vyšší a proměnná velikost řezných sil
- Vysoký tlak na malý průřez třísky v oblasti ostří
- Rychlé opotřebení břitu, nebo lom břitové destičky
- Pnutí v obrobku během obrábění

Při volbě typu, materiálu a geometrie břitové destičky je nutné vzít v úvahu vysoké teploty a mechanické zatížení, kterým jsou vestaveny při dané operaci a použitých řezných podmínkách.

Na břity jsou kladeny značné požadavky, především s ohledem na:

- Odolnost proti působení abrazivního opotřebení
- Chemickou stabilitu
- Tvrdost za tepla
- Pevnost v tlaku a ohybu
- Odolnost proti difúznímu opotřebení
- Spolehlivost a houževnatost břitu

Pro obrábění kalené oceli jsou nejdůležitější první tři uvedené vlastnosti.

4.3 Řezné materiály

Nejdůležitější řezné materiály pro obrábění tvrdých materiálů jsou CBN (kubický nitrid bóru) a keramika.

CBN – ideální pro obrábění kalených materiálů na bázi železa, jako jsou kovaná ocel, kalená ocel, povrchově kalené výrobky, kovy na bázi kobaltu a železa a martenzitické korozivzdorné oceli. Nejlepších výsledků dosahuje CBN u abrazivních tvrdých materiálů. Měkčí struktury způsobují zhoršení trvanlivosti břitu.

Při dodržení příznivých podmínek obrábění je možné dosáhnout vynikající kvality povrchu obrobku. Čím tvrdší obrobek je, tím více předností CBN má.

Nejvýhodnější jsou střední řezné rychlosti a relativně malé posuvy i hloubky řezu. Řezné rychlosti by neměly být zvoleny příliš nízké, aby se zabránilo případnému nebezpečí mikrovýlomů. Při obrábění s destičkami CBN zůstává nástroj obvykle chladný, protože teplo je odváděno třískami. Upřednostňuje se obrábění bez použití chladicí kapaliny.

Keramické břitové destičky – používají se ve velkém rozsahu pro obrábění tvrdých materiálů. Keramika je řezný materiál s vysokou odolností proti opotřebení, má velkou tvrdost za tepla a dobrou chemickou stabilitu. Úspěch keramiky spočívá ve správně zvolených řezných podmínkách a na dobré součinnosti všech faktorů. Mezi hlavní materiály, které jsou vhodné pro obrábění keramickými břity, patří kalené oceli, tvrzená litina a povrchově kalené obrobky. Řezná keramika pro obrábění tvrdých materiálů může být na bázi oxidu hlinitého nebo na bázi nitridu křemíku. Speciálním případem je keramika vyztužená vlákny, která se používá pro za velmi obtížných podmínek obrábění oceli nebo litiny.

Zavedením vysoce výkonných houževnatých a opotřebení odolávajících řezných materiálů se soustružení tvrdých obrobků stalo používanější technologií, než broušení. Soustružení umožňuje obrábět nejrůznější tvary, provádět různorodé operace a v neposlední řadě vykazuje vysokou produktivitu práce.

5. Tepelné zpracování, rizika při TZ

Tepelné zpracování nástrojových ocelí má ve srovnání s tepelným zpracováním ocelí konstrukčních podstatné rozdíly, které vyplývají z jejich specifických vlastností i účelu použití. Většinou jde o oceli s vyšším obsahem uhlíku a legujících prvků. Je důležité brát ohledy i na nízkou tepelnou vodivost nástrojových ocelí.

5.1 Tepelné zpracování rychlořezných nástrojových ocelí

Při tepelném zpracování nástrojů z uhlíkových a legovaných ocelí s kalící teplotou do 900 °C se volí obvykle jeden přehřev na teplotě 650 °C. Obvyklé je nepřetržité ochlazování ve vodě, v oleji, případně v solné lázni pro komplikovanější tvary. Tyto nástroje se vesměs popouštějí při nízkých teplotách. [27]

Tento postup nelze provést u rychlořezných nástrojových ocelí. Tyto oceli se vyznačují vyšším obsahem uhlíku (nad 0,7 %) a vysokým obsahem legujících prvků (v součtu více než 12%). Tyto oceli bývají legovány prvky, které rozšiřují oblast feritu a zmenšují oblast austenitu. Vlivem legování se posouvá eutektoidní bod a maximální rozpustnost uhlíku

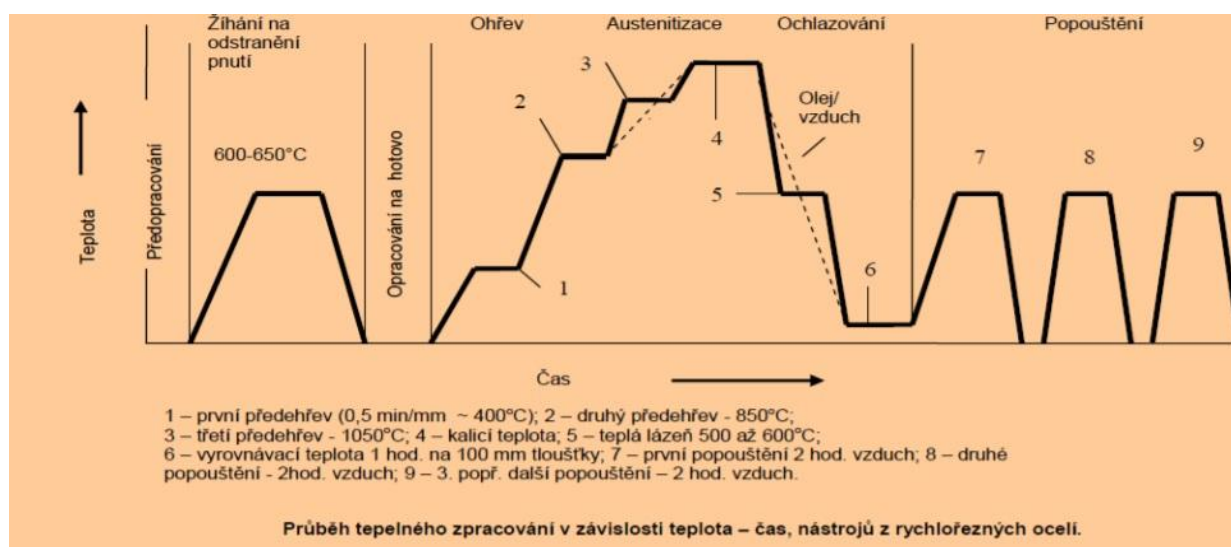
v austenitu k nižším hodnotám obsahu uhlíku. Proto se i při obsahu uhlíku nižším než 2,11% může vyskytnout ledeburit. [29]

Počátek transformace austenitu je posunutý k delším časům, proto je možné ocel kalit i na vzduchu. Rychlost ochlazování je však velmi důležitá, protože při nízké rychlosti ochlazování dochází k vylučování karbidů po hranicích zrn austenitu a dochází k poklesu houževnatosti. [27]

Kalení rychlořezných ocelí je běžně prováděno z vysoké austenitizační teploty (1 100 až 1 300 °C). Vzhledem k této vysoké teplotě a nízké tepelné vodivosti materiálu, která je způsobena přítomností velkého množství legujících prvků, je nutné ohřev provádět stupňovitě. Výše austenitizační teploty je rozhodující z důvodů procesů, které se v materiálu iniciují. Na teplotě austenitizace je závislé především množství karbidů, které se rozpustí do roztoku a způsobují obohacení austenitu uhlíkem a dalšími legujícími prvky. [31] [33]

Dalším důležitým parametrem je prodleva na austenitizační teplotě, která také se podílí na množství rozpuštěných karbidů. Ochlazení z kalicí teploty ve zvoleném prostředí musí proběhnout takovou rychlostí, aby se co nejvíce austenitu přeměnilo na martenzit. U rychlořezných ocelí však není přeměna austenitu úplná, proto je nutno počítat s vysokým podílem zbytkového austenitu. [33]

Běžně používaný postup tepelného zpracování nástrojové oceli je znázorněn na obr. 28. Nezbytné je vícenásobné popouštění, které je nutné k popouštění martenzitu vzniklého přeměnou zbytkového austenitu i ke stabilizaci struktury. [27]



Obr. 28: Obecné schéma tepelného zpracování nástrojové oceli [21]

Na rychlosti ochlazování z kalící teploty závisí konečná tvrdost daná vznikem přesyceného martenzitu. Ochlazovací rychlost by neměla být větší, než je nezbytně nutná pro překročení kritické rychlosti a dosažení požadované tvrdosti. Čím vyšší je rychlost ochlazování, tím větší zůstávají v nástroji vnitřní pnutí, které mohou vést až k destrukci nástroje. [33]

Teplota popouštění se volí podle teploty austenitizace. Pro stejný materiál lze pouze změnou teploty kalení a popouštění získat struktury s odlišnými vlastnostmi.

Pokud je kalící teplota nižší, dochází k nedostatečnému rozpuštění karbidů. Následkem toho ocel vykazuje nižší sekundární tvrdost (tvrdost po popuštění) a menší odolnost proti popuštění (menší teplotní stálost). Takto zakalená ocel má však menší podíl zbytkového austenitu, a proto vysokou tvrdost hned po zakalení. Při tomto způsobu není plně využito vlastností rychlořezných ocelí a používá se spíše pro tvarově složitější nástroje, které mají požadavek na vysokou houževnatost. Popouštění se zde provádí při nižší teplotě, přibližně 200 °C. [31]

Při vyšších kalících teplotách roste podíl rozpuštěných karbidů. Vzniká větší množství zbytkového austenitu a ocel má po zakalení nižší tvrdost. Popouštěním na vyšší teplotě, zpravidla kolem 600°C, se zbytkový austenit rozpadá a vylučují se jemné karbidy, které zvyšují tvrdost (tzv. sekundární tvrdost) a mají pozitivní vliv na životnost nástroje. Při ochlazování z popouštěcí teploty se přeměňuje další část zbytkového austenitu, proto je nutné několikanásobné popuštění. Dalším důvodem je dodání aktivační energie, díky které začne proces rozpadu zbytkového austenitu. Proto nelze provést popuštění jedním dlouhým procesem, ale je nutné pozvolné ochlazení a zopakování ohřevu. [27] [31]

5.2 Rizika při TZ nástrojových ocelí

Pro rychlořezné oceli je tepelné zpracování velkým úskalím. Při nedodržení optimální technologie (rychlost ohřevu, výše teploty, délka prodlevy, rychlost ochlazení, počet popuštění atd.) může dojít k nevratnému poškození materiálu, resp. nástroje. [31]

Tepelné zpracování nástrojových ocelí má ve srovnání s ocelmi konstrukčními zvláštnosti, které vyplývají z jejich specifických vlastností i účelu použití. Většinou jde o oceli s vyšším obsahem uhlíku a obvykle také legujících přísad, které vedou ke snížení tepelné vodivosti a tím zvýšení vnitřních pnutí. [27]

Výše kalící teploty u nástrojových ocelí neodpovídá plně diagramu Fe-Fe₃C. Zvyšováním kalící teploty vzrůstá podíl rozpuštěných karbidů a při překročení maximální kalící teploty dochází k rychlému rozpuštění karbidů po hranicích zrn. Tento děj vede k nežádoucímu

hrubnutí zrna během austenitizace a tím i k zhoršení houževnatosti. Dále se zvyšuje nebezpečí trhlin a deformaci po kalení. [27]

5.3 Tepelné zpracování ve vakuu

Vakuové pece jsou moderními zařízeními, které jsou používány pro nejrůznější účely a existuje řada konstrukčních variant. Dělí se podle konstrukčního uspořádání (komorové, šachtové, víceúčelové), podle základní konstrukční koncepce (teplostěnné, studenostěnné) nebo podle určení (bez kalící lázně a s kalící lázní). [27]

Typickým zástupcem vakuových pecí je horizontální vakuová pec. Většinou se jedná o jednokomorové pece, kde je možné k evakuovanému prostoru realizovat i chlazení v ochranné atmosféře. Vyrábí se v horizontálním i vertikálním provedení a mohou být i dvoukomorové. [27]

Tepelná izolace ohřívací (pracovní) komory bývá z grafitové tkaniny nebo keramických vláken. Jako vytápěcí tělesa se dnes běžně používají topné články z pevného grafitu nebo grafitové tkaniny. Vakuové pece mají relativně vysokou cenu a vysoké náklady na údržbu. Zpravidla jsou výhodné pro tepelné zpracování při vyšších teplotách ohřevu. [27]

Výhody:

- Variantnost režimů – na základě vlastností konkrétního materiálu lze dobře nastavit konkrétní prodlevy a intenzitu ochlazování
- Lepší ochrana nástroje proti oduhličení a oxidaci
- Bezpečnější, čistý, ekologický proces
- Průběh TZ dle stanoveného (nastaveného) režimu, bez zásahu a vlivu lidského faktoru
- Čistý, nezoxidovaný, lesklý povrch

Nevýhody:

- Nižší koeficient přestupu tepla
- Méně homogenní teplotní pole (vysoký teplotní gradient) v průřezu nástroje během předehřevů a ochlazování
- V první části ohřevu, kde dominuje přenos tepla prouděním (do 600°C), je díky absenci atmosféry komplikovanější a pomalejší ohřev

5.4 Vliv legujících prvků použité oceli na tepelné zpracování [29]

Použité materiály W. Nr. 1.3343 (ČSN 19 830) a W. Nr. 1.3243 (ČSN 19 852) obsahují téměř 0,9 % C a jsou legovány Si, Mn, Cr, Mo, V, W a Co viz kapitola 2.1 a 2.2.

Chrom, vanad, wolfram a molybden vytváří karbidické fáze, které mají v procesu tepelného zpracování rozhodující vliv na vlastnosti ocelí.

Základní leguru představuje zhruba 4% chromu. V rychlořezných ocelích vytváří karbid Cr_{23}C_6 , který se zcela rozpouští v austenitu. Tím se podstatně zvyšuje prokalitelnost oceli a stabilita martenzitu ve vyšších teplotách.

Další legurou ve vybraných ocelích je wolfram, který tvoří většinou základ pro směsné karbidy typu W_6C . Tyto karbidy se částečně rozpustí během austenitizace a tudíž se přímo účastní tepelného zpracování. Nerozpuštěné části karbidu wolframu zůstávají v původním stavu a zvyšují odolnost proti opotřebení. Wolframové karbidy jsou stabilní vlivem nízké rychlosti difúze v železe a zachovávají si vysoké hodnoty tvrdosti i za vyšších teplot.

Typickými doprovodnými prvky jsou mangan a křemík. Obsah ani jednoho z nich by neměl být více než 0,5 %. Při vyšším množství tyto prvky napomáhají stabilizaci zbytkového austenitu.

Ocel W. Nr. 1.3243 (ČSN 19 852) je legována navíc kobaltem, který nevytváří karbidickou fázi, ale substitučně zpevňuje tuhý roztok a částečně zpomaluje difúzi ostatních prvků. Dále má pozitivní vliv na odolnost vůči popuštění (teplotní stabilitu), protože zpomaluje růstové děje při precipitaci karbidů.

6. Výroba špičky technologií vyjiskřování

V celosvětovém průměru se udává, že asi 10% technologických operací při výrobě náradí se uskutečňuje elektroerozivními metodami obrábění, přičemž dominantní postavení má elektroerozivní metoda využívaná jak pro hloubení tvarových dutin nebo profilových otvorů, tak i pro drátové řezání plochých tvarových nástrojů a dílů. [18] U těchto metod se nepoužívá standartní řezný nástroj a při obrábění se netvoří tříska. K úběru materiálu dochází převážně účinky tepelnými, chemickými, případně i mechanickými (převážně abrazivními), nebo jejich vzájemnou kombinací. V poslední době je zaznamenán rostoucí rozsah aplikace nekonvenčních metod obrábění s odezvou na vývoj a používání nových konstrukčních materiálů s vysokou pevností, tvrdostí a houževnatostí. [20]

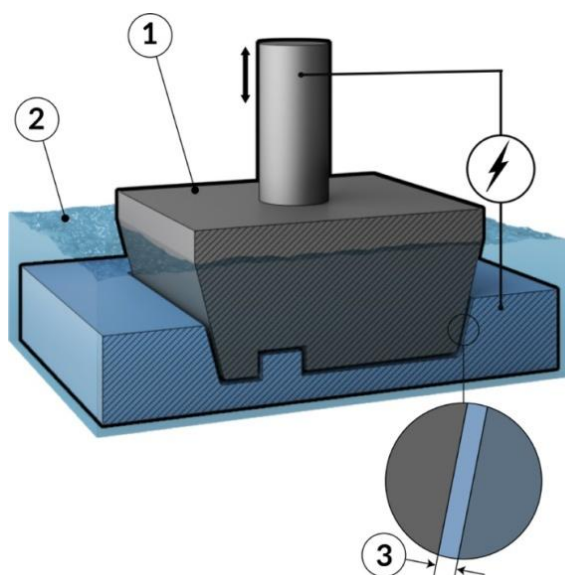
Elektroerozivní obrábění patří mezi nekonvenční metody obrábění využívající elektro-
tepelných principů úběru materiálu a je nejrozšířenější nekonvenční metodou obrábění. Pro
jeho označení se v mezinárodní literatuře vžila zkratka EDM (elektro-discharge machining).
[18]

Úběr materiálu je vyvolán periodicky se opakujícími elektrickými, popř. obloukovými výboji
nástrojem a obrobkem. Z obráběného materiálu jsou tavením a vypařováním odstraňovány
velmi malé částice (mikročástice – okem neviditelné), které mají tvar dutých kuliček a jsou
z oblasti obrábění pomocí dielektrické kapaliny. [20]

6.1 Princip, výhody a parametry

Elektroerozivní hloubení představuje základní typ elektroerozivních metod
obrábění. Uplatňuje se při výrobě tvarově složitých vnějších, ale zejména vnitřních
ploch ve výrobě tvářecích zápustek, forem pro lití, střižných nástrojů, nástrojů pro
lisování plastů apod.

Nástrojová elektroda se při elektrojiskrovém hloubení automaticky posouvá proti
obrobku, zároveň se musí udržovat konstantní velikost jiskrové mezery.
Elektroda má negativní tvar obrobené plochy, který je prostřednictvím výbojů
kopírován do obrobku (obr. 29).



Obr. 29: Schéma vyjiskřování [23]
1 – nástrojová elektroda, 2 – dielektrikum,
3 – jiskrová mezera

K výhodám elektrojiskrového hloubení patří: [20]

- Možnost obrábění vodivých materiálů bez ohledu na jejich mechanické vlastnosti (pevnost, tvrdost, houževnatost, křehkost)
- Velký rozsah pracovních parametrů umožňuje vyrábět povrchy různých jakostí
- Možnost výroby složitých tvarů a provádění operací, které nelze uskutečnit jinými metodami obrábění
- Na obrobek nepůsobí žádné mechanické zatížení

- Vzniká menší odpad než při konvenčním mechanickém obrábění
- Poměrně jednoduchá výroba nástrojových elektrod

K nevýhodám elektrojiskrového hloubení patří: [20]

- Nepřímá úměra mezi produktivitou obrábění a jakostí povrchu obrobené plochy
- Nutnost ponoření obrobku do kapaliny v průběhu obrábění
- Jakost obrobeného povrchu závisí na mnoha faktorech, které nelze předem spolehlivě určit
- Poměrně nízká produktivita při obrábění měkkých materiálů

Nejčastější aplikací elektrojiskrového hloubení v průmyslu je odstranění zalomených nástrojů (vrtáků, závitníků spod.) z obráběných dílů. Tímto způsobem se zachraňují obrobky často i milionových hodnot. Pro tyto operace se používají jednoduchá přenosná zařízení, která se umisťují přímo na obrobek nebo vedle obrobku. Jádrem zalomeného nástroje se odjiskří a zbytky jeho řezné části se snadno vyjmou. [18]

Základní parametry hloubení: [18], [20]

- Elektrický proud – pracovní napětí - až 50 V
 - velikost proudu 0,5 až 320 A a více
 - frekvence 50 – $5 \cdot 10^5$ Hz
- Dielektrikum
- Elektrody
- Tvar a frekvence výbojů
- Materiál nástroje a obrobku

6.2 Nástrojové elektrody

Při návrhu nástrojové elektrody je třeba vzít v úvahu její materiál, výrobu (možnosti, cena) a opotřebení v průběhu daného procesu elektrojiskrového obrábění. Materiál elektrody má mít vysokou elektrickou vodivost, dobrou obrobiteľnosť, vysoký bod tavení a dostatečnou pevnost, aby se při práci nedeformoval. K základním metodám výroby elektrod patří obrábění, lisování, lití a prášková metalurgie. [20]

Nástrojová elektroda se navrhuje a konstruuje pro každý případ obrábění samostatně. Náklady na zhotovení elektrody činí až 50% z celkových nákladů procesu vyjiskřování. Kromě materiálu (tab. 6) je důležité volit pečlivě i způsob upnutí elektrody do vřetena. [21]

Na opotřebení elektrody má největší vliv teplota tavení použitého materiálu. Hodnotí se opotřebení boků, rohů a konce elektrody. Nejvýznamnější kritérium, které určuje trvanlivost elektrody a vymezuje nutnost její úpravy je opotřebení úhlů. [20]

Velikost elektrody musí být menší o vyjiskřovací mezeru než požadovaná dutina, avšak až v době dokončení operace, tedy při určitém opotřebení elektrody. U dokončovacích elektrod se počítá s menším proudem i s menší mezerou.

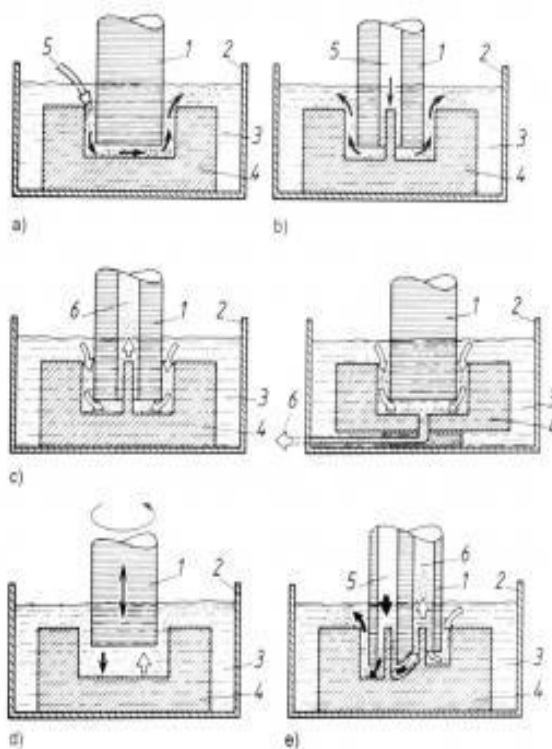
Materiál	Charakteristika	Použití (pro materiál)
Grafit	Nejčastěji používaný materiál, dobrá obrobiteľnosť a nízke opotrebení. Nevýhodou grafitu je znečišťování hloubícího stroje.	Oceli a nerezové oceli
Měď	Dobrá elektrická vodivost, nízke opotrebení. Horší pracovní vlastnosti než u grafitu nebo mosazi. Dosahovaná drsnost povrchu je lepší než Ra=0,5 μm	Oceli a nerezové oceli, oceli s karbidy wolframu
Měď – wolfram a stříbro – wolfram	Velmi nákladné. Výroba hlubokých drážek. Elektrody vyráběny slinováním. Po slinutí již nemůže být elektroda tvarována kvůli křehkosti materiálu.	Nástrojové oceli, oceli s karbidy wolframu
Měď – grafit	Přibližně 2x dražší než grafit.	Oceli s karbidy wolframu
Mosaz	Lehké a snadno obrobiteľné, nevýhodou vysoké hodnoty opotrebení	Spíše řezání materiálů
Wolfram	Pro výrobu malých děr, $D < 0,2$ mm	Oceli a nerezové oceli

Tab. 6: Materiály nástrojových elektrod

6.3 Výměna dielektrika

Prívod a výměna dielektrika mezi obrobek a elektrodu, tzv. vyplachování je možné několika způsoby (obr. 30): [22]

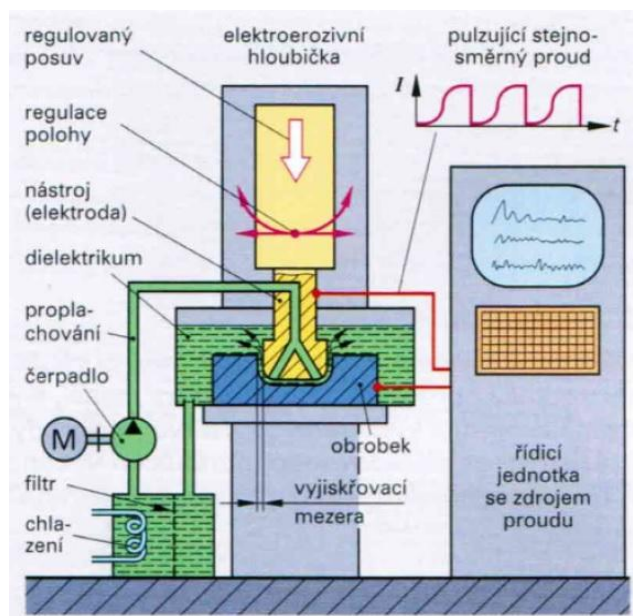
- Vnější – nejčastěji používané při obrábění dutin o větší hloubce
- Tlakové vnitřní – dielektrikum je přiváděno otvorem v nástrojové elektrodě přímo do pracovního otvoru. Nevýhodou je menší tvarová přesnost boků vyráběné dutiny
- Odsáváním – realizuje se odsáváním dielektrika dutinou v nástrojové elektrodě nebo v obrobku. Vyznačuje se velmi dobrou tvarovou přesností obráběné dutiny
- Pulzní – nástrojová elektroda se v nastavitelných časových intervalech oddaluje od materiálu, případně ještě rotuje. Dosáhne se tak dokonalého vypláchnutí mezery.
- Kombinované – kombinace vnitřního tlakového vyplachování a odsávání. Používá se zejména při hloubení tvarově složitých dutin



Obr.30: Způsoby vyplachování mezery [22] 1 – nástrojová elektroda, 2 – pracovní vana, 3 – dielektrikum, 4 – obrobek, 5 – přívod dielektrika, 6 – odsávání dielektrika

6.4 Elektrojiskrová hloubička

Příklad elektrojiskrové hloubičky je na obr. 31. Hloubička má podobnou mechanickou konstrukci jako konzolová frézka. Má stojan s křížovým stolem a v horní části stroje visle přestavitelnou hlavu s držákem nástroje. Dále je hloubička vybavena generátorem a hydraulickým systémem pro čerpání dielektrické kapaliny, její čištění a chlazení. Moderní elektrojiskrové hloubičky mají CNC řízení ve třech osách. [21]



Obr. 31: Konstrukce elektrojiskrové hloubičky [21]

8. Motivace a problematika

V současné době se pro svařování ultrazvukem používají ocelové komerční sonotrody vyrobené technologií práškové metalurgie. Kromě vysoké pořizovací ceny jsou dalšími problémy vysoké opotřebení špičky a zejména horší stabilita stojaté ultrazvukové vlny. Při ztrátě stability dochází ke zvýšení svařovacího času. Systém se snaží situaci napravit zvýšením frekvence, což ale vede k posunutí kmitny a uzlového bodu. V dalším okamžiku může dojít k únavovému selhání sonotrody a jejímu porušení. Vzhledem k vysoké frekvenci dále dochází kromě přehřátí sonotrody také k negativnímu vlivu na celou svařovací sestavu, kdy dochází k destrukci sonotrody i zesilovače. Je tedy zřejmé, že tato selhání mají vysoce negativní ekonomický dopad.

Kovaná sonotroda z nástrojové oceli by mohla nahradit stávající sonotrody z práškové metalurgie. Vybrané oceli W. Nr. 1.3343 (ČSN 19 830) a W. Nr. 1.3243 (ČSN 19 852) mají velmi podobné chemické složení a vlastnosti jako používané oceli z práškové metalurgie. Jejich výhodou by měla být prokovaná, velmi jemnozrná struktura, která obsahuje velmi malé karbidy.

Na špičce nástroje se nachází kmitna, která má podstatný vliv na průběh svařování, zejména na jeho rychlost a teplotu procesu. Cílem je, aby měla kmitna na konci nástroje co největší posunutí.

V oblasti těsně za přechodovým zaoblením sonotrody vzniká během provozu nástroje maximální napětí, které způsobuje poškození sonotrody. Kovaná jemnozrná struktura by měla mít oproti práškovým materiálům lepší mechanické vlastnosti, zejména odolnost proti dynamickému namáhání, a tím by mělo dojít ke zvýšení životnosti nástroje. Po opakovaném popouštění má prokovaná jemnozrná ocel také vyšší stabilitu struktury při zahřátí.

Jemnozrná struktura má také velmi pozitivní vlastnosti z hlediska nízkého útlumu ultrazvukových vln.

V současné době jsou předními dodavateli sonotrod pro ultrazvukové svařování švýcarská společnost TELSONIC Ultrasonics, americká společnost SONICS a také americká společnost DUKANE. U všech těchto výrobců se cena za jednu sonotrodu pohybuje kolem 900 €, to znamená řádově v desetitisících Kč. V případě zvýšení životnosti nástroje a levnější práce v České republice, by se mohly náklady na nástroje snížit.

9. Příprava polotovaru kováním

Výchozím polotovarem byla vyžíhaná válcovaná tyč o průměru 50 mm a délce 75 mm, která byla považována za polotovar s nulovým stupněm prokování. Postup byl navrhován pro kování na modelu kovacího lisu CKW6000 s maximální silou 1 MN, který je k dispozici v halové laboratoři katedry materiálu a strojírenské metalurgie na ZČU. [16]

Za pomoci simulací v softwaru Deform byla navržena speciální sada kovadel. Tato kovadla musí zabránit tvorbě přeložek a dalším vadám, tedy zajišťují tvarově i strukturně kvalitní výkovek. Při návrhu kovadel byla uvažována horní kovací teplota 1 150 °C před každou operací. [16]

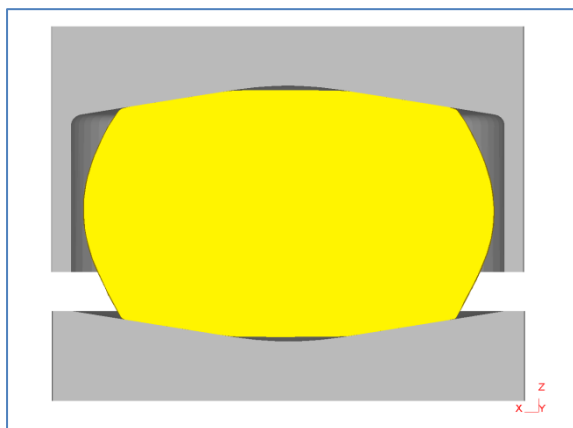
Ohřev byl prováděn ve dvoukomorové elektrické odporové peci, kdy první komora byla předehřátá na 700 °C a sloužila k předehřevu a udržování na teplotě. Druhá komora byla předehřátá na horní kovací teplotu 1150 °C. Nástrojové oceli jsou obtížně tvařitelné a teplota rychle klesá, proto byl kladen důraz na rychlost práce a manipulace. Kováno bylo 8 kusů v jedné dávce a byl sledován čas práce. Celá dávka osmi kusů netrvala déle než 15 minut, čas na kování jednoho kusu byl tedy přibližně 2 minuty. Mezi jednotlivými operacemi byly vzorky ponechány v udržovací komoře na teplotě 700 °C. Před další operací byly vzorky přesunuty do první komory, kde se opět ohřály na horní kovací teplotu 1 150 °C. Po ukončení celého procesu tváření byly překované vzorky ponechány v peci, kde pomalu chladly přibližně dva dny až na teplotu 60 °C. Pomalé ochlazování bylo nutné z toho důvodu, aby nedošlo k zakalení a bylo tak možné výkovky dále obrábět. [17]

Kování proběhlo ve třech kovacích cyklech. První cyklus se skládal z pēchování a dvoufázového prodlužování. Pēchování proběhlo pomocí sestavy na obr. 32, kde vnitřní průměr horního kovadla byl 74 mm. Po napēchování se špalek otočil o 90° a proběhla první fáze prodlužování pomocí sestavy na obr. 33. Po této operaci vznikl špalek o průřezových rozměrech 82 mm na šířku a 40 mm na výšku. Poté se špalek opět otočil o 90° a byla provedena poslední operace prvního cyklu, kterou byla druhá fáze prodlužování pomocí kovadel na obr. 34. Po dokončení prodlužování vznikl špalek o průřezových rozměrech 40x40 mm (obr. 35). [16]

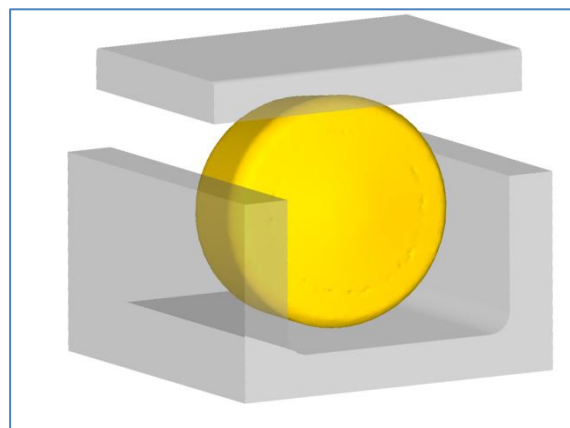
Druhý cyklus začal překováním na osmihran pomocí úhlové vložky, která byla zasunuta do spodního kovadla na obr. 33. Dále se znovu zopakoval postup pēchování a dvoufázového prodloužení. [16]

V posledním cyklu kování bylo opět zopakováno překování špalku na osmihran pomocí úhlové vložky, po kterém následovalo poslední pěchování a dvoufázové prodloužení. [16]

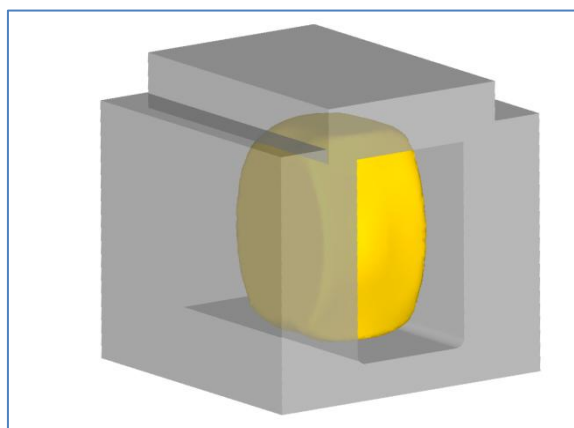
Pomocí tohoto postupu bylo dosaženo vysokého stupně prokování a dostatečné deformace v celém objemu materiálu. Rozložení efektivní deformace uvnitř tělesa, které odpovídá stupni prokování (tab. 7), bylo vypočteno pomocí numerické simulace.



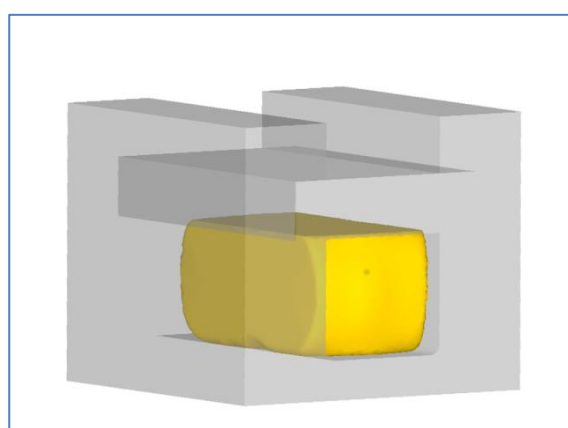
Obr. 32: Sestava pro pěkchování [16]



Obr. 33: Sestava pro první fázi prodlužování [16]



Obr. 34: Sestava pro druhou fázi prodlužování [16]



Obr. 35: Překovaný špalek 40x40 mm [16]

Postup	Sled operací	P_{k1}	P_{k2}
1	Pěkchování - prodlužování	2,17	2,14
2	Pěkchování – prodlužování – překování na osmihran – pěkchování - prodlužování	4,93	6,08
3	Pěkchování – prodlužování – překování na osmihran – pěkchování – prodlužování – překování na osmihran – pěkchování - prodlužování	11,24	17,32

Tab. 7: Určení stupně prokování, P_{k1} dle Eflamrka a P_{k2} dle Plzeňských kováren [16]

Pro samotné vykování polotovaru pro sonotrodu byly vzorky opět překovány na osmihran pomocí úhlové vložky. Výchozím polotovarem pro kování tvaru sonotrody byl tedy osmistěn o vzdálenosti protilehlých stěn (vepsaná kružnice) 45 mm. Dalším postupem bylo kování v kovadlech kruhového průřezu, která byla zapůjčena z Regionálního technického institutu ZČU. Kování bylo provedeno ručně velkým množstvím úderů. Nejdříve bylo použito první kovadlo, které mělo 3 kalibry o průměrech 40, 37 a 32 mm. Před dalším krokem musely být vzorky opět nahřáty na horní kovací teplotu. Dále se kovala část o menším průměru pomocí druhého kovadla, které mělo 2 kalibry o rozměrech 30,5 a 26,5 mm. Výsledným vykováním polotovarem byla tyč se změnou průřezu o délce přibližně 200 mm. (obr. 36). [16]



Obr. 36: Vykováný polotovar pro sonotrodu.

10. Návrh a simulace geometrie sonotrody

Tvar sonotrody má stěžejní vliv na výslednou pracovní frekvenci a na správný průběh ultrazvukové vlny. Dále tvar sonotrody ovlivňuje průběh napětí, místo maximálního napětí a hodnotu maximálního posunutí na špičce sonotrody.

Návrh tvaru sonotrody byl proveden pomocí numerické simulace na základě změřených vlastností materiálu. Důležité hodnoty pro numerické simulace jsou hustota materiálu a rychlost šíření ultrazvuku materiálem. Měření těchto hodnot bylo předmětem mé bakalářské práce s názvem „*Měření ultrazvukových parametrů kované nástrojové oceli*“. Výpočet všech parametrů a rovnice se vztahy mezi rychlostí ultrazvuku, hustotou a modulem pružnosti jsou v kapitole „*9.3 Výpočet dalších parametrů materiálu*“.

10.1 Naměřené hodnoty rychlosti ultrazvuku a vstupní data

Všechny uvedené hodnoty jsou převzaty z mé bakalářské práce s názvem „Měření ultrazvukových parametrů kované nástrojové oceli“. Uvedené hodnoty odpovídají stavu po tepelném zpracování. [26]

Materiál	Rychlost šíření podélné vlny [m/s]	Rychlost šíření příčné vlny [m/s]	Hustota materiálu [kg/m ³]	μ [-]	E [GPa]	G [GPa]
W. Nr. 1.3343 (ČSN 19 830)	5 948,6	3 246,5	8 020,5	0,289	281,7	83,5
W. Nr. 1.3243 (ČSN 19 852)	5 933,5	3 233,4	7 989,7	0,291	282,4	83,3

Tab. 8: Naměřené a vypočtené hodnoty [26]

10.2 Návrh geometrie a vlastní simulace

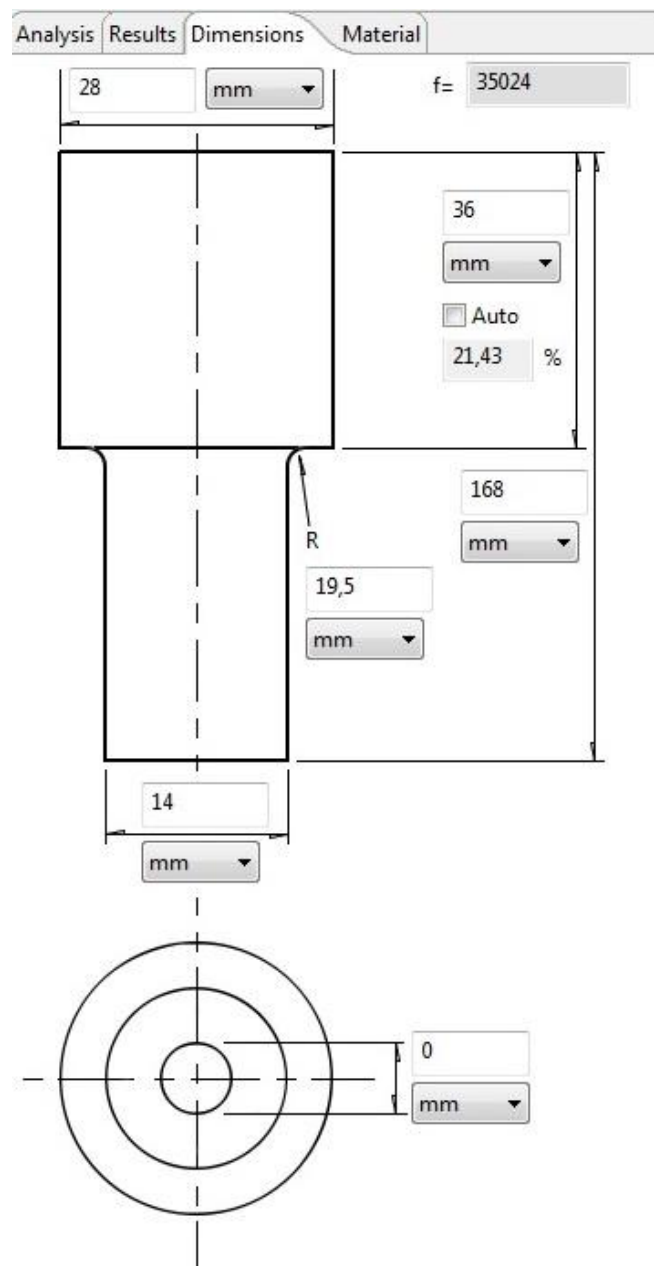
Na základě vstupních dat byl navrhován konečný tvar sonotrody. Ze stávajících komerčních sonotrod byly převzaty pouze rozměry pro upínací část sonotrody. Délka a rozměry pracovní části sonotrody byly navrženy s pomocí programu Sonoanalyzer tak, aby byla výstupní pracovní frekvence co nejbližší hodnotě 35 000 Hz. Na této frekvenci pracují generátory pro ultrazvukové svařování ve firmě Megatech Boshoku s.r.o. Jejich tolerance je ± 500 Hz pro strojní svařování a ± 250 Hz pro svařování ruční. Celková délka sonotrod je rovna vlnové délce λ .

Vstupní data obou materiálů se liší pouze minimálně, proto byl navržen jeden tvar. Hodnota frekvence v závislosti na konkrétním materiálu byla dále upřesněna pomocí změny přechodového rádiusu.

Návrh sonotrody z materiálu W. Nr. 1.3343 (ČSN 19 830)

Sonotroda z materiálu W.Nr. 1.3343 byla navržena s pracovní frekvencí 35 024 Hz. Kompletní rozměry sonotrody (obr. 37) jsou:

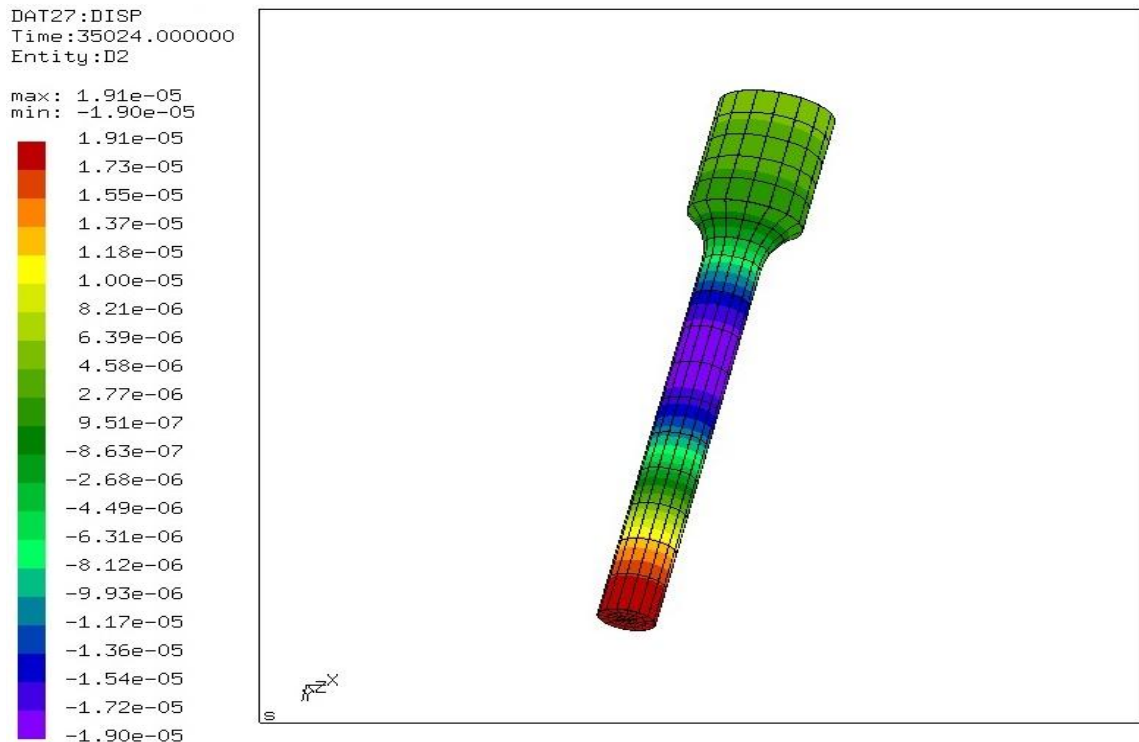
- Celková délka – 168 mm
- Délka upínací části – 36 mm
- Průměr upínací části – 28 mm
- Průměr pracovní části – 14 mm
- Velikost přechodového radiusu – 19,5 mm



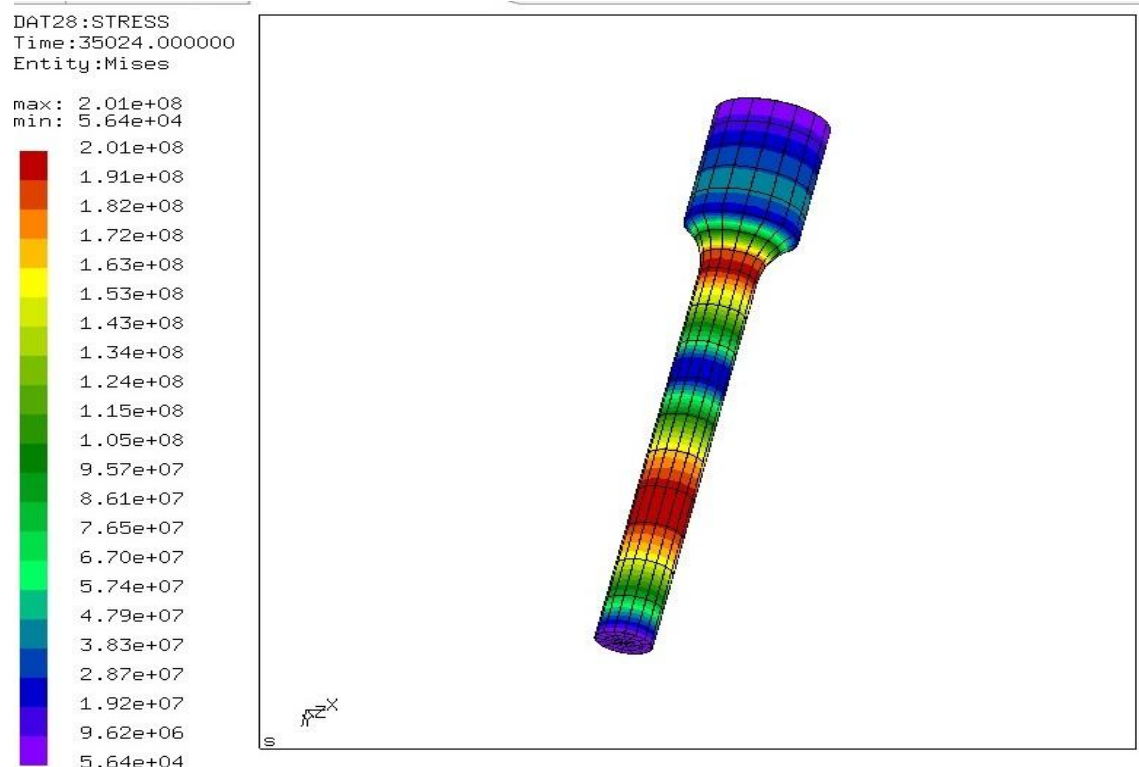
Obr. 37: Rozměry sonotrody z materiálu W. Nr. 1.3343

Dále bylo určeno maximální posunutí na špičce sonotrody (obr. 38) a hodnota maximálního napětí, které se nachází těsně za přechodovým rádiusem sonotrody (obr. 39).

- Maximální posunutí – pásmo 17,3 až 19,1 μm
- Maximální napětí – pásmo 191 až 201 MPa



Obr. 38: Průběh posunutí sonotrodou z materiálu W. Nr. 1.3343

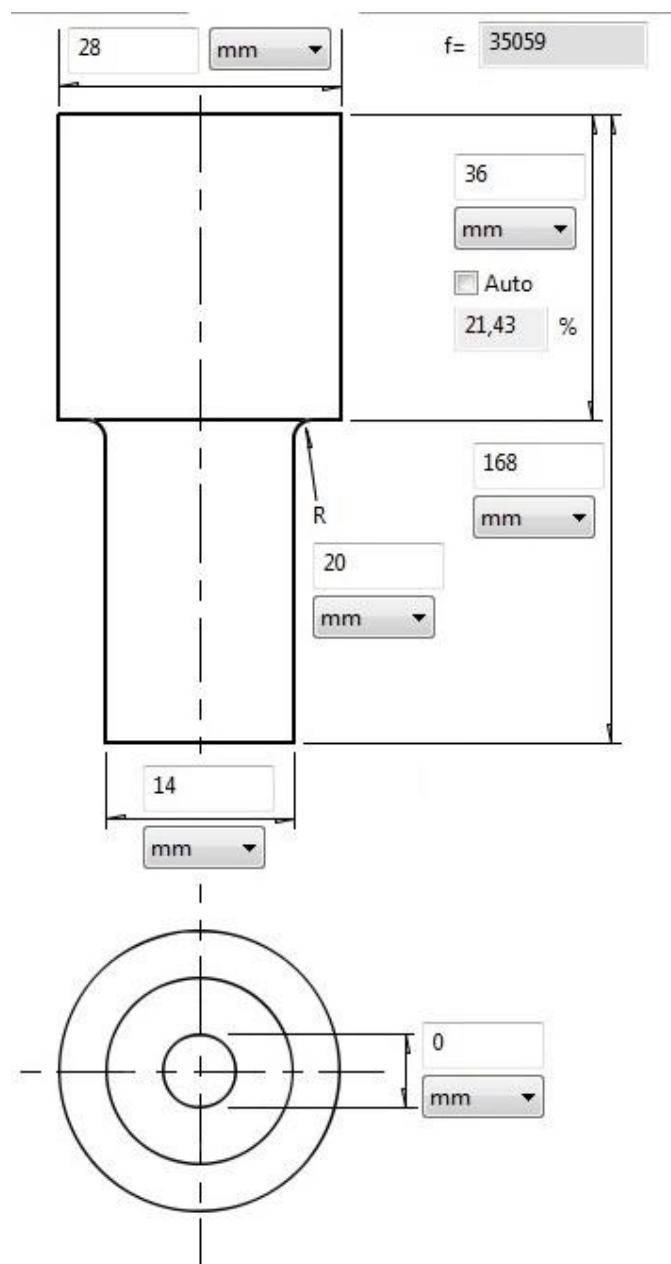


Obr. 39: Průběh napětí sonotrodou z materiálu W. Nr. 1.3343

Návrh sonotrody z materiálu W. Nr. 1.3243 (ČSN 19 852)

Sonotroda z materiálu W.Nr. 1.3343 byla navržena s pracovní frekvencí 35 059 Hz. Kompletní rozměry sonotrody (obr. 40) jsou:

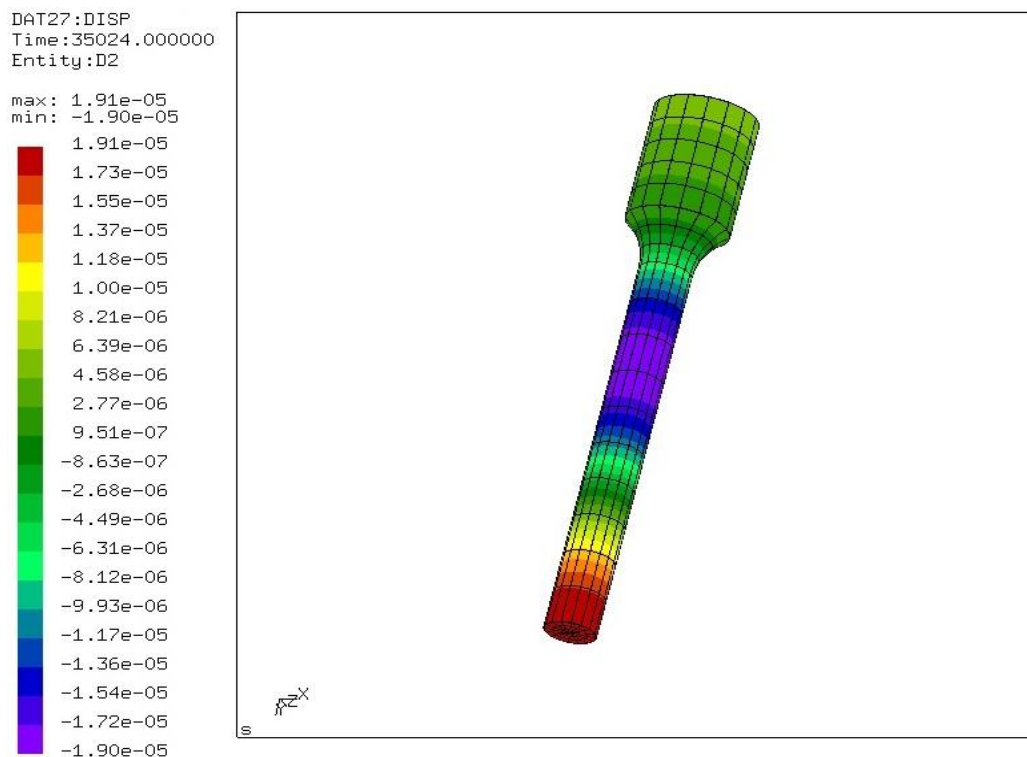
- Celková délka – 168 mm
- Délka upínací části – 36 mm
- Průměr upínací části – 28 mm
- Průměr pracovní části – 14 mm
- Velikost přechodového radiusu – 20 mm



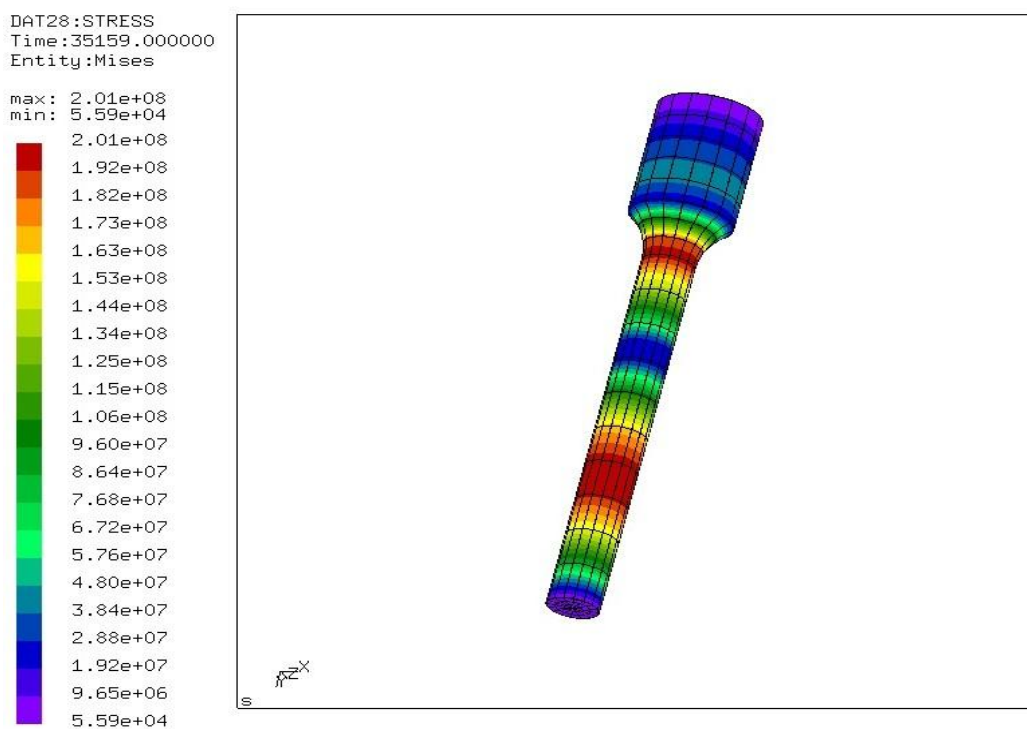
Obr. 40: Rozměry sonotrody z materiálu W. Nr. 1.3243

Opět bylo určeno i maximální posunutí na špičce sonotrody (obr. 41) a hodnota maximálního napětí, které se nachází těsně za přechodovým rádiusem sonotrody (obr. 42).

- Maximální posunutí – pásmo 17,1 až 19,1 μm
- Maximální napětí – pásmo 192 až 201 MPa



Obr. 41: Průběh posunutí sonotrodou z materiálu W. Nr. 1.3243



Obr. 42: Průběh napětí sonotrodou z materiálu W. Nr. 1.2343

11. Obrábění na finální tvar, parametry a způsob obrábění

Pro obrobení sonotrody byl využit strojový park v Regionálním technologickém institutu Západočeské univerzity v Plzni. Jednalo se především o CNC soustruh a CNC frézku. Dokončovací operace broušení byla provedena ve firmě PILSEN TOOLS s.r.o.

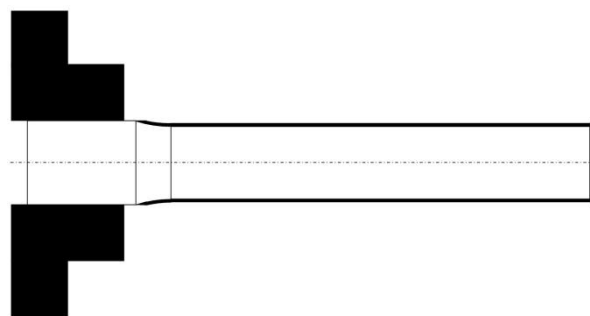
Výchozími polotovary jsou tvarové, osazené předkovky s dvěma rozdílnými průměry z nástrojové oceli W. Nr. 1.3343 (ČSN 19 830) a W. Nr. 1.3243 (ČSN 19 852).

Rozměry kovaného polotovaru jsou $\varnothing d_1 = 32$ mm, $\varnothing d_2 = 28$ mm, $l = 200$ mm a postup obrábění proběhl následujícím způsobem.

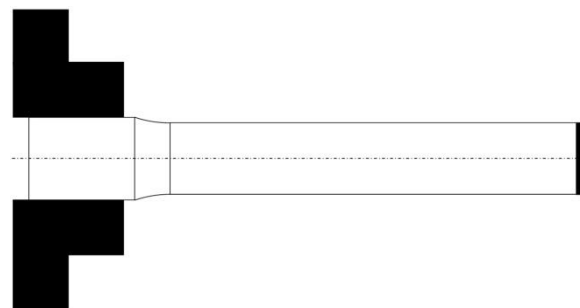
1) Hrubování kovaného polotovaru a zarovnání čela

- Zařízení: CNC soustruh Masturn 50NC
- Upnutí: Sklíčidlo, tvrdé čelisti
- Nástroj: Soustružnický nůž s vyměnitelnou břitovou destičkou SCACR 1010 E 06
- Operace: Hrubování pro odstranění okují a srovnání kruhovitosti
- Řezná rychlost: $v = 180$ m/min
- Posuv: $f = 0,2$ mm/ot
- Hloubka třísky: $a = 1$ mm
- Výpočet otáček:

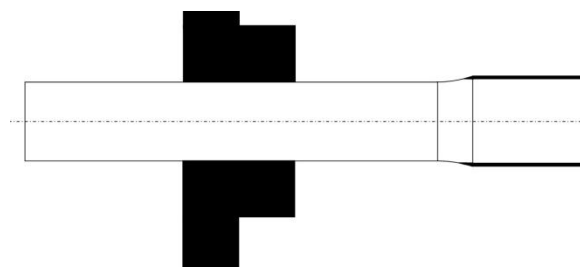
$$n = \frac{1000 * v}{\pi * D} = \frac{1000 * 180}{\pi * 32} = 1790 \text{ ot./min}$$



Obr. 43: Hrubování kovaného polotovaru



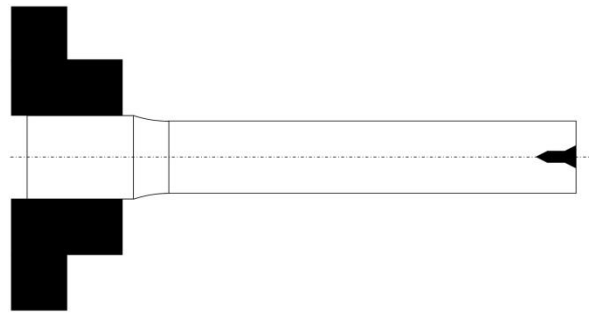
Obr. 44: Zarovnání čela kovaného polotovaru



Obr. 45: Hrubování kovaného polotovaru

2) Navrtání středícího důlku do výkovku.

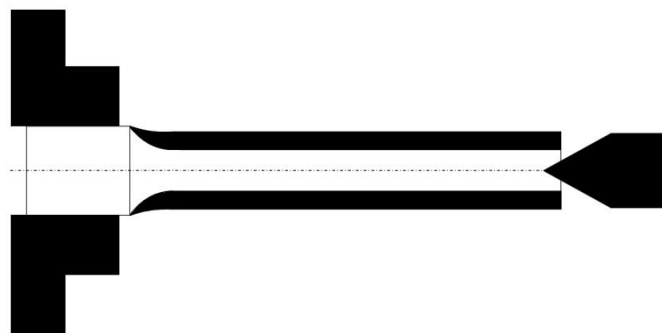
- Zařízení: CNC soustruh Masturn 50NC
- Upnutí: Sklíčidlo, tvrdé čelisti
- Nástroj: VRTÁK A4 ČSN EN 22 1110
- Operace: Navrtání do hloubky 8 mm
- Řezná rychlost: $v = 20 \text{ m/min}$
- Posuv: $f = 0,3 \text{ mm/ot}$
- Výpočet otáček: $n = \frac{1000 \cdot v}{\pi \cdot D} = \frac{1000 \cdot 20}{\pi \cdot 4} = 1590 \text{ ot./min}$



Obr. 46: Navrtání středícího důlku

3) Hrubování na rozměr pracovní části s přídavkem na broušení

- Zařízení: CNC soustruh Masturn 50NC
- Upnutí: Sklíčidlo, tvrdé čelisti, hrot
- Nástroj: Soustružnický nůž s vyměnitelnou břitovou destičkou SCACR 1010 E 06
- Operace: Hrubování na rozměry pracovní částí s přídavkem na broušení 0,5 mm na průměru
- Řezná rychlost: $v = 180 \text{ m/min}$
- Posuv: $f = 0,2 \text{ mm/ot}$
- Hloubka třísky: $a = 1,5 \text{ mm}$
- Výpočet otáček: $n = \frac{1000 \cdot v}{\pi \cdot D} = \frac{1000 \cdot 180}{\pi \cdot 26} = 2204 \text{ ot./min}$



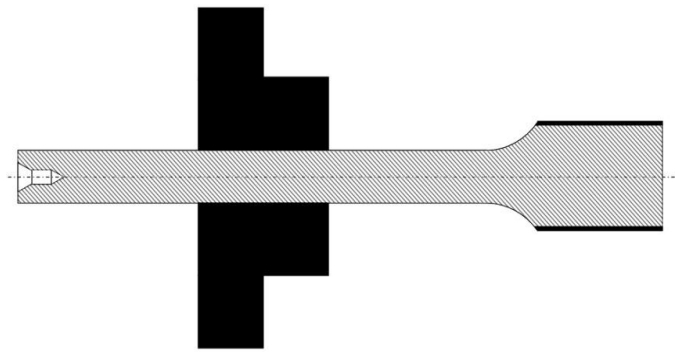
Obr. 47: Hrubování na rozměr pracovní části

4) Hrubování na rozměr upínací části s přídatkem nabroušení

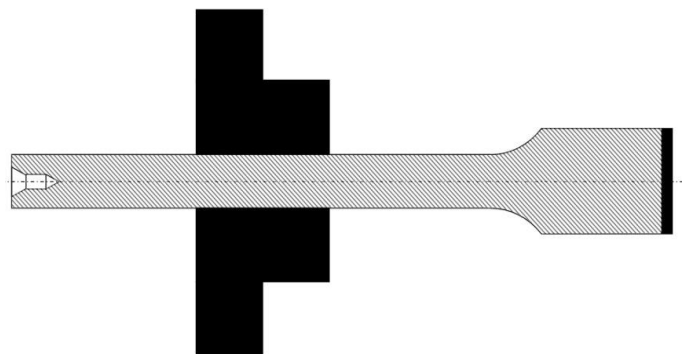
- Zařízení: CNC soustruh Masturn 50NC
- Upnutí: Sklíčidlo, tvrdé čelisti, hrot
- Nástroj: Soustružnický nůž

s vyměnitelnou břitovou destičkou SCACR 1010 E 06

- Operace: Hrubování na rozměry upínací části s přídatkem na broušení 0,5 mm na průměru
- Řezná rychlost: $v = 180 \text{ m/min}$
- Posuv: $f = 0,2 \text{ mm/ot}$
- Hloubka třísky: $a = 1,5 \text{ mm}$
- Výpočet otáček: $n = \frac{1000 \cdot v}{\pi \cdot D} = \frac{1000 \cdot 180}{\pi \cdot 30} = 1910 \text{ ot./min}$



Obr. 48: Hrubování na rozměr upínací části

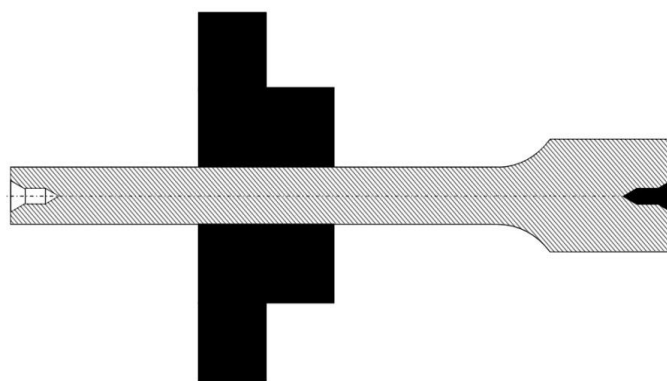


Obr. 49: Hrubování na rozměr upínací části

5) Navrtání druhého středícího důlku

- Zařízení: CNC soustruh Masturn 50NC
- Upnutí: Sklíčidlo, tvrdé čelisti
- Nástroj: VRTÁK A4 ČSN EN 22 1110
- Operace: Navrtání do hloubky 8 mm
- Řezná rychlost: $v = 20 \text{ m/min}$
- Posuv: $f = 0,3 \text{ mm/ot}$

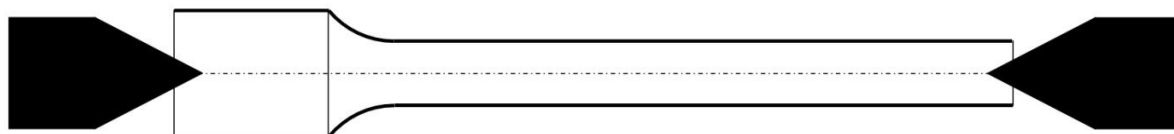
- Výpočet otáček: $n = \frac{1000 \cdot v}{\pi \cdot D} = \frac{1000 \cdot 20}{\pi \cdot 4} = 1590 \text{ ot./min}$



Obr. 50: Navrtání středícího důlku

6) Broušení

- Zařízení: Hrotová bruska univerzální UB 25 CNC
- Upnutí: Unášecí hrot, otočný hrot
- Nástroj: Kotouč 99A 36 J13 V 100x30x20
- Operace: Broušení na $\varnothing d_1 = 28 \text{ mm}$ a $d_2 = 14 \text{ mm}$
- Řezná rychlost kotouče: $v_1 = 30 \text{ m/s}$
- Obvodová rychlost obrobku: $v_2 = 10 \text{ m/min}$
- Posuv: $f = 0,3 * 30 = 10 \text{ mm/ot}$
- Přísuv: $a = 0,005 \text{ mm/ot}$
- Výpočet otáček brusného kotouče: $n_1 = \frac{1000*v}{\pi*D} = \frac{1000*1800}{\pi*100} = 5730 \text{ ot./min}$
- Výpočet otáček obrobku: $n_2 = \frac{1000*v}{\pi*D} = \frac{1000*10}{\pi*28,5} = 110 \text{ ot./min}$

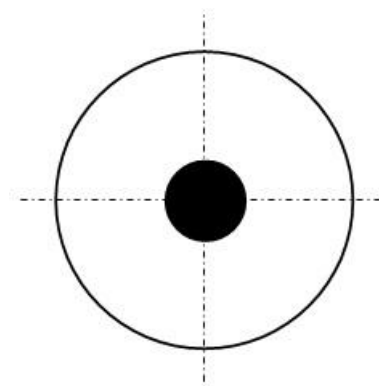


Obr. 51: Broušení na přesné rozměry

7) Vrtání a děr a řezání závitu

a) Díra pro upínací šroub

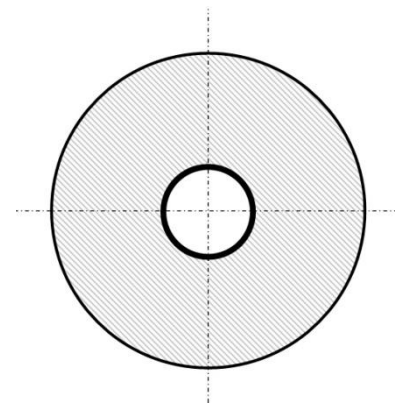
- Zařízení: CNC frézka DMU 40 eVo linear
- Upnutí: Sklíčidlo, tvrdé čelisti
- Operace: Vrtání díry pro závit M8 mm do hloubky 20 mm
- Nástroj: VRTÁK 7 ČSN 22 1122
- Řezná rychlost: $v = 26 \text{ m/min}$
- Posuv: $f = 0,1 \text{ mm/ot}$
- Výpočet otáček: $n = \frac{1000*v}{\pi*D} = \frac{1000*26}{\pi*7} = 1180 \text{ ot./min}$



Obr. 52: Vrtání díry pro závit

b) Závít pro upínací šroub

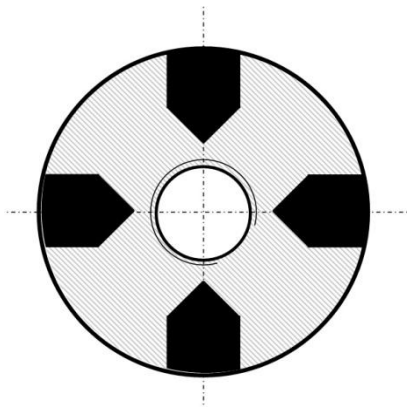
- Zařízení: CNC frézka DMU 40 eVo linear
- Upnutí: Sklíčidlo, tvrdé čelisti
- Operace: Řezat závít M8 do hloubky 18mm
- Nástroj: SADA 3 ZAVITNÍKŮ M8-2N ČSN 22 3010
z důvodu vyšší pevnosti materiálu
- Řezná rychlost: $v = 5 \text{ m/min}$



Obr. 53: Řezání závitu

c) 4x pomocná díra pro upínání

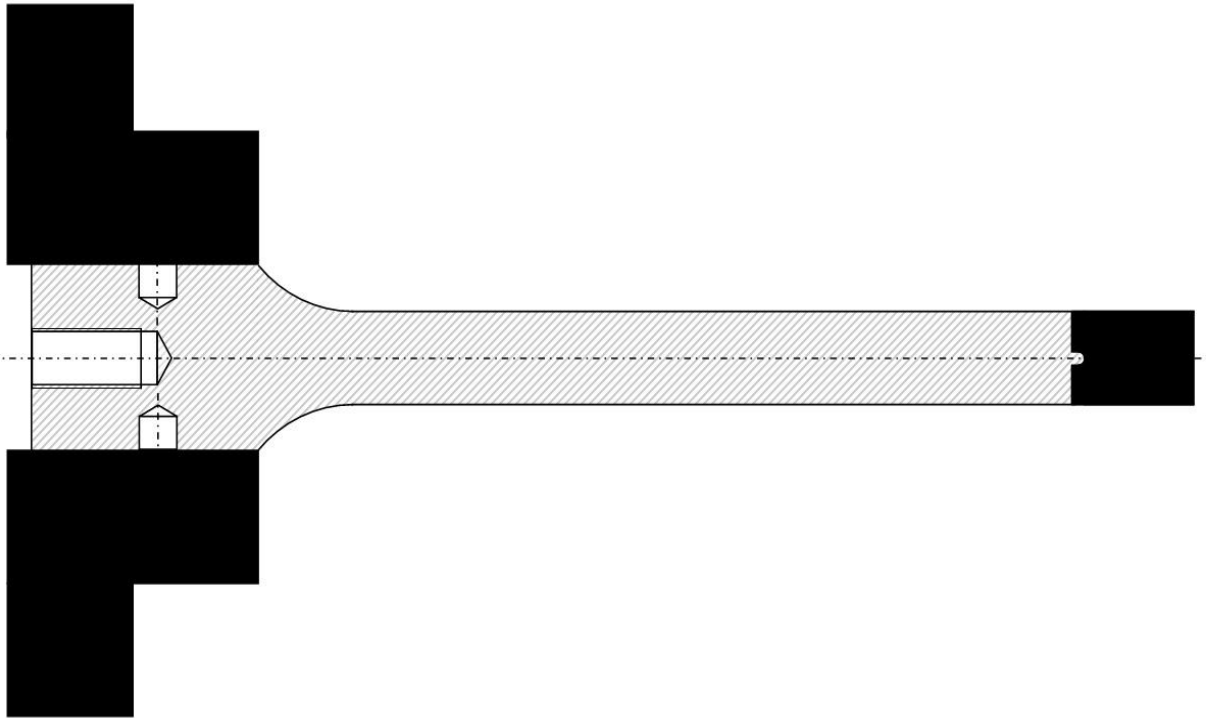
- Zařízení: CNC frézka DMU 40 eVo linear
- Upnutí: Sklíčidlo, tvrdé čelisti
- Operace: Vrtat 4x díru $\varnothing = 6 \text{ mm}$ do hloubky 5 mm
- Nástroj: VRTÁK 6 ČSN 22 1122
- Řezná rychlost: $v = 26 \text{ m/min}$
- Posuv: $f = 0,08 \text{ mm/ot}$
- Výpočet otáček: $n = \frac{1000 \cdot v}{\pi \cdot D} = \frac{1000 \cdot 26}{\pi \cdot 6} = 1380 \text{ ot./min}$



Obr. 54: Vrtání čtyř pomocných děr pro upínání

8) Odstranění důlku a příprava špičky

- Zařízení: CNC soustruh Masturn 50NC
- Upnutí: Sklíčidlo, měkké čelisti
- Nástroj: Soustružnický nůž s vyměnitelnou břitovou destičkou SCACR 1010 E 06
- Operace: Odstranění středícího důlku, zakrácení na konečnou délku 168 mm a příprava špičky pro vyjiskřování
- Řezná rychlost: $v = 180 \text{ m/min}$
- Posuv: $f = 0,2 \text{ mm/ot}$
- Hloubka třísky: $a = 1 \text{ mm}$
- Výpočet otáček: $n = \frac{1000 \cdot v}{\pi \cdot D} = \frac{1000 \cdot 180}{\pi \cdot 14} = 4090 \text{ ot./min}$



Obr. 55: Odstranění důlku a příprava špičky

Příprava špičky sonotrody je nutná pro správně vystředění vyjiskřovací elektrody. Obrobená sonotroda je na obr. 56. V tomto stavu putuje na tepelné zpracování ve vakuu.



Obr. 56: Obrobená sonotroda

12. Tepelné zpracování sonotrody

Vzhledem k vysoké tvrdosti po tepelném zpracování je kalení a popuštění prováděno až po obrobení sonotrody na konečné rozměry. Po tepelném zpracování jsou nežádoucí jakékoliv okuje či nečistoty na povrchu, proto je zvoleno tepelné zpracování ve vakuu.

12.1. Použité zařízení [32]

Tepelné zpracování bylo provedeno ve firmě NAREX Ždánice, spol. s.r.o. Jedná se o společnost, která se specializuje zejména na výrobu závitníků z výkonných a vysoce výkonných rychlořezných ocelí. Také má dlouholetou praxi v tepelném zpracování materiálů a kalírna funguje i pro externí zákazníky. Tepelné zpracování proběhlo ve vakuové peci (obr. 57). [32]

Parametry zařízení:

- Zařízení: víceúčelová vakuová kalící pec s nuceným chlazením plynem
- Max. rozměry vsázky: 900 x 600 x 900 mm
- Max. hmotnost vsázky: 500 kg
- Operace: kalení, popouštění, zušlechťování
- Typy materiálů: nástrojové a rychlořezné oceli



Obr. 57: Víceúčelová vakuová kalící pec [32]

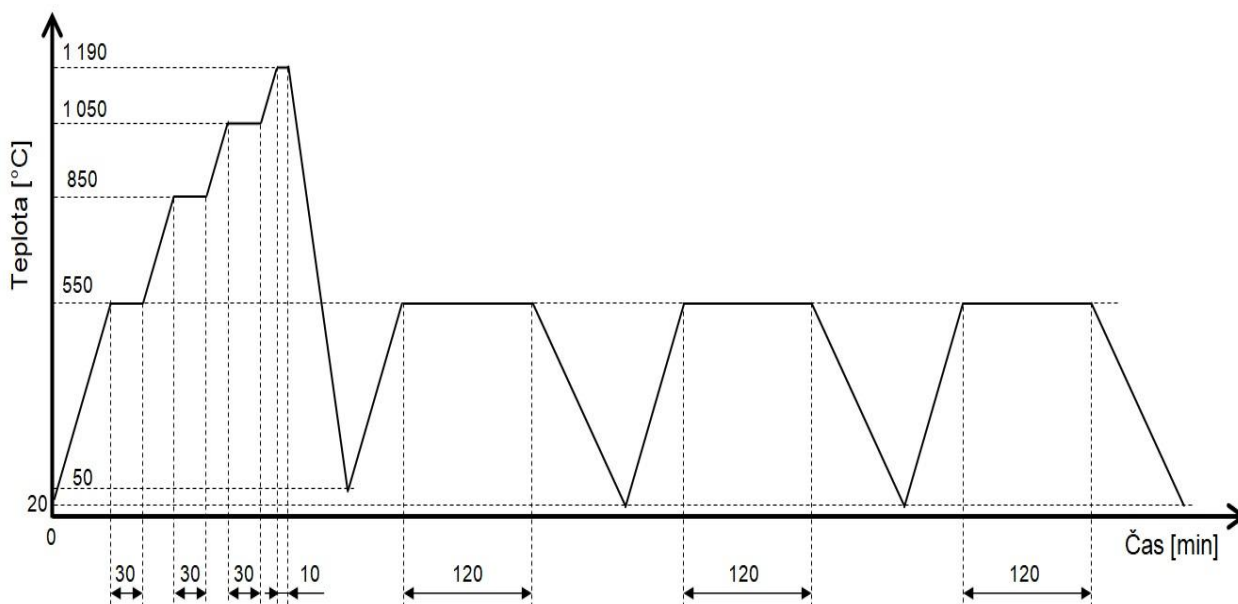
12.2 Parametry tepelného zpracování

Kalení:

- Ohřev:
 1. předehřev – teplota 550 °C / prodleva 30 minut
 2. předehřev – teplota 850 °C / prodleva 30 minut
 3. předehřev – teplota 1050 °C / prodleva 30 minut
 4. austenitizace – teplota 1 190 °C / prodleva 10 minut
- Kalicí médium: dusík / přetlak 5 bar (0,5 MPa)
- Ochlazení na 50 °C, poté 3x popouštění

Popouštění:

- 1. popouštění – teplota 550 °C / prodleva 120 minut / ochlazení na 20 °C
- 2. popouštění – teplota 550 °C / prodleva 120 minut / ochlazení na 20 °C
- 3. popouštění – teplota 550 °C / prodleva 120 minut / ochlazení na 20 °C



Obr. 58: Průběh provedeného tepelného zpracování

13. Výroba špičky elektroerozivním obráběním

Výroba špičky sonotrody proběhla ve spolupráci s Regionálním technologickým institutem Západočeské univerzity v Plzni. Nejdříve byla vyrobena měděná elektroda. Polotovarem byla měděná tyč o průměru 16 mm a délce 65 mm.

Z jedné strany polotovaru proběhla úprava průměru pro upnutí (obr. 59) a na druhé straně byla zhotovena pracovní část elektrody. Tvar této pracovní části elektrody je opačným tvarem (negativem) skutečné špičky kované sonotrody viz obr. 60.

Po dokončení procesu vyjiskřování se tvar elektrody negativně promítl ve špičce sonotrody (obr. 61). Pracovní část měděné elektrody použitím zčernala (obr. 62), to však nebrání jejímu dalšímu použití.

Parametry pro vyjiskřování byly určeny na základě plochy pracovní části elektrody, která byla přibližně 150 mm^2 . K této hodnotě se vztahuje elektrický proud 6,5 A, napětí 110 V a velikost jiskrové mezery $85 \text{ }\mu\text{m}$.



Obr. 59: Tělo měděné elektrody



Obr. 60: Špička měděné elektrody



Obr. 61: Špička sonotrody



Obr. 62: Použitá elektroda

14. Ověření

Ověření sonotrody proběhlo ve spolupráci s firmou Megatech Industries s.r.o. v Plzni. První částí bylo připojení sonotrody ke generátoru, který pracuje na frekvenci 35 000 Hz. Zároveň byl ke generátoru připojen i počítač s příslušným programem.

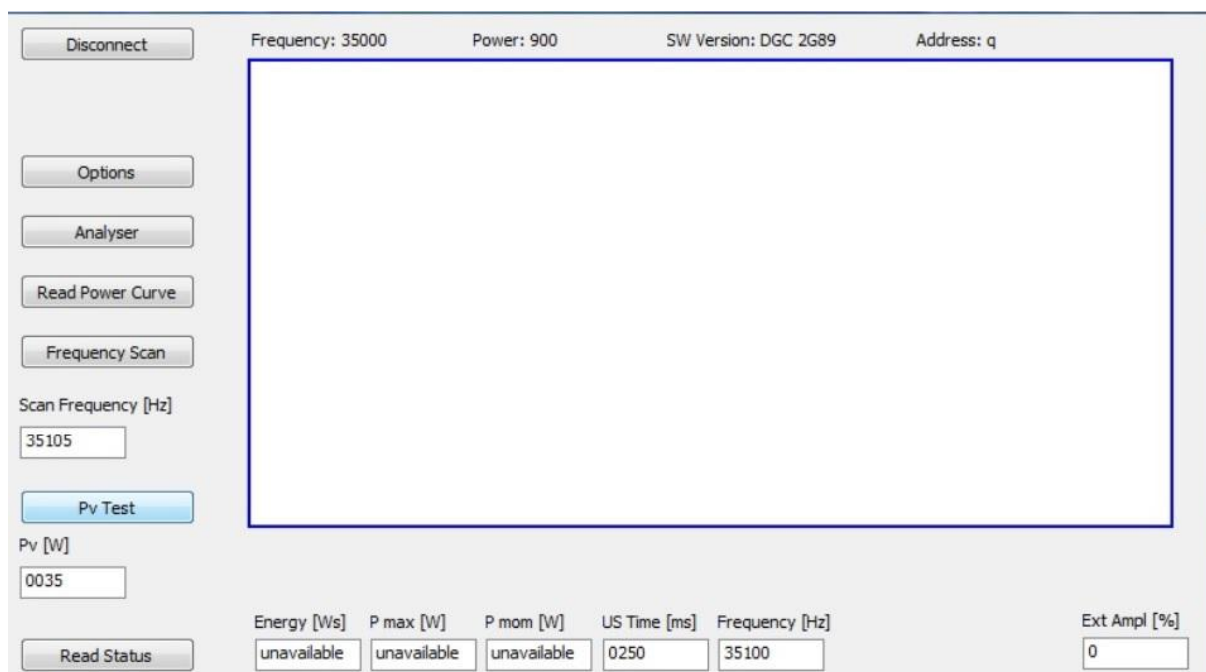
Proces ověřování je postaven na porovnání funkční ocelové sonotrody vyrobené práškovou metalurgií proti kované sonotrodě z rychlořezné nástrojové oceli, konkrétně z materiálu W. Nr. 1.3243 (ČSN 19 852).

14.1 Ověření frekvence

Po zapojení sonotrody ke generátoru se pomocí softwaru spustí první test, který zjistí pracovní frekvenci zapojené sonotrody. Tolerance generátoru je ± 500 Hz pro strojní a ± 250 Hz pro ruční svařování.

Nejdříve byla zapojena funkční sonotroda vyrobena práškovou metalurgií. Na obr. 63 je záznam z této zkoušky, kdy byla zjištěna pracovní frekvence 35 105 Hz.

V dalších částí ověřování software určí i svařovací energii, frekvenci během svařování a celkový svařovací čas.



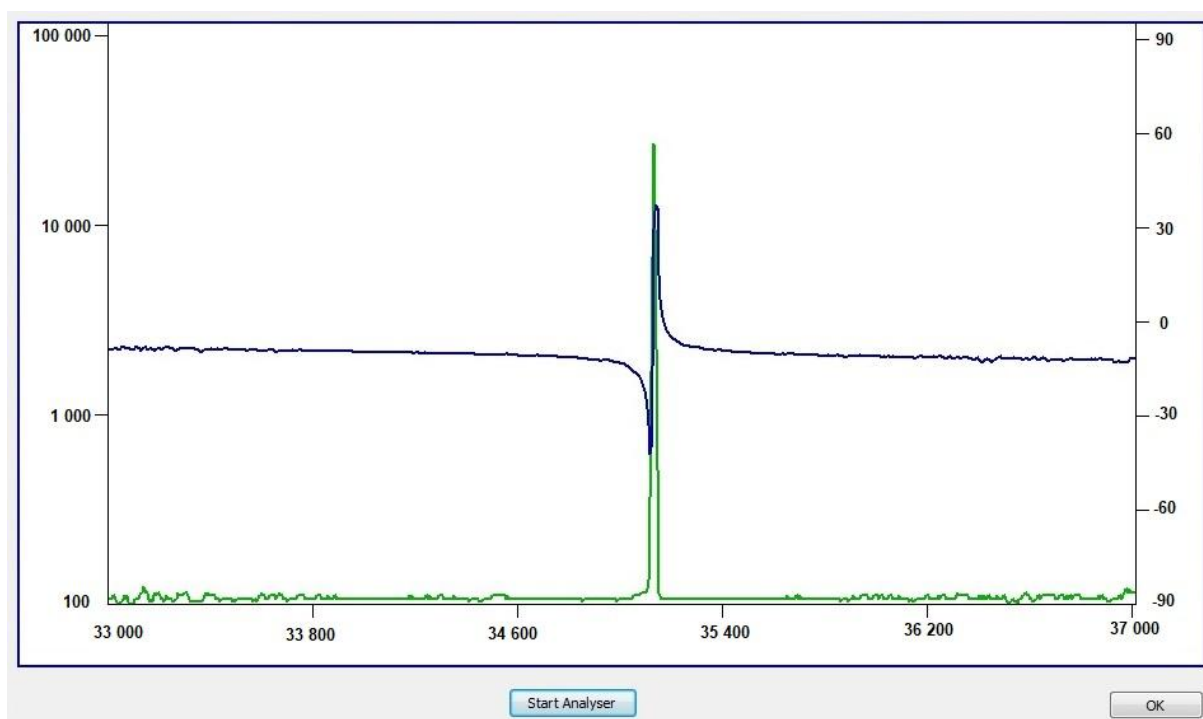
Obr. 63: Měření pracovní frekvence sonotrody

Po zapojení kované sonotrody z rychlořezné nástrojové oceli bylo zjištěno, že je sonotroda naladitelná. Software vyhodnotil její pracovní frekvenci na 35 370 Hz. Tato hodnota je v toleranci generátoru pro svařování.

14.2. Analýza

Další částí ověřování byla analýza průběhu ultrazvukové vlny sonotrodou. Tato analýza probíhá tak, že software na pokyn uživatele určí svařovací energii a svařovací čas. Poté vyšle do sonotrody ultrazvukovou vlnu na požadované frekvenci a graficky vyhodnotí její průběh.

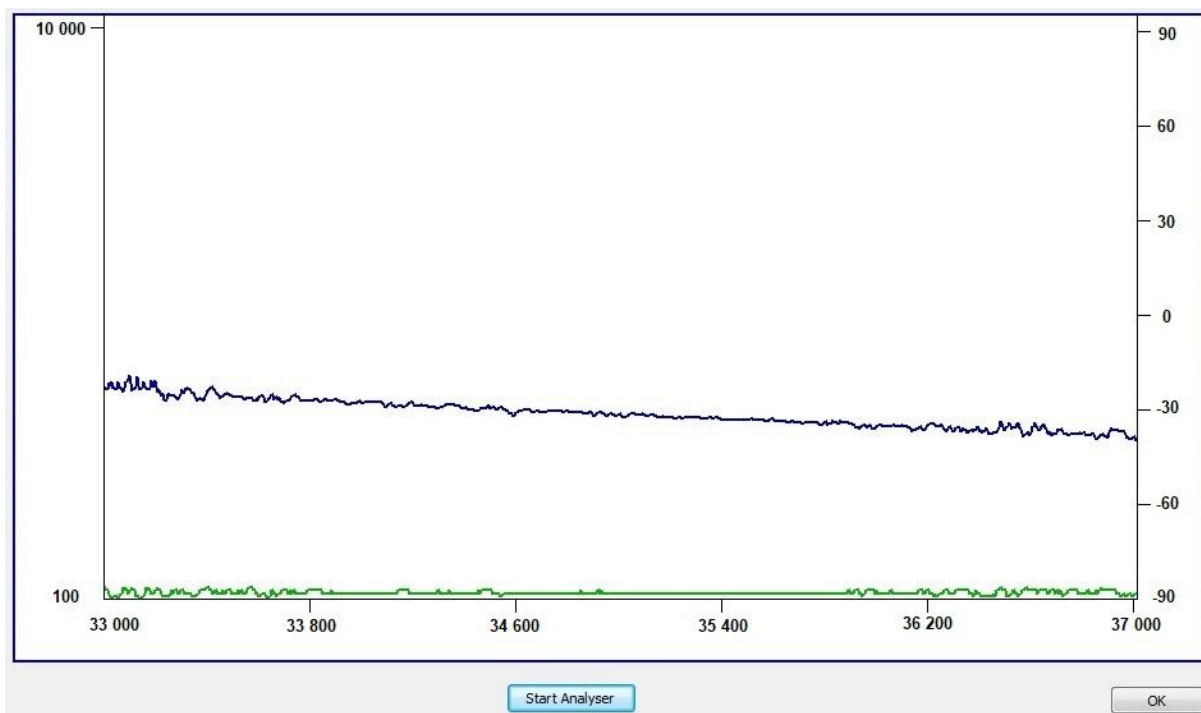
Záznam průběhu ultrazvukové vlny funkční komerční sonotrodou je na obr. 64. Na horizontální ose se nachází frekvence [Hz] a na vertikální ose amplituda. Největší výkmit na tomto záznamu se musí nacházet okolo 35 000 Hz podle pracovní frekvence sonotrody. Výkmit říká, že ultrazvuková vlna projde skrz celou sonotrodu až na špičku, kde se odrazí a vrací se zpět ke zdroji. Tímto způsobem vzniká stojatá vlna, která je nezbytná pro úspěšné svařování.



Obr. 64: Záznam průběhu ultrazvukové vlny komerční sonotrodou

Při analýze kované sonotrody z nástrojové kované oceli byly zjištěny hodnoty energie potřebné pro svaření a doby svařování, kdy hodnota energie je shodná a svařovací čas je nižší, než u funkční komerční sonotrody.

Dále bylo zjištěno, že ultrazvuková vlna prochází celou sonotrodou až na špičku. Na záznamu z analýzy (obr. 65) lze vidět, že na hodnotě okolo 35 000 Hz ale chybí jakýkoliv náznak výkmitu. Z toho vyplývá, že ultrazvuková vlna sonotrodou pouze prochází a na špičce se neodrazí zpět. Příčinou by mohla být nedostatečná kvalita obrobení špičky sonotrody, nesprávně zvolený tvar špičky nebo nesprávná délka sonotrody.



Obr. 65: Záznam průběhu ultrazvukové vlny kovanou sonotrodou

14.3 Ověření posunutí

Poslední provedenou částí ověření sonotrody bylo měření posunutí sonotrody. Posunutí se měří v podélném i příčném směru. Stále připojená sonotroda ke generátoru se upne do stojanu ve vertikální poloze (obr. 66, 67). Na spodní část stojanu se upne druhý magnetický stojánek, ve kterém je upevněný měřicí hrot. Měřicí hrot se nastaví tak, aby se dotýkal sonotrody a připojí se k měřicímu přístroji.

Samotné měření se opět spustí softwarem, kdy na pokyn uživatele generátor vyšle ultrazvukovou vlnu na pracovní frekvenci do sonotrody. Po průchodu ultrazvukové vlny sonotrodou se pomocí měřicího hrotu a měřicího přístroje odečte hodnota



Obr. 66: Měření příčného posunutí celkového fyzického posunutí na špičce sonotrody. Přístroj měří s přesností 0,1 μm .

Posunutí v příčném směru by mělo být teoreticky nulové. Výrobci dodávají sonotrody s tolerancí příčného posunutí $\pm 0,2 \mu\text{m}$.

Nejdříve byla opět měřena funkční komerční sonotroda, která vykazala posunutí v příčném směru $\pm 0,3 \mu\text{m}$. Je to sice nepatrně více než je stanovená tolerance od výrobců, ale na průběh svařování takto malá odchylka nemá vliv.

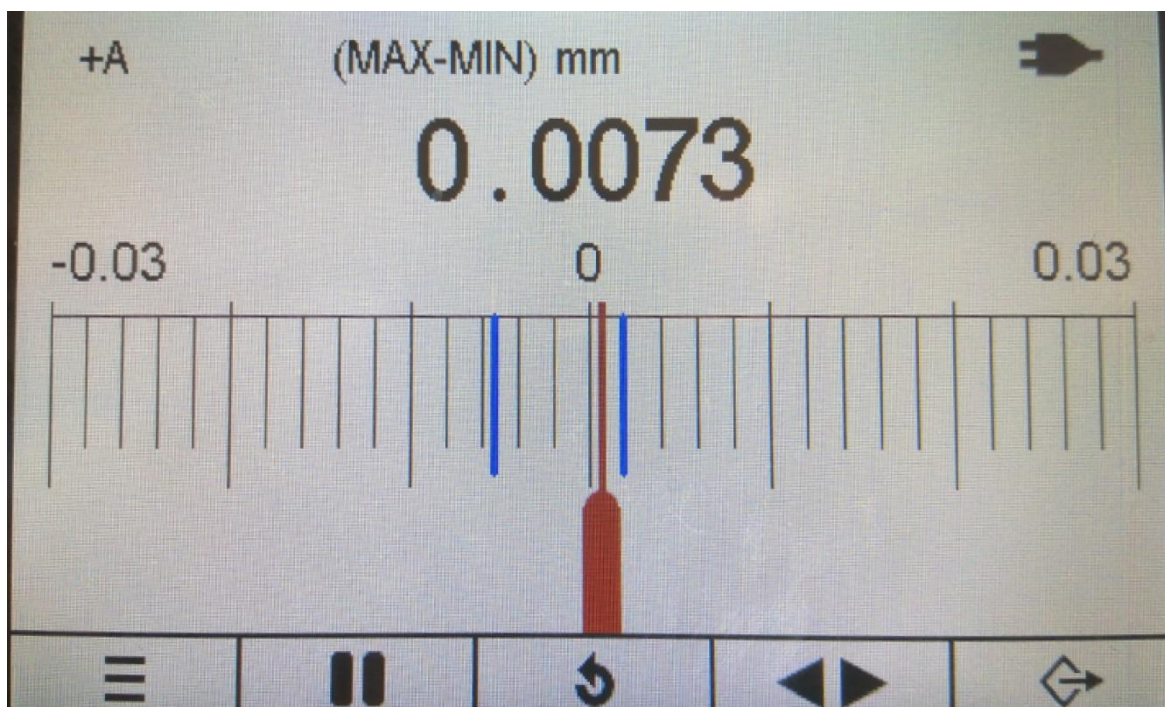
Na kované sonotrodě z nástrojové oceli bylo naměřeno boční posunutí $-0,7 \mu\text{m}$ až $+0,3 \mu\text{m}$, to znamená celkové posunutí $1 \mu\text{m}$. Takto vysoké boční posunutí by se u sonotrod nemělo vyskytovat. Možnou příčinou by mohla být nedostatečná kruhovitost po obrábění a následném tepelném zpracování.

Posunutí v podélném směru by mělo dosahovat podstatně vyšších hodnot. Velmi záleží na typu a materiálu konkrétní sonotrody, ale obecně se hodnoty podélného posunutí na špičce pohybují v řádech jednotek až desítek μm .



Obr. 67: Měření podélného posunutí

U funkční komerční sonotrody byla naměřena hodnota podélného posunutí $-5,3 \mu\text{m}$ až $+2 \mu\text{m}$, to znamená celkový výkmit $7,3 \mu\text{m}$ (obr. 68).



Obr. 68: Naměřená hodnota podélného posunutí komerční sonotrody

Na sonotrodě z kované nástrojové oceli bylo naměřeno posunutí +4,4 μm . Toto posunutí bylo však pouze do kladných hodnot. Ultrazvuková vlna tedy sonotrodu prodlouží, ale už ji nevrátí do původního stavu a dále do záporných hodnot. Z toho opět vyplývá, že se ultrazvuková vlna na špičce sonotrody nedokáže odrazit zpět a vytvořit tak stojatou vlnu.

15. Diskuze výsledků

V následující tabulce 9 je sepsán kompletní technologický postup výroby sonotrody z rychlořezné prokované oceli.

Materiál: W. Nr. 1.3343 (ČSN 19 830.3), W. Nr. 1.3243 (ČSN 19 852.3)		
Výchozí polotovár: Vyžehaná válcová tyč $\varnothing d = 50 \text{ mm}$, $l = 67 \text{ mm}$		
Technologie	Operace	Parametry
Kování	1. Předehřev	$T = 750 \text{ }^\circ\text{C}$
	2. Předehřev	$T = 1\ 150 \text{ }^\circ\text{C}$
	Pěchování + 2x prodloužení	Výstup – kvádr s průřezem 40x40 mm
	Ohřev	$T = 1\ 150^\circ\text{C}$
	Překování na osmihran pomocí úhlové vložky	Výstup – osmistěn o vzdálenosti protějších hran 45 mm
	Pěchování + 2x prodloužení	Výstup – kvádr s průřezem 40x40 mm
	Ohřev	$T = 1\ 150^\circ\text{C}$
	Překování na osmihran pomocí úhlové vložky	Výstup – osmistěn o vzdálenosti protějších hran 45 mm
	Pěchování + 2x prodloužení	Výstup – kvádr s průřezem 40x40 mm
	Překování na osmihran pomocí úhlové vložky	Výstup – osmistěn o vzdálenosti protějších hran 45 mm
	Ohřev	$T = 1\ 150^\circ\text{C}$
	Kování pomocí kruhových kalibrů	Rozměry kalibrů: $\varnothing d_1 = 40 \text{ mm}$, $\varnothing d_2 = 37 \text{ mm}$, $\varnothing d_3 = 32 \text{ mm}$
	Ohřev	$T = 1\ 150^\circ\text{C}$
	Kování pomocí kruhových kalibrů	Rozměry kalibrů: $\varnothing d_1 = 30,5 \text{ mm}$, $\varnothing d_2 = 26,5 \text{ mm}$
Ochlazení v peci	$t = 72 \text{ hod}$, $T = 60 \text{ }^\circ\text{C}$ ($v = 13 \text{ }^\circ\text{C/hod}$)	
Obrábění	Hrubování polotovaru + zarovnání čela	$v = 180 \text{ m/min}$, $f = 0,2 \text{ mm/ot}$, $a = 1 \text{ mm}$, $n = 1\ 790 \text{ ot/min}$
	Navrtání středícího důlku	$v = 20 \text{ m/min}$, $f = 0,3 \text{ mm/ot}$, $n = 1\ 590 \text{ ot/min}$
	Hrubování na rozměr pracovní části + přídavek na broušení	$v = 180 \text{ m/min}$, $f = 0,2 \text{ mm/ot}$, $a = 1,5 \text{ mm}$, $n = 2\ 204 \text{ ot/min}$
	Hrubování na rozměr upínací části + přídavek na broušení	$v = 180 \text{ m/min}$, $f = 0,2 \text{ mm/ot}$, $a = 1,5 \text{ mm}$, $n = 1\ 910 \text{ ot/min}$
	Navrtání středícího důlku	$v = 20 \text{ m/min}$, $f = 0,3 \text{ mm/ot}$, $n = 1\ 590 \text{ ot/min}$
	Broušení	$v_1 = 1\ 800 \text{ m/min}$, $v_2 = 10 \text{ m/min}$ $f = 10 \text{ mm/ot}$, $a = 0,005 \text{ mm/ot}$ $n_1 = 5\ 730 \text{ ot/min}$, $n_2 = 110 \text{ ot/min}$
	Vrtání díry pro závit M8	$v = 26 \text{ m/min}$, $f = 0,1 \text{ mm/ot}$, $n = 1\ 180 \text{ ot/min}$
	Řezání závitu M8	$v = 5 \text{ m/min}$

	Vrtání 4x \varnothing 6 mm	$v = 26$ m/min, $f = 0,08$ mm/ot, $n = 1\ 380$ ot/min
	Odstranění důlku + příprava špičky	$v = 180$ m/min, $f = 0,2$ mm/ot, $a = 1$ mm, $n = 4\ 090$ ot/min
Kalení ve vakuu	1. Předehřev	$T = 550$ °C, prodleva $t = 30$ min
	2. Předehřev	$T = 850$ °C, prodleva $t = 30$ min
	3. Předehřev	$T = 1\ 050$ °C, prodleva $t = 30$ min
	Ohřev na kalicí teplotu	$T = 1\ 190$ °C, prodleva $t = 10$ min
	Ochlazení	Dusík N_2 , přetlak $p = 5$ bar, $T = 50$ °C
Popouštění ve vakuu	1. Ohřev	$T = 550$ °C, prodleva $t = 120$ min
	1. Ochlazení v peci	$T = 20$ °C
	2. Ohřev	$T = 550$ °C, prodleva $t = 120$ min
	2. Ochlazení v peci	$T = 20$ °C
	3. Ohřev	$T = 550$ °C, prodleva $t = 120$ min
	3. Ochlazení v peci	$T = 20$ °C
Vyjiskřování	Vyjiskřování	$I = 6,5$ A, $U = 110$ V, $a = 85$ μ m

Tab. 9: Kompletní přehled technologického postupu výroby sonotrody

V tabulce 10 je porovnání nejdůležitějších parametrů a hodnot, které byly ověřovány v porovnání s funkční komerční sonotrodou vyrobenou práškovou metalurgií.

Parametr	Kovaná sonotroda z rychlořezné nástrojové oceli	Funkční komerční sonotroda vyrobená práškovou metalurgií	Vyhodnocení
Frekvence	35 370 Hz	35 105 Hz	Vyhovuje
Největší výkmit ultrazvukové vlny při průběhu sonotrodou	-	35 000 Hz	Nevyhovuje
Příčné posunutí	-0,7 μ m až +0,3 μ m	$\pm 0,3$ μ m	Nevyhovuje
Podélné posunutí	+4,4 μ m	-5,3 μ m až +2 μ m	Nevyhovuje

Tab. 10: Vyhodnocení důležitých parametrů ověření kované sonotrody

Negativní vyhodnocení funkčnosti sonotrody je způsobeno především faktem, že se ultrazvuková vlna není schopna odrazit na špičce sonotrody. Tento problém by mohl být způsoben některou z těchto příčin:

- Nedostatečná kvalita obrobení špičky sonotrody – V tomto případě může docházet k lomu a špatnému odrazu ultrazvukové vlny. Správným směrem se odrazí nedostatečné množství energie pro vytvoření stojaté vlny.
- Nevhodně zvolený tvar špičky sonotrody – byla zvolena špička se žebrováním. Při zvolení jednoduššího tvaru špičky by bylo možné použít kvalitnější technologii broušení nebo soustružení.
- Nevhodně zvolená technologie obrobení špičky sonotrody – technologií broušení nebo soustružení by se dosáhlo kvalitněji opracovaného povrchu špičky sonotrody, který má přímý vliv na odraz ultrazvukové vlny.
- Nevhodně zvolena délka sonotrody - mohla by zapříčinit posunutí uzlového bodu do jiného místa, než je špička sonotrody. V tomto případě by na špičce nástroje nemohlo dojít k odrazu ultrazvukové vlny.
- Vyražení označení na čele sonotrody (obr. 69) – po technologii broušení byl vzorek označen nešťastně na čelní ploše sonotrody. Přes tuto plochu vstupuje ultrazvuková vlna do sonotrody, proto by na ploše neměly být žádné rušivé elementy.



Obr. 69: Označení na čele sonotrody

Nízké posunutí ve směru podélném je opět způsobeno nemožností ultrazvukové vlny odrazit se na špičce sonotrody.

Příliš vysoké posunutí v příčném směru by mohlo být způsobeno nedostatečnou kruhovitostí sonotrody.

Závěr

Práce mapuje kompletní výrobu sonotrody z kované rychlořezné nástrojové oceli. Nejdůležitější částí procesu je technologie kování polotovaru, která má stěžejní vliv na výslednou strukturu a schopnost vést ultrazvukovou vlnu. Prokování polotovaru bylo provedeno třemi kovacími cykly reverzního kování, po kterém bylo dosaženo vysokého stupně prokování $P_K > 10$.

V další části byl navržen přesný tvar sonotrody včetně zjištění maximálního napětí a posunutí sonotrody. Tento navržený tvar byl obroben technologiemi soustružení, frézování a broušení.

V tomto stavu obrobek putoval na tepelné zpracování. Protože obrábění bylo provedeno na konečné rozměry, nesměly na obrobku být po tepelném zpracování okuje či jiné nečistoty. Z tohoto důvodu bylo zvoleno jako prostředí pro tepelné zpracování vakuum.

Posledním krokem byla výroba špičky sonotrody. Pro tento účel byla zvolena technologie elektroerozivního obrábění – vyjiskřování.

Ve spolupráci s firmou Megatech Industries s.r.o. v Plzni bylo provedeno ověření sonotrody. Přestože dle tab. 10 vypadá ověření velmi negativně, není tomu tak. Bylo potvrzeno, že prokovaná jemnozrnná nástrojová ocel má výborné vlastnosti z hlediska šíření a stability ultrazvukové vlny. O kvalitě materiálu svědčí i to, že v současné době si firma MS Ultraschall Technologie GmbH od Západočeské univerzity v Plzni objednala 5 kusů prokovaného polotovaru z rychlořezné nástrojové oceli pro výrobu sonotrod.

Základním předpokladem funkční sonotrody je již naladění kované sonotrody na požadovanou pracovní frekvenci a její schopnost vést ultrazvukovou vlnu. Tento splněný základní předpoklad je příslibem pro vyrobení kompletně funkční kované sonotrody.

V současném stavu se však ultrazvuková vlna nedokáže na špičce sonotrody odrazit a vytvořit tak stojatou vlnu. Tento problém by mohl být způsoben nekvalitně obrobenou špičkou nástroje. Kvůli složitému tvaru špičky byla zvolena technologie vyjiskřování, která by ale při zjednodušení tvaru špičky mohla být nahrazena kvalitnější technologií soustružení nebo broušení. Na čele sonotrody bylo vyraženo označení, které by mohlo mít negativní vliv na vstup ultrazvukové vlny do sonotrody. Dalším důvodem by mohla být nesprávná délka sonotrody, což by vedlo k posunutí kmitny do jiného místa, než je špička nástroje.

Použitá literatura:

- [1] LEPIL, O. Fyzika pro gymnázia: Mechanické kmitání a vlnění. Prometheus, 2007, ISBN: 978-80-7196-387-5
- [2] OBRAZ, J. *Zkoušení materiálu ultrazvukem*, SNTL Praha, 1989
- [3] ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE [online], [cit. 18.10.2019]. Dostupné z:
- [4] REGAZZO, Richard a REGAZOVÁ, Marcela. *ULTRAZVUK základy ultrazvukové defektoskopie*, Praha, 2013, ISBN 978-0-8247-5830-1
- [5] ENSMINGER, Dale a STULEN, B. Foster. *ULTRASONIC data, equations and their practical uses*. Taylor & Francis Group, LLC, 2009
- [6] Odraz vlnění v řadě bodů, stojaté vlnění: MEF. Fyzika : MEF [online]. Copyright © 2006 [cit. 18.10.2019]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/168-odraz-vlneni-v-rade-bodu-stojate-vlneni>
- [7] KUMAR, Pradeep a K. PRAKASAN. *Acoustic horn design for joining metallic wire with flat metallic sheet by ultrasonic vibrations*. *Journal of Vibroengineering* [online]. 2018, **20**(7), 2758-2770 [cit. 2019-12-07]. DOI: 10.21595/jve.2018.19648. ISSN 13928716
- [8] ELANGOVAN S., SEMEER S. s PRAKASAN K. *Temperature and stress distribution in ultrasonic metal welding-An FEA-based study*, *Journal of materials processing technology*. Volume 209, Issue 3, 2009. Pages 1143 – 1150. ISN 0924-0136
- [9] Elektroakustické měniče [online] [cit. 18.10.2019] Dostupné z: http://dlabos.wz.cz/en/Elektroakusticke_menice.html
- [10] DUKANE, *Ultrasonic Welding and Cutting, Ultrasonic Assembly, Vibration Welding, Food Processing* [online]. Copyright © [cit. 24.11.2019]. Dostupné z: http://www.dukane.eu/downloads/cz/manuals/iQ_Hand_Probe_System_manual_CZ.pdf
- [11] KOVAŘÍK, R. a ČERNÝ, F. *Technologie svařování*, ZČU v Plzni, 2000
- [12] Manual | SonoAnalyzer. *SonoAnalyzer/ from PowerUltrasonics.com* [online]. Copyright ©2011 [cit. 01.12.2019]. Dostupné z: <http://www.sonoanalyzer.com/manual>
- [13] Bolzano. *Úvod: Přehled rychlořezných ocelí a jejich charakteristika* [online] [cit. 01.12.2019]. Dostupné z: https://www.bolzano.cz/assets/files/TP/Nastrojove_oceli/Prehled_rychloreznych_NO.pdf
- [14] Bolzano. *Materiálový list oceli HS 6- 5 -2*. Bolzano [online]. Copyright © 2019 Bohdan Bolzano, s.r.o. [cit. 20.11.2019]. Dostupné z: <https://www.bolzano.cz/cz/technicka-podpora/technicka-prirucka/nastrojove-oceli/nastrojove-oceli-rychlorezne/materialove-listy/materialovy-list-oceli-hs-6-5-2>

- [15] Bolzano. *Materiálový list oceli HS 6-5-2-5. Bolzano* [online]. Copyright © 2019 Bohdan Bolzano, s.r.o. [cit. 08.12.2019]. Dostupné z: <https://www.bolzano.cz/cz/technicka-podpora/technicka-prirucka/nastrojove-oceli/nastrojove-oceli-rychlorezne/materialove-listy/materialovy-list-oceli-hs-6-5-2-5>
- [16] BENEŠOVÁ, Soňa. *Kování rychlořezných nástrojových ocelí*. Západočeská univerzita v Plzni, 2017
- [17] BENEŠOVÁ, Soňa a KESL, Miloslav. *Příprava rychlořezné oceli s vysokým stupněm prokování a ultrajemnou strukturou pro speciální nástroje*. Západočeská univerzita v Plzni, 2019
- [18] MORÁVEK, Rudolf. *Nekonvenční metody obrábění*, 2. vydání. Tiskové středisko ZČU, 1999, ISBN: 80-7082-518-9
- [19] KREIDL, M., ŠMÍD, R., MATZ, V. a ŠTARMAN, S. *Ultrazvuková defektoskopie*, Praha, 2011, ISBN: 978-80-254-6606-3
- [20] ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE, *Technologie obrábění I, Technologie obrábění – 3. část* [online]. Copyright © [cit. 25.11.2019]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/Dokoncovaci_a_nekonvencni_metody_obrabeni/TI_TO-3.cast.pdf
- [21] DILINGER, Josef a kolektiv. *Moderní strojírenství pro školu i praxi*. Verlag Europa-Lehrmittel, 2007, ISBN: 978-80-86706-19-1
- [22] MM spektrum. *Nekonvenční metody obrábění*. [online]. Copyright © 2019 www.mmspektrum.com [cit. 05.12.2019]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni.html>
- [23] Find suppliers, processes & material. *Electrical discharge sinking* [online] [cit. 05.12.2019]. Dostupné z: <https://www.manufacturingguide.com/en/electrical-discharge-sinking>
- [24] Bolzano. *Úvod: Zpracování nástrojových ocelí* [online] [cit. 07.12.2019]. Dostupné z: https://www.bolzano.cz/assets/files/TP/Nastrojove_oceli/MOP_Zpracovani%20nastrojo
- [25] 301 Moved Permanently. *301 Moved Permanently* [online] [cit. 20.05.2019]. Dostupné z: <http://www.sonoanalyzer.com/content/sonoanalyzer-pro-offers-additional-analysis-methods>
- [26] TRČKA, Jan. *Měření ultrazvukových parametrů kované nástrojové oceli*, Bakalářská práce, Západočeská univerzita - Fakulta strojní, 2018
- [27] KRAUS, Václav. *Tepelné zpracování a slinování*, Západočeská univerzita v Plzni, 2013, ISBN: 978-80-261-0260-1

- [28] *Nástrojové oceli* [online] [cit. 19.05.2020]. Dostupné z: http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/vyuka/struktura_a_vlastnosti_materialu/prednasky/07%20-%20Nastrojove%20oceli.pdf
- [29] MUŠUTOVÁ, Veronika, *Vliv tepelného zpracování Cr-V ledeburitické oceli* [online]. [cit. 22.04.2020]. Dostupné z: <http://stc.fs.cvut.cz/pdf11/1100027-1.pdf>
- [30] KŘÍŽ, Antonín, *Vady tepelného zpracování rychlořezných ocelí* [online] [cit. 29.04.2020]. Dostupné z: https://www.opi.zcu.cz/VADY_TEPELNEHO_ZPRACOVANI_RYCHLOREZNYCH_OCELI.pdf
- [31] ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI. Způsob výroby nástroje pro ultrazvukové svařování elektricky vodivých i nevodivých materiálů a nástroj vyrobený tímto způsobem. Vynálezci: Soňa BENEŠOVÁ, Antonín KŘÍŽ, Miloslav KESL, Jan SCHWEITZER. Česká republika. Patentový spis CZ 308308 B6. 18. 3. 2020
- [32] Kalírna Narexd.cz. *Úvod, Narexd.cz* [online]. Copyright © NAREX Ždánice, spol. s r.o. [cit. 02.05.2020]. Dostupné z: <https://www.narexd.cz/o-nas/kalirna/>
- [33] KESL, Miloslav, *DSpace at University of West Bohemia: Vliv technologie tepelného zpracování na řezivost RO ocelí* [online] [cit. 10.06.2020]. Dostupné z: <https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/16116/1/Kesl.pdf>
- [34] SIRAPID 3343 Steel (Mat.No. 1.3343, DIN S5-5-2, AISI M2). [online] [cit. 09.06.2020]. Dostupné z: <https://steelselector.sij.si/steels/BRM2.html>
- [35] OBRAZ, Jaroslav, *Ultrazvuk v měřící technice*, STNL – Státní nakladatelství technické literatury, 1976
- [36] ŠVEHLA, Štefan, FIGURA, Zdenko, *Ultrazvuk v technologii*, STNL – nakladatelství technické literatury Praha, 1984
- [37] TROUGHTON, Michal, J., *Handbook od plastics joining, a practical guide, second edition*, Library of Congress Cataloging-in-Publication Data, 2008, ISBN: 978-0-8155-1581-4
- [38] BENEŠOVÁ, S., KŘÍŽ, A., *Výpočet stupně prokovaní a jeho vztah k rozložení deformace uvnitř tělesa, stanovené numerickou simulací*, FST, KMM
- [39] PÍŠKA Miroslav a kolektiv, *Speciální technologie obrábění*, Akademické nakladatelství Cerm, s.r.o. Brno, 2009, ISBN: 978-80-214-4025-8
- [40] AB Sandvik Coromant, přeložil KUDELA Miroslav, *Příručka obrábění*, Sandvik CZ s.r.o., 1. české vydání 1997, ISBN: 91-97 22 99-4-6

[41] MM spektrum, *Využití ultrazvuku při svařování plastů*. [online]. Copyright © 2020 [cit. 10.07.2020]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/vyuziti-ultrazvuku-pri-svarovani-plastu.html>