



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ



Ústav konstruování a částí strojů

Přestavba lisu pro odporové svařování

Redesigning of Resistance Welding Press

Diplomová práce

Studijní program: N2301 STROJNÍ INŽENÝRSTVÍ
Studijní obor: 2031T047 Dopravní, letadlová a transportní technika
Zaměření: Transportní technika

Vedoucí práce: Ing. Martin Dub
Odborný konzultant: Ing. Ivan Růžek

Bc. Marek Sýkora

Praha 2015

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem: „Přestavba lisu pro odporové svařování“ vypracoval samostatně dle mého nejlepšího vědomí a svědomí pod vedením Ing. Martina Duba s použitím literatury uvedené na konci mé diplomové práce v seznamu použité literatury.

V Praze dne 3. 6. 2015

.....
Bc. Marek Sýkora

Poděkování

Tímto bych chtěl především poděkovat své rodině a přátelům, kteří mi pomohli se stylizací mnoha pasáží, měli podnětné připomínky k obsahu práce a zároveň mi poskytovali psychickou podporu při jejím psaní. Dále bych rád poděkoval panu Ing. Růžkovi, mému konzultantovi z firmy KOPR spol. s r.o., za rady týkající se konstrukce celého zařízení a panu Ing. Dubovi, mému vedoucímu práce, za pomoc při vytváření MKP modelu. V neposlední řadě patří dík i panu Lukovi z firmy Tenneco za jeho vstřícnou komunikaci.

Anotační list

- Jméno autora: **Bc. Marek SÝKORA**
- Název DP: Přestavba lisu pro odporové svařování
- Anglický název: Redesigning of Resistance Welding Press
- Rok: 2015
- Obor studia: 2301T047 Dopravní, letadlová a transportní technika
- Ústav: Ústav konstruování a částí strojů
- Vedoucí DP: Ing. Martin Dub
- Bibliografické údaje:
- | | |
|---------------|-----|
| počet stran | 104 |
| počet obrázků | 77 |
| počet tabulek | 8 |
| počet příloh | 11 |
- Klíčová slova: Odporové svařování, výstupkové svařování, JÚS, jednoúčelový svařovací přípravek, konstrukce, simulace průchodu elektrického proudu, ABAQUS MKP, návrh svařovacích parametrů
- Keywords: Resistance welding, projection welding, welding fixture, construction, electrical current simulation, ABAQUS FEM, suggestion of welding parametres
- Anotace: Práce se zabývá konstrukcí jednoúčelového svařovacího přípravku pro odporové svařování automobilových tlumičů. Kromě konstrukce byl proveden návrh svařovacích parametrů a pomocí MKP simulace průchodu elektrického proudu analyzováno teplotní pole v závislosti na čase.
- Abstract: This thesis concerns designing of welding fixture for resistance welding of shock absorbers. Besides the construction, there was performed the suggestion of welding parametrs. The simulation of electic current flow was made by using the FEM and a thermal distribution in time was analyzed.

OBSAH

1. Odporové svařování.....	3
1.1 Vývoj svařování.....	3
1.2 Metody svařování.....	9
1.3 Charakteristika a rozdělení odporového svařování.....	11
1.4 Výstupkové svařování.....	12
1.4.1 Svařovací parametry.....	12
1.4.2 Tvary výstupků.....	15
1.4.3 Technologie a použití výstupkového svařování.....	16
1.4.4 Zařízení používaná při výstupkovém svařování.....	18
1.4.5 Zkoušky jakosti výstupkových svarů.....	19
1.4.6 Normy týkající se výstupkového svařování.....	21
2. Konstrukce svařovacího přípravku.....	22
2.1 Technické zadání.....	22
2.2 Technologičnost konstrukce.....	26
2.3 Horní elektroda.....	30
2.3.1 Celkový pohled.....	30
2.3.2 Průchod elektrického proudu.....	31
2.3.3 Chlazení nejdůležitějších komponent.....	36
2.3.4 Výpočet čepu.....	38
2.3.5 Pohyb čepu.....	40
2.3.6 Poka – Yoke.....	44
2.4 Dolní elektroda.....	48
2.4.1 Celkový pohled.....	48
2.4.1 Výměnné držáky pro různé svařované díly.....	50
2.4.1.1 Modifikace pro svařování pístnic.....	50
2.4.1.2 Modifikace pro svařování plášťů.....	51
2.4.2 Průchod elektrického proudu.....	52
2.4.3 Chlazení nejdůležitějších komponent.....	55
2.4.4 Stavitelnost.....	56
2.4.5 Kloubová spojení.....	57
2.4.6 Aretace podpěrné tyče.....	60
2.4.7 Vzpěrná pevnost hlavní tyče.....	61

2.5	Výsledná podoba zařízení	62
2.6	Zkoušky prováděné na svařených tlumičích	67
3.	Návrh svařovacích parametrů.....	69
4.	Způsoby modelování odporového svařování	74
4.1	Simulace odporového svařování dílů	74
4.2	Mechanicko-teplotně-elektrická závislost	75
4.3	Simulace průchodu elektrického proudu	77
4.3.1	Stacionární analýza ohřevu průchodem el. proudu.....	77
4.3.2	Nestacionární analýza ohřevu průchodem el. proudu.....	81
4.3.3	Nestacionární analýza volného ochlazování	85
4.3.4	Způsob modelování kontaktní úlohy 2 těles	88
5.	Závěr	96
	Seznam obrázků.....	97
	Seznam tabulek.....	100
	Seznam příloh.....	100
	Použité zdroje	101

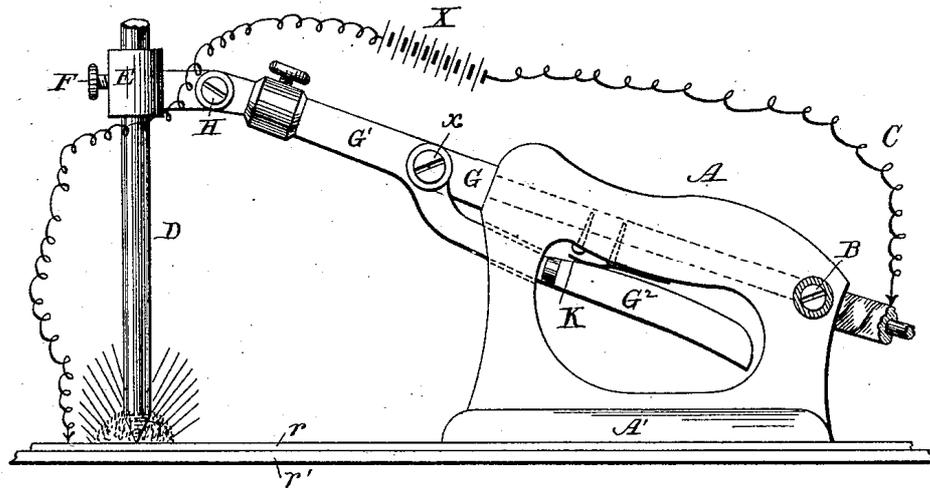
1. Odporové svařování

1.1 Vývoj svařování

Jedním z prvních využívaných způsobů spojování kovových materiálů bylo tzv. tvrdé pájení. První pokusy s touto technologií prováděli v době bronzové již Sumerové. Pozůstatky nádob, které měly kolem držadel připájené dráty, byly nalezeny v hrobce královny Pu-abi, která žila přibližně okolo roku 3000 př. n. l. Další používanou metodou v tomto období bylo kovářské svařování, jímž se zhotovovaly bronzové meče a jiné zbraně. Obě technologie byly známy rovněž ve starém Egyptě, což opět dokládají četné archeologické nálezy. Kovářské sváření dalo později základ ostatním tlakovým způsobům svařování.^[1]

Až o mnoho set let později, mezi lety 1801-1802, vynalezl americký chemik Robert Hare kyslíko-vodíkový hořák, kterým položil základy plamennému svařování. Shodou okolností došlo ve stejném období k významnému objevu, jímž bylo zažehnutí vůbec prvního elektrického oblouku mezi dvěma neodtavujícími se uhlíkovými elektrodami. Postarali se o to nezávisle na sobě Angličan Humphrey Davy (roku 1801) a Rus Vasilij Petrov (roku 1803). Tento objev byl klíčový pro rozvoj veškerých obloukových metod svařování.^{[1],[2],[3]}

K průmyslovému využití obou nových metod však došlo mnohem později. V roce 1860 využil elektrický oblouk ke spojení dvou kovů Angličan Wilde, který si tento vynález nechal o pět let později také patentovat. Přesto k prosazení elektrického oblouku došlo až v roce 1881, kdy byl v Anglii využit v prvních obloukových lampách. V témže roce francouzský vědec Auguste de Méritens použil elektrický oblouk ke svaření olověných desek akumulátorů. Právě on prvně připojil kladný pól zdroje napětí na základní materiál, a vytvořil tak z něj druhou elektrodu. Provedl tím vůbec první přímé zapojení v historii. Stanislas Olszewski a Nikolas Benardos, de Méritensovi žáci, pokračovali ve výzkumu – metodu se jim podařilo úspěšně aplikovat na spojení ocelových plechů a nechali si ji patentovat v mnoha zemích světa. Ukázka z jejich patentového spisu podaného v USA je na *obrázku 1*. Tento způsob byl záhy uplatněn v praxi jednou anglickou firmou při výrobě sudů a nádrží. Nicméně nevýhodou metody byla potřeba přídavného materiálu (podobně jako je tomu dnes u WIG (TIG) sváření) a kvůli použití uhlíkových elektrod docházelo k nauhličování svarové lázně. To mělo za následek křehnutí spoje a jeho časté praskání.^{[1],[4],[5],[6]}



Witnesses -

Ewell A. Dick
Marvin A. Curtis

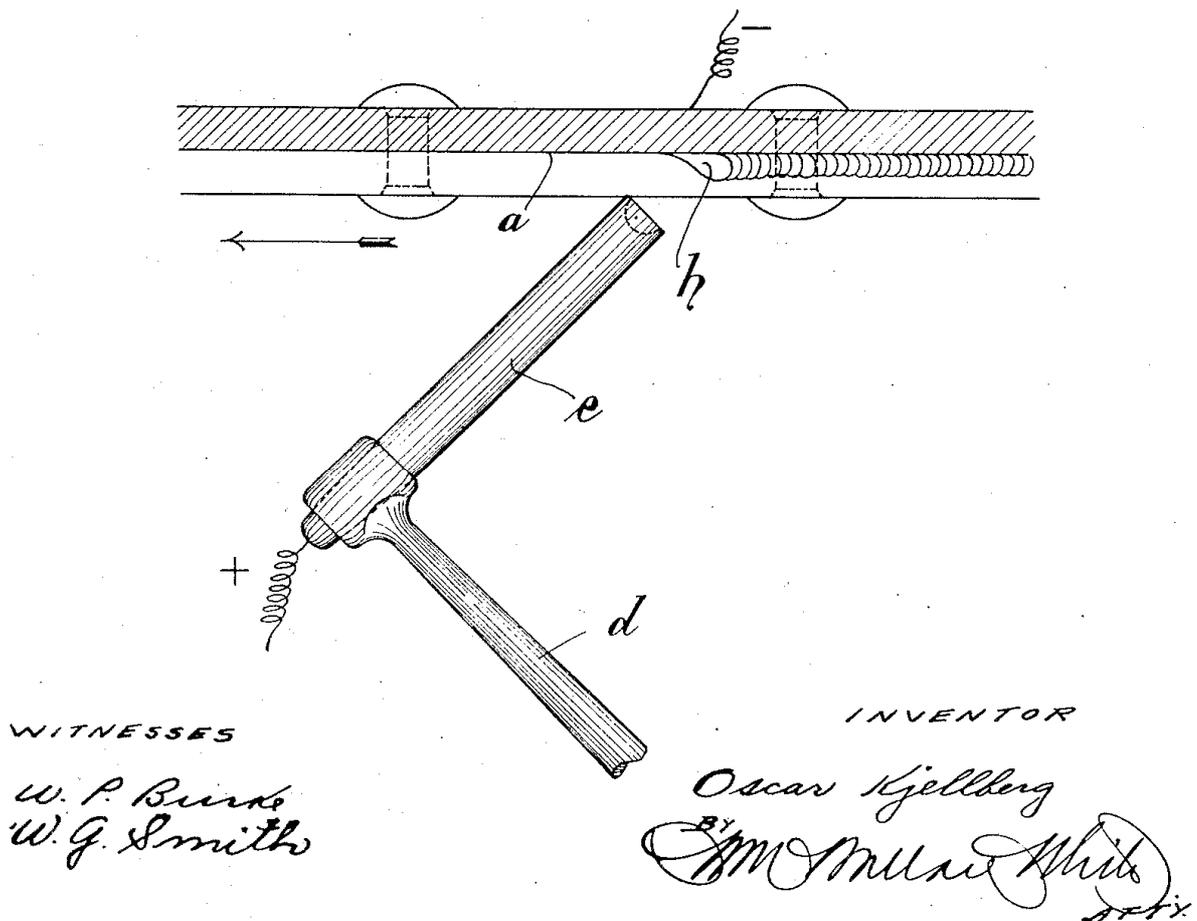
Inventors -

Nicholas de Benardos
Stanislas Olszewski
by Maullus Bailey
Attorney

obr. 1: Držák elektrody pro obloukové svařování. Ukázka z patentu Benardose a Olszewskiho.^[12a]

Tohoto „nedostatku“ využil Nikolaj Slavjanov, který jako první v roce 1888 představil odtavující se kovovou elektrodu. Sám tento postup nazval jako „Svařování kovů odléváním“. Vytvořený svar již nebyl nauhličený, ve větší míře se však projevilo negativní působení vzdušných plynů – především kyslíku. Původní uhlíková elektroda totiž vytvářela v okolí elektrického oblouku CO_2 , kterým částečně chránila svarovou lázeň.

Tím vyvstala potřeba ochrany roztaveného svarového kovu, což si jako první uvědomil Charles L. Coffin a v roce 1889 navrhl, aby svařování probíhalo v neoxidující atmosféře. Položil tak základy používání ochranných atmosfér při svařování. Jinou cestou ochrany lázně se vydal Oscar Kjellberg, zakladatel švédské firmy ESAB. Opatřil odtavující se elektrodu struskotvorným ochranným obalem z minerálů, a tak v roce 1907 spatřila světlo světa vůbec první obalovaná elektroda. Ukázka z patentu je na obrázku 2. Tehdejší tenké obaly však přispívaly spíše ke stabilitě hoření oblouku než k rafinaci svarového kovu. Ve výzkumu různých typů obalů pokračoval v letech 1909 – 1912 Arthur Percy Strohmenger. Až jeho tlustostěnné obaly elektrod dokázaly ochránit lázeň potřebným způsobem a vytvořit svar požadovaných mechanických vlastností bez nežádoucích příměsí.^{[4],[5],[6]}



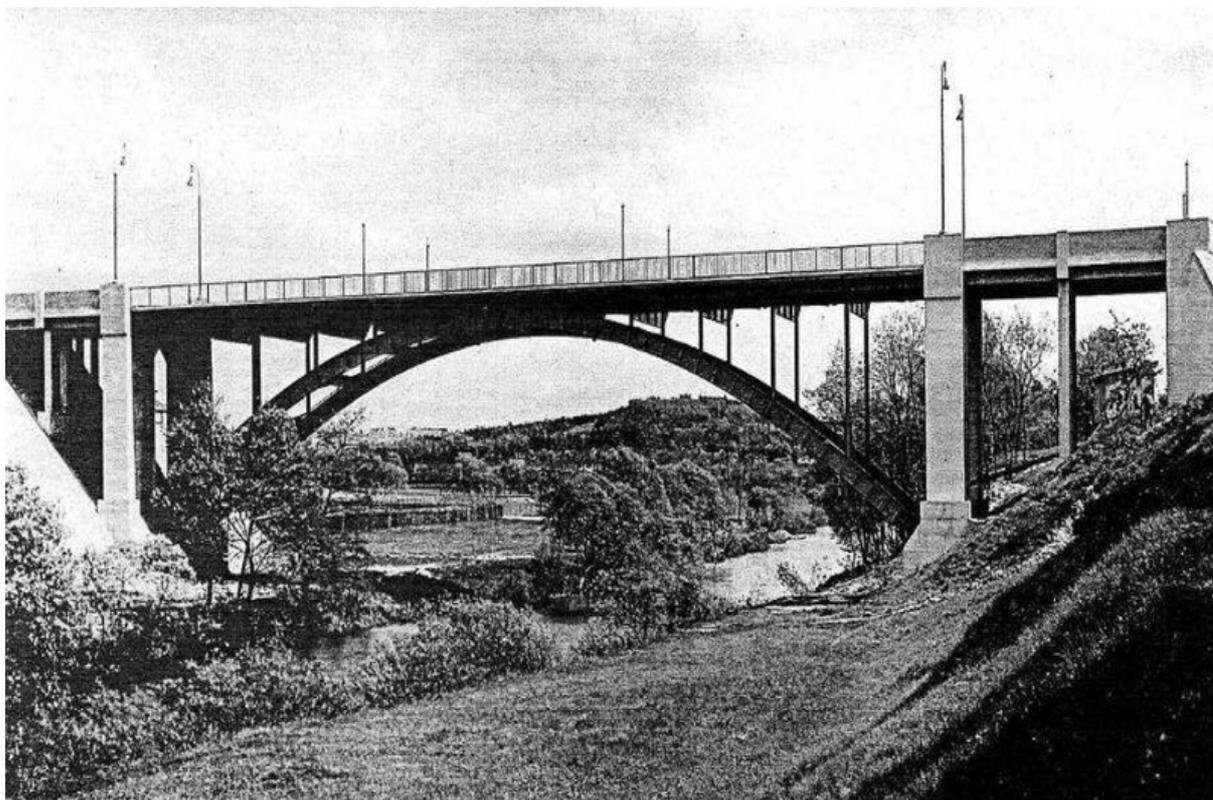
obr. 2: První obalovaná elektroda sestavená Oscarem Kjellbergem. Ukázka z jím podaného patentu z roku 1907.^[12b]

Obalované elektrody si ale získávaly přízeň jen pomalu. Jejich pověst nebyla valná kvůli již zmiňované špatné kvalitě svarů a navíc výroba samotných elektrod byla poměrně drahá. Dominantní technologií svařování bylo na počátku 20. století plamenné svařování kyslíko-acetylenovým hořákem. První hořák s využitím těchto plynů zkonstruoval v roce 1901 Charles Picard. Tento plamen, který se dodnes v hojné míře využívá především kvůli vysoké výhřevnosti a teplotě dosahující až 3150 °C, byl schopen vytvořit svary dobré jakosti. Jeho hojnému rozšíření velmi napomohly dva zásadní vynálezy.^[1]

První z nich pochází od německého technika Carla von Linde, který v roce 1895 sestavil přístroj na zkapalnění vzduchu a o 7 let později rektifikační kolonu určenou pro separaci kyslíku a dusíku. V roce 1910 započala průmyslová velkovýroba čistých plynů za zlomek dřívějších nákladů (do té doby byl kyslík získáván pouze chemickou cestou popř. elektrolýzou). Až později byl stejným způsobem ze vzduchu získán také argon, jeden z hlavních plynů moderních ochranných atmosfér.^[7]

Druhý vynález uskutečnil mezi lety 1907 – 1912 Švéd Nils Gustaf Dalén, kterému se nově podařilo vyvinout způsob uskladnění acetyleny, a to rozpuštěním v acetonu a naplněním do tlakových lahví s porézní hmotou. Do této doby musel být acetylen vyvíjen vždy v místě a okamžiku spotřeby. Tento vynález tak významně zjednodušil manipulaci, zefektivnil výrobu a je používán dodnes.^{[7],[8]}

Výraznější využití obloukového svařování a obalovaných elektrod přišlo během 1. světové války, kdy bylo zapotřebí technologie k rychlému opravení těžce poškozených lodí. Zde našlo obloukové sváření svoje místo a stalo se uznávaným při stavbě lodí. Rozšíření do ostatních oblastí strojírenské výroby proto bylo už jen otázkou času. Již mezi lety 1920 a 1930 vznikaly první nosné konstrukce budov a mostů, které byly kompletně svařovány elektrodami. Zastánci tohoto způsobu postupně prosazovali svařované díly namísto do té doby běžných, litinových. Roku 1933 byl v Plzni Škodovými závody svařen Tyršův most (viz *obrázek 3*) o celkovém rozpětí 49,2 metry, což byl ve své době nejdelší takto vyrobený most na světě. Jeho autorem byl prof. František Faltus, který působil na ČVUT v Praze. Na začátku 2. světové války bylo obloukové svařování naprosto dominantním procesem a do značné míry vytlačilo původní plamenné sváření.^{[4],[6],[10]}



obr. 3: Tyršův most z roku 1933. Svého času nejdelší celosvařovaný most na světě.^[13]

V roce 1924 došlo ještě k jednomu významnému vynálezu. Postaral se o něj Paul O. Nobl, který si nechal patentovat automatické podávání svařovacího drátu řízené napětím oblouku. Toho využili Henry M. Hobart a Philip K. Devers, kteří navíc svými experimenty s inertními ochrannými atmosférami (argon, helium) položili základ MIG svařování. V reakci na vysokou cenu argonu přišli v roce 1953 Ljubavský a Novošilov s jeho nahrazením za CO₂, které našlo uplatnění především při svařování nelegovaných a nízkolegovaných ocelí. Zároveň využití ochranných atmosfér přineslo rozvoj i v oblasti svařování hořčíku a niklu pomocí neodtavujících se wolframových elektrod (metoda WIG (TIG)), což mělo velký význam především pro letecký průmysl. Tato metoda byla dále zdokonalována a v roce 1953 z ní byla odvozena zcela nová technologie – plazmové svařování.^{[1],[4],[6],[9]}

Nezávisle na vývoji plamenného a obloukového svařování vznikla ještě další, v dnešní době velmi hojně využívaná metoda, kombinující působení elektrického proudu a tlaku, a tou je odporové svařování. Roku 1856 experimentoval James Joule se svazkem drátů a podařilo se mu pomocí elektrického proudu a vnitřního odporu svazku zhotovit pevný spoj. V roce 1886 zdokonalil tuto metodu Elihu Thomson. Ukázka jeho patentu je na *obrázku 4*. V dalších letech se vývoj orientoval především na zdokonalování potřebných zdrojů elektrického proudu. Thompson se tomuto typu sváření věnoval přibližně dalších 15 let a nechal si mimo jiné patentovat zdroj na tzv. měkký způsob svařování, který ale neposkytuje příliš dobrou kvalitu spoje. Mnohem výhodnější je použití tzv. tvrdého režimu vyžadujícího ovšem zdroje s řádově vyšším příkonem z elektrické sítě a celkově lepší energetickou situaci. Proto k dalšímu vývoji odporového svařování dochází až po roce 1925, kdy dosáhla elektrotechnika potřebné úrovně. Klíčovou roli zde sehrál nově vznikající automobilový průmysl a rostoucí důraz na ekonomičnost provozu spolu se zaváděním stále větší míry automatizace.^{[1],[4],[6],[11]}

V průběhu historie vznikly i další významné metody, jakými jsou např. svařování termitem (1903) používané hlavně na spojování kolejnic, svařování laserovým paprskem, atd. Dnes existuje a používá se nespočet různých způsobů svařování. Původní metody byly díky vývoji elektrotechniky a nástupu elektroniky značně vylepšeny, jejich základ však zůstává i nadále stejný. Ten dal vzniknout mnohým modifikacím, jakými jsou např. svařování pod tavidlem, výstupkové svařování a další. Vznikly však i metody zcela nové, založené na nových fyzikálních jevech. Do této kategorie bychom mohli zařadit např. elektronové nebo ultrazvukové svařování, svařování světelným zářením, atd. Do svařovacích metod se rovněž řadí řezání, drážkování a jim příbuzné procesy. Sváření

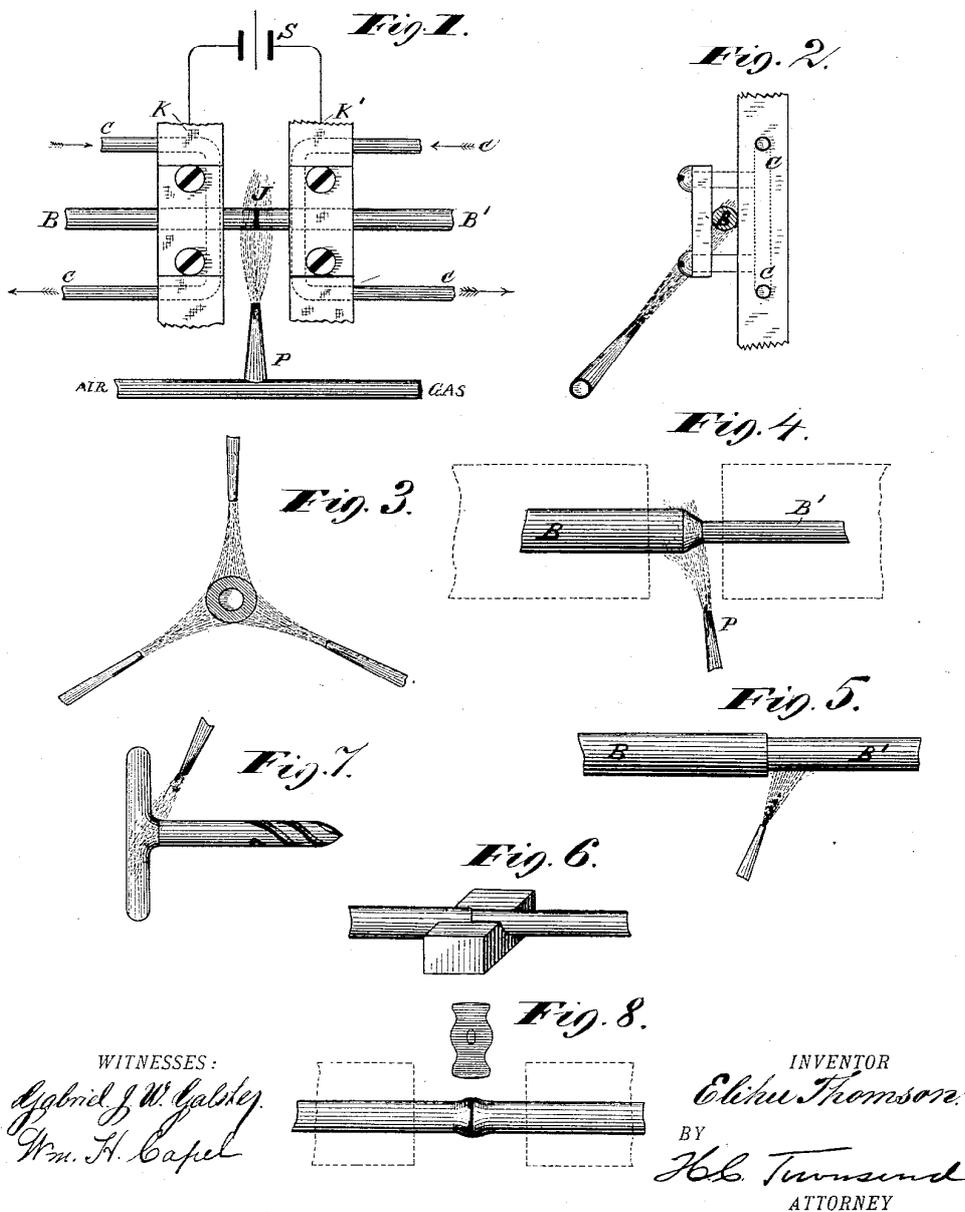
bezpochyby zůstává v dnešní době jednou z klíčových oblastí strojírenské výroby a jeho význam i nadále roste. Při dodržení všech potřebných technologických postupů je možné vytvořit velmi kvalitní, konstrukčně i ekonomicky výhodný spoj s požadovanými mechanickými vlastnostmi.^{[11],[14]}

(No Model.)

E. THOMSON.
ELECTRIC WELDING.

No. 347,142.

Patented Aug. 10, 1886.



N. PETERS, Photo-Lithographer, Washington, D. C.

obr. 4: Skica z patentu Elihu Thomsona pojednávající o metodách odporového svařování.^[12c]

1.2 Metody svařování

Jak jsem již uvedl v předešlé kapitole, svařovacích metod je v dnešní době celá řada. Stejně tak k jejich rozdělení je možné přistupovat z mnoha různých hledisek (podle zdroje tepla, teploty svařování,...). Pro praxi nejdůležitější rozdělení je obsaženo v mezinárodně platné normě ČSN EN ISO 4063: „Svařování a příbuzné procesy – Přehled metod a jejich číslování.“ Tato norma shrnuje názvy jednotlivých metod a každé přiřazuje číselné označení. Toto číslo může být až trojčíferné, kde první cifra udává základní způsob svařování, druhá metodu svařování a třetí upřesnění metody svařování.

Stejnou oblast popisuje i norma ČSN ISO 857: „Metody svařování, tvrdého a měkkého pájení – Slovník“, která definuje pouze některé z metod uvedených v ČSN EN ISO 4063. Mezinárodní organizace pro normalizaci (ISO) měla v plánu obě normy sloučit do jedné. Tento záměr nebylo ale možné realizovat, protože odkazy na obě byly již uvedeny v jiných normách, a mohly by tak vzniknout nepříjemnosti a potíže při vyhledávání.^[N]

Základní způsoby svařování ve více jazycích jsou uvedeny v *tabulce 1*. Vybrané nejběžněji používané konkrétní metody a jejich zkratky jsou shrnuty v *tabulce 2*.^[N]

Číslo metody	Název metody (česky)	Název metody (anglicky)	Název metody (Německy)
1	Obloukové svařování	Arc welding	Lichtbogenschweißen
2	Odporové svařování	Resistance welding	Widerstandsschweißen
3	Plamenné svařování	Gas welding	Gasschmelzschweißen
4	Tlakové svařování	Welding with pressure	Pressschweißen
5	Svařování svazkem paprsků	Beam welding	Strahlschweißen
6	--- vynecháno / není definováno ---		
7	Ostatní způsoby svařování	Other welding processes	andere Schweißverfahren
8	Řezání a drážkování	Cutting and gouging	Schneiden und Ausfugen
9	Pájení tvrdé, měkké a do úkosu	Brazing, soldering and braze welding	Hartlöten, Weichlöten und Fugelöten

tab. 1: Základní metody svařování podle ČSN EN ISO 4063.^[N]

Číslo metody	Používaná Zkratka ¹⁾	Název metody
111	MMA	Ruční obloukové svařování obalenou elektrodou
12	SAW	Svařování pod tavidlem
131	MIG	Obloukové svařování tavící se elektrodou v inertním plynu
135	MAG	Obloukové svařování tavící se elektrodou v aktivním plynu
141	TIG / WIG	Obloukové svařování netavící se elektrodou v inertním plynu
15	PAW*	Plazmové svařování
21	RSW*	Bodové odporové svařování
22	RSEW*	Švové odporové svařování
23	PW*	Výstupkové svařování
24	FW*	Odtavovací stykové svařování
25	RBW*	Stlačovací stykové svařování
311	GAS	Kyslíko-acetylenové svařování
52	LW*	Laserové svařování
71	AW*	Aluminotermické svařování
78	ASW*	Přivařování svorníků
81	FC*	Řezání kyslíkem
83	PC*	Plazmové řezání
84	LC*	Laserové řezání
86	FG*	Plamenové drážkování
91	BLH*	Tvrdé pájení
94	SLH*	Měkké pájení
97	WB*	Pájení do úkosu
*) Zkratka není v evropské normě nijak definována, liší se podle regionálních zvyklostí nebo se vůbec nepoužívá. Tabulka udává navrhanou zkratku vycházející z anglického názvu metody popř. zkratku již používanou dle AWS v USA.		

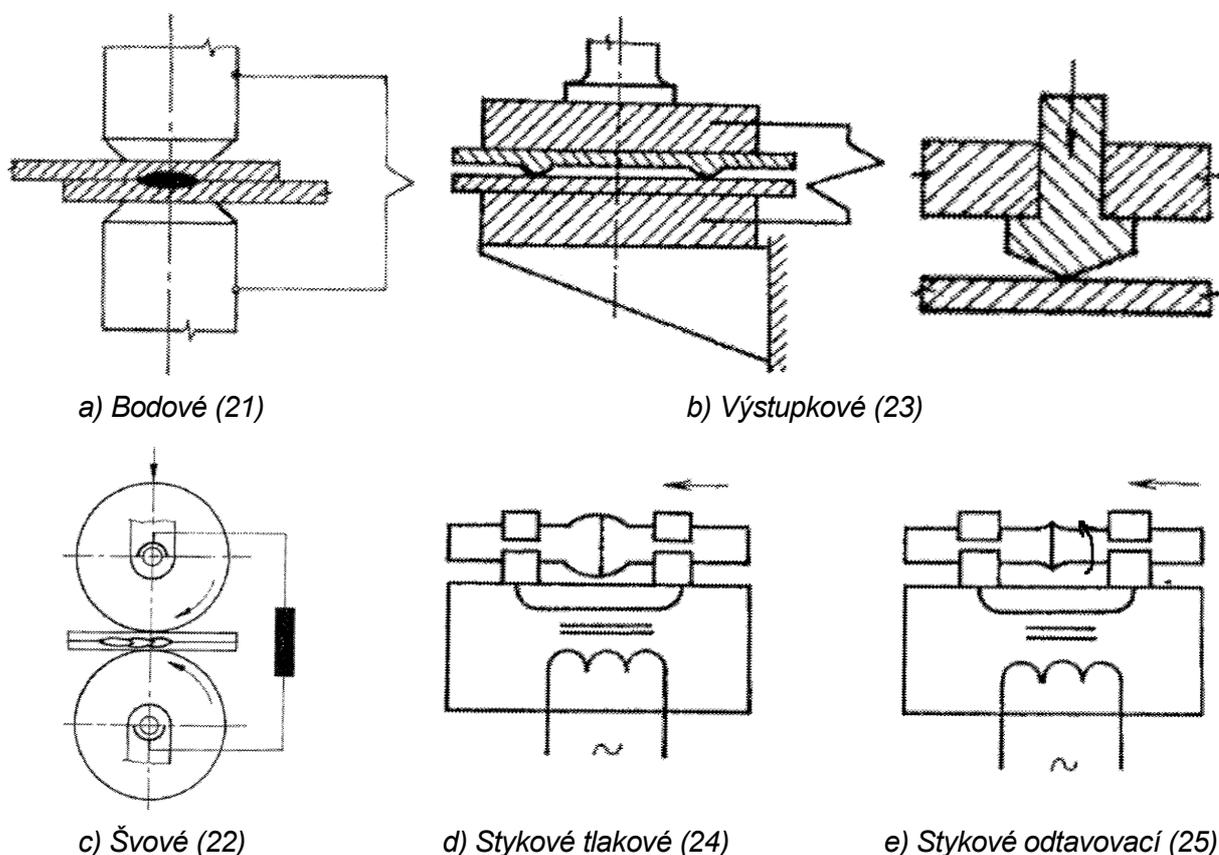
tab. 2: Přehled nejdůležitějších metod svařování podle ČSN EN ISO 4063.^[N]

¹⁾ V normách platných v USA (podle American Welding Society = AWS) se pojmenování některých metod mírně odlišuje a značky jsou místy rovněž jiné. V příloze B normy ČSN EN ISO 4063 se nachází převodní tabulka mezi evropským a americkým značením.

1.3 Charakteristika a rozdělení odporového svařování

Odporové svařování využívá ke zhotovení spoje tlaku a elektrického odporu svařovaných dílů. Svařovací proud je přiváděn a odváděn elektrodami vyrobenými obvykle z mědi anebo (častěji) jejich slitin, které sice nedosahují tak dobré vodivosti, ale jsou o poznání tvrdší a mají výrazně delší životnost. Výhodou odporového svařování je fakt, že není třeba žádný přídavný materiál – svarová lázeň vzniká lokálním roztavením základních (svařovaných) dílů. Díky velkému teplotnímu gradientu, který dosahuje až $100000\text{ }^{\circ}\text{C}$ za sekundu, je ohřev intenzivní a rychlý, což má za následek minimální tepelné ovlivnění okolní oblasti, čímž svar značně získává na kvalitě. Zároveň se díky rychlosti procesu i možnosti jednodušší automatizace značně šetří čas. To s sebou přináší snížení provozních nákladů. Je však nutné si uvědomit, že počáteční investice do vybavení takto mechanizovaných pracovišť roboty, svářecími lisy, svařovacími přípravky, atd. je značná, a proto se vyplatí pouze při velkých sériích.^{[11],[14]}

Samotné odporové svařování se rozděluje na 5 základních druhů, či lépe podtypů, jejichž princip je naznačen na *obrázku 5*. Vzhledem k zaměření své práce se v dalším rozboru budu zabývat pouze problematikou výstupkového svařování.



obr. 5: Základní druhy odporového svařování – schéma a) – e).^[14]

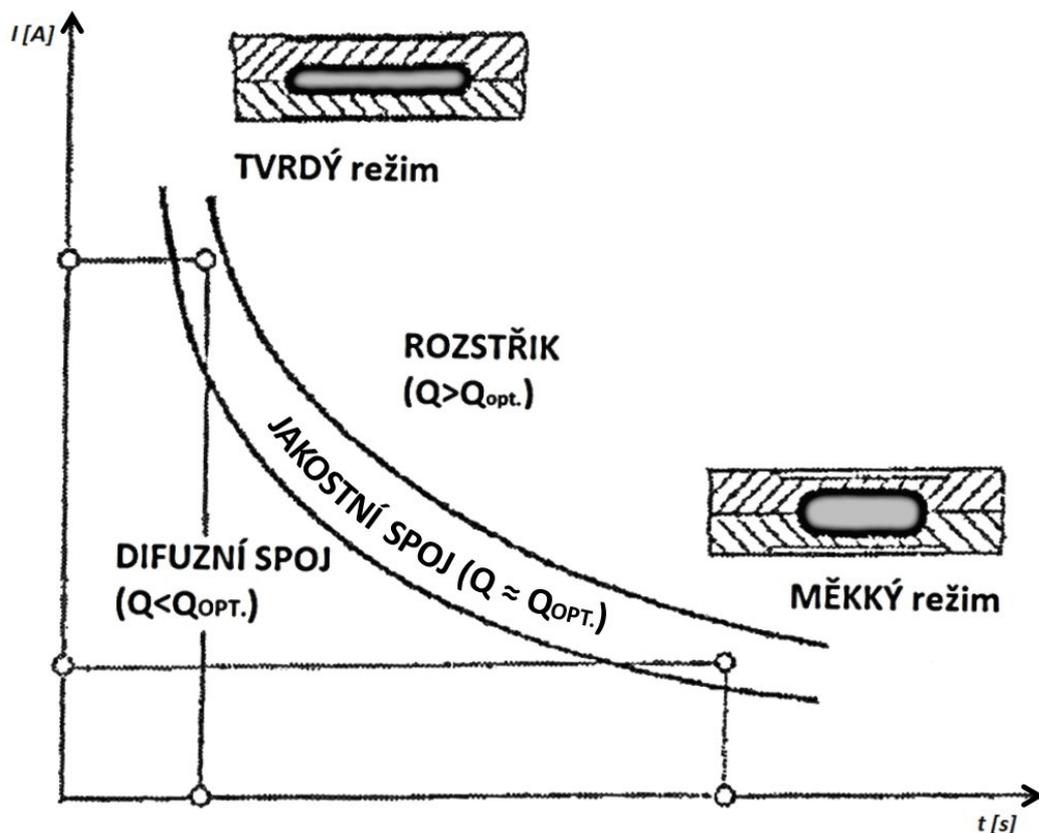
1.4 Výstupkové svařování

1.4.1 Svařovací parametry

Základními parametry odporového svařování obecně jsou tlak, který má zásadní význam na kvalitu spoje, dále pak svařovací proud a svařovací čas, které zajišťují vznik tepla potřebného k roztavení kovů. Proud se ve většině případů používá střídavý. Čas se proto udává spíše počtem period než trváním v sekundách. Nejinak je tomu u svařování výstupkového. Výše zmíněné teplo – tzv. Joulovo teplo – vzniká díky elektrickému odporu vodičů na základě průchodu elektrického proudu. Rovnice popisující děj má tvar:

$$Q = \int_0^t RI^2 dt = RI_{ef}^2 t$$

K roztavení základního materiálu je zapotřebí dodat určité množství tepla označovaného jako $Q_{OPT.}$. Z rovnice je zřejmé, že toho můžeme dosáhnout dvěma způsoby, tzv. svařovacími režimy. Tvrdý režim značí způsob s vysokým svařovacím proudem po krátký svařovací čas za použití velké přitlačné síly. Měkký režim využívá naopak nižší svařovací proud po delší svařovací čas s menší přitlačnou silou. Grafické znázornění obou režimů je na obrázku 6.

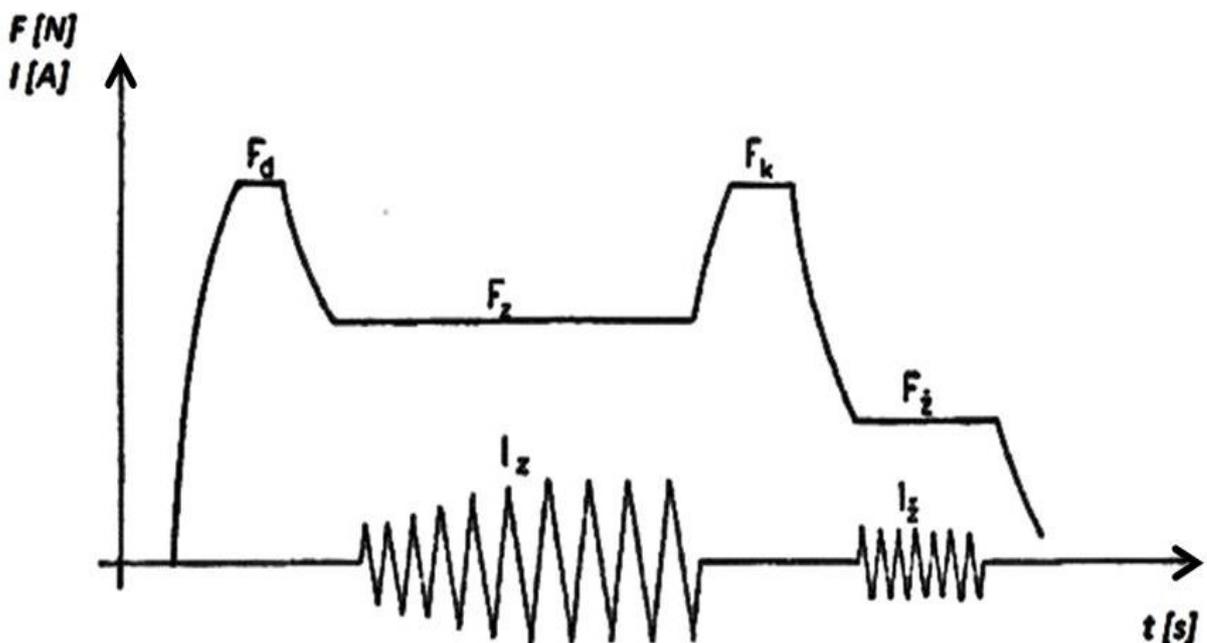


obr. 6: Režimy svařování v závislosti na množství přivedeného tepla Q .^[14]

Tvrdý svařovací režim je charakteristický úsporou času, menším přívodem tepla, a tím pádem lokálnějším ohřevem, díky čemuž dochází k menšímu vtlačení elektrod do svařovaných materiálů a menším deformacím svařenců. To vede k lepším mechanickým vlastnostem spoje. Pozitivně je ovlivněna i životnost elektrod, neboť vyšší tlak zmenšuje přechodový odpor dotyku. Nevýhodou je nutnost pořízení silnějšího zdroje proudu, robustnějšího a silnějšího lisu a současně nutnost správné přípravy svařovaných materiálů (především jejich očištění).^{[14],[16]}

Měkký režim naopak vzhledem k delšímu svařovacímu času způsobuje značné tepelné ovlivnění, které s sebou nese hrubnutí zrna a větší vtisky elektrod. Nezanedbatelné jsou ztráty tepelnou kondukcí, jimiž elektrody silně trpí, a mají proto zkrácenou trvanlivost. Rovněž jsou vyšší i energetické nároky na rozvodnou síť. Obecně se doporučuje používat tvrdý režim a měkkého využívat pouze v odůvodněných případech. Těmi může být např. svařování materiálů s tendencí k zakalení anebo svařování znečištěných plechů.^{[14],[16]}

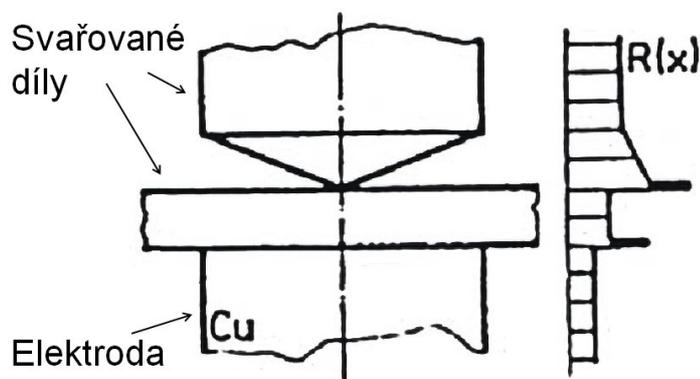
Samotné svařování probíhá navíc v tzv. svařovacích cyklech. Ty definují funkční závislost přítláčné síly F a procházejícího proudu I na čase t . Daný cyklus má zásadní vliv na výslednou kvalitu svaru a jeho průběh se může lišit – od nejjednoduššího (s konstantní přítláčnou silou a daným počtem period proudu) až po složitý, kombinovaný proces. Jeden z obvyklých a účinných průběhů výstupkového svařování používaný ve svařovacích lisech je na *obrázku 7*.



obr. 7: Svařovací cyklus pro výstupkové svařování na lisech.^[14]

Nejprve dojde k silnému přitlačení elektrod, tím ke správnému vymezení vůlí a poklesu přechodových odporů (viz dále). Následně svěrná síla poleví na svou pracovní velikost a je vpuštěn daný počet period proudu. To má za následek roztavení základního materiálu a vznik svarové lázně. Svěrná síla se pak znovu zvýší, a zastává tak funkci kování. Silnější přitlak má mimo jiné příznivý vliv na snížení velikosti zrn výsledného ztuhlého svaru. Ke konci svařovacího cyklu se svěrná síla snižuje až na zvolenou mez, kdy je svar opětovně vystaven působení proudu, který má za úkol kritickou oblast ohřát, a tím ji vyžítat (provádí se převážně u materiálů, kde hrozí zakalení a vznik křehké martenzitické struktury). Poté jsou elektrody oddáleny a spoj je hotový. Díky tomuto postupu je po odladění všech příslušných parametrů docíleno velmi kvalitního svaru.

Poslední veličinou, která má vliv na vznikající teplo, je celkový elektrický odpor R . Je třeba si uvědomit, že tento celkový odpor se sestává z několika sériově řazených odporů, které se dělí na vnitřní a přechodové. Vnitřní odpor je určen hlavně chemickým složením materiálu. Dále je závislý především na geometrii součásti, na teplotě, s jejíž rostoucí hodnotou se zvyšuje, a částečně pak i na tlakovém působení. Přechodový odpor vzniká v místech styku jednotlivých komponent účastnících se svařování a hraje klíčovou roli při lokalizaci místa vzniku odporového svaru. Schematické znázornění závislosti celkového odporu na geometrii styčných míst můžeme vidět na *obrázku 8*.



obr. 8: Vnitřní a přechodové odpory u výstupkového svařování.^[17]

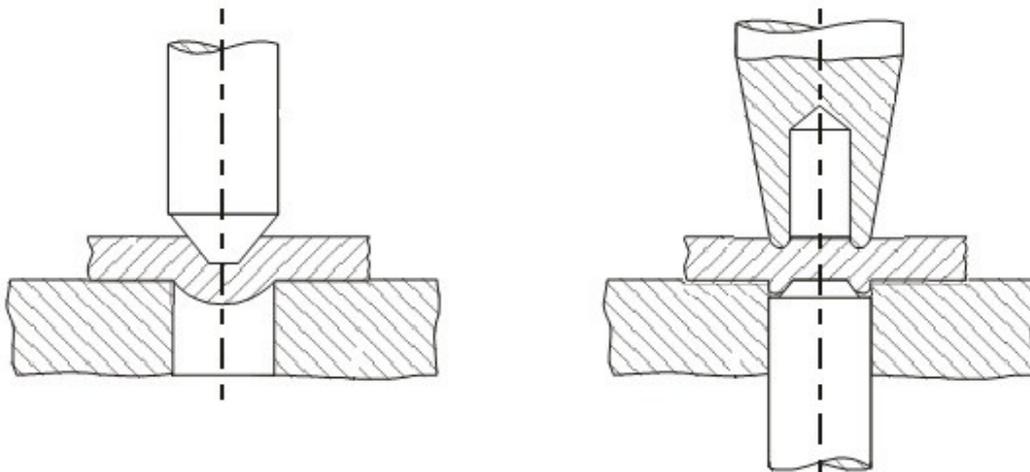
Protože množství generovaného tepla je přímo úměrné elektrickému odporu, je zřejmé, že nejdříve dojde k roztavení v místě styku desky a kuželu (svařovaných dílů), kde je nejvyšší hodnota celkového elektrického odporu. Odpor mezi měděnou elektrodou a deskou je nežádoucí, způsobuje jejich ohřívání v místě přitlaku, a tím snižuje životnost elektrod. K zahřívání elektrod dochází také vlivem jejich vnitřního odporu. Je proto třeba volit na jejich výrobu materiály jak s dobrou elektrickou, tak i teplotní vodivostí. Nutností je i intenzivní chlazení elektrod, ideálně zevnitř pomocí kapaliny (obvykle vody).

1.4.2 Tvary výstupků

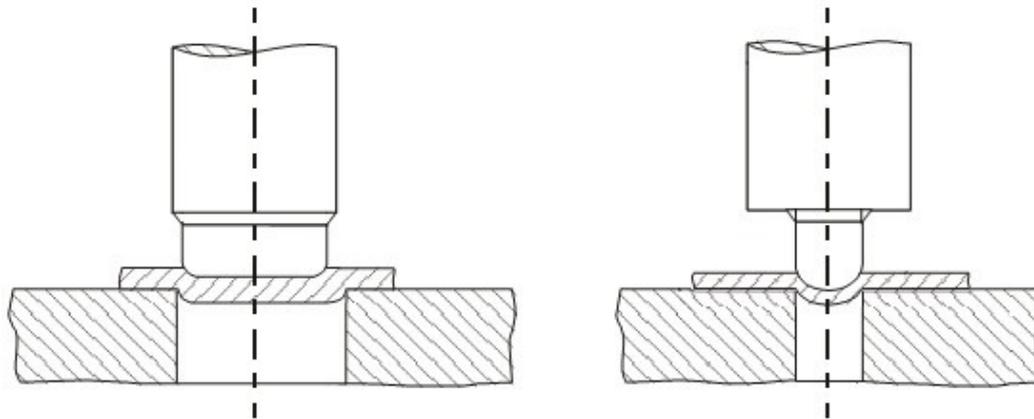
Výstupkové svařování, někdy označované také jako bradavkové svařování, získalo svůj název od specifické přípravy svarových ploch, která spočívá právě ve vytváření tzv. výstupků, též bradavek. Výstupky mají v první řadě za úkol definovat místo spoje. Zmenšují také počáteční styčnou plochu mezi svary, čímž vzrůstá proudová hustota (při bodovém dotyku se teoreticky blíží nekonečnu) a dochází k rychlému roztavení požadovaného objemu materiálu. Současně tím poskytuje výstupek při roztavení potřebný svarový kov, a není tak třeba žádného přídavného materiálu.

Je patrné, že geometrie výstupku bude hrát zásadní roli při vytváření budoucího svarového spoje. Touto problematikou se zabývá starší, ale stále platná norma ČSN EN 28167: „Svařování. Výstupky pro odporové svařování“. V normě je ale popsán pouze jeden tvar výstupků včetně jediné tabulky udávající jeho rozměry pro různé tloušťky plechu. Dále se zde nachází členění výstupků do tří kategorií (skupina A, skupina B, skupina C) podle velikosti výstupků příslušejících dané síle plechu. Běžně používanou je skupina B. Skupina A je určena pro malé/málo namáhané svary, naopak skupina C slouží pro velké/silně zatížené svarové spoje. Norma rovněž definuje i základní rozměry nástroje využívaného k přípravě výstupků. Pro úplnost doplním, že zmiňovaná česká norma je odvozena z mezinárodní normy ISO 8167: „Projection for resistance welding“.^[N]

Ačkoliv je normou udávaný tvar výstupků nejpoužívanější, není jediný, který se v průmyslové praxi pro spojování požadovaných materiálů využívá. Příklady některých běžných tvarů jsou na *obrázcích 9a a 9b*. Existuje řada dalších provedení, z nichž mnohá se postupem času přestala využívat obvykle kvůli nevyhovujícím požadavkům na jakost.



obr. 9a: Tvary výstupků (levý = dle ČSN EN 28167; pravý = vhodný pro tenké plechy).^{[11],[17],[N]}



obr. 9b: Tvary výstupků (levý = pro velký svar; pravý = upravený pro tenké plechy).^{[11],[17],[N]}

Jak je z obrázků 9a a 9b patrné, k vytvoření výstupku se používá lisovací nástroj – razník, který může být v případě nutnosti doplněn i tvarovaným protikusem – zápustkou. Z toho plyne, že i k samotné přípravě svarových ploch je zapotřebí vlastnit speciální vybavení, popř. jednoúčelové stroje, což jen podtrhuje požadavek velkosériové výroby. Výstupky se zpravidla vytvářejí pouze na jednom ze spojovaných dílců, aby se tak předešlo případným problémům s líčováním.

1.4.3 Technologie a použití výstupkového svařování

Výstupkové svařování se využívá nejčastěji pro spojování nízkouhlíkových ocelí (plechy v automobilovém průmyslu), je vhodné i pro spojování nerezových ocelí. Lze jím vzájemně spojovat i různé materiály, např. uhlíkovou a nástrojovou ocel. Naopak se tento způsob nevyužívá pro měkké materiály (hliník, měď apod.), protože dochází k snadné deformaci výstupků (zpětné zamáčknutí do dílu) a ve výsledku ke špatné kvalitě spoje.^[11]

Především pro tenké plechy (do cca 1 mm tloušťky) je zapotřebí dbát na výraznou přesnost hlavně výšky výstupků. Horní elektroda musí mít možnost svým pohybem sledovat zmenšování výstupku (kvůli jeho postupnému roztavování) a vyrovnávat úbytek výšky svým přísuvem. U větších tlouštěk nejsou tyto požadavky tak přísné. Drobné nerovnoměrnosti se snáze vyrovnají přítlačnou silou. Při svařování různě silných materiálů by výstupky měly být vždy provedeny na tlustším z dvojice, neboť má větší elektrickou i tepelnou vodivost a hůře se natavuje. Výstupek toto negativum vyrovnává.^[11]

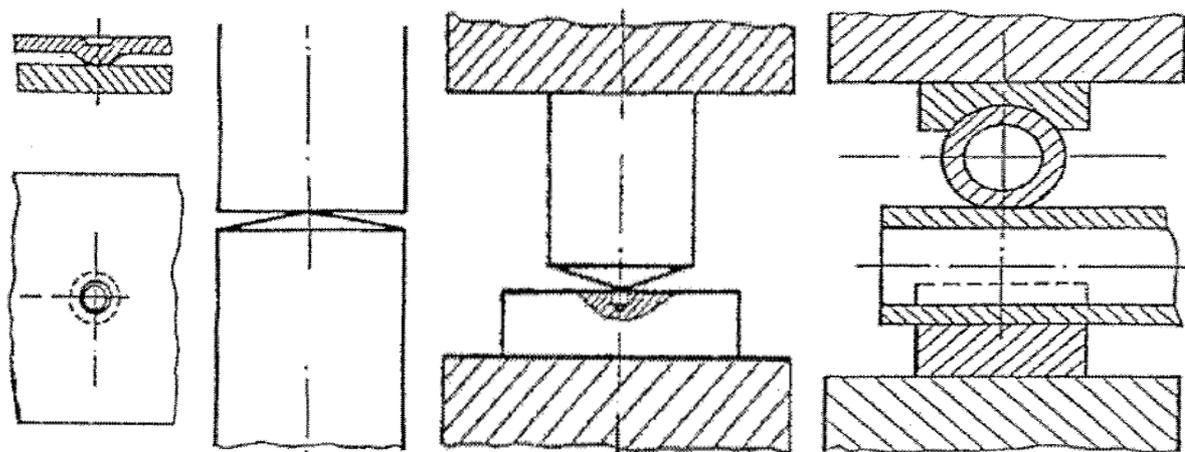
Jednou svařovací operací je možné zhotovit i více výstupkových svarů, ne však více než 10. Doporučení bere do úvahy rovnoměrné rozdělení tlaku a protékajícího proudu, které by nemuselo být splnitelné při větším počtu výstupků. S tím souvisí

i požadavek, aby všechny takto hromadně svařované spoje byly umístěny v okruhu asi 200 mm a elektroda byla co možná nejbližší jejich geometrickému středu. Spojované dílce by měly být dokonale odmaštěny a zbaveny všech mechanických nečistot, aby se eliminovaly rozdílné hodnoty přechodových odporů.^[11]

Naopak svar vytvářený pouze jedním výstupkem nemá takové požadavky na čistotu mezi svařovanými materiály, kde vyšší hodnota přechodového odporu nevádí. V místě dotyku elektrod je ale opět třeba snížit odpor na minimum.

Z konstrukčního hlediska je nejdůležitější zajištění správné přístupnosti elektrod ke svařovaným dílům. Elektrody by měly pokud možno směřovat kolmo. Odklon od svislé osy svaru má za následek nesouměrné rozložení dotykového tlaku a přináší problémy s dosažením kvality svarového spoje, opotřebením elektrod, atd. Velikost výstupku se volí podle normy ČSN EN 28167 (viz kapitola 1.4.2). Minimální rozteč dvou sousedních výstupků určuje norma ČSN EN ISO 16432: „Odporové svařování – Postup pro výstupkové svařování nepovlakovaných a povlakovaných nízkouhlíkových ocelí“ a neměla by být menší než $4,5D$, kde D je průměr daného výstupku. Vzdálenost výstupku od kraje dílu by měla být větší než $1,25D$ podle tloušťky základního materiálu.^[N]

Díky mechanismu vzniku tepla není problém se spojováním materiálů různých tloušťek, jak je tomu vidět například na obrázku 8. Běžně se výstupkové svařování používá pro 4 různé konstrukční typy spojů – přeplátované, tupé, kolmé a křížové. Všechny varianty jsou vidět na obrázku 10.^[14]



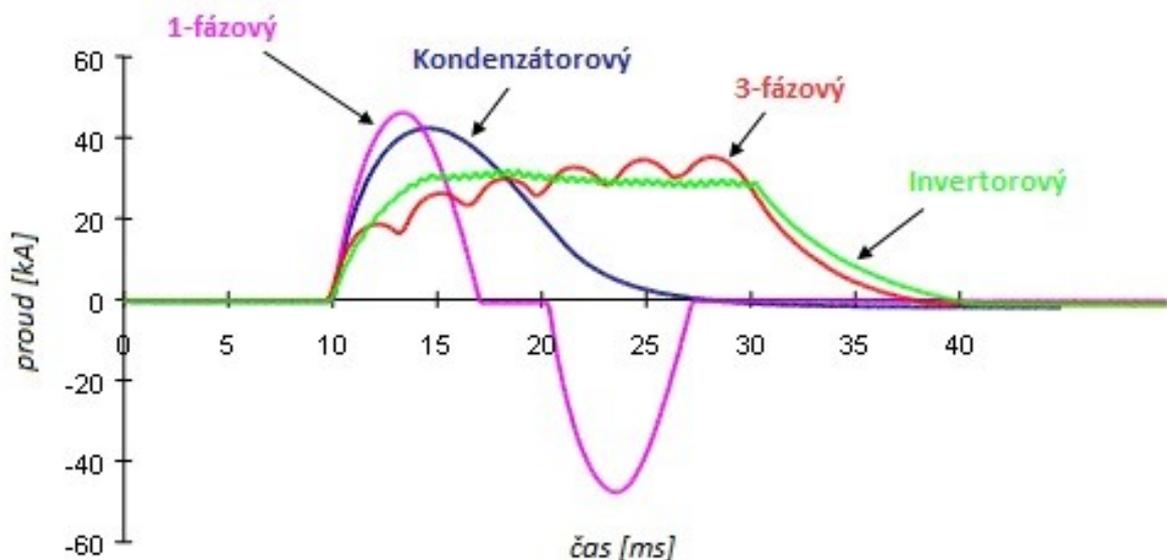
obr. 10: Typy spojů dle konstrukce. V pořadí zleva – přeplátované, tupé, kolmé a křížové.^[14]

Pro zachování logické souslednosti by se měl v této kapitole objevit i způsob určení svařovacích parametrů. Ten bude podrobně rozebrán v kapitole 3.

1.4.4 Zařízení používaná při výstupkovém svařování

Jak jsem se již zmínil dříve, ke svařování součástí pomocí výstupků je zapotřebí disponovat velmi výkonnými svařovacími lisy, které jsou schopny vyvinout jak požadovanou přítlačnou sílu, tak vytvořit a přenést svařovací proud, který se pohybuje v řádu 1 kA až 100 kA. Je tedy zřejmé, že i příkony těchto zařízení nejsou vůbec malé, řádově 10 kVA až 1000 kVA, a vyžadují tak dobrou energetickou situaci podnikové sítě. Navíc jsou tyto příkony odebírány skokově, po velmi krátký čas. To má za následek výrazné dynamické zátěžové rázy do celé rozvodné sítě.

V technické praxi se využívá více konstrukcí svařovacích lisů. Ty se liší tvarem – s „C“ rámem / portálové, způsobem vyvození přítlačné síly – mechanicky / hydraulicky / pneumaticky a podle způsobu elektrického napájení – 1-fázové / 3-fázové / kondenzátorové / invertorové. Zapojením jsou všechny procesy velmi podobné. Základ tvoří vždy svařovací transformátor, jehož výstup je připojený přímo na svařovací elektrody. Proud (zpravidla střídavý) je dodáván řídicí jednotkou a upraven nejčastěji pomocí tyristorů, popřípadě kondenzátorem či invertorem (jak napovídá název lisu). Různé průběhy proudu v čase podle použitého svařovacího zdroje jsou vidět na obrázku 11.^{[11],[16]}



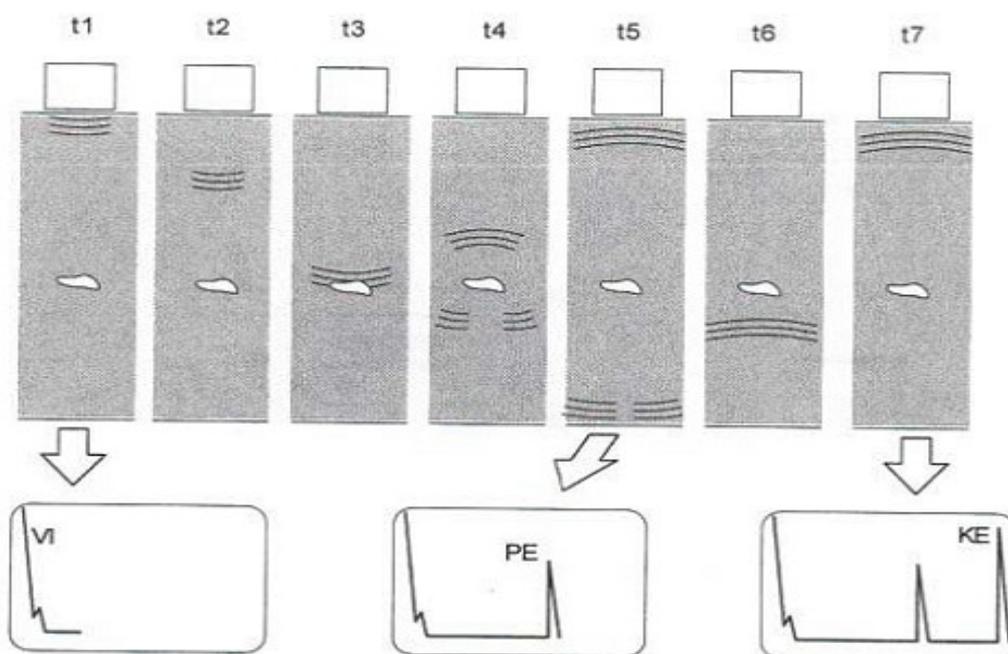
obr. 11: Průběhy svařovacího proudu v závislosti na použitém zdroji proudu a řídicí jednotce.^[19]

Nedílnou součástí strojů pro výstupkové svařování jsou svařovací přípravky. Nejčastěji bývají konstruovány jako jednoúčelové stroje (JÚS) na zakázku pro konkrétní svařované díly. Ty jsou pomocí těchto přípravků drženy ve správné, předem definované

poloze, v průběhu celého svařovacího procesu. Stejně jako ostatní zařízení musí být i přípravky schopny přenést namáhání tlakem a elektrickým proudem. Navíc však musí odolávat výraznému teplotnímu zatížení kvůli přímému styku se svařovanými materiály. Přípravky se upevňují přímo na svařovací lisy (např. pomocí T-drážek). Detailně se konstrukcí svařovacích přípravků budu zabývat v *kapitolách 2.3 – 2.5*, neboť konstrukce přesně takového zařízení je hlavní náplní této práce.

1.4.5 Zkoušky jakosti výstupkových svarů

Aplikace nedestruktivních zkoušek (NDT)²⁾ je u odporových svarů velmi problematická a rozsah použitelných zkoušek je velmi omezený. Svar totiž vzniká uvnitř mezi spojovanými materiály, takže není vidět. Vizuální kontrola povrchu spoje se provádí vždy, vyžaduje však dostatek zkušeností. Nejprůkaznější a nejspolehlivější je pak zkouška ultrazvukem, kdy je do zhotoveného spoje vyslán zvukový signál, který se při nárazu na překážku, jako je neprůvar, trhлина, pór, apod. odrazí zpět, je zachycen přijímačem a vyhodnocen. Toto zařízení může být dokonce nainstalováno přímo na/do svařovacích elektrod a podává tak on-line obraz o stavu vzniklého svaru. Princip metody je na *obrázku 12*.



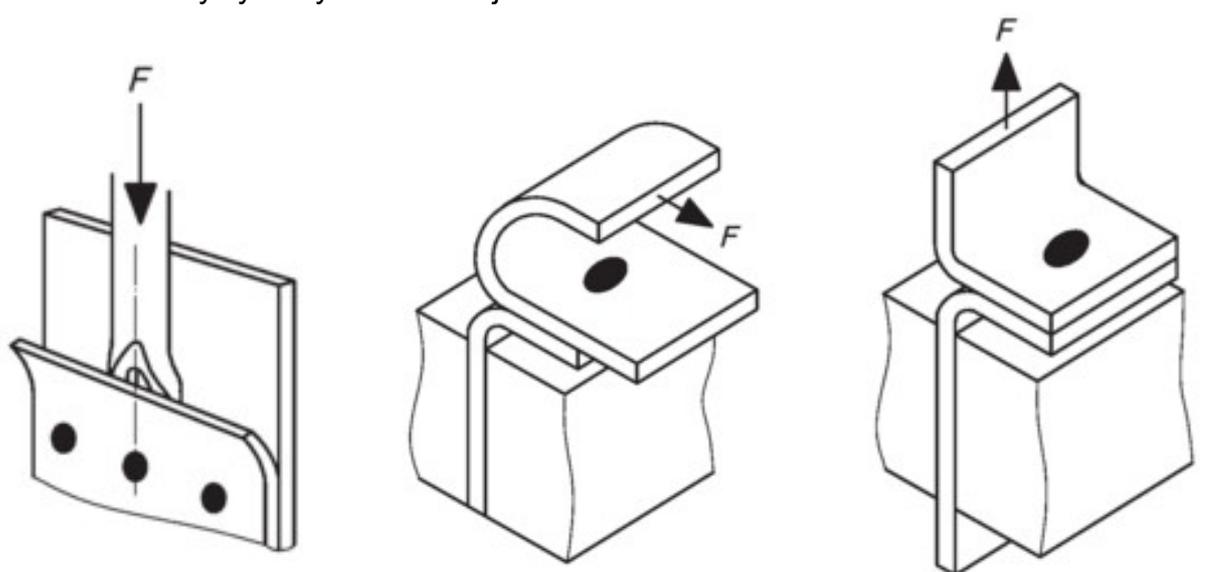
*obr. 12: Princip ultrazvukového zkoušení svarů.
 (VI = vstupní impuls, PE = poruchové echo, KE = koncové echo).^[19]*

²⁾ Za zmínku stojí, že v technické praxi se běžně používá termín DT (Destructive Test) resp. NDT (Nondestructive Test) zkoušení či kontrola, ačkoliv význam zkratky v sobě již slovo „zkouška“ obsahuje.

Mezi NDT kontrolu se dá zařadit i tzv. monitorovací systém, který zaznamenává skutečný průběh svařovacího proudu, síly, trajektorie lisu, roztažnosti spoje a dalších význačných parametrů v čase. Jejich porovnáním s údaji z odzkoušených průběhů je pak možné statistickým vyhodnocením odchylek určit, zda je daný svar ještě přijatelný či nikoliv. V oblasti nedestruktivního testování jsou v současné době prováděny mnohé pokusy a probíhá vývoj nových metodik a přístrojů.^[14]

Významnou roli hrají především zkoušky destruktivní (DT). Mezi nejběžnější z nich patří smyková zkouška, případně odlupovací zkouška, kterými se zjišťuje tavný a difúzní charakter svarové čochky. V praxi hojně využívanou je sekáčová zkouška, jejíž vyhodnocení sice velmi záleží na zkušenostech, ale je možné pomocí ní rychle odhalit nejběžnější chyby ve spojích. Dále se provádí převážně zkoušky ve smyslu budoucího namáhání konstrukce, mezi které patří např. zkouška tahem, kroucením, lámavosti atd.

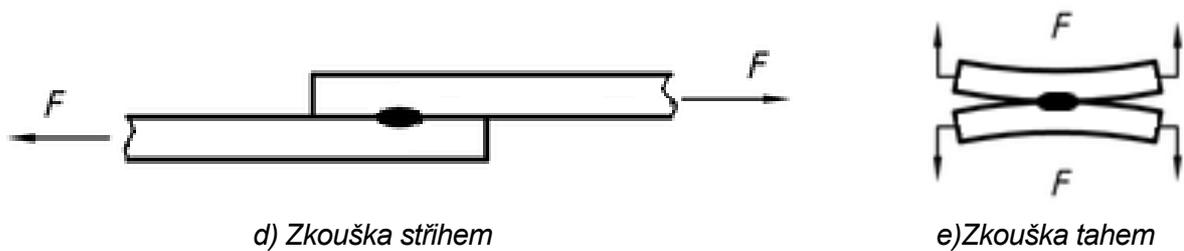
Mezi DT kontrolu se řadí rovněž metalografické zkoušky (makro + mikro), které se provádějí na naleptaném výbrusu spoje. Ty zkoumají tvrdost uvnitř svaru a mají za cíl vyloučit vznik křehké martenzitické struktury, a tedy náchylnost svaru k porušení křehkým lomem. Význam této kontroly stoupá s množstvím uhlíku ve svařované oceli, protože rychlým ochlazováním svarového kovu dojde snáze k jeho zakalení. Dále se kontroluje tvar a velikost zrn materiálu, stupeň průvaru apod., jak tomu je u většiny svarových spojů zhotovených i jinými metodami. V neposlední řadě se vedle zkoušek statických provádí i dynamické testování svarů. Nejběžnější jsou zkoušky na únavu nebo rázové zkoušky stříhem. Ukázky vybraných zkoušek jsou vidět na *obrázku 13*.



a) Sekáčová zkouška

b) Ruční odlupovací zkouška

c) Strojová odlupovací zkouška



obr. 13: Příklady DT a NDT zkoušek u výstupkových odporových svarů a)-e).^{[21],[22]}

Všechny zkoušky, ať DT, nebo NDT, jsou přesně popsány příslušnými normami. Ty stanovují nejen jejich průběh, ale i vyhodnocení včetně vytvoření protokolu o daném měření. Cílem je vždy dosažení požadovaných mechanických vlastností svaru (především pevnosti a houževnatosti). Tyto požadavky bývají zpravidla uvedeny ve výkresové dokumentaci společně s označením, které svary jsou nosné a které pouze přidržovací. Dobrý přehled zkoušek prováděných u odporových svarů dává souhrnná norma ČSN EN ISO 18278-1: „*Odporové svařování – Svařitelnost – Část 1: Hodnocení svařitelnosti kovových materiálů pro odporové bodové, švové a výstupkové svařování.*“^[N]

Důležitým aspektem je však i dobrý stav svařovacích elektrod před samotným provedením cyklu. Jsou-li elektrody příliš drsné či jinak vymačkané, příliš špinavé, má toto zásadní vliv na špatnou jakost budoucí svarové čočky. Proto je třeba pravidelně opotřebením elektrod kontrolovat a přistoupit včas k jejich výměně.

1.4.6 Normy týkající se výstupkového svařování

Je důležité si uvědomit, že svařování má status tzv. zvláštního výrobního procesu. To z toho důvodu, že nikdy nejsme schopni pomocí NDT zkoušek zaručit 100% nezávadnost a spolehlivost svaru. Jistotu o skutečné jakosti svaru získáme až po rozřezání příslušného vzorku. Těžko však můžeme každý vyrobený díl testovat destruktivně. Proto je více než kde jinde celá problematika svázána množstvím závazných předpisů, které musí každá certifikovaná výrobní firma dodržovat, přičemž nejvíce je normami ošetřeno právě odporové svařování.

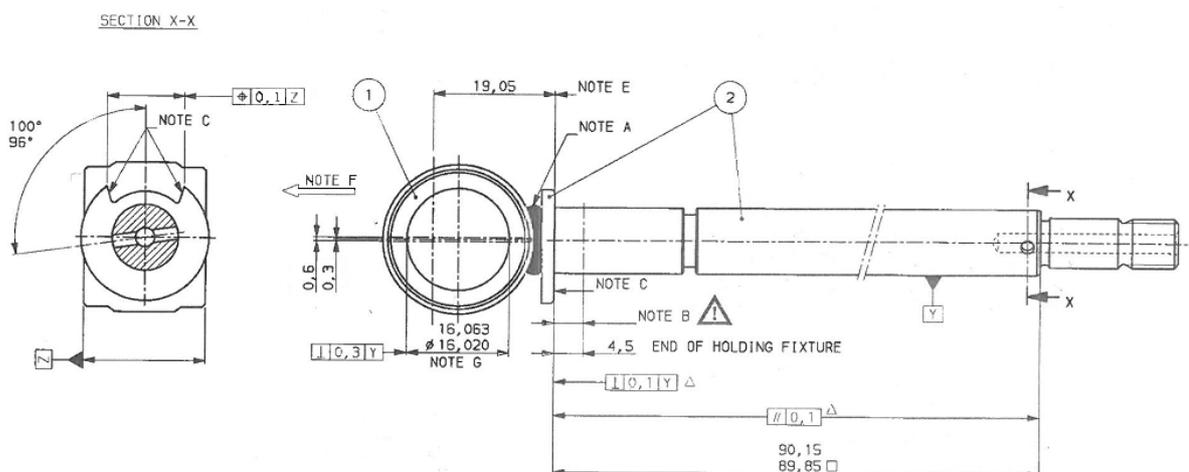
Celkový počet norem týkajících se svařování se pohybuje okolo 400 a jejich kompletní seznam včetně vyhledávání je hezky ucelen např. na internetových stránkách českého normalizačního úřadu nebo české svářečské společnosti. Nemá proto smysl, abych zde všechny uváděl. V příloze 1 se nachází výběr těch nejpodstatnějších, v současnosti platných, norem týkajících se výhradně výstupkového svařování.

2. Konstrukce svařovacího přípravku

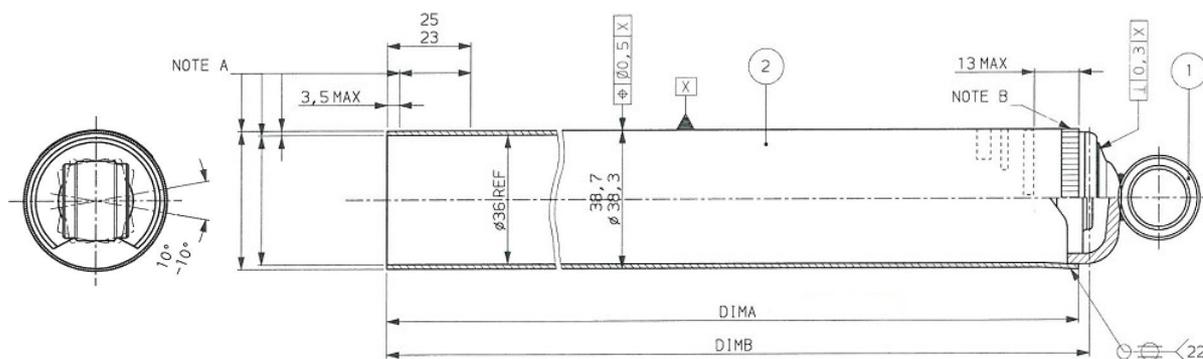
2.1 Technické zadání

Předmětem zadání a rovněž tématem této práce je konstrukce jednoúčelového odporového svařovacího přípravku na zákazníkem repasovaný svařovací lis. Zadavatelem celé zakázky byla firma Tenneco, Monroe Czechia, s.r.o. se sídlem v Hodkovicích nad Mohelkou. Zhotovitelem byla firma KOPR spol. s r.o. se sídlem v Praze Michli, zastoupená mnou a panem ing. Ivanem Růžkem, odborným konzultantem. Součástí zadání bylo i zhotovení kontrolního přípravku, které jsem však neměl na starosti já. Kopie oficiálního zadání je v příloze 2.

Na předělávaném odporovém svařovacím lisu se budou svařovat tlumiče pro osobní automobily, a to jak pístonice, tak pláště. Během procesu je potřeba na příslušnou část vždy přivařit oko, za které bude tlumič připevněný ke karoserii resp. nápravě automobilu. Obrázky 14a a 14b zobrazují části výkresů obou svařenců.

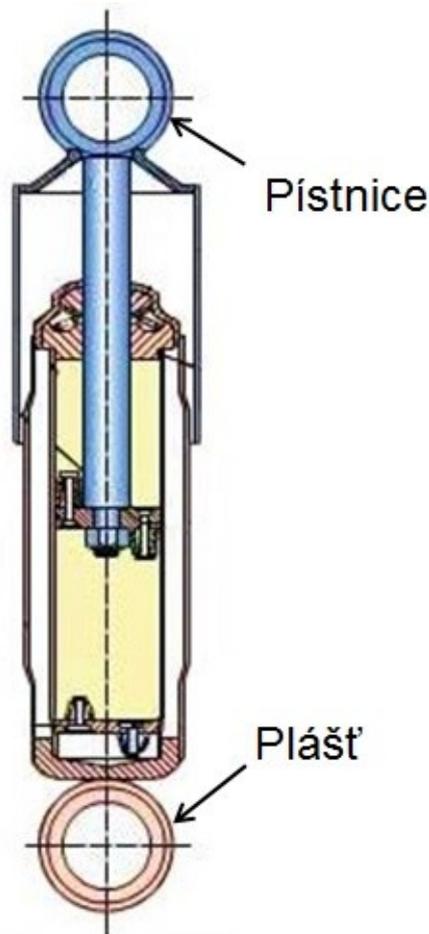


obr. 14a: Část výkresu svařence pístonice



obr. 14b Část výkresu svařence pláště

Oba svařované výrobky jsou ze 2 dílů. V případě pístnice pracuji s hřídelí, ke které je již z předchozí operace přivařen talířek s postranním vybráním (na výkrese označeno pozicí „2“). K této podsestavě se přivařuje oko (na výkrese označeno pozicí „1“). Hřídel má z vrchní strany připraven výstupek určený pro zhotovení požadovaného spoje. U pláště je z dřívějšího kroku švovým svařováním připojena tvarovaná horní zátka (na výkrese označeno pozicí „2“). Opět se přivařuje oko (na výkrese označeno pozicí „1“), které je shodné s okem u pístnice. Na *obrázku 15* je vidět řez automobilovým tlumičem s umístěním svařenců zhotovovaných na tomto přípravku.



obr. 15: Konstrukční uspořádání sestavy automobilového tlumiče.^[23]

Z uvedených výkresů je patrné, že je třeba zabezpečit správnou vzájemnou orientaci obou dílů vůči sobě, a to u obou svařenců. Osa oka musí být kolmá na osu symetrie vybrání talířku resp. tvarovaného výstupku zátky. Přípravek dále musí zajistit kontrolu délky oka a vyhodnotit, zda se jedná o díl správný, vyrobený v požadovaných tolerancích, nebo se jedná o zmetek.

Zařízení musí rovněž umožňovat založení více rozměrových variant obou spodních dílů („2“). U pláště se jedná o trubky s referenčními vnitřními průměry $D_1 = 36 \text{ mm}$ a $D_2 = 39 \text{ mm}$. Po dodatečných jednáních s firmou Tenneco vzešel navíc požadavek, aby se délka pístitnice mohla měnit v rozmezí $l = 120 \pm 20 \text{ mm}$.

Z podstaty tvaru dílů je k jejich spojení používáno odporové výstupkové svařování. Tloušťka v místě svařovaných dílů je $t = 3,5 \text{ mm}$ a jedná se o nelegovanou jakostní ocel s označením C40 dle EN 10027-1, W. Nr. 1.0511 (viz příloha 3).

V rámci konstrukce zařízení jsem zhotovil také kompletní výrobní dokumentaci včetně kusovníků, která byla poskytnuta zákazníkovi. Byla zajištěna výroba celého zařízení, následný transport do výrobních hal firmy Tenneco a montáž na repasovaný lis v prostorách závodu. Před předáním zařízení byla ověřena jeho funkčnost. Úprava lisu nabyla předmětem zakázky, zákazník si ji provedl sám.

Při osobní návštěvě ve firmě Tenneco společně s mým kolegou p. Růžkem jsme si ujasnili mnohé další otázky týkající se konstrukce, o kterých budu mluvit v následujících kapitolách. Při této příležitosti jsme provedli měření všech potřebných připojovacích a limitujících rozměrů. Pohled na lis včetně původního přípravku je na obrázku 16.



obr. 16: Svařovací lis s původním přípravkem – dolní elektroda (vlevo) + horní elektroda (vpravo)

dílů podle naprogramovaného svařovacího cyklu a konečně odjetí elektrody. Poté obsluha vyjme svařený díl a celý cyklus se opakuje. Řízení svařovacího lisu má za úkol nově instalovaný programovatelný logický automat (PLC) od firmy SIEMENS, který nebyl součástí naší dodávky.

3D model a 2D dokumentace byly zhotoveny v programu *CATIA V5R19* od firmy Dassault Systèmes a výsledný konstrukční návrh zařízení spolu se sestavenými výkresy jsou k dispozici na *příloženém CD*.

2.2 Technologičnost konstrukce

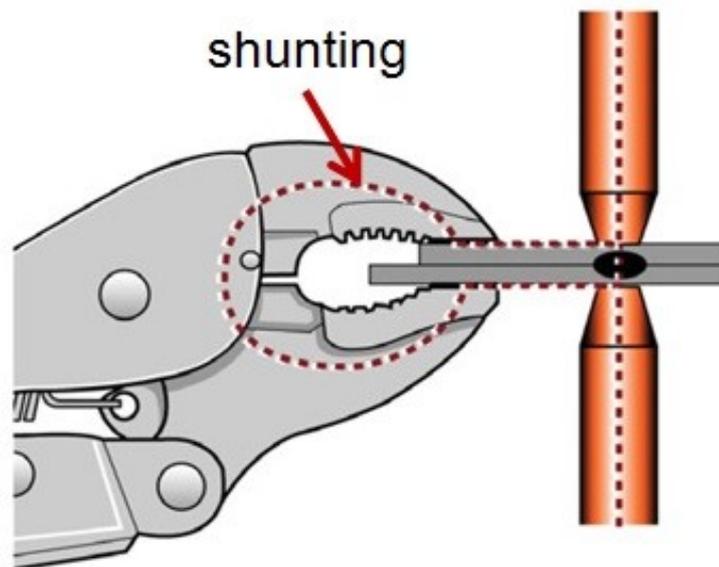
Konstrukční zásady uplatňované při navrhování odporových svařovacích přípravků vychází především z teorie této metody svařování. Celý proces kvůli své fyzikální podstatě vyžaduje, aby se dbalo určitých skutečností, které mají zásadní vliv na funkčnost a hospodárnost provozu zařízení.

Prvním důležitým aspektem je nutnost vést proud co nejkratší cestou tak, aby protékal co možná nejmenším počtem dílů. To minimalizuje ztráty v důsledku vnitřních odporů vodičů a přechodových odporů mezi vodiči proudu, které by byly uvolňovány ve formě tepla. Kromě ztrát energetických by docházelo k zahřívání všech těchto komponent. Současně je tedy třeba minimalizovat počet styčných ploch v hlavní cestě proudu. Plochy by měly být jemně obrobena, aby byl přechodový odpor snížen na minimum.

Je třeba zajistit potřebný průřez elektrod, aby bylo dosaženo přijatelné proudové hustoty na stykové ploše se svařovaným dílem. Přílišná proudová hustota by měla za následek nepřípustné ohřátí elektrody a mohlo by dojít ke ztrátě jejích mechanických vlastností.

Svařované díly musí být pevně upnuty jak před svařováním, tak v jeho průběhu. Musí být zajištěna volnost ve směru svařovací síly, aby se díly po roztavení výstupků mohly dostatečně vmáčknout do sebe, a vytvořit tak spoj požádaných parametrů.

Zajímavým problémem u odporového svařování je tzv. shunting (anglicky shunt = odbočka, výhybka). Nazývá se tak stav, kdy část proudu protéká na základě Kirchhoffových zákonů i jinými, ne tak výhodnými, cestami. Schematický pohled na tento jev u bodového svařování je na *obrázku 18*.



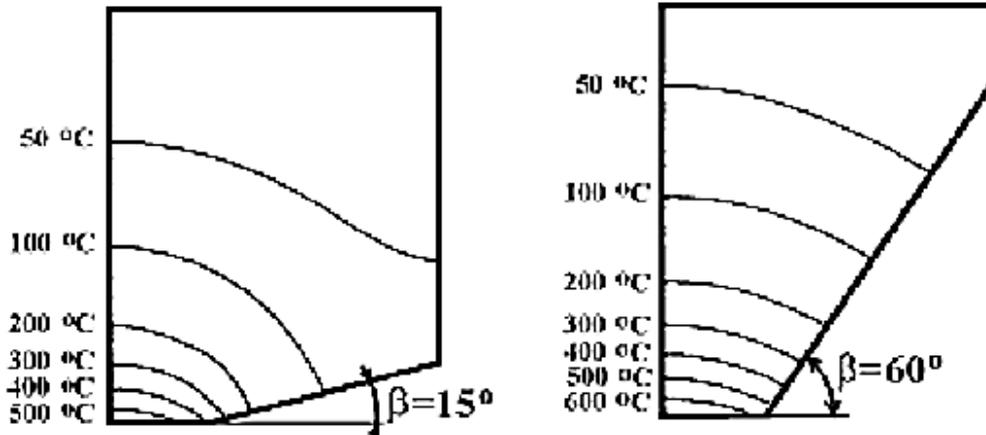
obr. 18: Příklad jevu zvaného shunting (u bodového svařování) – část proudu protéká jinou cestou, než je požadováno.^[24]

U výstupkového svařování obvykle probíhá svaření většího počtu výstupků současně, a tak tento jev vůbec nenastává. Mohou však vznikat obdobné problémy ve vztahu svařenec – přípravek. Proto se dříve provádělo odizolování všech případných nežádoucích cest, aby proud protékal výhradně definovanou cestou. V dnešní době se od toho řešení v naprosté většině případů upouští. Důvodem je především minimální velikost takto vznikajících paralelních proudů a neúměrné finanční prostředky vynaložené na eliminaci tohoto problému. Rovněž rozměrová náročnost izolovaných spojů bývá větší, což s sebou nese další konstrukční obtíže. Izolování se tak provádí pouze tam, kde je patřičně opodstatněné. Více se budu shuntingu věnovat v kapitole 2.4.2, přímo na příkladu konstruovaného přípravku.

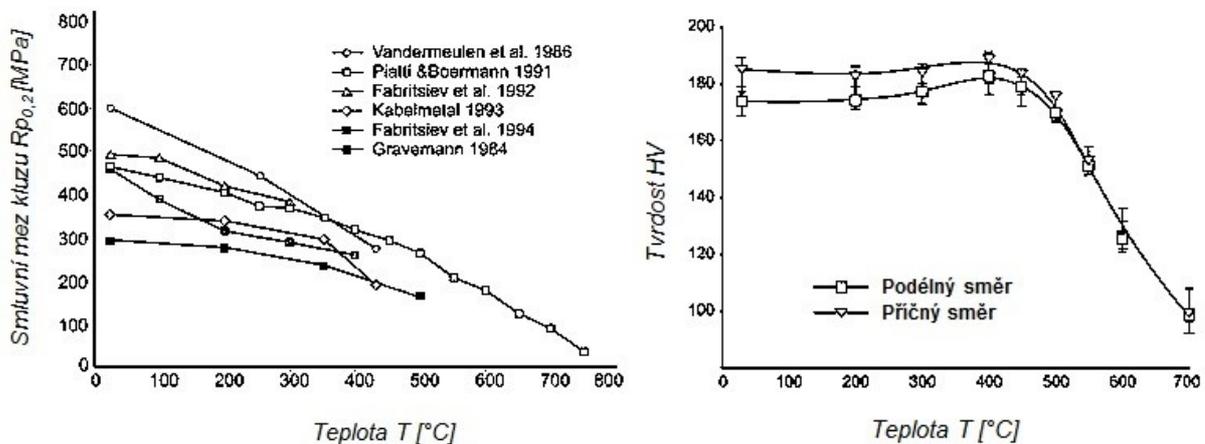
Jak jsem již zmínil v kapitole 1.4.1, důležitým aspektem je také dostatečné chlazení elektrod, kterými protéká největší část proudu. Chladicí kapalina by měla mít přístup co nejbližší k vznikajícímu svaru. Čím účinnější je chlazení, tím delší je životnost elektrod, což přispívá k hospodárnosti celého provozu.

Na rozložení teplot v elektrodách má vliv kromě chlazení také tepelná vodivost materiálu, tvar, velikost, okolní prostředí atd. Alespoň rámcovou představu o teplotním poli u kruhových elektrod dává obrázek 19. Jejich přílišné zahřátí může vést k překročení tzv. teploty měknutí. To je teplota, při níž kov ztrácí svou tvrdost, výrazně se snižuje mez kluzu, a stává se tak velmi snadno plasticky deformovatelný, což má za následek destrukci elektrody. Norma ČSN EN ISO 5182: „Odporové svařování – Materiály pro elektrody a pomocné vybavení“ definuje teplotu měknutí jako maximální

teplotu, která je-li udržována po dobu 2 hodin, dojde k poklesu tvrdosti o 15% z původní (neovlivněné) hodnoty. Zmíněné závislosti ukazuje obrázek 20.



obr. 19: Teplotní pole elektrod při bodovém svařování (velikost proudu odpovídá svarové čočce o velikosti 5 mm, přítláčná síla = 1900 N, čas = 10 period).^[16]



obr. 20: Ukázka změknutí slitin Cu-Cr-Zr pro výdrž jedné hodiny na příslušné teplotě.^[25]

Nejběžněji používané materiály pro elektrody jsou slitiny mědi. Ty se vyznačují výbornou tepelnou a elektrickou vodivostí. Čistý kov disponuje sice o něco lepšími termoelektrickými vlastnostmi, ale jeho tvrdost a pevnost je pro potřeby odporového svařování nedostatečná. Konkrétní slitiny pro výrobu elektrod specifikuje rovněž norma ČSN EN ISO 5182. Ta mimo jiné definuje 3 skupiny materiálů elektrod (skupina A – Měď a její slitiny, skupina B – Spékané materiály, skupina C – Rozptylem zesílené slitiny mědi (DSC)) a systém jejich označování. Je zde uvedeno i jejich doporučené použití pro jednotlivé metody odporového svařování. Vybrané materiály jsou v tabulce 3.

Označení materiálu	Značka materiálu*	Tvrdość HV 30 (min.)	Teplota měknutí [°C] (min.)	Elektrická vodivost [% IACS]**
A 1/1	Cu-ETP (99,9% Cu)	40 – 90	150	96
A 2/1	CuCr1	85 – 120	475	76
A 2/2	CuCr1Zr	100 – 140	500	74
A 2/3	CuCrZr	150	500	74
A 3/1	CuCo2Be	250 – 270	500	40
A 3/3	CuNi2Be	240	450	42
A 4/2	CuBe2CoNi	330 – 350	300	25
A 4/5	CuZn40Pb2	120	650	17
B 10	W75Cu	220	1000	29
B 12	WC70Cu	300	1000	20
B 14	W (99,5% W)	420	1000	29
B 15	W65Ag	140	900	50
C 20/1	CuAl2O3 (1,1%)	150 – 160	980	76
C 20/3	CuAl2O3 (0,3%)	120 – 140	980	92

*) Značka materiálu odráží chemické složení dané slitiny. Číslo u legury značí její jednotkové procentuální zastoupení (žádné číslo znamená méně než 1%). Zbytek složení vždy tvoří čistá měď.
Např. složení CuCo2Be (A 3/1) odpovídá: Co = 2,0 – 2,8%, Be = 0,4 – 0,7%, Cu = zbytek
Ve skupině C je značka stejná pro všechny druhy slitin. Číslo v závorce udává koncentraci Al₂O₃

**) Mezinárodní standard žíhané mědi (IACS) udává elektrickou vodivost (G) ostatních materiálů jako procento z vodivosti žíhané, 100% čisté mědi při teplotě 20 °C , jejíž hodnota je $G = 5,8001 \cdot 10^7 S / m$.
Např. vodivost 40% IACS odpovídá $G_{40\%} = 2,32 \cdot 10^7 S / m$

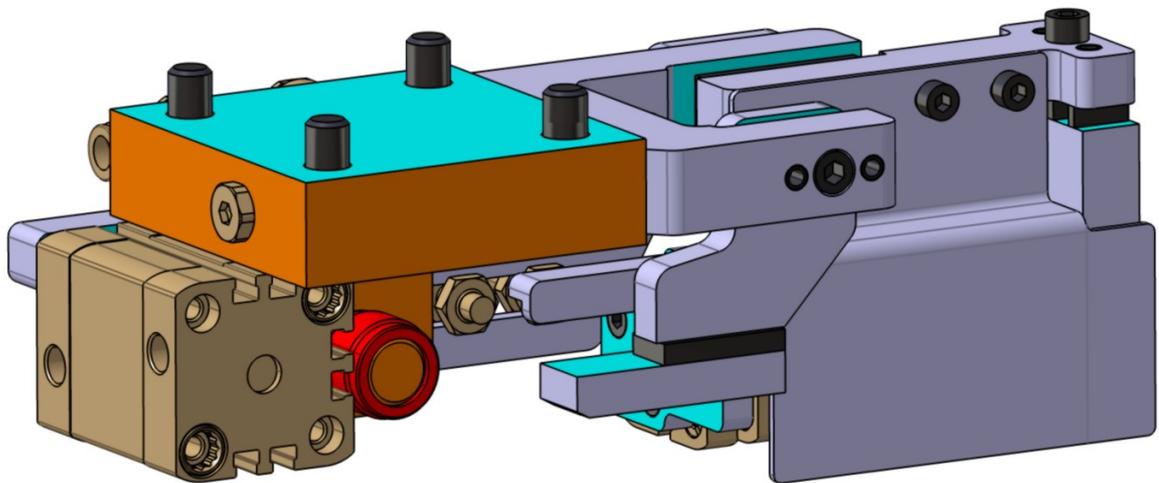
tab. 3: Vybrané materiály elektrod a jejich vlastnosti dle ČSN EN ISO 5182.^[N]

Z uvedených hodnot je patrné, že zvýšená tvrdost a vyšší teplota měknutí je vykoupena sníženou elektrickou vodivostí materiálu. Zpravidla se elektrody vybírají podle tvrdosti, která je pro danou aplikaci stěžejní. Snížená vodivost, díky které dochází ke vzniku většího množství tepla, se dohání intenzivnějším chlazením elektrod, popř. se řeší častější opravou nebo výměnou elektrod. Existují však aplikace, kde je rozhodující spíše teplota, kterou musí elektrody snášet. Zde se volí elektrody skupiny B a C.

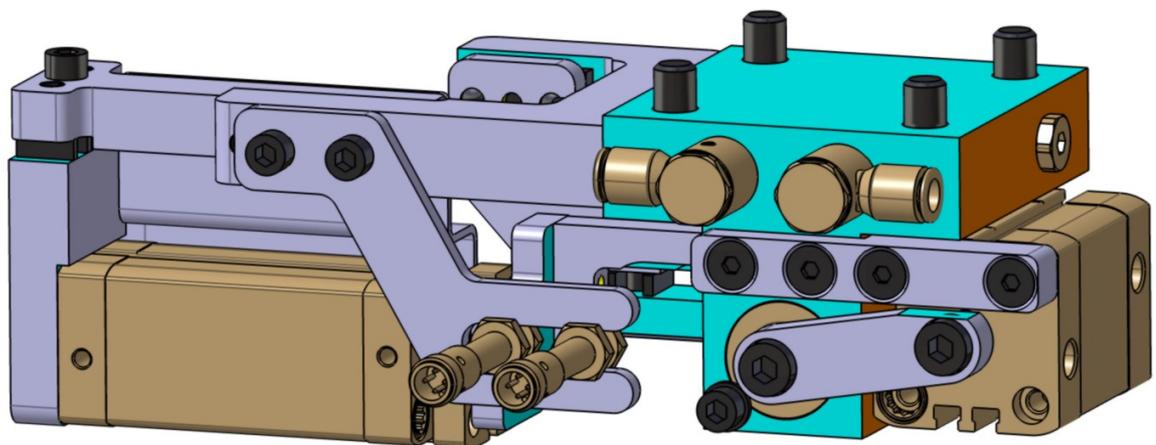
2.3 Horní elektroda

2.3.1 Celkový pohled

Horní elektroda slouží kromě přívodu elektrického proudu také k zakládání ok a jejich rozměrové kontrole. Její výsledná podoba je vidět na *obrázcích 21a a 21b*. Rozměry sestavy jsou cca 265 mm na šířku, 95 mm na výšku a 150 mm do hloubky. Sestavný výkres elektrody s vyznačením všech pozic a s potřebným spojovacím materiálem je k nahlédnutí v *příloze*. Detailní výkresy jednotlivých dílů nejsou v této práci uveřejněny. Jednotlivé dílčí uzly a jejich klíčové funkce (včetně nejdůležitějších pevnostních výpočtů) rozeberu podrobně v následujících podkapitolách.



obr. 21a: Přední pohled na horní elektrodu.



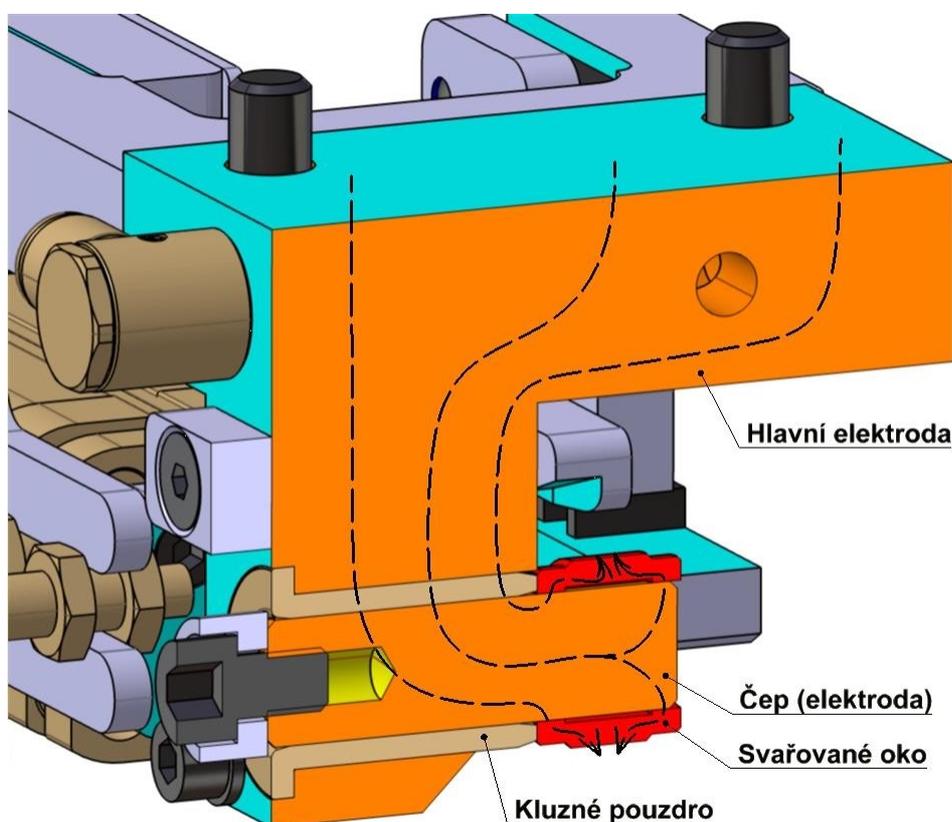
obr. 21b: Zadní pohled na horní elektrodu.

Pro lepší orientaci jsou jednotlivé součásti resp. plochy barevně odlišeny. Všechny díly, které jsou vyrobeny z oceli běžné jakosti jako S235JRG1 (11 373), E335 (11 600)

atd. a oceli vhodné k zušlechťování, kalení a nitridování jako 16MnCr5 (14 220), 42CrMo4 (15 142) apod., jsou zobrazeny šedou barvou ■. Součásti zhotovené z čisté mědi a tvrdé mědi (např. CuCrZr) mají oranžovou barvu ■, součásti z mosazi pak tmavě žlutou ■. Všechny nakupované díly jsou zbarveny hnědě ■, kromě spojovacího materiálu a speciálních distančních podložek, které jsou černé ■. Svařované díly jsou červené ■. Druhotné barevné značení má za úkol zajistit lepší orientaci při tvoření modelu a následně i výkresové dokumentace. Tyrkysové ■ jsou označeny všechny funkční (obráběné) plochy, tmavě modře ■ přesné funkční otvory a žlutě ■ závitové díry.

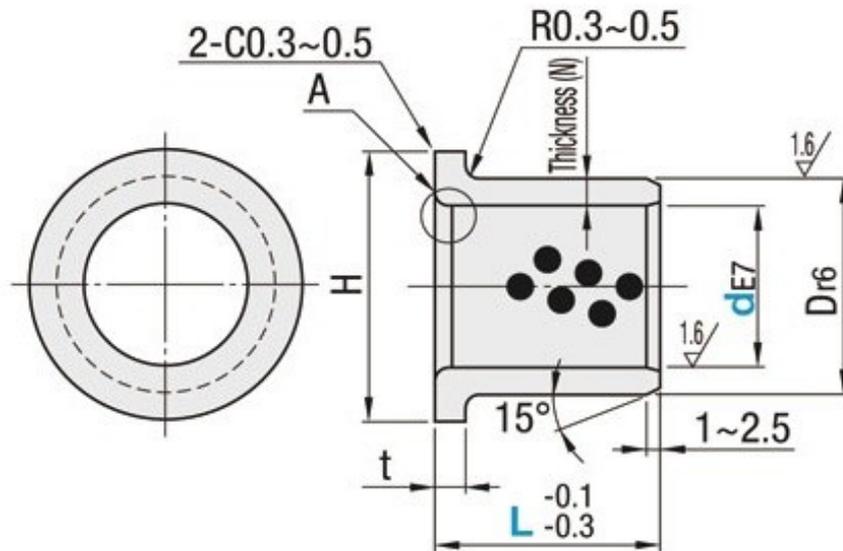
2.3.2 Průchod elektrického proudu

Jak jsem se již zmínil v předchozích kapitolách, elektrický proud se přivádí přes horní elektrodu. Děje se tak pomocí hlavní elektrody, která je vyrobená ze slitiny mědi se značkou CuCrZr (A2/3) viz *tabulka 3*. V hlavní elektrodě je v mosazném, samomazném kluzném pouzdru s grafitovými kapsami posuvně uložený čep (CuCrZr), na který se zakládá svařované oko. Čep nemůže být uchycen napevno, protože by tlumič po svaření nešel ze zařízení vyndat (blíže o způsobu zakládání resp. vyjímání pojednává *kapitola 2.5*). Schematický tok proudu je znázorněn v řezu sestavou na *obrázku 22*.



obr. 22: Schematický průchod proudu horní elektrodou (řez sestavou).

Jak jsem se již zmínil v teoretické části této práce, průchodem proudu dochází k zahřívání všech komponent vlivem vnitřního a přechodového odporu. Z tohoto pohledu se jeví kriticky zejména vložené mosazné pouzdro. Jedná se o nakupovaný díl od firmy MISUMI s označením „MPFZ16-35“. Výňatek z katalogu výrobce je na obrázku 23.



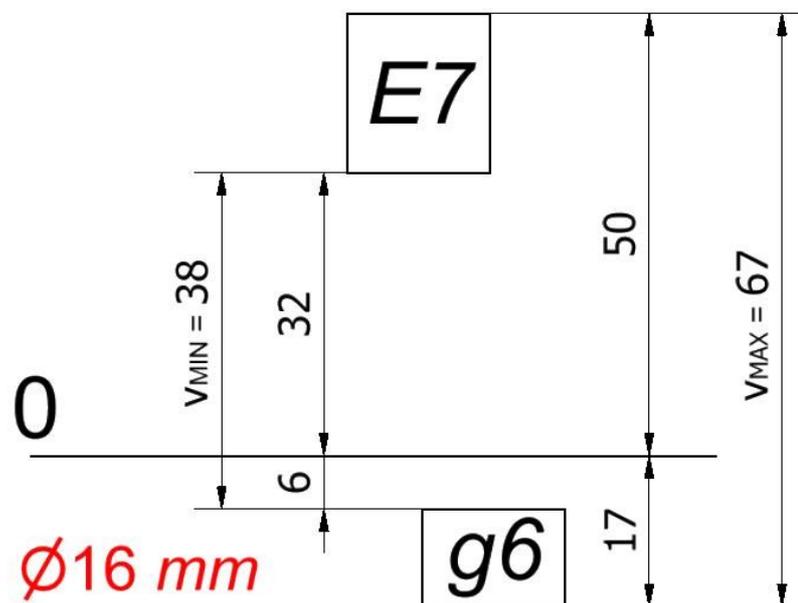
obr. 23: Mosazné samomazné pouzdro „MPFZ16-35“ od firmy MISUMI.^[26]

Zvolené pouzdro je do hlavní elektrody uloženo v toleranci $H7/r6$ (přesah). To značně zmenšuje daný přechodový odpor. Složitější je situace mezi pouzdrem a čepem, kde je kvůli nutnosti pohybu potřeba mít uložení s vůlí. Zde jsem zvolil přesnější uložení $E7/g6$ (průměr 16 mm), které zabezpečí minimální vůli při zachování pohyblivosti. Je důležité si uvědomit, že čep je v průběhu svařování v klidu a pracovní síla lisu přitlačí čep k vrchní části pouzdra, čímž eliminuje jakoukoliv drobnou mezeru mezi součástmi. To má vliv na další snížení přechodového odporu.

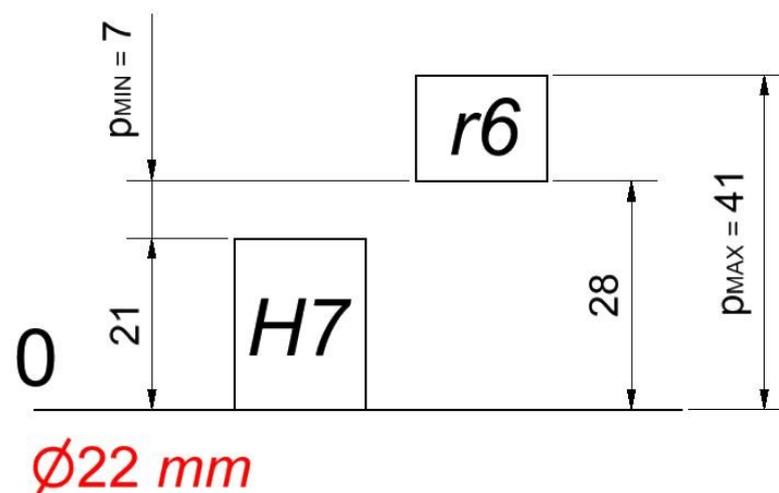
Ačkoliv neznáme přesné složení této vysokopevnostní mosazi, lze říci, že její elektrická vodivost se pohybuje přibližně kolem 30% IACS, což je přibližně 2,5x méně než u materiálu elektrody a čepu.^{[25],[30]} Vzhledem k tomu, že tloušťka pouzdra je však pouze 3 mm , je její výsledný ohmický odpor zanedbatelný.

Větším problémem tak je teplotní roztažnost. Ohřátím čepu a kluzného pouzdra dojde ke zvětšení jejich rozměrů. Protože díly nejsou vyrobeny ze stejných materiálů, bude jejich teplotní roztažnost různá a v nepříznivém případě by tak mohlo dojít k vymizení vůle až vzniku přesahu, který by bránil čepu v pohybu. Proto bylo zapotřebí tuto skutečnost zkontrolovat. Průměrný součinitel teplotní roztažnosti v rozmezí teplot

$20^{\circ}\text{C} - 300^{\circ}\text{C}$ tvrdé mědi je $\alpha_{\text{CuCrZr}} = 17 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ [25],[29] a mosazi přibližně $\alpha_{\text{mosaz}} = 19 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ [27],[28],[29],[31]. Díky intenzivnímu chlazení nepředpokládám, že by teplota v místě pouzdra stoupla výrazně nad 300°C , takže zvolený interval by měl být dostatečný. Díky tomu, že je teplotní roztažnost pouzdra větší než u čepu, bude docházet naopak ke zvětšování vůle, takže nehrozí ztráta pohyblivosti. Pro úplnost uvádím na obrázku 24a schematický nákres uložení E7/g6 pro průměr 16 mm a na obrázku 24b uložení H7/r6 pro průměr 22 mm. [20]



obr. 24a: Schematické zobrazení uložení E7/g6 pro průměr 16 mm.



obr. 24b: Schematické zobrazení uložení H7/r6 pro průměr 22 mm.

V katalogu MISUMI se můžeme dočíst, že nejvyšší povolená pracovní teplota pouzdra je $150\text{ }^{\circ}\text{C}$, nárazově je pouzdro schopné snést i $200\text{ }^{\circ}\text{C}$, avšak pouze po omezenou dobu. V případě nedostatečného chlazení by mohly být v průběhu svařování teploty v místě pouzdra i vyšší než zmíněných $150\text{ }^{\circ}\text{C} - 200\text{ }^{\circ}\text{C}$, což by mělo negativní vliv na jeho životnost. To jen podtrhuje význam chlazení. Velkou neznámou bylo nasazení takového pouzdra u výstupkového svařování, kdy jím protéká velký elektrický proud. Bohužel se mi nepodařilo objevit jeho použití v žádných obdobných aplikacích, a proto jsem se rozhodl ho otestovat. Až doposud (po asi 5 měsících provozu) se neobjevily žádné problémy. Dá se tedy usuzovat, že pouzdro snáší proudové zatížení bez obtíží.

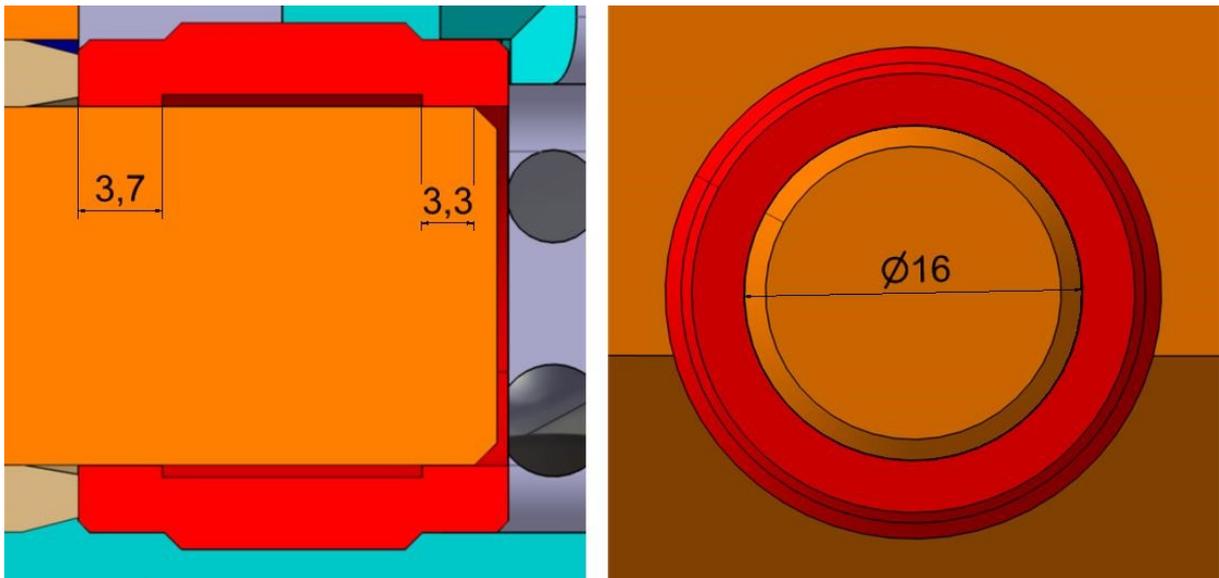
Dále je zapotřebí alespoň rámcově odhadnout, zda není styčná plocha mezi elektrodou (čepem) a svařovaným okem příliš malá a zvolené řešení je vyhovující. Jako stěžejní parametr se jeví proudová hustota. Ta přímo ovlivňuje množství generovaného tepla, a tím výslednou teplotu. Určení přesné mapy teplotního pole je velmi náročné, vyžaduje velké množství vstupních dat jako materiálové konstanty, odpory atd., navíc vše v závislosti na teplotě. Analytické řešení je tak nemožné bez řady zjednodušujících úvah, které však celý problém zkreslí za přijatelnou mez. Je tedy nutné přistoupit k iteračnímu numerickému výpočtu např. metodou konečných prvků (blíže tuto problematiku proberu v kapitole 4). Odladění takového modelu k dokonalosti je velmi časově, tedy i finančně náročné, a tak jsem pro rychlou kontrolu zvolil jiný postup, který je ale pro praktický přístup plně dostačující.

Vycházel jsem z normy ČSN EN ISO 14737: „*Odporové svařování – Postup pro bodové svařování nepovlakovaných a povlakovaných nízkouhlíkových ocelí.*“ Zde se uvádí doporučený průměr elektrody jako $5\sqrt{t}$, kde t je tloušťka svařovaného plechu. Za předpokladu, že výsledné parametry svařování (především velikost elektrického proudu a čas) budou více méně obdobné jako u bodového svařování (blíže viz kapitola 3), lze tento vztah využít i pro případ výstupkového svařování. Svařovaná tloušťka je u obou zhotovovaných dílů stejná, a to $3,5\text{ mm}$. Dosazením do rovnice získám fiktivní průměr elektrody, který následně přepočítám na velikost styčné plochy, která již má vypovídající hodnotu. Jejím porovnáním se skutečnou velikostí kontaktní plochy tak zjistím, zda bude proudová hustota větší nebo menší než u fiktivní elektrody.

$$d_{fikt} = 5\sqrt{t} = 5\sqrt{3,5} = 9,35\text{ mm} \approx 10\text{ mm} \quad (\text{zaokrouhleno dle normy})$$

$$S_{MIN} = \frac{\pi d_{fikt}^2}{4} = \frac{\pi \cdot 10^2}{4} = 78,5\text{ mm}^2$$

Čep, který je uložený s vůlí, se vlivem působení přitlačné síly namáčkne k spodní straně a tím dojde k vytvoření mezery o velikosti dvou vůlí na protilehlé straně. Tím značně stoupne přechodový odpor v horní části čepu a proud nebude přecházet z čepu na oko po celém obvodu s konstantní hustotou. Nebudu proto počítat s celou teoretickou plochou, ale vezmu v úvahu pouze 75%. Na obrázku 25 jsou všechny potřebné rozměry.



obr. 25: Rozměry styčné plochy mezi čepem a okem.

$$S_{REAL} = 0,75\pi dl = 0,75 \cdot 16\pi \cdot (3,7 + 3,3) = 263,9 \text{ mm}^2$$

$$\frac{S_{REAL}}{S_{MIN}} = \frac{263,9}{78,5} = 3,36$$

Z porovnání obou hodnot je vidět, že plocha dotyku čepu a oka je více než 3x větší, než vychází výpočtem z normy pro obvyklé průřezy elektrod, což jako kontrola plně dostačuje.

V normě se dále uvádí, že běžně dosahovaná velikost proudu pro tloušťku plechů 3 mm je 12–17 kA při průměru elektrod 9 mm. Proudová hustota j pak vychází pro nejnižší hodnotu proudu:

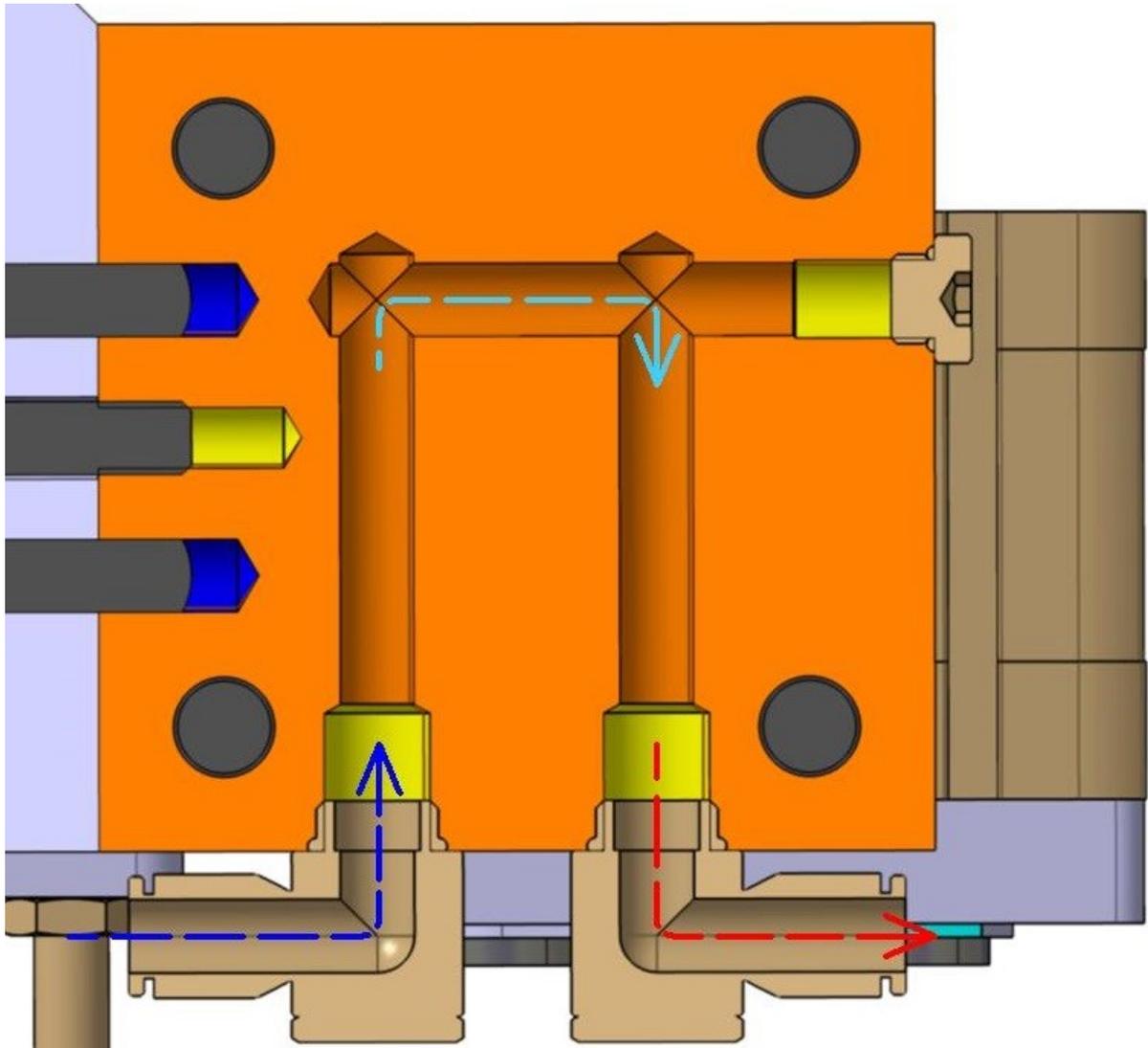
$$j = \frac{I}{S} = \frac{12000}{\frac{\pi \cdot 9^2}{4}} = 188,6 \text{ A/mm}^2$$

Nejvyšší možný proud, který si mohu dovolit přivést do přípravku tak teoreticky bude (při zachování stejné proudové hustoty):

$$I_{MAX}^{teoret} = jS = 188,6 \cdot 263,9 = 49,8 \text{ kA}$$

2.3.3 Chlazení nejdůležitějších komponent

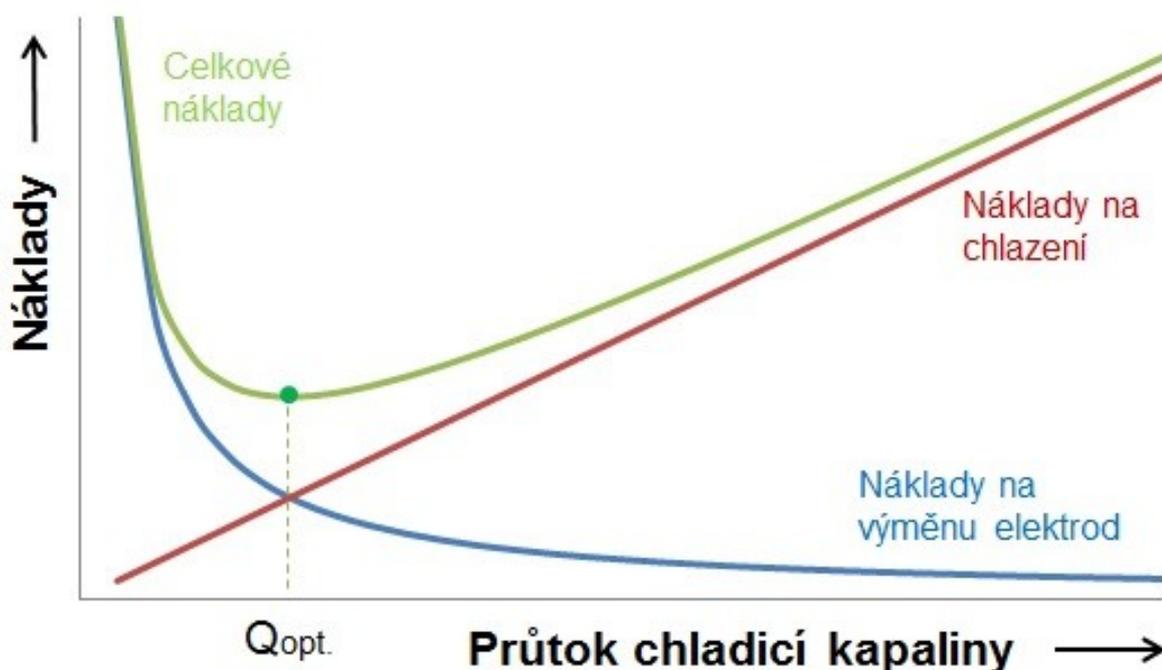
Pro udržení co nejnižší teploty a zajištění její maximální hranice $150^{\circ}\text{C} - 200^{\circ}\text{C}$, je třeba celou elektrodu intenzivně chladit. To je zabezpečeno rozvrtáním hlavní elektrody a přívodem chladicí kapaliny, jak je znázorněno na *obrázku 26*.



obr. 26: Rozvrtání kostky pro chlazení horní elektrody.

Chladícím médiem je v tomto případě voda. Zdrojem tlaku a průtoku je čerpadlo instalované na místě již z dřívějšího provedení svařovacího lisu. Průtok chladicí vody si nastavila podle svých zkušeností firmy Tenneco sama. Jeho odladění však není ničím složitým. Sledujeme závislost životnosti elektrod na průtoku chladicí kapaliny a snažíme se najít jakési optimum. V převedeném smyslu tedy pozorujeme stoupající náklady na množství média na jedné straně a klesající náklady na výměnu elektrod na straně druhé. Sečtením obou průběhů (funkcí) získáme křivku celkových nákladů a v místě jejího minima najdeme požadovaný optimální průtok, jak je schematicky ukázáno na

obrázku 27. Pro vyjádření funkční závislosti matematicky se požadovaná hodnota vypočte z podmínky minima funkce celkových nákladů, čili položením její derivace rovné nule.



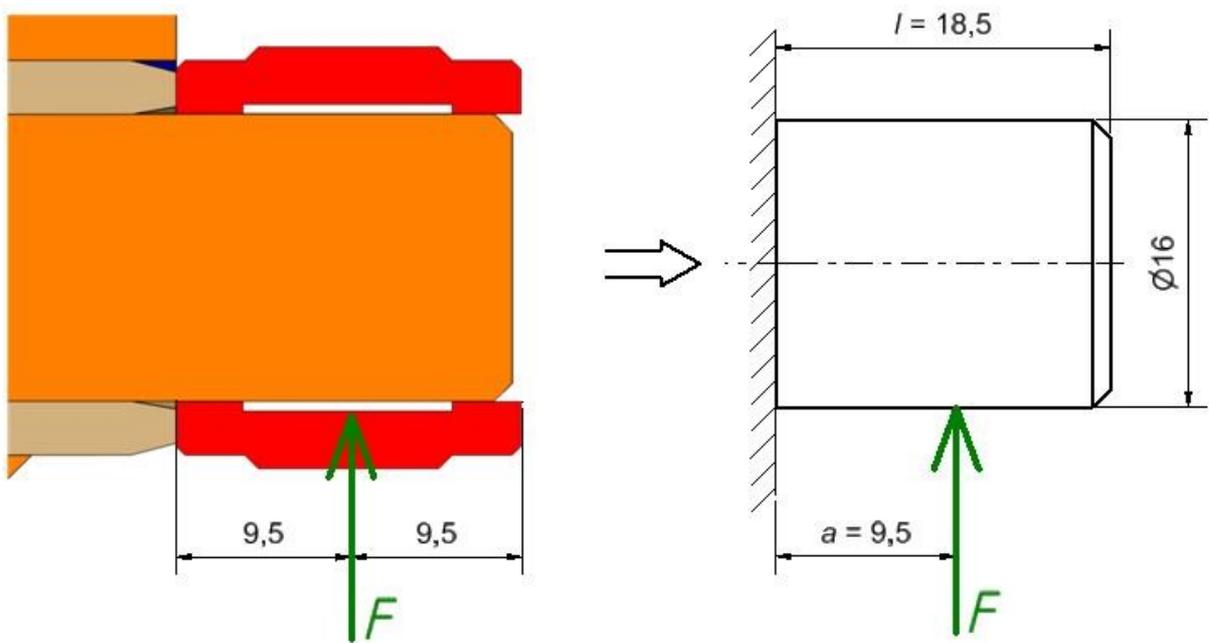
obr. 27: Stanovení optimálního průtoku chladicí kapaliny.^[32]

I přes veškerou snahu jsou elektrody výrazně spotřebním dílem. K zajištění opakovatelné jakosti svarového spoje je nutné mít elektrody v neustále dobrém stavu, bez viditelných poškození či deformací styčných ploch se svařovanými díly. Z tohoto důvodu se konstruují tzv. křivky životnosti elektrody, které blíže specifikuje norma ČSN EN ISO 8166: „Odporové svařování – Způsob hodnocení životnosti bodových svařovacích elektrod při konstantním nastavení zdroje.“ Ačkoliv se tato norma týká výhradně bodového svařování, lze ji přeneseně využít i pro ostatní metody odporového svařování, coby technologický návod a přístup k popisované problematice.

Je proto velmi důležité, aby elektroda, která je v přímém kontaktu s dílem, byla tvarově co nejjednodušší. To značně sníží pracnost výroby (a tím i náklady) na výrobu nových elektrod.

2.3.4 Výpočet čepu

Jednoznačně nejnamáhanější součástí celé konstrukce horní elektrody je čep. V první řadě se jedná o tepelné zatížení od procházejícího proudu, které jsem již rozebral v kapitole 2.3.1. Čep však přivádí na oko rovněž přítlačnou sílu od svařovacího lisu, která teoreticky může být až $F_{MAX} = 23 \text{ kN}$. Prakticky nemá smysl takto vysokou sílu uvažovat, protože při výstupkovém svařování obdobných tlouštěk materiálů je běžně používaná síla dle normy ČSN EN ISO 16432 přibližně 3 kN (blíže viz kapitola 3), pro složitější cykly s kování může být síla až dvojnásobná, tedy cca 6 kN . Pro výpočet s dostatečnou rezervou budu počítat se silou $F = 10 \text{ kN}$. Větší přítlak by při svařování v žádném případě neměl být potřeba. Na obrázku 28 je nakreslen čep včetně výpočtového modelu.



obr. 28: Zatížení a uložení čepu.

Čep budu řešit obvyklým postupem s jedinou výjimkou, kterou je uložení vetknutím. Síla namáhá čep na ohyb, takže ohybové napětí σ_o vypočtu jako:

$$\sigma_o = \frac{M_o}{W_o} = \frac{32Fa}{\pi d^3} = \frac{32 \cdot 10\,000 \cdot 9,5}{\pi \cdot 16^3} = 236 \text{ MPa}$$

Protože je čep velmi krátký a silný, musím uvažovat rovněž napětí smykové τ od sřížného efektu síly:

$$\tau = \frac{F}{S} = \frac{4F}{\pi d^2} = \frac{4 \cdot 10\,000}{\pi \cdot 16^2} = 50 \text{ MPa}$$

Výsledné redukované napětí σ_{red} pak určím podle Trescovy hypotézy (τ_{MAX}):

$$\sigma_{red} = \sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2} = \sqrt{236^2 + 4 \cdot 50^2} = 256 \text{ MPa}$$

V materiálovém listu slitiny CuCrZr (viz příloha 4) je uvedena minimální smluvní mez kluzu $R_{p0,2} = 450 \text{ MPa}$. Tato hodnota však platí pouze při pokojové teplotě. Dle závislosti na obrázku 20 dochází k více či méně prudkému poklesu mechanických vlastností. Konkrétní hodnoty pro teplotní chování se však výrazně liší napříč literaturou. Záleží totiž na konkrétním tepelném zpracování, způsobu testování atd. Uváděné výsledky se hodnotově velmi různí, avšak jejich průběh je v zásadě totožný - přímkový či lehce nelineární, obdobně jako na obrázku 20 (vlevo). Podrobným prozkoumáním grafů jsem tak dospěl k závěru, že původní velikost meze kluzu $R_{p0,2}$ poklesne při teplotě $300 \text{ }^\circ\text{C}$ přibližně o 1/3 z původní hodnoty. Její velikost tak bude:

$$R_{p0,2}^{300^\circ\text{C}} = \frac{2}{3} R_{p0,2} = 300 \text{ MPa}$$

Vypočtené redukované napětí v čepu tak mohou porovnat s mezí kluzu materiálu:

$$\sigma_{red} = 256 \text{ MPa} < R_{p0,2}^{300^\circ\text{C}} = 300 \text{ MPa} \quad (\text{bezpečnost } k \approx 1,2)$$

Podmínka je splněna, a průměr čepu je proto vyhovující.

Protože celý svařovací lis je repasovaný, může při jeho zkouškách na nečisto (bez svařování, avšak se založenými díly), dojít k testování hlavního pneumatického válce lisu, který generuje přitlačnou sílu. Proto provedu navíc ještě kontrolu, jak velkou sílu čep přenesne, aniž by došlo k jeho výrazné a trvalé plastické deformaci.

$$\sigma_{red} = \sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2} = \sqrt{\left(\frac{32Fa}{\pi d^3}\right)^2 + 4\left(\frac{4F}{\pi d^2}\right)^2} < R_{p0,2}$$

$$\Rightarrow F < \frac{R_{p0,2}}{\sqrt{\left(\frac{32a}{\pi d^3}\right)^2 + 4\left(\frac{4}{\pi d^2}\right)^2}} = \frac{450}{\sqrt{\left(\frac{32 \cdot 9,5}{\pi \cdot 16^3}\right)^2 + 4\left(\frac{4}{\pi \cdot 16^2}\right)^2}} = 17555 \text{ N} = 17,5 \text{ kN}$$

$$F = \frac{17,5}{23} F_{MAX} = 76\% F_{MAX}$$

Výsledek naznačuje, že meze kluzu materiálu bude dosaženo již silou, která odpovídá $3/4 F_{MAX}$. Pro jakékoliv testování proto musí být síla omezena nejvýše na $70\% F_{MAX}$.

Poslední kontrolu provedu na otláčení čepu. Jeho tvrdost pro teplotu $300 \text{ }^\circ\text{C}$ nijak neklesá oproti pokojové teplotě. Tvrdost je hlavní parametr, který určuje odolnost proti

otlačení povrchu součásti, dále hraje roli také mez kluzu materiálu. Dovolенý stykový tlak pro materiál CuCrZr se mi nepodařilo zjistit (vlastnosti slitiny viz *příloha 4*). Pomůžu si proto přes ocel třídy S355J2 (11 523), která má velmi podobné pevnostní vlastnosti ($R_e = 345 \text{ MPa}$, $R_m = 500 \text{ MPa}$) i tvrdost ($140 - 200 \text{ HB} \approx 140 - 200 \text{ HV}$).^{[33],[34],[35]} Maximální dovolенý kontaktní tlak pro ocel S355J2 je pro statické zatížení bez pohybu součástí vůči sobě přibližně $p_D = 100 \text{ MPa}$. Dotykový tlak pro uvažované zatížení čepu je:

$$p = \frac{F}{S} = \frac{F}{bd} = \frac{10\,000}{(3,7 + 3,3) \cdot 16} = 89 \text{ MPa} < p_D = 100 \text{ MPa},$$

kde b je součet styčné délky (viz *obrázek 25*). Vypočtený tlak je menší než dovolенý, takže by nemělo docházet k otlačení.

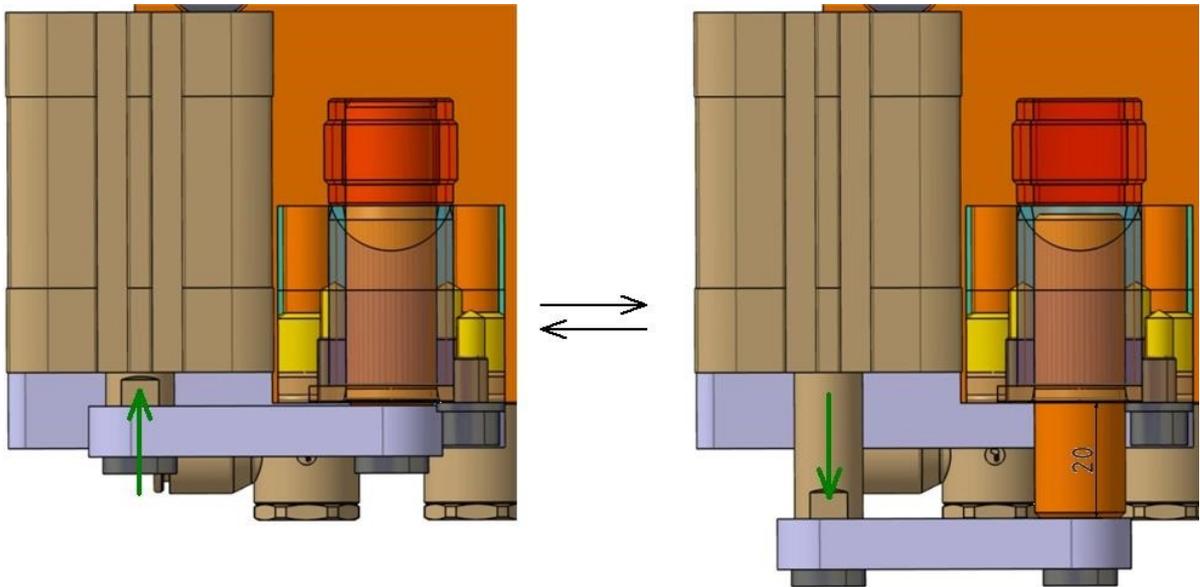
Závěrem této podkapitoly bych chtěl provést krátkou úvahu nad výpočty čepu. Jelikož se jedná o extrémně zatížený konstrukční uzel, který čelí velkému silovému a teplotnímu zatížení, budou lokální projevy únavy materiálu velmi intenzivní již po krátké době používání nehledě na rozměry součásti. Bude docházet k difúzi jednotlivých prvků mezi materiály, lokálním teplotním špičkám, budou vznikat lokální plastické deformace atd. Po překročení přípustné meze těchto negativních jevů bude muset být elektroda vyměněna, aby nedošlo k poklesu jakosti svaru. Přesto je třeba se vyvarovat příliš velkých styčných tlaků nebo namáhání nad mezí kluzu a vše alespoň rámcově propočítat tak, jak jsem to provedl v této kapitole. Životnost elektrody by totiž byla neúměrně kratší a elektroda by se musela měnit už po pár operacích.

2.3.5 Pohyb čepu

Zajiždění resp. vyjíždění čepu je realizováno pomocí pneumatického válce. Ideální by bylo umístit válec přímo do osy čepu na zadní stranu hlavní elektrody. Válec by tak pohyboval čepem s minimálními pasivními odpory.

Ačkoliv se toto řešení jeví jako nejlepší, nemohl jsem ho použít. Důvodem jsou omezené prostorové podmínky, které jsou vidět na *obrázku 16*. Přívodní svazek je od původní horní elektrody vzdálen cca 40 mm . Minimální zdvih válce musí být 20 mm , aby se přední čelo čepu dostalo za úroveň čela pouzdra. Proto jsem válec umístil vedle hlavní elektrody. To s sebou nese jak nesporná pozitiva, tak jistá negativa. Válec na zvoleném místě nikterak nepřekáží a není třeba vymýšlet složité připevnění ani mechanismus přívodu jeho síly na čep. Hlavní nevýhodou je blízkost k místu svařování

a nesouosé působení na čep. Vše demonstruje obrázek 29, kde jsem pro názornost zpřuhlednil některé plochy hlavní elektrody, pouzdra a přivařovaného oka.



obr. 29: Krajní polohy čepu (pohled ze spodu).

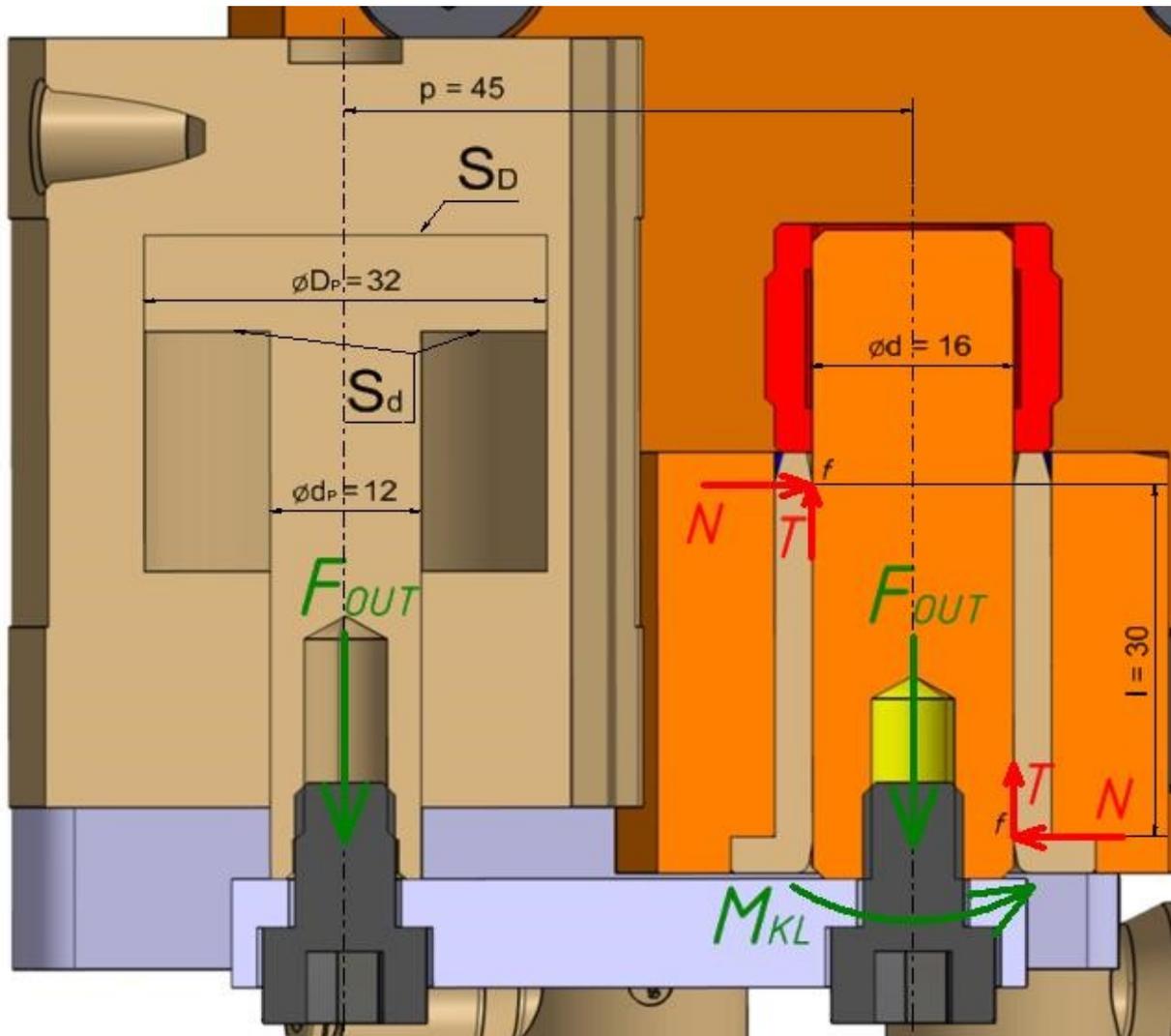
Vzhledem k rychlosti svařování a dobrému odvodu tepla kondukcí elektrod není relativně blízká poloha válce místu vzniku svaru příliš významná. Větší komplikace přináší zmíněný nesouosý tah, který by za provozu mohl způsobit vzpříčení mechanismu. Tím by došlo k jeho zablokování a hotový svařenec by nešel vyjmout z přípravku. Zvolil jsem válec od firmy FESTO s označením „ADN-32-20-I-P-A“. Jedná se o klasický pneumatický válec s průměrem pístu o velikosti $D_p = 32 \text{ mm}$, průměrem pístnice $d_p = 12 \text{ mm}$ a zdvihem $z = 20 \text{ mm}$. Běžný rozvod tlakového vzduchu v průmyslových podnicích (a nejinak je tomu ve výrobních prostorách firmy Tenneco) dosahuje hodnoty $p = 6 \text{ bar} = 0,6 \text{ MPa}$. Do válce je vzduch přiveden klasickými šroubeními, která jsem nezobrazoval ani v 3D modelu ani na obrázcích. Vzhledem k malému zdvihu válce jsem neinstaloval škrťací ventily. Kvůli rozdílné velikosti ploch pístu v pístním a pístnicovém prostoru nebude síla v obou směrech stejná. Její maximální velikost, kterou pneu-válec vyvine při výsuvu, je:

$$F_{OUT} = pS_D = p \cdot \frac{\pi D_p^2}{4} = 0,6 \cdot \frac{\pi \cdot 32^2}{4} = 483 \text{ N}$$

Oproti tomu při zasouvání bude síla menší, a to:

$$F_{IN} = pS_d = p \cdot \frac{\pi (D_p - d_p)^2}{4} = 0,6 \cdot \frac{\pi \cdot (32 - 12)^2}{4} = 189 \text{ N}$$

Silový rozbor působení pneu-válce včetně rozměrů na čep je na *obrázku 30*.



obr. 30: Silový rozbor působení pneumatického válce na čep.

Síla F_{OUT} působí na čep přes spojovací příčku. V místě čepu má síla válce nejen tahový účinek, ale vytváří i klopný moment M_{KL} . Tento moment působí přičení čepu v pouzdře, a vytváří tak reakční normálové síly N , které tlačí na čep. Díky snaze čepu pohybovat se ve směru síly F_{OUT} , tak vznikají třecí síly T . Bude-li tření větší než tažná síla válce, dojde k zablokování mechanismu nazývané jako vzpříčení. Podmínka pohybu tedy zní:

$$F_{OUT} > 2T$$

Pro moment M_{KL} lze psát následující rovnice, které vychází z rovnováhy silového působení válce a z momentové rovnice čepu:

$$M_{KL} = F_{OUT} p = Nl$$

Pro velikost tření platí Coulombův zákon a je vyjádřeno jako:

$$T = fN$$

Dosazením všech vztahů se působící síla vykrátí a získám čistě geometrickou podmínku pro pohyb mechanismu, kde po vyčíslení levé strany nerovnice vychází:

$$\frac{l}{2p} > f \Rightarrow \frac{30}{2 \cdot 45} = 0,33 > f$$

Bude-li koeficient tření menší než vypočtená hodnota, bude podmínka splněna a ke vzpříčení nedojde. Pro vyhodnocení potřebné hodnoty součinitele tření mezi mědí a mosazí za použití grafitového mazání se mi ale nepodařilo v žádné dokumentaci najít. Abych se dostal alespoň k přibližné hodnotě, provedl jsem následující úvahu. Protože mosaz je složena především z mědi, měl by koeficient tření těchto materiálů např. pro kombinaci s ocelí být blízký. To dokládají zjištěné hodnoty, které jsou shrnuty v *tabulce 4*.

Materiál 1 – Materiál 2	Statický koeficient tření	
	Na sucho	Namazáno
Ocel – Mosaz	0,5 – 0,53	0,19
Ocel – Měď	0,5 – 0,53	0,18
Měď – Měď	0,6 – 1	0,08 – 0,1

tab. 4: Statické koeficienty tření vybraných kombinací materiálů. ^{[37],[38],[39],[40],[41]}

Tím jsem si ověřil, že se materiály skutečně chovají podobně. Rozdíl tak nebude nikterak veliký, a proto využiji namísto hodnoty součinitele tření pro měď – mosaz kombinaci materiálů měď – měď. Pro namazaný povrch, což je případ samomazného pouzdra s grafitovými kapsami, má hodnotu:

$$f_{mosaz-Cu} \approx f_{Cu-Cu} = 0,08 < f_{MIN} = 0,33$$

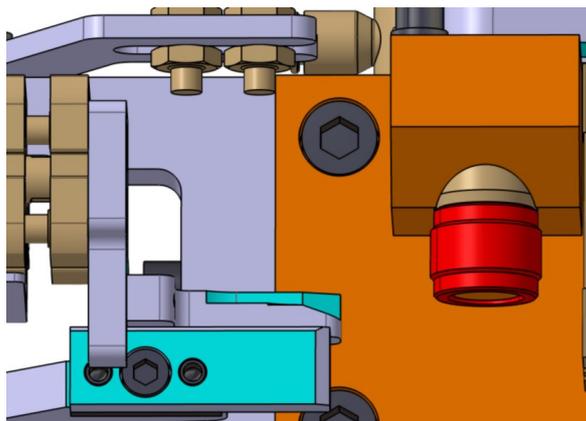
Podmínka je splněna a k přičení čepu docházet nebude.

Je důležité si uvědomit, že výrobní nepřesnosti, které by měly za následek výraznější nesouosost pístnice válce a čepu, by výrazně přispěly k přičení mechanismu, a musí proto být minimalizovány. To jsem vyřešil patřičným otolerováním všech funkčních ploch. I přesto bylo při montáži zapotřebí odladit mechanismus, poněvadž nefungoval hladce a čep se zadržoval. Vše spravila správně silná podložka vložená mezi pístnici a spojovací příčku, která dorovnala nasčítané výrobní chyby.

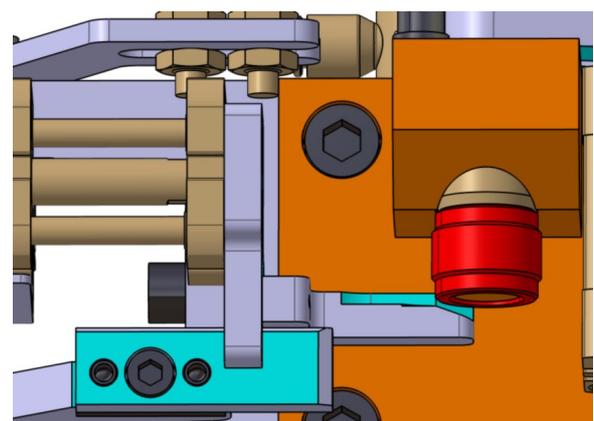
2.3.6 Poka – Yoke

Systém prevence neúmyslných chyb pomocí konstrukčních a dalších opatření, nazývaný v praxi souhrnně jako Poka – Yoke, pomáhá ke snížení zmetkovitosti výroby, čímž výrazně šetří náklady. Ve velkém s tímto systémem jako první přišla japonská automobilka Toyota. Postupem času se termín i metoda rozšířily a dnes jsou hojně využívány napříč průmyslovými odvětvími.^[42]

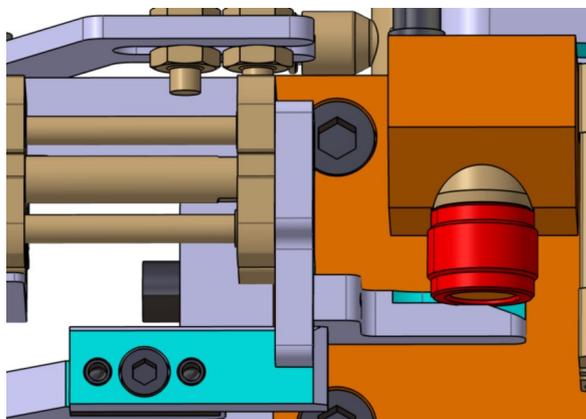
Systém Poka – Yoke jsem implementoval podle požadavků zákazníka i já do svařovacího přípravku. Zabezpečuje jej druhý pneumatický válec, který má na sobě připevněný nitridovaný tvarový palec. Před zahájením samotného svařování dojde k vysunutí pístnice válce. Ta buď dosáhne maximálního výsuvu, nebo se zastaví ve chvíli, kdy se palec zarazí o založené oko. Podle polohy válce se následně vyhodnocuje, zda se svařovaný díl vejde do požadovaného tolerančního pole, jehož velikost je $0,4\text{ mm}$. Obrázek 31 zobrazuje 4 stavy resp. polohy, které mohou nastat.



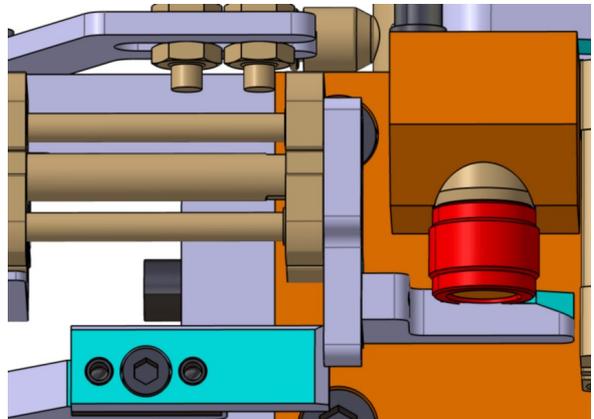
Poloha „1“ – základací poloha



Poloha „2“ – dlouhý díl (nevyhovující)



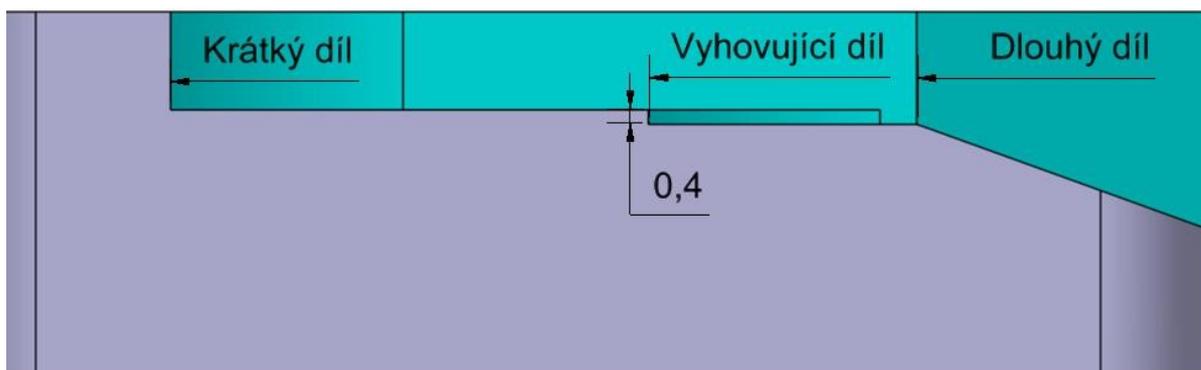
Poloha „3“ – vyhovující díl



Poloha „4“ – krátký díl (nevyhovující)

obr. 31: Poka – Yoke.

Poloha „1“ je zakládací a signalizuje, že pístnice je zcela zajištěná. Pokud válec skončí v poloze „2“, je díl příliš dlouhý a jedná se o zmetek. Svařovací cyklus se nespustí a obsluze stroje se zobrazí chybové hlášení s popisem chyby. Obdobná situace nastane pro polohu „4“ pouze s tím rozdílem, že díl je naopak moc krátký. Zastaví-li se palec v poloze „3“, má přivařované oko správnou velikost a řídicí systém povolí spuštění svařovacího programu. Detail odstupňovaných funkčních ploch tvarového palce je vidět na *obrázku 32*. Z obrázku je patrné, že díl se zasekne o výčnělek pouze tehdy, pokud odpovídá požadovaným rozměrům.



obr. 32: Frézování ploch kontrolního palce.

Polohu válce zjišťují celkem 4 indukční snímače s digitálním výstupem 1 / 0. Každá poloha je tak jednoznačně definována jedním čidlem. Dalo by se říct, že by stačily pouze 3 snímače, protože poslední poloha by mohla být definována samými nulami. Toto řešení by ale nebylo zcela vhodné, protože stav „samých nul“ může také signalizovat, že některé z čidel je vadné a nefunkční.

Indukční snímače jsou dvou různých typů. První dvě čidla nesou označení „*BES-M08EG1-PSC15A-S04G-W*“ a jsou od firmy BALLUFF. Tato čidla mají jemný závit M8x1 a jsou pomocí dvou matic přichycena k držáku, který jim umožňuje posun v drážce podle potřeby (viz *obrázek 31*). Druhou dvojicí jsou tzv. štěrbinové snímače od firmy FESTO, které se vsouvají do drážek v plášti pneumatického válce. Ty snímají polohu pístu uvnitř válce přes magnetický kroužek, který má píst v sobě vložený. Rozdílné snímače byly použity kvůli prostorové a funkční optimalizaci. Štěrbinové snímají obě krajní polohy válce, druhé dva pak požadované mezipolohy.

Nabízela se ještě jedna, z pohledu snímání elegantnější, možnost, a to volba proporcionálního čidla opět štěrbinového provedení. To snímá přesnou polohu válce a převádí ji na velikost napětí, které lineárně narůstá od definované počáteční hodnoty v jedné krajní pozici pístu. Napěťový výstup tak odpovídá přesně výsuvu pístnice.

Nevýhodou toho řešení je, že čidlo má pouze analogový výstup, a tudíž by byl zapotřebí A/D převodník. Tato sestava je bohužel mnohem dražší než 4 indukční snímače, a proto jsem toto řešení nepoužil.

Pravdivostní tabulka s možnou kombinací vstupů je zobrazena v *tabulce 5*.

Snímač 1 (a)	Snímač 2 (b)	Snímač 3 (c)	Snímač 4 (d)	Výstup (y)	Chyba (Err)	Vadný snímač (Err*)
1	0	0	0	0	0	0
0	1	0	0	0	1	0
0	0	1	0	1	0	0
0	0	0	1	0	1	0
0	0	0	0	0	1	1

tab. 5: Pravdivostní tabulka vstupů a výstupu.

Vyhodnocením hodnot dostanu rovnici pro výstupní parametr, kterým budu následně řídit spuštění svařovacího cyklu. Pro 3. řádek *tabulky 5* (zelený) tak lze psát:

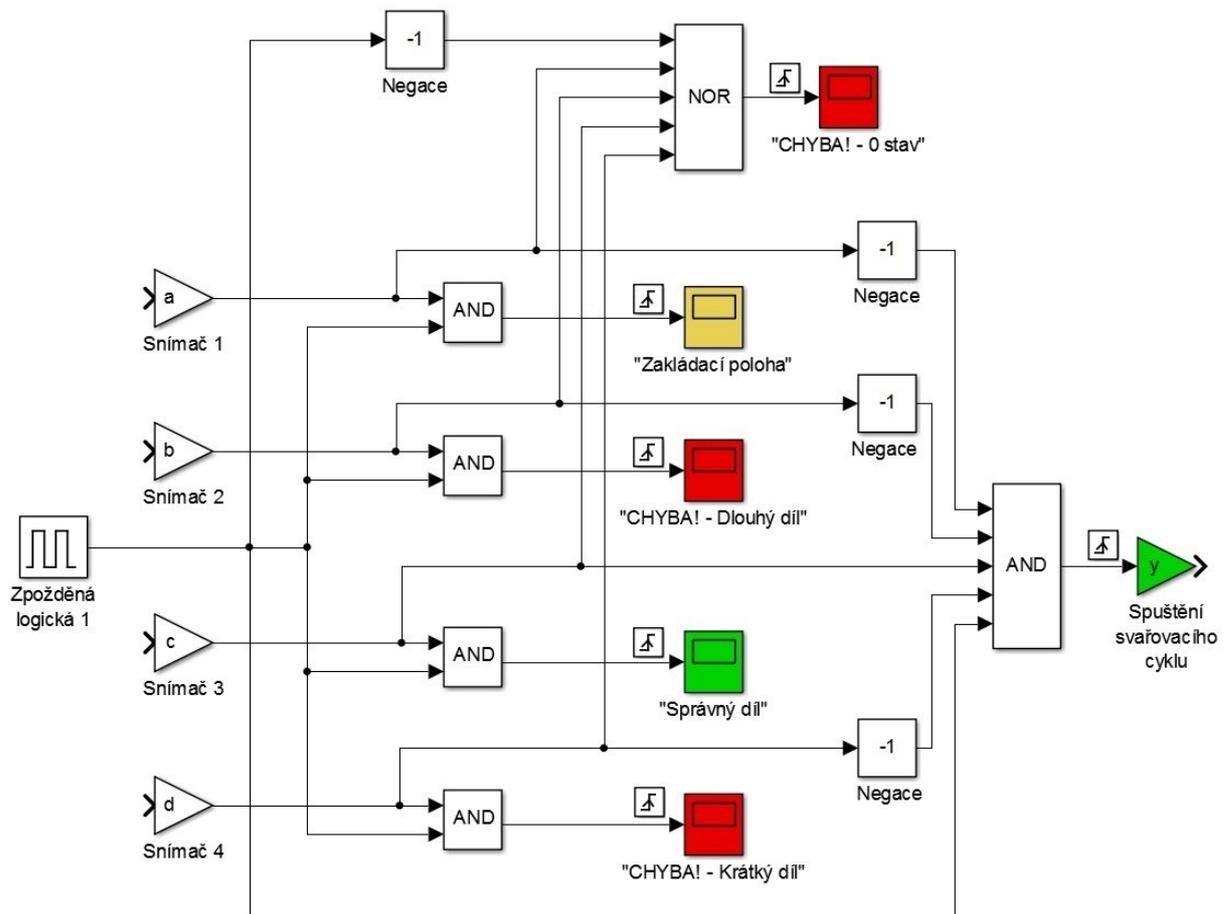
$$y = \bar{a} \cdot \bar{b} \cdot c \cdot \bar{d}$$

Pro všechny stavy čidel bude na displeji řídicí jednotky zobrazena zpráva, která popisuje daný stav zařízení. Ve výchozím stavu bude zobrazena zpráva „Zakládací poloha“. Ve chvíli, kdy dojde ke spuštění programu, se válec rozjede a program vyhodnotí jeho výslednou polohu. Vyhodnocení musí proběhnout s předem definovaným zpožděním, aby se na displeji nezobrazovaly postupně jednotlivé stavy, jak bude deska pístitnice míjet všechna čidla. Proto jsem se rozhodl generovat zprávu přes logickou funkci („výstup snímače“ AND „1“), přičemž logická jednička bude právě o něco zpožděna. V reálu se zmíněná zpožděná jednička vyřeší impulsem, který vygeneruje žádanou zprávu pro obsluhu. Zpráva samozřejmě bude reagovat pouze na tzv. vzestupnou hranu, takže i po spadnutí řídicího signálu na úroveň logické 0 zůstane na displeji.

Kromě toho si nadefinuji ještě jednu důležitou rovnici pro případ chyby, která odpovídá řádku 5 *tabulky 5*. Tento stav nemůže nastat pro žádnou z definovaných poloh. Dojde-li k takové situaci, znamená to, že některý ze snímačů nepracuje. Rovnice má tvar:

$$Err^* = \bar{a} \cdot \bar{b} \cdot \bar{c} \cdot \bar{d} = \overline{a + b + c + d}$$

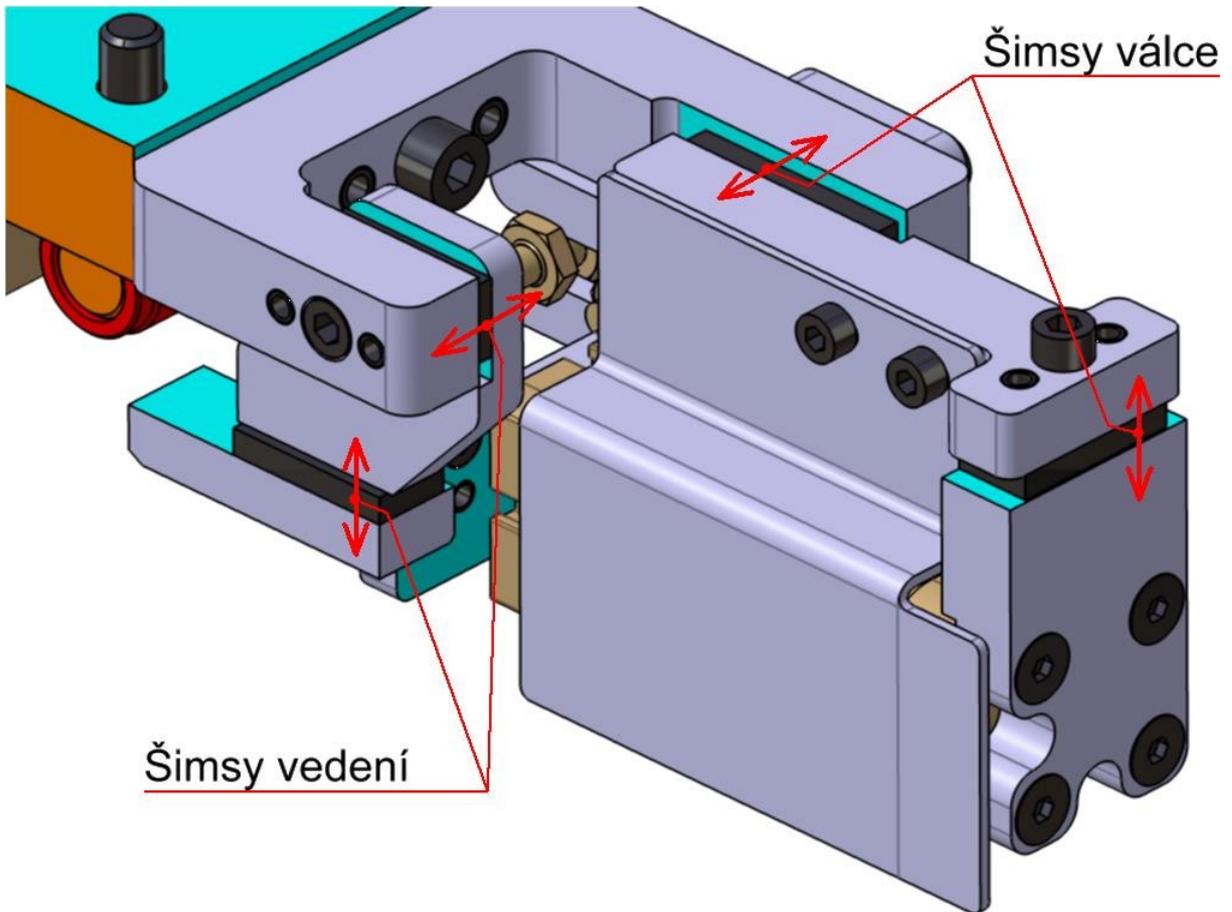
Samotné spuštění i vyhodnocení chyby opět provádím pouze na vyžádání. Velikost zpoždění činí asi 3 sekundy, aby měl válec čas dosáhnout plného výsuvu. Schéma realizace logických funkcí je na *obrázku 33*.



obr. 33: Schéma realizace logických funkcí.

Protože tolerance vyhovujícího dílu je široká pouze zmiňovaných $0,4 \text{ mm}$, bude muset být celý systém Poka – Yoke stavitelný v řádu setin milimetru (cca $\pm 0,05 \text{ mm}$). K tomuto účelu jsem použil v praxi osvědčený způsob tzv. šimsování. Všechny směry, ve kterých bude potřeba seřízení, obsahují jednu speciální distanční podložku (šimsu) o teoretické tloušťce 5 mm . Po smontování přípravku se provede měření celkových odchylek od standardních rozměrů. Tento rozdíl se vykompenzuje buď broušením, anebo doplněním další tenké podložky.

Aby kontrolní palec držel svou definovanou trajektorii a neměl při kontaktu s okem tendenci vybočovat ven, musí být podepřen z druhé strany vedením. Jenom tak dojde k požadovanému vzpříčení a píst se zasekne. Poloha vedení musí být logicky také přesně stavitelná, avšak nezávisle na válci. Situaci znázorňuje *obrázek 34*.



obr. 34: Způsob nezávislého šimsování válce a vedení.

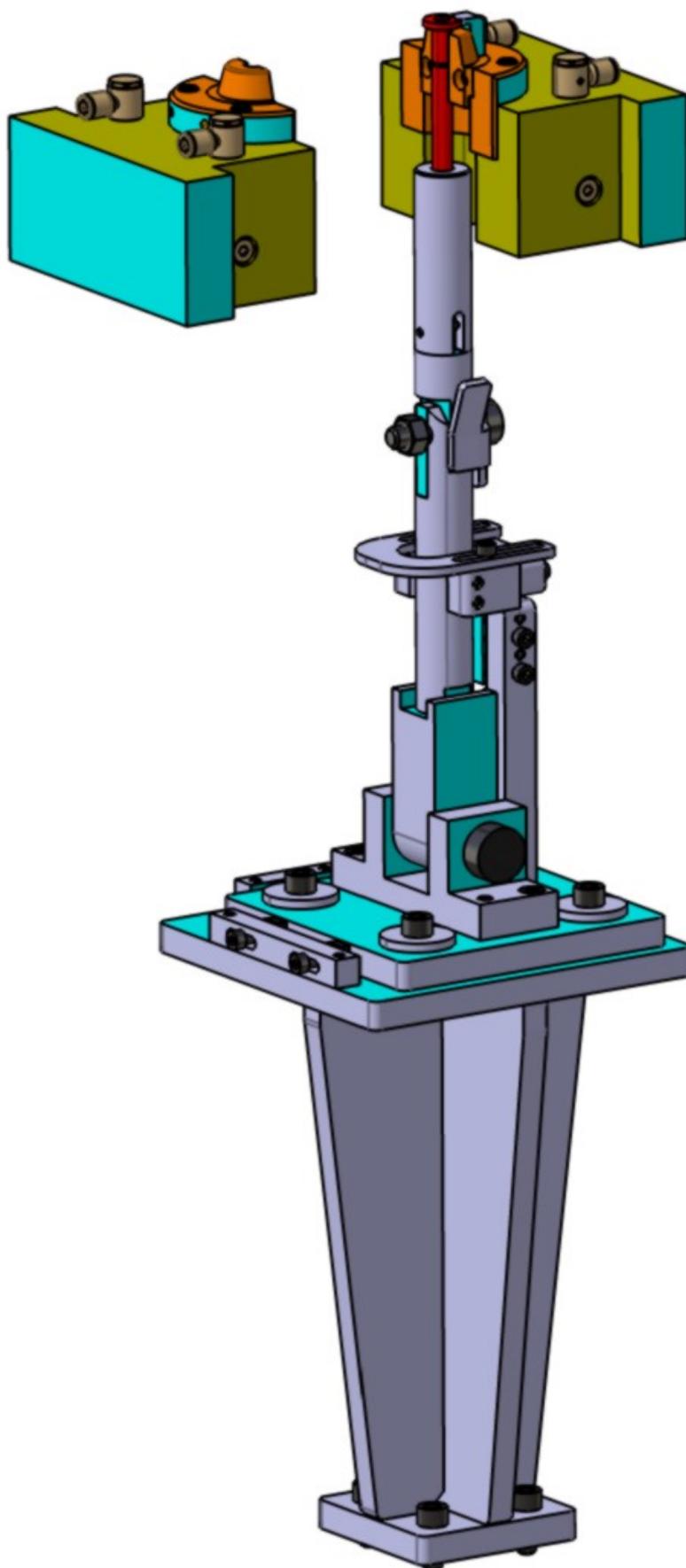
2.4 Dolní elektroda

2.4.1 Celkový pohled

Dolní elektroda slouží kromě odvodu elektrického proudu také k zakládání pístnic a plášťů. Stejně jako v případě horní elektrody je i sestavný výkres dolní elektrody k nahlédnutí v *příloze*. V následujících podkapitolách opět rozeberu jednotlivé dílčí uzly a jejich klíčové funkce včetně nejdůležitějších pevnostních výpočtů.

Konstrukce musela být uzpůsobena velmi úzkému prostoru v rámu svařovacího lisu. Velikost mezery je vidět na *obrázku 16 (vlevo)* a měří necelých 100 mm . To bylo velmi limitující, především co se týče mechanismu vyjímání resp. zakládání dílů.

Levá strana dolní elektrody je připevněna na pneumatický válec u pojezdu lisu, a je tedy pohyblivá. Velikost posuvu je přibližně 120 mm . Výsledná podoba dolní elektrody při odjetí její levé části je na *obrázku 35*. Rozměry sestavy jsou cca 835 mm na výšku a 210 mm jak na šířku, tak do hloubky.



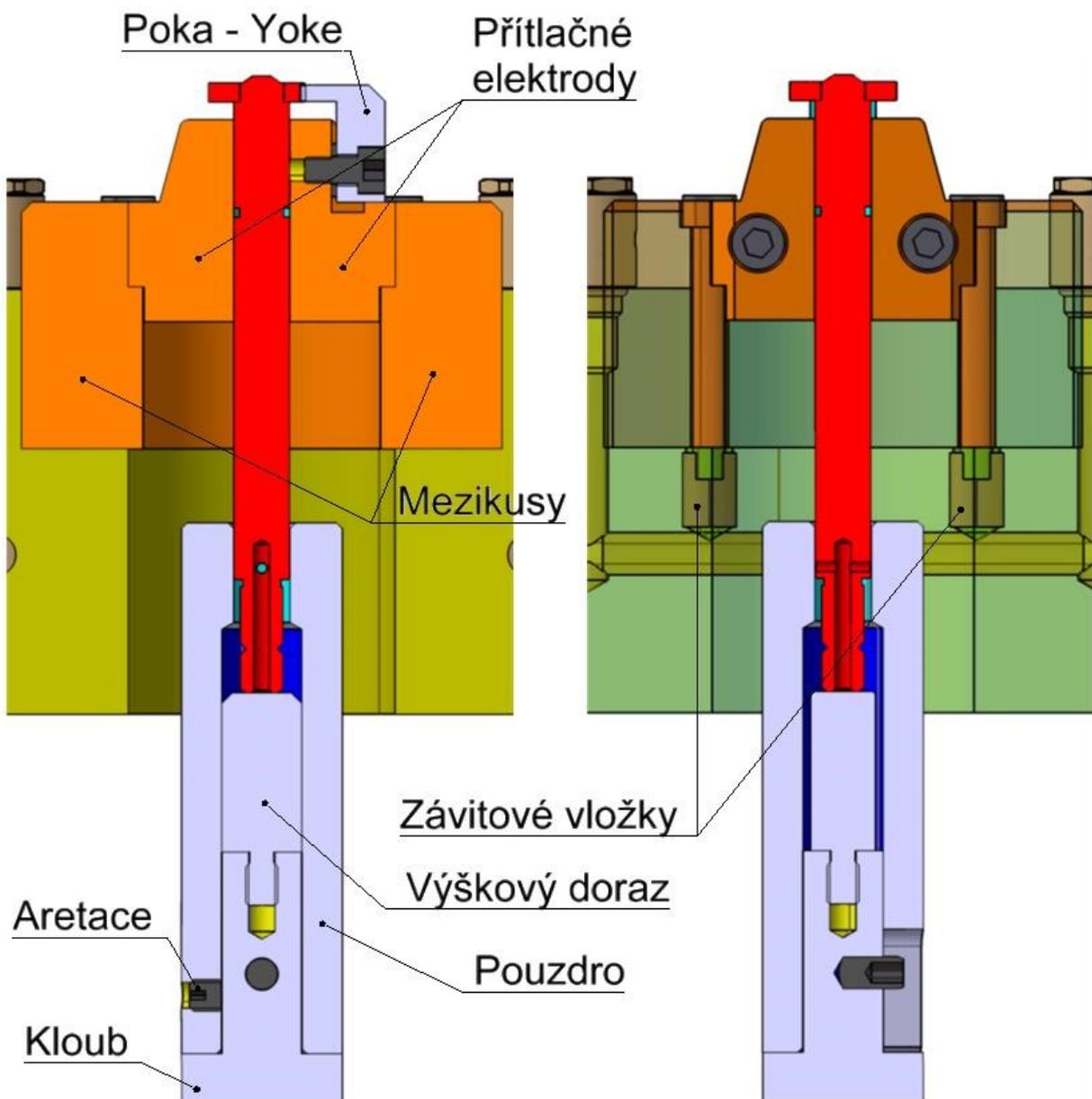
obr. 35: Pohled na dolní elektrodu (modifikace pro svařování pístnic).

2.4.1 Výměnné držáky pro různé svařované díly

Dolní elektroda musí podle požadavků technického zadání umožňovat založení 2 různých dílů – pístnic a plášťů. U obou se požaduje zajištění přesné polohy vůči ose oka. Tento problém jsem vyřešil sadou výměnných elektrod a držáků tak, aby přestavení přípravku z prvního na druhý typ svařovaných dílů (a obráceně) bylo co nejrychlejší a pro obsluhu co nejjednodušší.

2.4.1.1 Modifikace pro svařování pístnic

Detail hořejší části dolní elektrody je na *obrázku 36*.



obr. 36: Detail modifikace pro svařování pístnic (řez osou). Vlevo řez zepředu, vpravo řez zleva.

Do otvoru na svrchní straně kloubu je našroubovaný nitridovaný výškový doraz, o který se opírá svařovaná pístnice. Požadavek zákazníka na různé délky pístnic jsem vyřešil vyrobením sady těchto dorazů s rozdílnými výškami. Stačí pouze pomocí běžného nářadí založit požadovaný doraz. Aby při zakládání pístnice držela na svém místě (když je levá část elektrody odjetá), je jištěna pomocí pouzdra, které je zaaretováno stavěcím šroubem. Díra v pouzdře neslouží jako středící otvor. Středění mají za úkol přítlačné elektrody vyrobené ze slitiny CuCrZr. Limitujícím faktorem byla nemožnost vytvoření jejich vlastního tvaru. Musel jsem tedy dodržet předepsaný design, protože ve firmě Tenneco již používají mnoho stejných elektrod a přáli si, aby je mohli využívat i na tomto přípravku. Proto je spojení s mosaznými kostkami realizováno přes vložené mezičláanky.

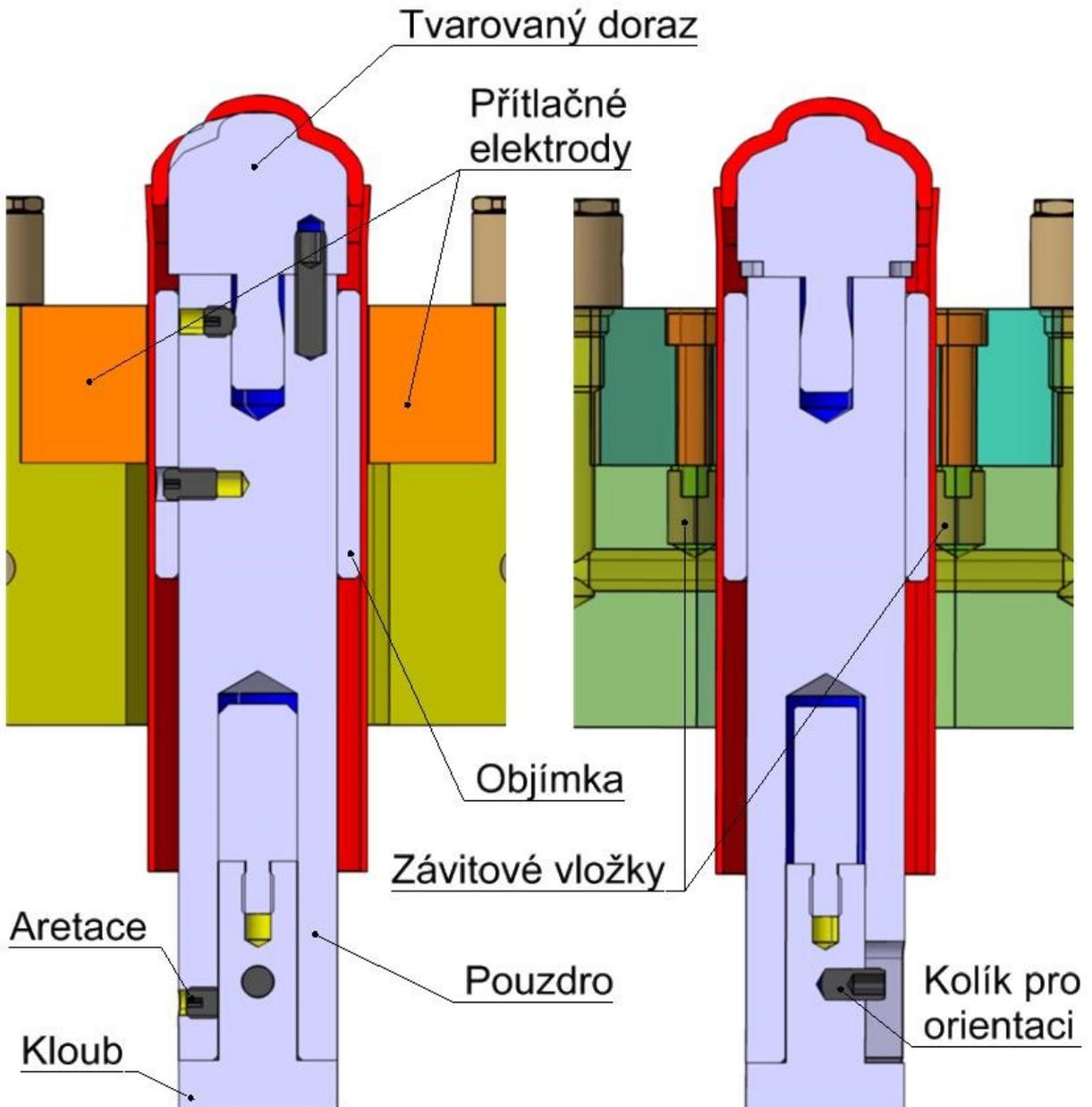
Při častém přestavování přípravku mezi oběma variantami svařovaných dílů by velmi brzy došlo ke stržení závitu v měkké mosazné kostce. Její výměna by byla velmi nákladná a nežádoucí. Proto jsem se rozhodl vyřešit tento kritický uzel pomocí tvrzených závitových vložek, které se napevno zašroubují do mosazi.

Na pravou (nepohyblivou) přítlačnou elektrodu jsem umístil člen Poka – Yoke, který vynucuje správnou orientaci vybrání talířku pístnice. Tvar tohoto členu je vlastně negativem k onomu tvarovému vybrání a je možné pomocí podložek doladit jeho odstup od svařovaného dílu.

2.4.1.2 Modifikace pro svařování pláštů

Při úpravě přípravku na svařování pláštů je zapotřebí udělat pouze pár drobných změn. Obě sestavy přítlačné elektrody a mezičláanky se vyšroubují a nahradí jinými elektrodami, které se připevní přímo do mosazných kostek (tedy bez mezičláanky). Povolením aretačního stavěcího šroubu se stáhne původní pouzdro a nahradí se smontovanou sestavou se stejnými přípojovacími rozměry. Díky tomu není potřeba zbytečně vyndávat výškový doraz.

Nová sestava pouzdra má shora výměnný nitridovaný tvarový doraz, jehož tvar je opět negativem k vnitřní ploše zátky pláště. Tím jsem zajistil správnou orientaci výstupku a zároveň i středění svařovaného dílu. Přes pouzdro je ještě navíc navlečená nitridovaná objímka, která plní funkci pomocného středění a podpírá trubku v místě přítlaku elektrod, aby nedošlo k její nežádoucí deformaci. Orientaci celé této sestavy jsem vyřešil kolíkem, který zapadá do drážky na spodní straně pouzdra. Výsledná modifikace po výměně všech popsanych částí je na *obrázku 37*.

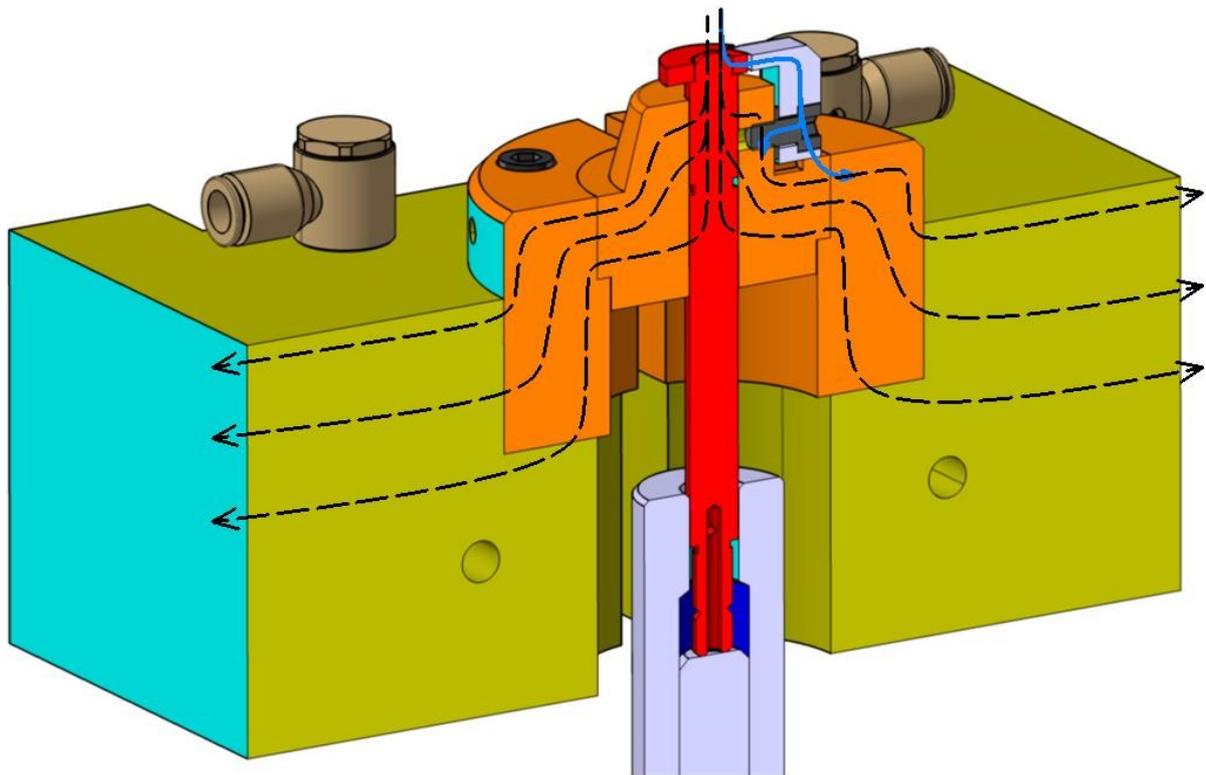


obr. 37: Detail modifikace pro svařování plášťů (řez osou). Vlevo řez zepředu, vpravo řez zleva.

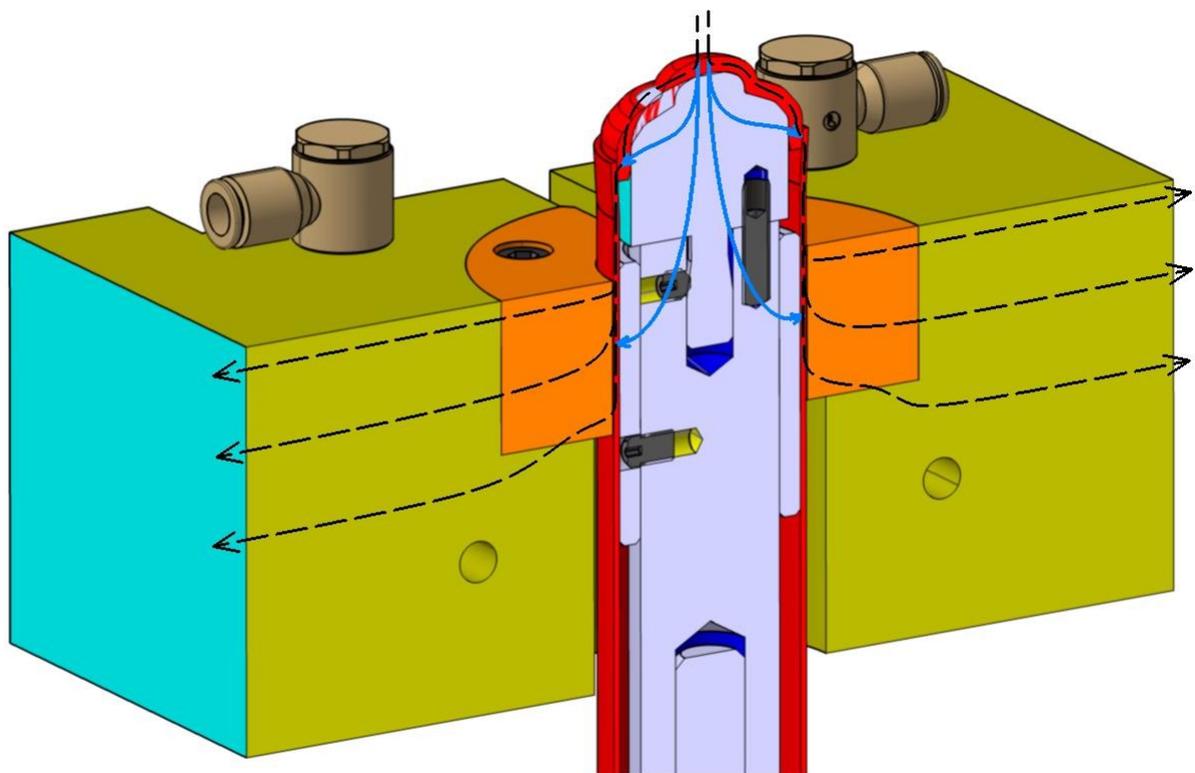
2.4.2 Průchod elektrického proudu

Dolní elektroda odvádí elektrický proud. Ten protéká skrze tvarované díly z tvrdé mědi do velkých mosazných kostek, z nichž odchází boční plochou do vnějšího lože svařovacího lisu. Do tohoto lože byly po přestavbě připevněny odváděcí kabely, jak jsem již zmínil v kapitole 2.1.

Z toho vyplývá, že žádná z komponent sestavy spodní tyče ani pouzder nemusí být vyrobena z dobře vodivého materiálu. Schematický tok proudu při svařování pístnic je na obrázku 38a resp. při svařování plášťů na obrázku 38b.



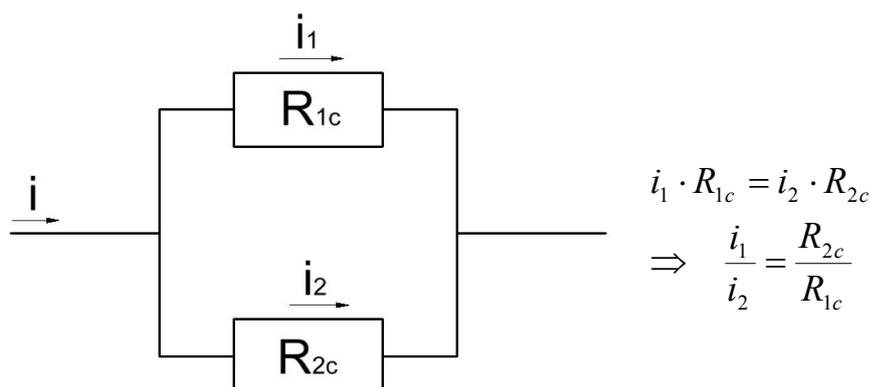
obr. 38a: Schematický průchod proudu skrz dolní elektrodu pro založenou pístnici (řez sestavou).



obr. 38b: Schematický průchod proudu skrz dolní elektrodu pro založený plášť (řez sestavou).

V případě dolní elektrody není potřeba počítat proudovou hustotu a ověřovat, zda nebude docházet k přetěžování elektrickým proudem. Styčné plochy měděných elektrod jsou mnohonásobně větší, než tomu bylo u čepu na horní elektrody. Můžu proto (na základě předchozího výpočtu) s jistotou tvrdit, že jsou více než dostatečné.

Mnohem větší problém zde představují parazitní toky proudu, o kterých jsem hovořil v kapitole 2.2. Na obrázcích 38a a 38b jsem tyto alternativní cesty vyznačil modře. Má-li proud dostatečnou velikost, proudovou hustotu a čas, vzniklé teplo způsobí vytvoření druhotných svarů. Ty sice mají ve většině případů spíše difúzní charakter a nevynikají velkou pevností, avšak způsobují problémy při vyjímání svařených dílů ven z přípravku. Je třeba si uvědomit, že proud teče vždy cestou nejmenšího odporu a celý přípravek je pro něj pouze řadou sériově a paralelně řazených rezistorů.³⁾ Podle Kirchhoffových zákonů se proud v uzlu (rozvětvení) rozdělí přesně v opačném poměru odporů, jak znázorňuje obrázek 39, kde $i_{1,2}$ označují proudy a $R_{1c,2c}$ celkové odpory v dané větvi.



obr. 39: Průchod proudu jednotlivými větvemi při paralelním zapojení obvodů

Nejkritičtějším místem je Poka – Yoke člen zapadající do vybrání talířku pístnice. Styčná plocha je velmi malá a elektrický odpor modře vyznačené cesty není o mnoho větší než napřímo skrze elektrodu. Při svařování testovacích kusů docházelo ke vzniku nežádoucího spoje mezi talířkem a Poka – Yoke členem a pístnice nešla vyndat. Mohla za to absence distanční podložky, díky čemuž byl člen příliš zasunutý do dílu. Poté, co byla tato závada opravena, se situace výrazně zlepšila. Více informací jsme v tomto ohledu od firmy Tenneco nezískali. Jisté ale je, že vyloučit dotyk zcela není principiálně možné. V případě, že by tento uzel působil problémy i nadále, muselo by se provést buď

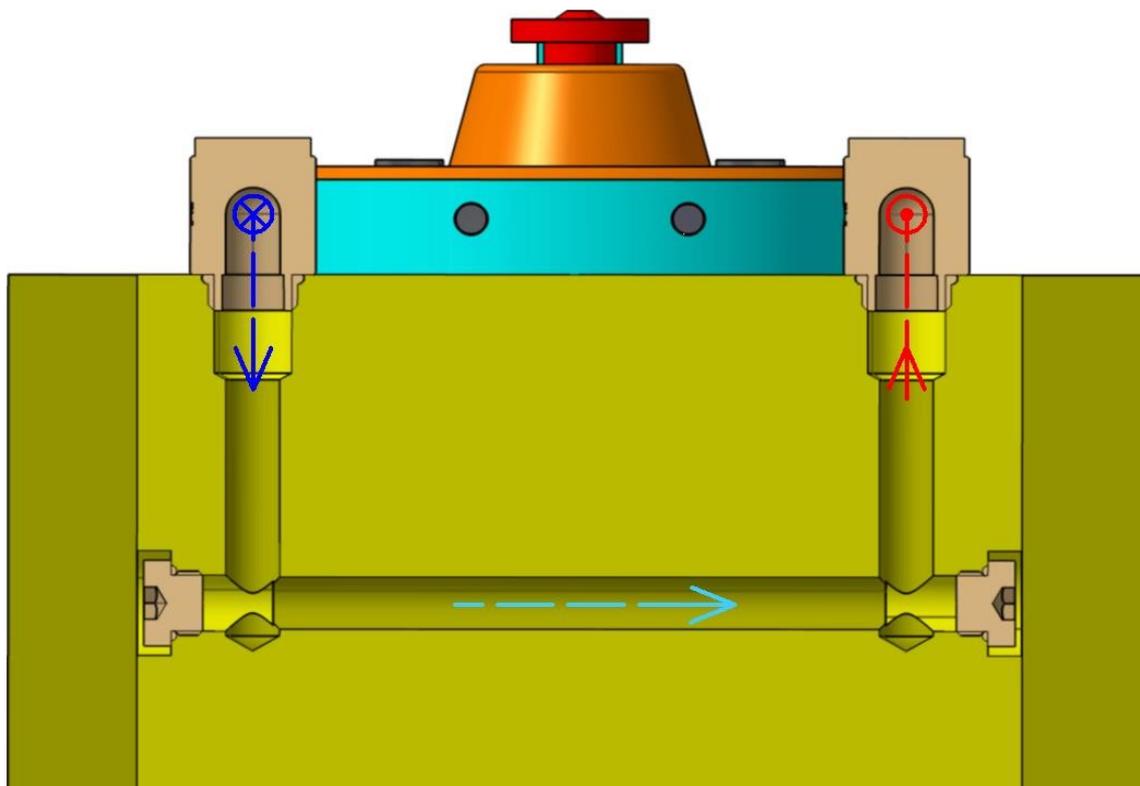
³⁾ Ve skutečnosti bychom neměli uvažovat pouze rezistory, nýbrž impedanci příslušných smyček. Induktance a kapacitance však budou výrazně menší než reaktance. Navíc pro přiblížení mechanismu postačí jednodušší model.

odizolování členu od přitlačné elektrody, nebo mnou navrhované řešení – aplikovat na tvarovou část Poka – Yoke členu nevodivý keramický nástřík. Ten by zamezil nejen průchodu proudu, ale propůjčil by stykové ploše výbornou žáruvzdornost a otěruvzdornost. Nástřík není příliš drahý, zvláště když je ošetřená plocha velmi malá. Navíc toto řešení nevyžaduje žádné konstrukční úpravy ani předělávání dílů a životnost komponenty bude výrazně delší.

V případě pláště není tento problém nikterak výrazný. Styková plocha tvarového dorazu je relativně veliká. Proudová hustota je tak dostatečně malá a teplo se stíhá odvádět. Za povšimnutí stojí i naznačená cesta proudu skrze sestavu pouzdra, která vychází ven přes objímku (delší z trajektorií). Velikost tohoto proudu bude velmi malá, protože množství komponent stojících v cestě vytváří v součtu značné přechodové odpory, takže celkový odpor této větve je řádově větší než u větve přímé.

2.4.3 Chlazení nejdůležitějších komponent

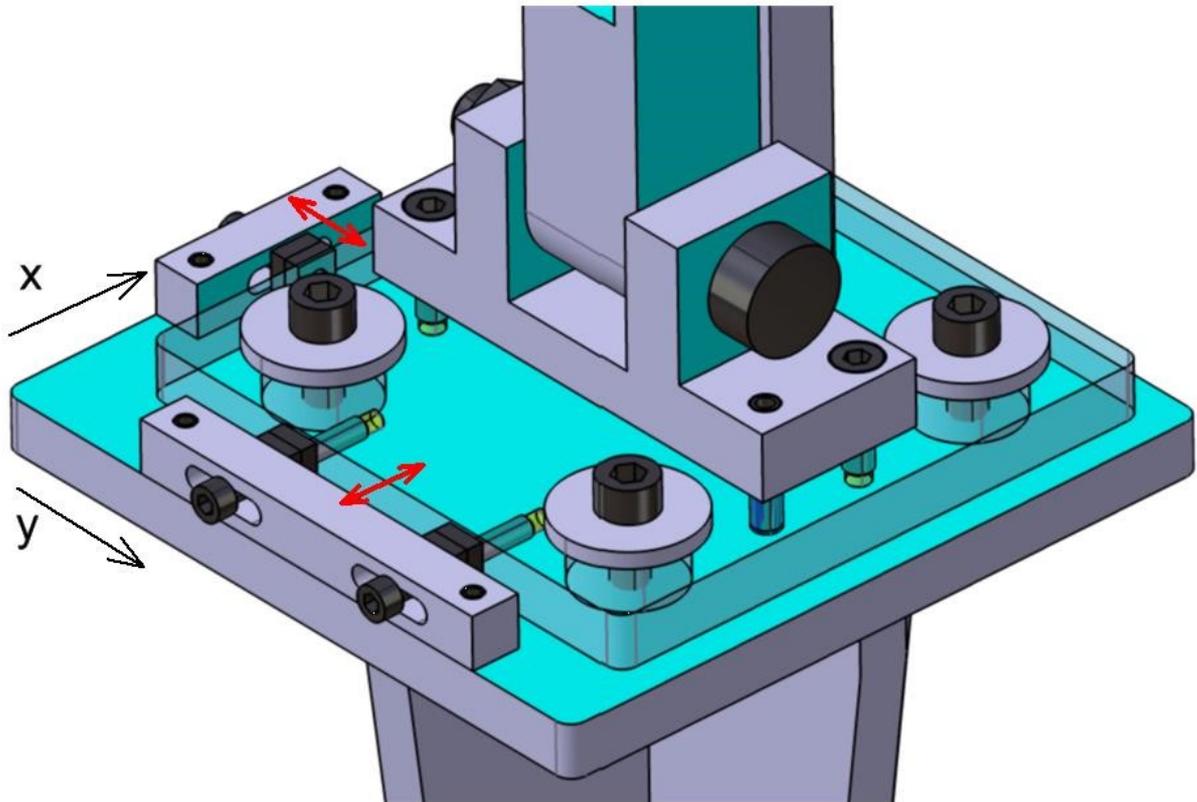
Stejně jako u horní elektrody je zapotřebí intenzivně chladit i dolní elektrodu. Chlazené jsou v tomto případě obě strany – jak levá, tak pravá. Kapalina protéká skrz mosazné kostky přípravku, které jsou propojeny v tak jeden chladicí okruh. Řez napříč vrtáním mosazné kostky s naznačením průtoku chladicí kapaliny je na *obrázku 40*.



obr. 40: Schéma průtoku chladicí kapaliny mosaznou kostkou.

2.4.4 Stavitelnost

Jedním z požadavků technického zadání byla mimo jiné možnost ustavení dolní elektrody vůči pevné ose svařovacího lisu, což u předešlé realizace nešlo. Pro poziční variabilitu jsem využil opět systému šimsování v kombinaci s oválnými dírami a velkými otvory, jak je vidět na *obrázku 41*.



obr. 41: Stavitelný mechanismus dolní elektrody.

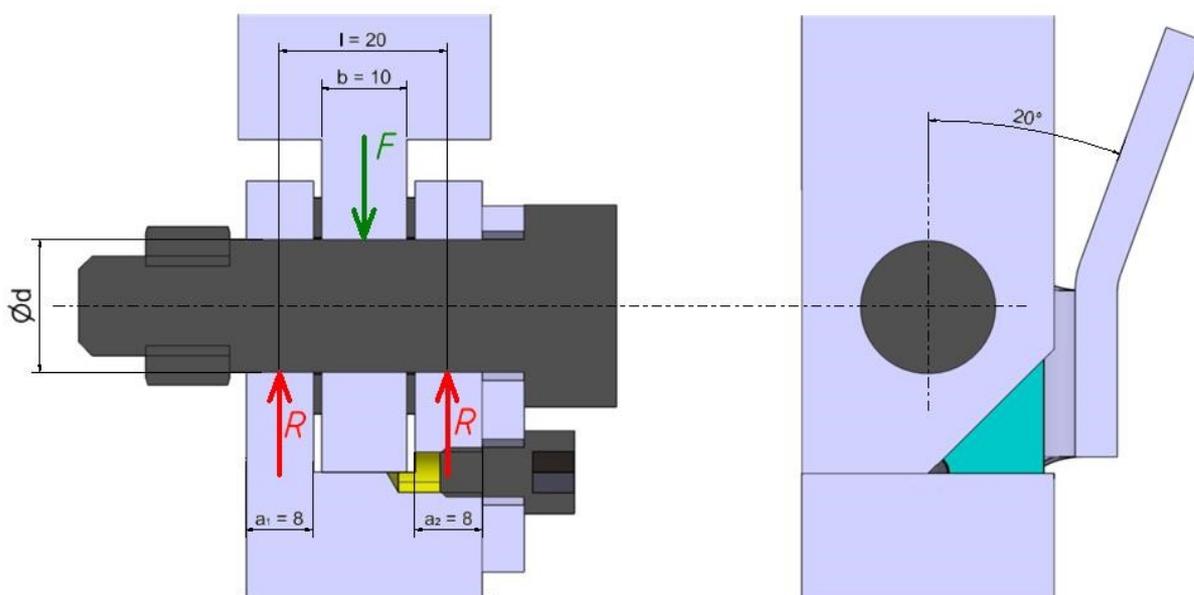
Celý systém se skládá ze dvou na sobě umístěných desek, kdy spodní deska je součástí svařené podstavce, který je napevno přišroubován k základu lisu. Druhá deska je na tomto podstavci umístěna volně (na *obrázku 41* je zprůhledněna) a v poloze ji drží 3 přítláčné šrouby tlačící shora přes velké podložky. Povoláním těchto šroubů se deska uvolní. Pak lze desku polohovat pomocí 3 bočních šroubů a přidat popř. odebrat potřebný počet distančních podložek (šims). Po opětovném utahení všech šroubů je deska nehybně spojena s podstavcem v požadované poloze. Tento mechanismus umožňuje ve vodorovné rovině přesné vyladění osy přípravku, přičemž pohyby v ose x a y jsou na sobě zcela nezávislé. To přináší velké výhody při seřizování během montáže. Mnou navržené řešení umožňuje posuv o $\pm 10 \text{ mm}$ v obou směrech od teoretické polohy v modelu, čehož bylo také při zprovoznění přípravku ve výrobní hale

zákazníka využito. Zvolená velikost tolerančního pole byla dostatečná a ani nebyla zcela vyčerpána.

2.4.5 Kloubová spojení

Princip zakládání komponent do a vyjímání svařených dílů z přípravku blíže vysvětlím v kapitole 2.5. V tuto chvíli se tak omezím pouze na fakt, že pro tyto operace je třeba mít tyč výkyvnou ve dvou směrech. To zajišťují 2 čepy, které vytváří kloubová spojení, přičemž oba musí přenést přítláčnou sílu vytvářenou svařovacím lisem. Protože plánovaná životnost těchto uzlů bude výrazně delší než v případě čepu u horní elektrody, musí tomu odpovídat i potřebná velikost koeficientu bezpečnosti. Výpočet jsem provedl pro maximální sílu lisu ($F_{MAX} = 23 \text{ kN}$). V porovnání s nejvyšší uvažovanou zátěžnou silou ($F = 10 \text{ kN}$) tak získávám vlastně bezpečnost o velikosti $k = 2,3$.

Horní kloub včetně silového zatížení je na obrázku 42. Vlevo je řez zobrazující spojení horní a dolní části, vpravo je pak vidět princip omezení výkyvu kloubu pro pohodlnější práci obsluhy stroje.



obr. 42: Rozbor sil v horním kloubu dolní elektrody (řez spojením).

Jeho návrh provedu jak z podmínky pevnostní, tak z podmínky na otláčení, a budu se řídit vyšší hodnotou. Co se týče typu, použiji lícovaný šroub ISO 7379, který má pevnostní třídu 12.9 a je kalený. Mez kluzu σ_{kt} tohoto dílu spočítám z jeho označení:

$$\sigma_{kt} = 12 \cdot 9 \cdot 10 = 1080 \text{ MPa}$$

Pro výpočet se omezím na maximální dovolené napětí:

$$\sigma_D = 0,8 \cdot \sigma_{kt} = 0,8 \cdot 1080 \approx 860 \text{ MPa}$$

Šroub budu řešit jako klasický nosník na dvou podporách se silou uprostřed. Maximální ohybový moment je v místě působení síly a má v tomto případě velikost:

$$M_o = \frac{1}{4} Fl = \frac{1}{4} \cdot 23\,000 \cdot 20 = 115\,000 \text{ Nmm}$$

Vyjádřením průměru ze vztahu pro výpočet redukovaného napětí pro kombinaci namáhání ohybem a stříhem získám bikubickou rovnici:

$$\begin{aligned} \sigma_D \geq \sigma_{red} &= \sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2} = \sqrt{\left(\frac{M_o}{W_o}\right)^2 + 4\left(\frac{F}{2S}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{32M_o}{\pi d^3}\right)^2 + 4\left(\frac{2F}{\pi d^2}\right)^2} \\ \Rightarrow \sigma_D^2 d^6 - \frac{16F^2}{\pi^2} d^2 - \frac{1024M_o^2}{\pi^2} &\geq 0 \end{aligned}$$

Provedením substituce $t = d^2$ získám obyčejnou kubickou rovnici ve tvaru:

$$\sigma_D^2 t^3 - \frac{16F^2}{\pi^2} t - \frac{1024M_o^2}{\pi^2} \geq 0$$

Její řešení jsou dva komplexní kořeny a jeden reálný kořen, který mě zajímá:

$$\begin{aligned} t_{MIN} &= 126,02 \text{ mm}^2 \\ \Rightarrow d_{MIN} &= \sqrt{t_{MIN}} = \sqrt{126,02} = 11,23 \text{ mm} \end{aligned}$$

Pro podmínku otláčení dolní vidlice, která je vyrobena z oceli E335 (11 600) a má dovolený stykový tlak $p_D = 100 \text{ MPa}$ ^[43], lze psát:

$$\begin{aligned} p = \frac{F}{S} = \frac{F}{(a_1 + a_2)d} &\leq p_D \\ \Rightarrow d_{MIN} = \frac{F}{(a_1 + a_2)p_D} = \frac{23\,000}{(8 + 8) \cdot 100} &= 14,38 \text{ mm} \end{aligned}$$

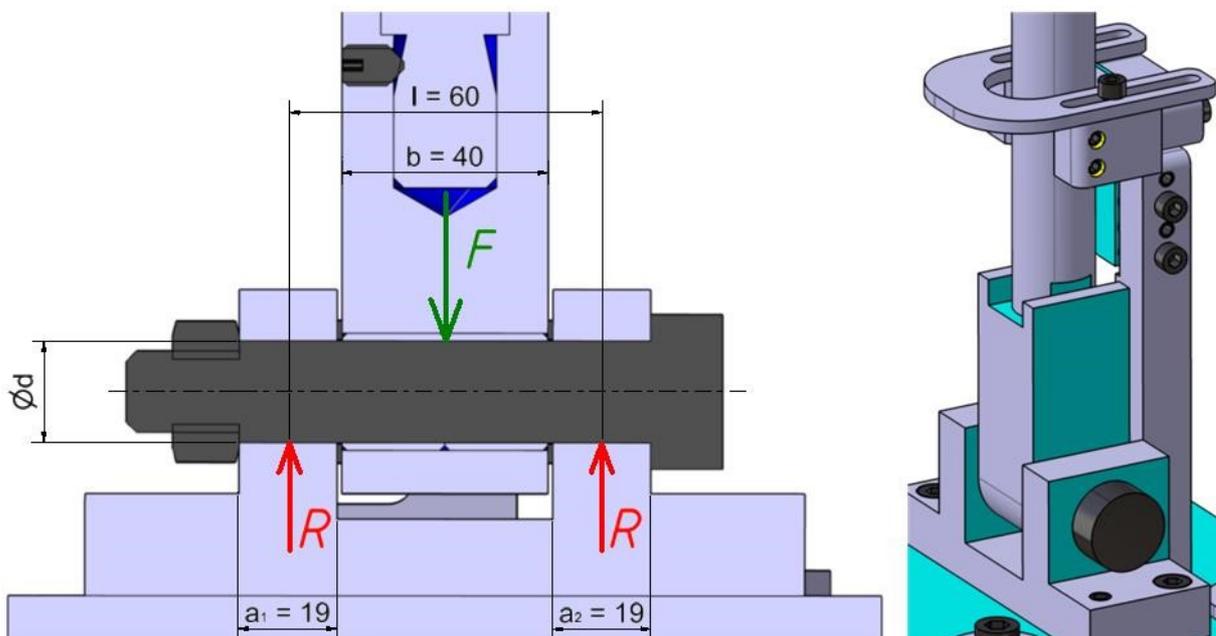
Horní díl otočného mechanismu je vyroben z oceli 42CrMo4 (15 142), jejíž povrch je nitridovaný. Protože se jedná o legovanou ocel s obsahem uhlíku kolem 0,4%, dá se předpokládat, že její tvrdost v základním stavu bude přinejmenším stejná jako u oceli E335. Proto využiji známých hodnot maximálních dotykových tlaků pro ocel E335 i pro ocel 42CrMo4. Dovolený tlak tak bude $p_D = 170 \text{ MPa}$ ^[43], a pro otláčení pak platí:

$$p = \frac{F}{S} = \frac{F}{bd} \leq p_D$$

$$\Rightarrow d_{MIN} = \frac{F}{bp_D} = \frac{23000}{10 \cdot 170} = 13,53 \text{ mm}$$

Z výpočtů vychází jako kritický parametr otláčení vidlice, a proto minimální průměr lícovaného šroubu je $d_{MIN} = 14,38 \text{ mm}$. Volím z normalizovaných řad vyráběných šroubů $M12(16) \times 35 \text{ ISO 7379}$.

Obdobná situace nastává u dolního kloubu, který je opět v řezu vidět i s naznačením silového zatížení a držáku omezujícího pohyb na *obrázku 43*.



obr. 43: Rozbor sil v dolním kloubu dolní elektrody (řez spojením).

Pevnostní výpočet provedu shodným způsobem, přičemž jediným parametrem, který se změní, je velikost maximálního ohybového momentu, který bude v tomto případě:

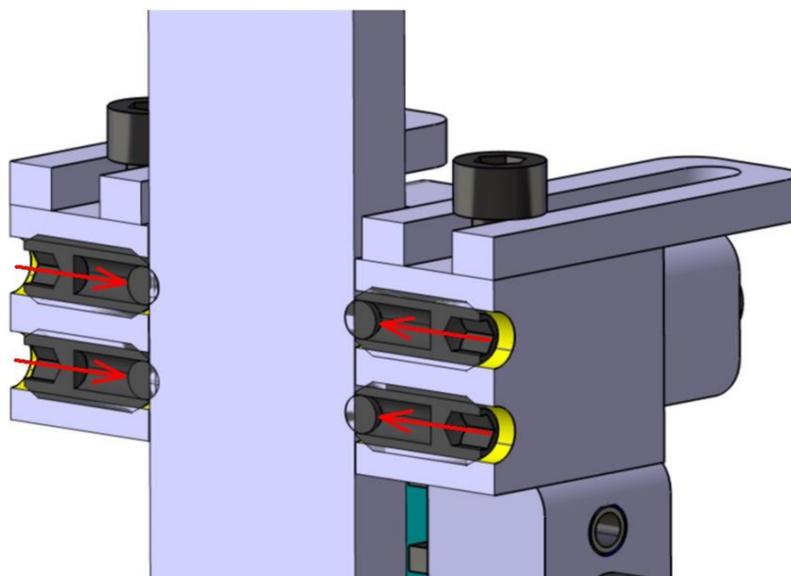
$$M_o = \frac{1}{4} Fl = \frac{1}{4} \cdot 23000 \cdot 60 = 345000 \text{ Nmm}$$

Po vyřešení další bikubické rovnice vychází minimální průměr šroubu v jeho hladké části $d_{MIN} = 16,03 \text{ mm}$. Opět volím nejbližší vyšší standardně vyráběnou velikost, kterou je $M16(20) \times 80 \text{ ISO 7379}$.

Vzhledem k větším kontaktním plochám a většímu průměru šroubu při použití stejných materiálů (v porovnání s horním kloubem), nebudu provádět kontrolu na otláčení obou dílů, protože její kladný výsledek je zaručen.

2.4.6 Aretace podpěrné tyče

Aby po založení dílu do přípravku držela sestava tyče v požadované poloze a neměla tendenci se odklánět, musel jsem vyřešit způsob její aretace. Horní část tyče je podepřena vpravo v pevné elektrodě. Tím je odebrán rotační stupeň volnosti hornímu kloubu. Zabránění pohybu dolního kloubu jsem však musel vyřešit boční pomocnou konstrukcí. Mým záměrem bylo co nejjednodušší použití, tedy aby obsluha nemusela nic šroubovat, přetáčet apod. Řez výsledným provedení je vidět na *obrázku 44*.



obr. 44: Aretace pomocí odpružených šroubů s kuličkou.

V žádané poloze (v ose přípravku) je tyč držena čtveřicí aretačních stavěcích odpružených šroubů s kuličkou od firmy MISUMI s označením „BSJ8“. Přítlak kuličky vytváří pružinka schovaná v těle součástky. V *obrázku 44* reprezentuje její silové působení vždy příslušná červená šipka. Šroub je na svém povrchu opatřen speciálním povlakem, který brání jeho povolování, čímž je vyřešené i pojištění žádané polohy. Při maximálním stlačení dává každá kulička sílu $N = 32,9 \text{ N}$. Pro běžný součinitel tření mezi kuličkou a tyčí (ocel – tvrzená ocel) o hodnotě $f \approx 0,1$ je celková přídržná síla T rovná:

$$T = 4fN = 4 \cdot 0,1 \cdot 32,9 \approx 13 \text{ N}$$

Tato síla zabezpečí, že tyč nebude mít tendenci k samovolnému vyklopení, a zároveň pro obsluhu není žádný problém tuto sílu překonat, zvláště při velikosti ramena, na kterém bude působit. Z konstrukčního hlediska jsem šrouby s kuličkami vysunul o cca 2 mm před průměr tyče, čímž dojde k zapuštění její osy za spojnicí protilehlých šroubků. To lehce přitlačuje tyč a tedy i založený díl do požadované polohy.

2.4.7 Vzpěrná pevnost hlavní tyče

Protože je přípravek namáhán poměrně velkým tlakovým zatížením a jeho hlavní část konstrukce tvoří sestava dlouhé tyče, provedu kontrolu na vzpěr. Kritický úsek je vyznačen na *obrázku 45*, přičemž delší je u modifikace pro svařování pláštěů. Délku budu

uvažovat od objímky tvořící podepření pláště až po osu dolního kloubu.

Oblast horního kloubu tvoří jistou výztuhu, kterou jsem se rozhodl nezohlednit. Výpočet by se značně zkomplikoval a při zanedbání zvýšené tuhosti uzlu se nacházím na straně bezpečnosti. Kontrolu bezpečnosti provedu klasickým postupem přes výpočet štíhlostního poměru.

Z konstrukce vychází pro typ uložení (kloubově dole, posuvně nahoře) součinitel $\mu = 0,71$.^[44] Stanovím si výpočtovou délku mého prutu jako:

$$l_v = \mu L = 0,71 \cdot 362 = 257 \text{ mm}$$

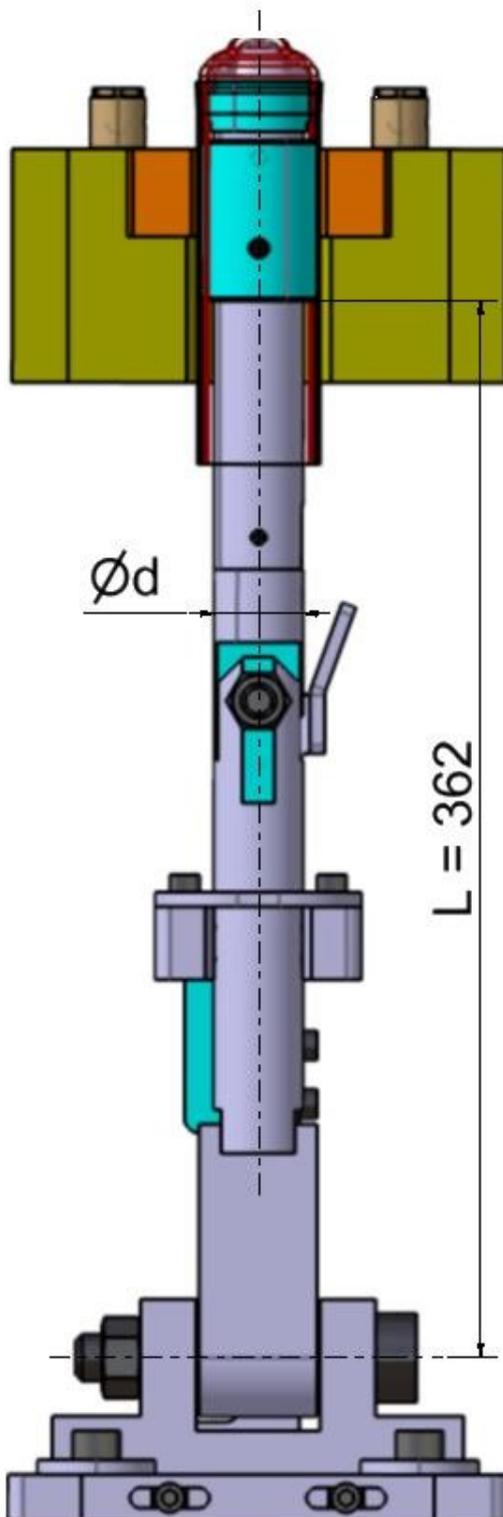
Poloměr setrvačnosti se pro případ prutu kruhového průřezu dá vyjádřit jako:

$$i_x = \frac{d}{4} = \frac{30}{4} = 7,5 \text{ mm}$$

Štíhlostní poměr méj konfigurace porovnám s jeho maximální hodnotou^[44], při níž ještě nehrozí vzpěr a součást je namáhána na čistý tlak:

$$\lambda = \frac{l_v}{i_x} = \frac{257}{7,5} = 34,27 \leq \lambda_{mez} = 40$$

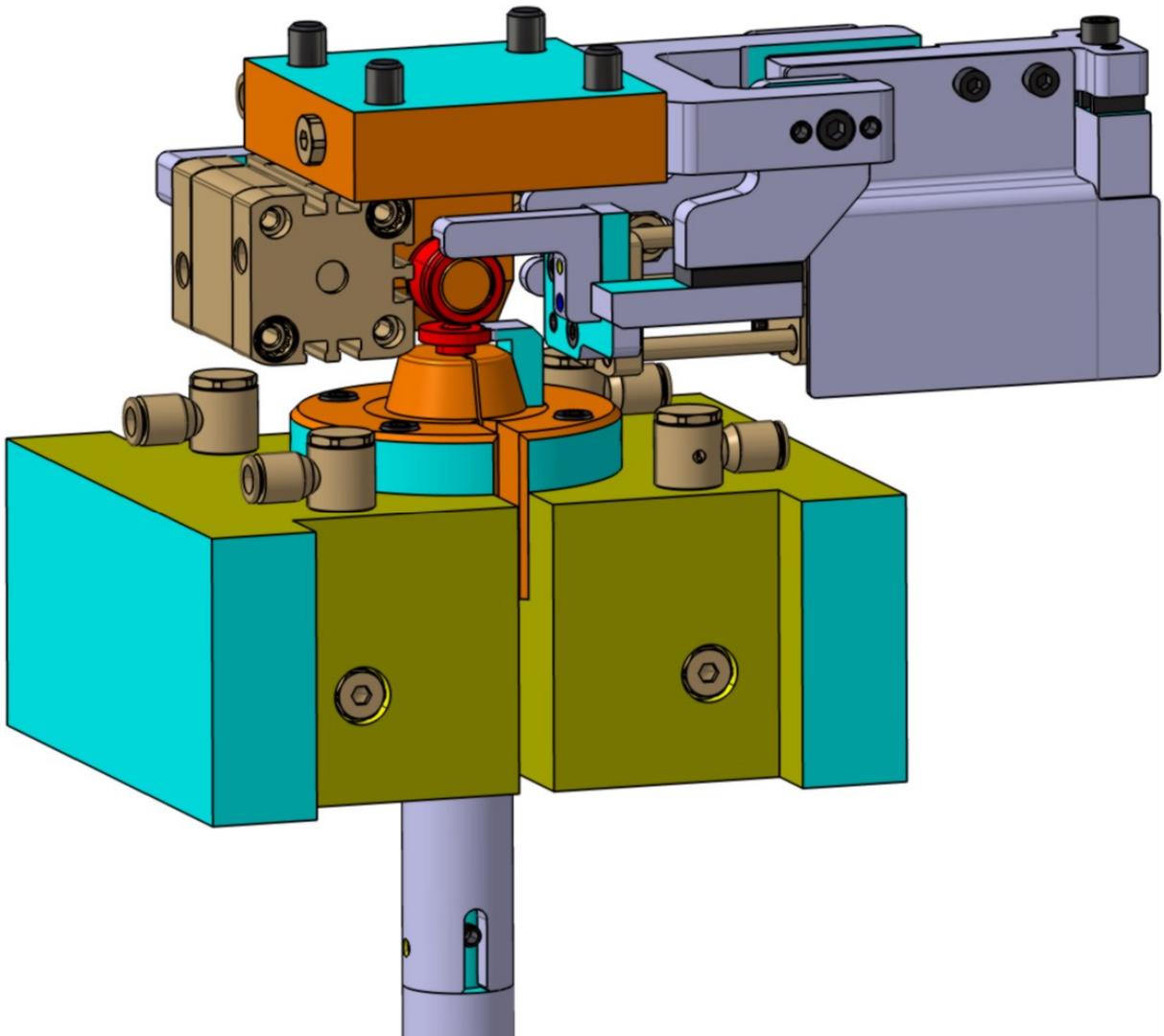
Podmínka je splněna a ke vzpěru by tak nemělo dojít.



obr. 45: Hlavní tyč dolní elektrody.

2.5 Výsledná podoba zařízení

Na obrázku 46 je pohled na horní část přípravku ve chvíli, kdy je lis připraven k zahájení svařovacího cyklu při výrobě pístnice.



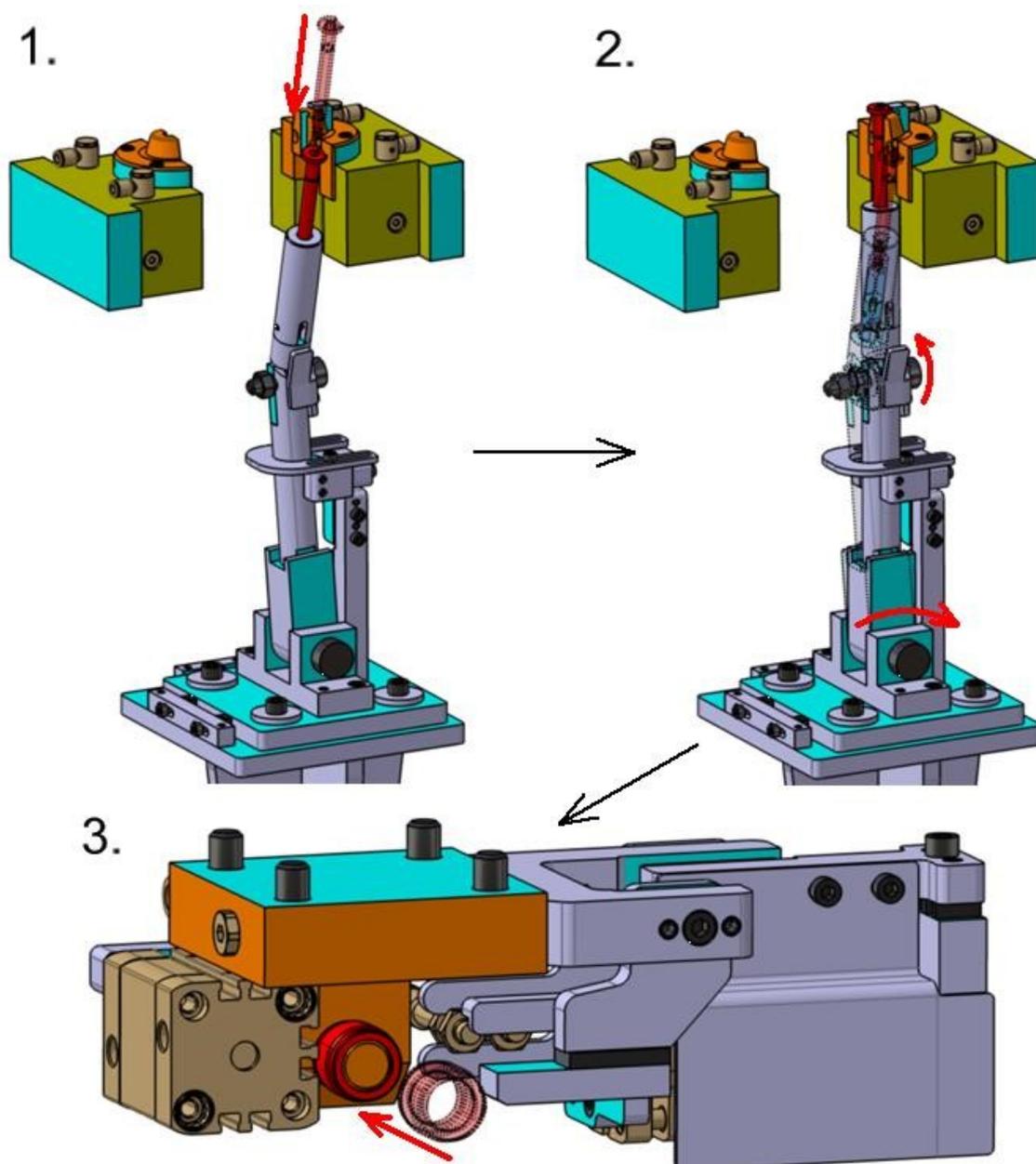
obr. 46: Horní část přípravku před započítím svařování pístnice.

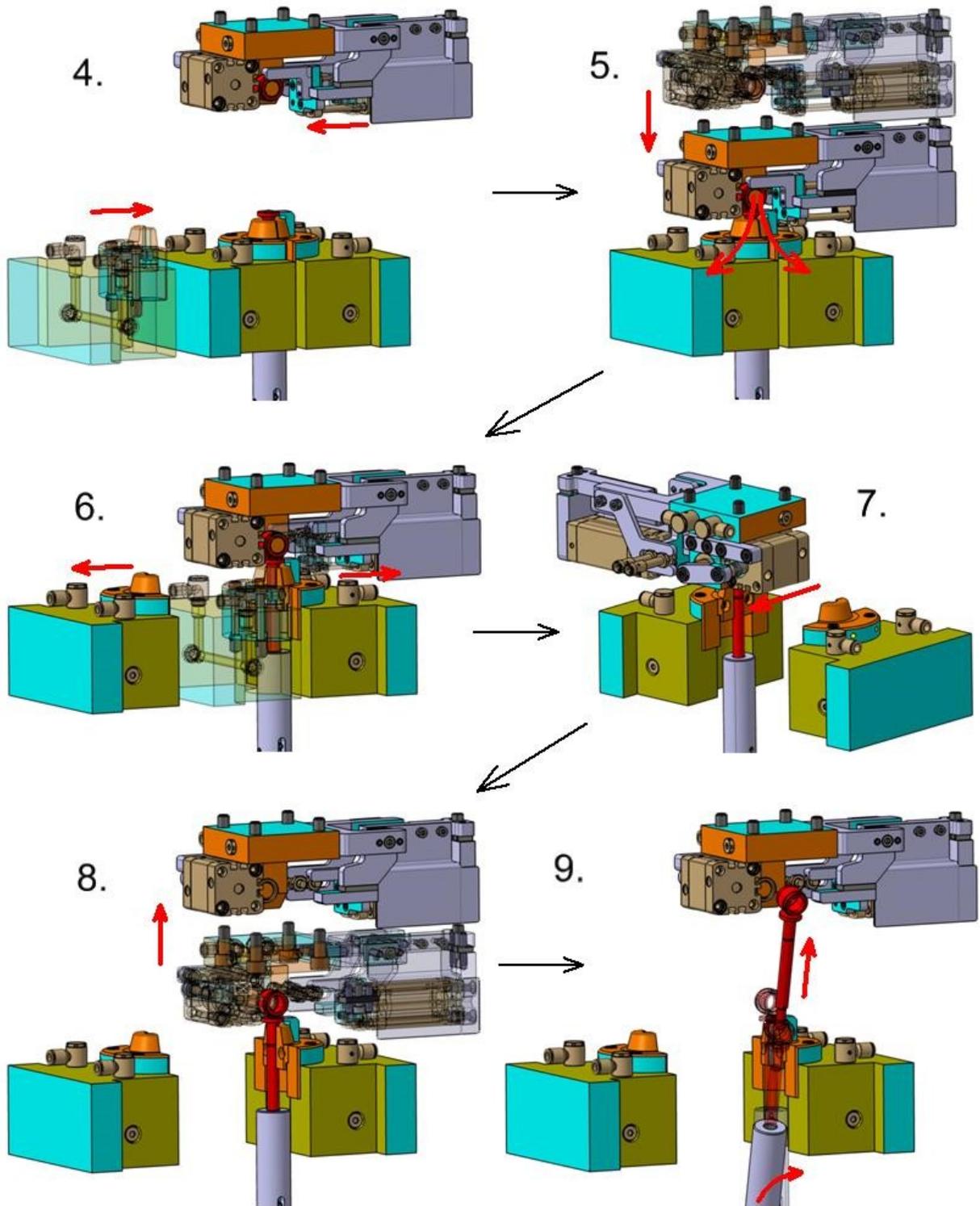
Horní elektroda je v dolní poloze, svařované oko se dotýká protějšího kusu. Kontrolní Poka – Yoke palec funguje současně jako axiální pojištění oka, a definuje tak přesně jeho polohu vůči ose pístnice resp. pláště. Levá část dolní elektrody přitlačuje pístnici resp. plášť vůči pevné pravé části.

Princip zakládání dílů pro svařování pístnice je následující – nejprve obsluha založí pístnici do vyklopené tyče, kterou poté narovná opře o pevnou část elektrody a o dolní aretaci. Přitom se talířek na pístnici zorientuje tak, aby zapadal do Poka – Yoke členu na pevné části elektrody. Nakonec obsluha založí oko na čep horní elektrody.

Stisknutím tlačítka Start započne automatický cyklus, při kterém nejprve dojde k přijetí kontrolního palce a vyhodnocení správnosti dílu (viz kapitola 2.3.6). Poté je přiveden tlakový vzduch do válce posouvajícího levou část dolní elektrody a dojde k jejímu přijetí a přitlačení pístnice. Závěrem sjede horní elektroda na dotyk k pístnici a spustí se svařovací cyklus. Po svaření dílů jako první odjedou levá část dolní elektrody a jištění oka na horní elektrodě, aby došlo k uvolnění svařence. Následně druhý pneumatický válec horní elektrody zasune čep, na kterém dosud drželo oko. Závěrem automatického cyklu odjede horní elektroda nahoru do své původní polohy.

Vyndání hotového svařence je pak analogické se zakládáním. Obsluha ručně vykloní tyč a svařenec vytáhne ze svařovacího přípravku. Celý postup je znázorněn krok po kroku na koláži v obrázku 47. Zakládání a vyjímání dílů pro plášť je analogické.



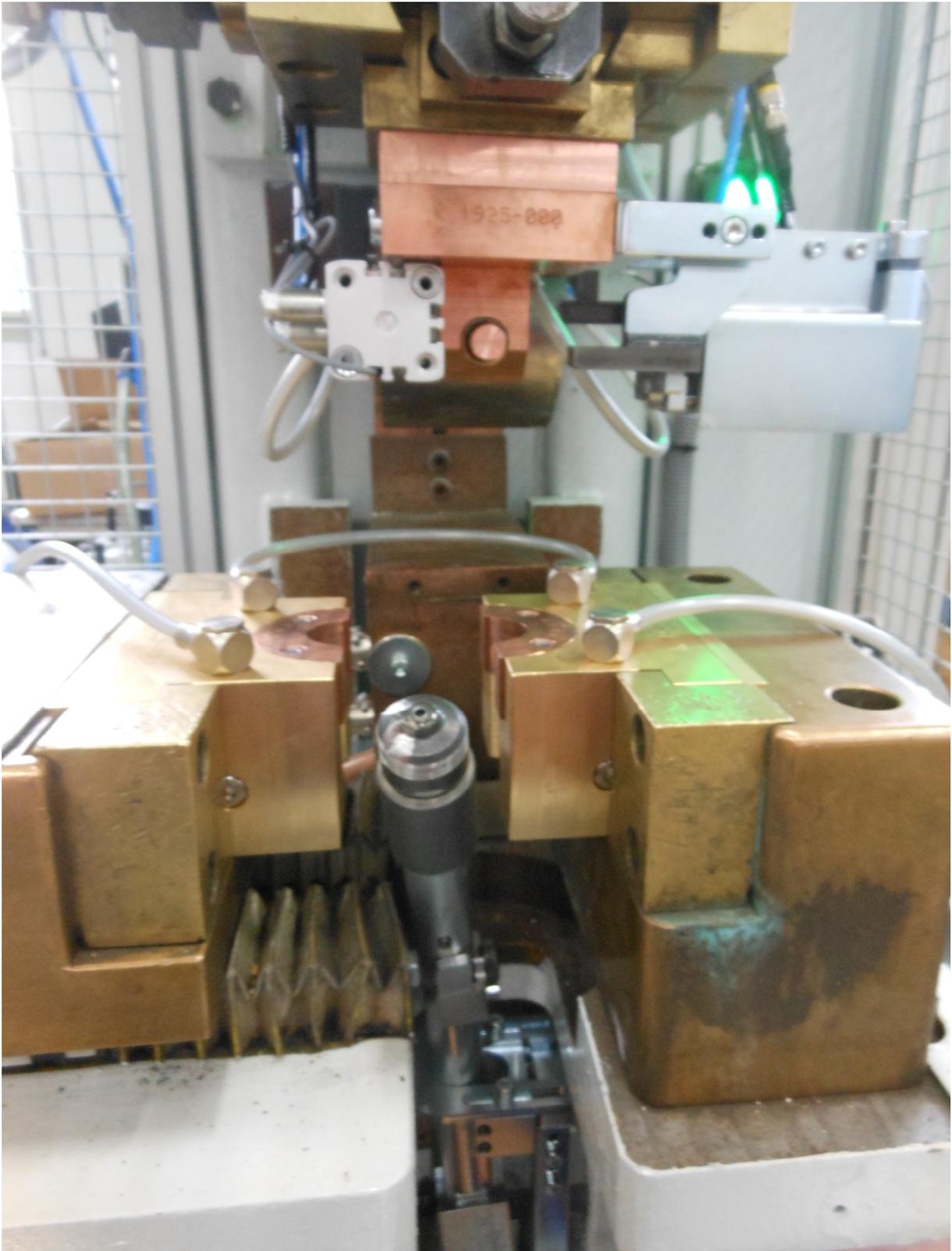


obr. 47: Postup založení a vyjmutí svařovaných dílů pístnice.

Na obrázcích 48a a 48b jsou fotky pořízené po úspěšné montáži ve výrobním závodě firmy Tenneco. Je zde jak pohled na celé pracoviště s již nainstalovaným svařovacím přípravkem, tak i detail svařovacího prostoru.



obr. 48a: Celkový pohled na pracoviště s instalovaným svařovacím přípravkem.



obr. 48b: Detail svařovacího prostoru stroje v modifikaci pro svařování pístnic.

Na obrázku 48c je fotografie ukazující založenou a upnutou pístnici. Na sjeté horní elektrodě je vidět připravené oko, které zatím není axiálně pojištěno (pneu-válec s kontrolním Poka – Yoke palcem je ve výchozí poloze).



obr. 48c: Detail založených dílů (pístnice + oko).

2.6 Zkoušky prováděné na svařených tlumičích

Podle výkresové dokumentace se na obou svařených dílech musí provádět destruktivní zkoušky, které mají za úkol prokázat požadované mechanické vlastnosti, a tedy i správné nastavení svařovacích parametrů na lisu.

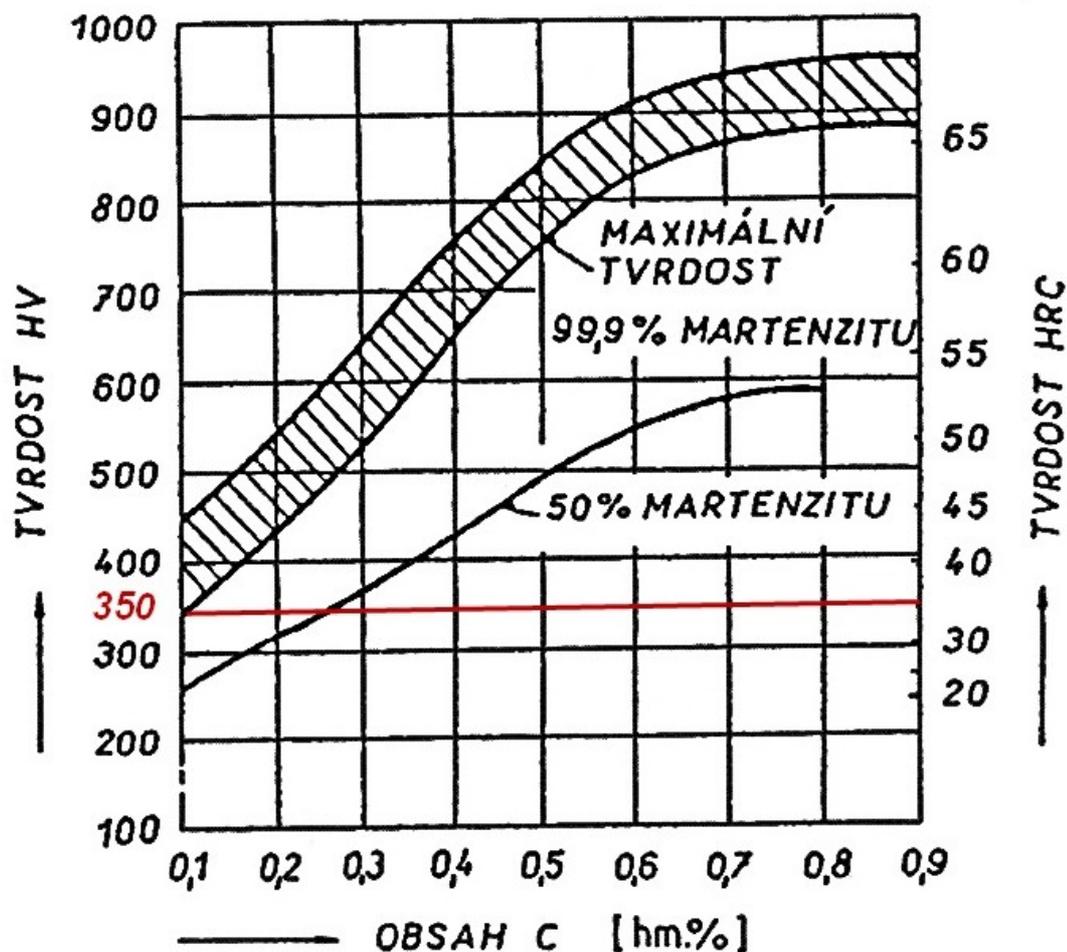
V první řadě se jedná o běžnou tahovou zkoušku. Úkolem je zjištění únosnosti svaru ve směru zatížení, které je téměř výhradně v ose tlumiče. Jedná se o zkoušku kvazistatickou, kdy je napětí zvyšováno postupně s velmi malým gradientem. Cílem je, aby došlo k porušení mimo svar či jím tepelně ovlivněnou zónu. Pokud dojde k porušení v místě svarového spoje, nemusí se však vždy jednat o nepřijatelnou vadu. Je-li trhací síla větší než minimální požadovaná, nezáleží na místě, kde nastane destrukce.

Další zkouškou je dynamická rázová zkouška. Ta má za úkol zjistit hodnoty vrubové houževnatosti, a stanovit tak rázovou práci. V žádném případě nesmí dojít ke křehkému lomu a lomový povrch součásti musí vykazovat houževnatý charakter. Tato zkouška je naprosto klíčová pro funkci automobilového tlumiče. Kdyby došlo k zakalení svarového kovu příliš rychlým ochlazováním, materiál by zkřehl, a vykazoval pak nízké

hodnoty nárazové práce. Problém se základnou strukturou je zde o to větší, že se jedná o ocel s vysokým obsahem uhlíku, jejíž svařitelnost je obtížná (podrobněji budu mluvit o svařitelnosti v kapitole 3)

Poslední z prováděných DT zkoušek je kontrola tvrdosti. Ta má za úkol opět vyloučení vzniku nežádoucího martenzitu ve struktuře svaru. Martenzit vykazuje velmi vysokou tvrdost, a proto je snadno odhalitelný pomocí této zkoušky. Běžně se jako kritická u uhlíkové oceli bere tvrdost 350 HV v tepelně ovlivněné oblasti, která odpovídá 50% martenzitu ve struktuře při 0,25% obsahu uhlíku. Závislost tvrdosti na procentuálním obsahu uhlíku je v grafu na obrázku 49.

Zpravidla se po odladění parametrů kontrolují vybrané díly z každé série podle určitých kritérií např. první, pátý, dvacátý, nebo každý desátý, apod. Konkrétní hodnoty v mém případě, nejen co se týká počtu kontrolovaných kusů, ale i parametrů zkoušek, nemám dovoleno uvést. Vše spadá do know-how zákazníka, které je pečlivě chráněno.



obr. 49: Závislost tvrdosti na obsahu uhlíku u běžných uhlíkových ocelí.^[45]

3. Návrh svařovacích parametrů

Pro svařování netypických tvarových dílů, kterými jsou i pístitnice a pláště automobilových tlumičů, neexistuje postup, jak stanovit přesné parametry procesu, které by zajistily požadovanou jakost spoje. Z tohoto pohledu se musí vycházet především ze zkušeností s obdobnými případy svařování. Celé seřízení si prováděla firma Tenneco sama a znalosti, které v této oblasti má, spadají do jejího výrobního tajemství, a nemohu je proto uveřejnit.

Aplikací teoretických poznatků se pokusím o navržení všech důležitých parametrů, které jsou pro nastavení výstupkového svařování třeba. Podotýkám, že se bude skutečně jednat pouze o návrh a bylo by třeba provést několikrát po sobě praktické odzkoušení s následným vyhodnocením, než bychom se dopracovali k plně funkčním WPS a jim příslušejících WPQR⁴⁾. Využitím všech teoretických poznatků však mohu minimalizovat dobu trvání tohoto cyklu i při nedostatku praktických zkušeností.

Při svém návrhu vezmu do úvahy nejprve několik norem a dalších faktů, které se týkají volby parametrů výstupkového svařování. První klíčovou vlastností je pojem svařitelnosti materiálu. Svařitelnost obecně je popsána v normě ČSN EN ISO 18278-1: „*Odporové svařování – Svařitelnost – Část 1: Hodnocení svařitelnosti kovových materiálů pro odporové bodové, švové a výstupkové svařování.*“ V této normě je pojem svařitelnosti hodnocen jako „schopnost vytvořit svar“ a jeho „schopnost odolávat stanovenému provoznímu zatížení“.^[N]

Kvantifikace svařitelnosti u uhlíkových ocelí je dána tzv. uhlíkovým ekvivalentem. Jeho definice je celá řada a nejpoužívanějším je vzorec navržený mezinárodním svařečským institutem (IIW), který se vypočte jako

$$C_{E\ IIW} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15}$$

Písmena označují procentuální zastoupení prvků v dané oceli. Bohužel je platnost tohoto vztahu omezena pouze na nízkouhlíkaté oceli s $C < 0,25\%$, a pro případ námi svařovaných dílů tak nelze vzorec správně použít.^[45]

⁴⁾ WPS = Welding Procedure Specifications (specifikace postupů svařování) je dokument, který v sobě definuje všechny parametry svařování. Dodržením WPS se zajišťuje opakovatelnost a též dokládá kvalita vytvořeného svaru. Tento dokument je požadován normou ISO 3834, která navazuje na ISO 9001.

WPQR = Welding Procedure Qualification Record (kvalifikace postupu svařování) je dokument, který vystavuje certifikační orgán na základě vyhovujících destruktivních zkoušek svarů. Každá WPS musí být podložena WPQR, která dokládá vyhovující nastavení parametrů svařovacího procesu

Zaručená svařitelnost uhlíkových ocelí odpovídá obsahu uhlíku $C \leq 0,22\%$ a současně musí být $C_{E_{IIIW}} \leq 0,45\%$. Jak je uvedeno v materiálovém listu oceli C40 (viz příloha 3), tak i podle procentuálního obsahu uhlíku ($C = 0,37 - 0,45\%$), se jedná o ocel obtížně (podmíněně) svařitelnou. Na vině je právě velké množství uhlíku, které způsobuje snadné zakalení struktury svaru, což vede k častému praskání v průběhu ochlazování.^[45]

Problém s rychlým ochlazováním svaru se běžně řeší patřičnou teplotou přehřevu. Ta způsobí pokles gradientu teploty, a svar tak chladne pomaleji. U výstupkového svařování se přehřívání nepoužívá, protože by bylo technologicky náročné, zdlouhavé a způsobilo by pokles žádané produktivity. Proto jsem se rozhodl použít speciální cyklus svařování s dohřevem, podobně jako na obrázku 7, který značně prodlouží čas $t_{8/5}$. Tento parametr vyjadřuje dobu, za kterou svar zchladne z $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ na $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ a jedná se o klíčovou veličinu pro vznik martenzitické struktury svaru.

Se snížením ochlazovací rychlosti souvisí také velikost tepelného příkonu, který je do svaru zaveden. Ten musí být relativně malý a působit delší dobu, aby došlo k většímu prohřátí celé součásti a gradient ochlazování nebyl vysoký – konfigurace tak odpovídá měkkému režimu svařování.

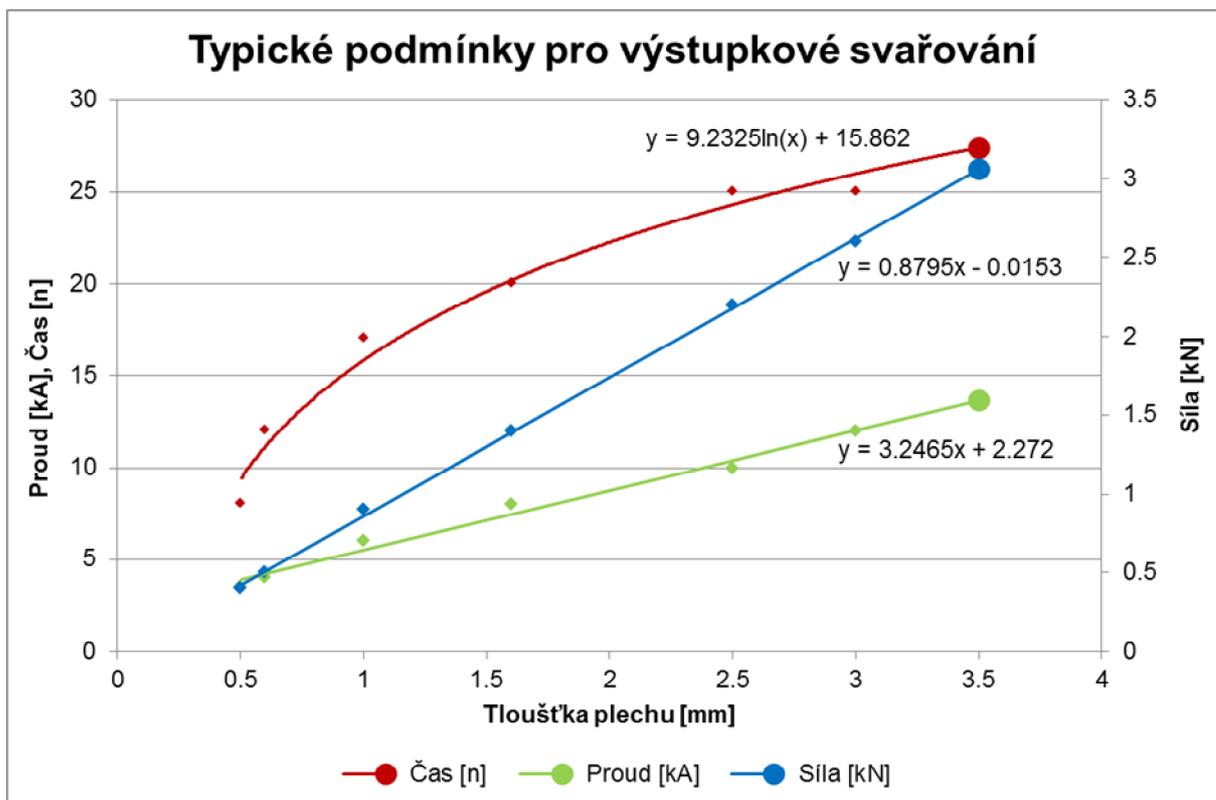
Pro návrh parametrů se pro svařování plechů pomocí výstupků používá příloha C normy ČSN EN ISO 16432 pojednávající o typických podmínkách výstupkového svařování. Porovnáním s normou ČSN EN ISO 14373, která se zabývá mimo jiné návrhem parametrů pro bodové svařování, jsem zjistil, že hodnoty uváděné u výstupkového svařování odpovídají měkkému režimu. Na obrázku 50 je tabulka převzatá z normy týkající se výstupkového svařování nepovlakovaných měkkých ocelí.

Tloušťka plechu mm		Svařovací podmínky			Označení výstupků (ISO 8167 skupina B)	
		Síla kN	Svařovací doba			Proud kA
Tlustší než	Až do (včetně)		Periody (při 50 Hz)	s	mm	
0,4 ^a	0,5	0,4	8	0,16	3,5	2,0
0,5	0,6	0,5	12	0,24	4	2,5
0,6	1,0	0,9	17	0,34	6	3,2
1,0	1,6	1,4	20	0,4	8	4,0
1,6	2,5	2,2	25	0,5	10	5,0
2,5	3,0	2,6	25	0,5	12	6,3

^a Tloušťka 0,4 mm je v rozsahu zahrnuta jako nejtenčí.

obr. 50: Typické podmínky pro výstupkové svařování (nepovlakované měkké oceli).^[N]

Tato tabulka poskytuje alespoň orientační náhled na velikost jednotlivých parametrů, a proto z ní bude vycházet i můj návrh. Rozhodující vstupní proměnnou je tloušťka svařovaného plechu. Protože síla materiálu námi svařovaných dílů je v místě spoje $t = 3,5 \text{ mm}$, provedu extrapolaci hodnot uvedených v tabulce. Jak je vidět na obrázku 51, vývoj doporučených hodnot síly a proudu je přibližně lineární, zatímco čas má spíše logaritmickou tendenci.



obr. 51: Extrapolace podmínek svařování.

Dosazením do rovnic jednotlivých regresních křivek tak získávám:

Síla: $F^* = 0,8795 \cdot 3,5 + 0,0153 = 3,094 \approx 3,1 \text{ kN}$

Proud (\sim): $I^* = 3,2465 \cdot 3,5 + 2,272 = 13,635 \approx 13,5 \text{ kA}$

Čas: $t^* = 9,2325 \ln(3,5) + 15,862 = 27,428 \approx 27 \text{ period} = 0,54 \text{ s}$

Další důležitou poznámkou v normě ČSN EN ISO 16432 je, že vysokopevnostní a jemnozrnné oceli se svařují nižším proudem o cca 20% za působení naopak o asi 20% větší síly. Prostudováním složení některých těchto ocelí jsem zjistil, že jsou zpravidla částečně legovány prvky jako Cr, Ni, Mo, Si, Cu apod., a to v mnohem větších koncentracích oproti běžným konstrukčním ocelím. Jejich uhlíkový ekvivalent je tak

přirozeně vyšší, a svařování se tedy bude provádět ještě měkčím režimem, čemuž odpovídá i doporučení normy. Dá se usuzovat, že materiál C40 použitý na pístnice, pláště a oka bude mít blíže k těmto ocelím díky podobným obtížím při svařování. Proto dodatečně upravím parametry na obě strany o zmíněných 20% – $F = 1,2F^* \approx 3,7 \text{ kN}$ resp. $I = 0,8I^* \approx 11 \text{ kA}$. Co se týče svařovacího času, zpravidla není třeba jej měnit, protože oceli s vyšším obsahem uhlíku mají rovněž nižší elektrickou vodivost, díky čemuž zůstane tepelný výkon beze změny i při snížení velikosti proudu, tedy $t = t^*$.^[46]

Jak jsem se již zmínil v předchozím výkladu, v průběhu ochlazování provedu technologický dohřev, abych se vyhnul vzniku očekávatelných trhlin v důsledku vnitřních pnutí a křehké struktury. K tomu se zpravidla využívá opět působení elektrického proudu, avšak o menší hodnotě a po kratší časovou dobu. Ohřev chci začít provádět při teplotě svaru přibližně $600 \text{ }^\circ\text{C}$ a skončit na teplotě cca $800 \text{ }^\circ\text{C}$. Takto použitému elektrickému proudu se říká žíhací a jeho hodnotu volím jako zlomek jmenovitého svářecího proudu. Abych svar znovu tepelně nepřetěžoval a celý proces ohřevu se dobře řídil, volím žíhací proud relativně malý jako:

$$I_{\dot{z}} = \frac{1}{5} I = \frac{1}{5} \cdot 11 = 2,2 \text{ kA}$$

Zdrojem tepla je opět Joulovo teplo, které ohřívá kromě objemu i vzniklý svar. Za předpokladu, že svar bude mít přibližně válcový tvar o průměru 8 mm a výšce 4 mm a fyzikální vlastnosti oceli C40 při teplotě okolo $700 \text{ }^\circ\text{C}$ jsou – elektrická rezistivita $\rho_R = 9,32 \cdot 10^{-7} \text{ } \Omega\text{m}$, hustota $\rho = 7750 \text{ kg/m}^3$, měrná tepelná kapacita $c_p = 500 \text{ J/kgK}$, mohu (díky malému teplotnímu intervalu) určit velmi zjednodušeně z tepelné rovnováhy potřebný čas

$$t_{\dot{z}} = \frac{Q}{P \cdot \eta} = \frac{\rho \left(\frac{\pi d^2}{4} \cdot v \right) c_p \Delta T}{\left(\rho_R \frac{v}{\frac{\pi d^2}{4}} \right) I_{\dot{z}}^2 \cdot \eta} = \frac{7750 \cdot \left(\frac{\pi \cdot 0,008^2}{4} \cdot 0,004 \right) \cdot 500 \cdot (800 - 600)}{\left(9,32 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{0,004}{\frac{\pi \cdot 0,008^2}{4}} \right) \cdot 2200^2 \cdot 0,8} = 0,54 \text{ s} \approx 27 \text{ per.}$$

Skutečnost, že bude docházet k odvádění tepla, jsem zahrnul do účinnosti přeměny elektrického příkonu v teplo koeficientem $\eta = 0,8$.

Další veličinou, kterou musím určit, je čas mezi přerušením svařovacího proudu a přivedením proudu žíhacího. Pro správné určení teploty jako funkce času bych musel

znát tzv. teplotní cyklus tohoto konkrétního procesu svařování. Průběh vývoje teploty by rovněž posloužil k přesnějšímu určení doby žíhání. Teplotní cyklus svaru bych získal nejlépe experimentálně, popř. se dá za řady zjednodušujících předpokladů vypočítat z Fourier-Kirchhoffovy rovnice vedení tepla. Bohužel většina fyzikálních vlastností je výrazně závislá na aktuální teplotě, a proto je analytický výpočet (zvláště u tvarově složitých konfigurací) prakticky nereálný. Poslední možností je numerická integrace rovnice, která v sobě umí zahrnout i zmíněné závislosti. Jejich získání je však nad rámec této práce. O numerických výpočtech podrobněji pojednává *kapitola 4*. Z vyjmenovaných důvodů mohu tento čas, v jehož průběhu probíhá i tzv. kování svaru, pouze odhadovat. Na základě značně rychlého ochlazování u odporového svařování však nebude tato doba nijak dlouhá a bude spíše v řádu jednotek sekund, a proto $t_K \approx 1 - 5 \text{ s}$.

Posledními hodnotami, které zbývá odhadnout, jsou velikost dosedací síly F_d , její čas působení t_d a kovací síla F_k . Pro volbu těchto parametrů se mi nepodařilo najít žádná exaktní doporučení, rozhodně ale budou vyšší. Jejich velikost nemohu volit libovolně, protože by mohlo dojít k trvalé plastické deformaci pístní tyče důsledkem tlakových napětí nad mezí kluzu. Z tohoto pohledu je kritickým místem dolní opěrná ploška, která má tvar mezikruží o vnějším průměru $D = 6 \text{ mm}$ a vnitřním průměru $d = 4 \text{ mm}$. Mez kluzu oceli C40 je podle materiálového listu $\sigma_k = 460 \text{ MPa}$ a dovolené napětí volím jako $\sigma_D = 0,8 \cdot \sigma_k \approx 370 \text{ MPa}$. Maximální zátěžná síla tak bude:

$$F_{MAX} = \sigma_D S = \sigma_D \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} = 370 \cdot \frac{\pi(6^2 - 4^2)}{4} \approx 5800 \text{ N}$$

Na základě tohoto výpočtu volím dosedací a kovací sílu jako $F_d = F_k = 5500 \text{ N}$. Čas působení prvotní síly nemusí být nijak dlouhý, takže volím $t_d = 1 \text{ s}$.

Všechny navržené parametry shrnuje *tabulka 6* a odpovídají průběhu svařovacího cyklu podle *obrázku 7*.

Síla F [kN]	Proud I [kA] (~)	Čas t [per]	Dosed. síla F_d [kN]	Dosed. čas t_d [s]	Žíhací proud $I_{\dot{z}}$ [kA] (~)	Žíhací čas $t_{\dot{z}}$ [per]	Kovací síla F_k [kN]	Kovací čas t_k [s]
3,7	11	27	5,5	1	2,2	27	5,5	1 – 5

tab. 6: Návrh parametrů pro výstupkové svařování pístnic resp. plášťů z oceli C40.

4. Způsoby modelování odporového svařování

4.1 Simulace odporového svařování dílů

V dnešní době se stále více využívá matematické modelování fyzikálních dějů ze všech oblastí. Jedním z nejpoužívanějších řešení je numerická simulace pomocí metody konečných prvků – ve zkratce *MKP* nebo *FEM* (z anglického *Finite Element Method*). Vzhledem ke komplexnosti problému se bohužel nelze analyticky dobrat řešení, které by odpovídalo realitě. Na vině je silná teplotní a částečně i tlaková závislost materiálových konstant, které se v průběhu procesu uplatňují a mnohdy i tvarová složitost dílů.

Mezi klíčové parametry patří hustota ρ , modul pružnosti E , elektrická vodivost σ resp. elektrická rezistivita ρ_R , měrná tepelná kapacita c_p a tepelná vodivost λ , pro něž obecně platí:

$$\langle \text{parametry} \rangle = f(T, p)$$

Protože při výstupkovém svařování bude tlak v průběhu vzniku svaru konstantní a samotná tlaková závislost není nikterak výrazná, pro další úvahy ji zanedbám. Teplota však hraje zásadní roli a při jejím nárůstu až na bod tavení oceli (přes $1500\text{ }^{\circ}\text{C}$) dojde ke změně „konstant“ o více než řád.

Dalším důležitým aspektem je pojem přechodových odporů (jak elektrických, tak tepelných). Vznik svaru na požadovaném místě je např. u bodových svarů závislý pouze na faktu, že elektrický přechodový odpor je zhruba o jeden řád vyšší než vnitřní odpor spojovaných plechů. U výstupkového svařování se proud přirozeně koncentruje do malé stykové plošky mezi výstupkem a protikusem, avšak přechodové odpory zanedbat nelze, pokud chceme dosáhnout reálných výsledků simulace.

Z toho jasně vyplývá, že klíčovou částí simulace je získání všech závislostí pro konkrétní materiál, změření přechodových odporů v reálné konfiguraci komponent atd. Bez těchto vstupů není možné vypočítat chování svaru ani zmapovat průběh jeho vzniku. Na trhu je v současné době k dispozici několik komerčních simulačních softwarů, které se orientují výhradně na odporové svařování (nejčastěji bodové). Podobné programy, mezi něž patří např. SORPAS či SYSWELD, využívají téměř všechny přední světové automobilky. Softwary mají uživatelsky relativně přívětivé prostředí a s jejich pomocí se dají odladit parametry reálného procesu velmi dobře. Jsou schopny zahrnout i jevy, jakými je například difúze, a vypočítat tak nauhličení materiálu, analyzovat deformace po

svařování, vykreslit finální fázové struktury apod. Jejich nevýhodou je vysoká cena společně s úzkou oblastí využití.

Druhým možným řešením je využití standardních CAE softwarů, jakými jsou třeba ANSYS, ABAQUS, Simulation Mechanical atd. Jejich řešiče umožňují počítat simultánně mechanické, elektrické a teplotní zatížení. Výhodou těchto softwarů je především jejich univerzálnost při řešení všech standardních i pokročilých technických výpočtů.

Ve své práci jsem se rozhodl vyzkoušet právě tyto CAE softwary, protože jsou v technické praxi velmi často využívány pro analýzu mechanického zatížení pro dimenzování a optimalizaci rozměrů různých strojních součástí. Nabízejí však možnost simulovat i další oblasti, kterými jsou mimo jiné i teplotní a elektrické pole. Jak uvidíme dále, je možné v nich řešit velice komplexní problémy.

Pro své testování jsem zvolil CAE software s názvem ABAQUS (opět od firmy Dassault Systèmes), který provádí řešení pomocí MKP. Jak je zřejmé z kapitoly 3, není návrh parametrů nijak snadný a jejich odladění vyžaduje mnoho praktických pokusů a následných destruktivních zkoušek, které s sebou nesou nemalé náklady. Motivací „proč simulovat“ je právě zkrácení celého verifikačního postupu, který běžně probíhá metodou pokus – omyl, a tím snížení nákladů spojených s kvalifikačním postupem svařování.

4.2 Mechanicko-teplotně-elektrická závislost

Jak jsem již naznačil v předchozí kapitole, výstupkové svařování vyžaduje specifický přístup při jeho matematickém modelování. Celá sestava je zatížena mechanicky přítlačnou silou. Ta způsobuje vznik kontaktních plošek, které následně definují proudovou hustotu resp. vnitřní elektrický odpor. Při průchodu proudem pak dochází ke vzniku tepla, které způsobuje zahřívání materiálu. Protože není elektrický odpor konstantní v celé součásti a navíc je celá sestava intenzivně chlazena z vnější strany, je ohřev nerovnoměrný a dochází k tepelnému proudění. Teplota lokálně ovlivňuje fyzikální vlastnosti materiálu, a ten se tak chová v každém místě odlišně. Ovlivněním modulu pružnosti tělesa dochází ke změně deformací při působení stále stejné přítlačné síly, mění se vodivost materiálu atd.

Teoretický rozbor metody a odvození konkrétních konečných prvků pro mechanicko-teplotně-elektrickou závislost je nad rámec této práce, a proto zde uvedu pouze základní popis problematiky bez detailního rozepisování. Vypsání rovnic jsou analyticky odvozené a pro jejich použití v MKP by byly vyžadovány další úpravy.

Mechanická oblast je popsána tahovým diagramem dané oceli. Ten se skládá z části elastické a plastické. V průběhu svařování obvykle napětí, vzniklé od přitlačné síly, nepřesahuje mez kluzu a uplatňuje se tudíž Hookův zákon. Lokálně může docházet k plastizování materiálu, ale pro zjednodušení není třeba tuto skutečnost uvažovat. Z řešení deformace tělesa pomocí MKP se vypočtou tzv. uzlové posuvy. Použitím Cauchyho vztahů pro přetvoření lze získat poměrné deformace, z nichž pomocí rozšířeného Hookova zákona určíme napjatost. Protože se pohybujeme v prostoru, mechanickou odezvu materiálu na zatížení popisuje celkem 15 rovnic. Cauchyho vztahy lze maticově vyjádřit jako:

$$\vec{\varepsilon} = \bar{D} \vec{u} \quad (\approx 6 \text{ rovnic}),$$

kde $\vec{\varepsilon}$ je vektorový zápis tenzoru deformace, \vec{u} jsou posuvy a \bar{D} je matice diferenciálních operátorů. Analogicky je definován i Hookův zákon, a to jako:

$$\vec{\sigma} = \bar{E} \vec{\varepsilon} \quad (\approx 6 \text{ rovnic}),$$

kde $\vec{\sigma}$ je vektorový zápis tenzoru napjatosti a \bar{E} je matice elastických konstant. Posledními vztahy jsou tzv. rovnice rovnováhy, které doplňují soustavu o další 3 rovnice na výsledných 15. Jejich tvar opět v maticové formě je následující:

$$\bar{D}^T \vec{\sigma} + \vec{f}^E = \vec{0} \quad (\approx 3 \text{ rovnice}),$$

kde \vec{f}^E je vektor objemové intenzity vnějších sil.^[48]

Tepelná rovnováha tělesa je popsána Fourier-Kirchhoffovou rovnicí, která pro pevné látky přejde do tvaru Fourierovy rovnice a má tvar:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \nabla^2 T + \dot{Q},$$

kde ρ je hustota, c_p je měrná tepelná kapacita, λ je tepelná vodivost (kondukce), T je teplota, t je čas a \dot{Q} je objemový zdroj tepla. Pro okrajové podmínky (styk s okolním prostředím) se využívá pro přestup tepla (konvekce) tzv. Newtonovy hypotézy ve tvaru:

$$q = \alpha (T_f - T_w),$$

kde q je tepelný příkon, α je součinitel přestupu tepla, T_f je teplota okolí a T_w je teplota stěny, která je ve styku s okolím. Odvod resp. přívod tepla zářením v této fázi zanedbám.^[49]

Elektrická vodivost je popsána Ohmovým zákonem, který lze psát ve dvou podobách – diferenciální a integrální:

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} = \frac{1}{\rho_R} \vec{E} \quad (\text{dif}); \quad U = RI \quad (\text{int}),$$

kde \vec{j} je proudová hustota, \vec{E} je intenzita elektrického pole, σ je elektrická vodivost (konduktivita), ρ_R je měrný odpor (rezistivita), U je napětí, R je elektrický odpor a I je elektrický proud. Je-li proud ve vodiči rozložen rovnoměrně, platí pro proudovou hustotu vztah:

$$j = \frac{I}{S},$$

kde S je plocha průřezu kolmá na směr proudové hustoty. Vnitřní odpor vodiče je definován jako:

$$R = \rho_R \frac{l}{S},$$

kde l je délka vodiče. Tepelný příkon vodiče P v důsledku průchodu elektrického proudu je dán rovnicí:

$$P = RI^2 \quad [50]$$

K provázání s Kirchhoffovou rovnicí využijí předpoklad, že tepelný příkon vodiče je úměrný objemovému zdroji tepla, a lze ho tak jednoduše vypočítat jako:

$$\dot{Q} = \frac{P}{V},$$

kde V je objem tělesa, kterým protéká elektrický proud.

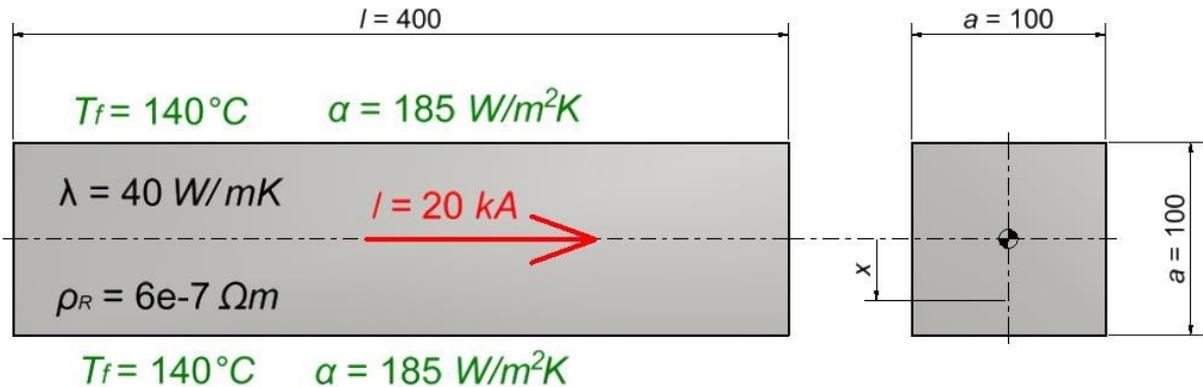
4.3 Simulace průchodu elektrického proudu

4.3.1 Stacionární analýza ohřevu průchodem el. proudu

Základním předpokladem správnosti výpočtů pomocí MKP je v první řadě ověření výsledků. Pro jednodušší úlohy se provede analytický výpočet, který se porovná s výsledky získanými simulací. Pro složitější případy se doporučuje provedení ověřovacího experimentu.

Pro simulaci procesu svařování je potřeba provést nestacionární analýzu ohřevu s objemovým zdrojem tepla. Ta je však analyticky velmi obtížně řešitelná, a proto jsem se rozhodl nejprve provést stacionární analýzu. Cílem bylo vypočítat nejchladnější

a nejteplejší místo na kvádru, kterým prochází elektrický proud. Zadání příkladu je na obrázku 52. Pro možnost analytického výpočtu nebudu uvažovat změnu parametrů v závislosti na teplotě a budu uvažovat pouze jednorozměrné vedení tepla.



obr. 52: Modelový příklad č. 1 – Kvádr, stacionární ohřev elektrickým proudem.

Vzhledem k řešení 1D úlohy je zřejmé, že maximální teplota se bude nacházet ve středu kvádru, čili $T_{MAX} = T(x = 0)$. Naopak minimální teplota bude na povrchu součásti, tedy $T_{MIN} = T(x = a/2)$. Vodič má díky omezené vodivosti vnitřní ohmický odpor, který je roven:

$$R = \rho_R \frac{l}{S} = 6 \cdot 10^{-7} \frac{0,4}{0,1 \cdot 0,1} = 2,4 \cdot 10^{-5} \Omega$$

Vnitřní objemový zdroj tepla vypočítám přes elektrický výkon jako:

$$\dot{Q} = \frac{P}{V} = \frac{RI^2}{V} = \frac{2,4 \cdot 10^{-5} \cdot 20000^2}{0,1 \cdot 0,1 \cdot 0,4} = 2,4 \text{ MW/m}^3$$

Protože se jedná o stacionární případ vedení tepla, časová parciální derivace teploty bude rovna nule. Současně řeším úlohu pouze ve směru osy x , takže parciální derivace teploty podle ostatních souřadnic budou rovněž nulové, a Kirchhoffova rovnice tak získá tvar obyčejné diferenciální rovnice druhého řádu:

$$0 = \lambda \frac{d^2 T}{dx^2} + \dot{Q}$$

Při zavedení okrajových podmínek – v ose ($x = 0$) je teplota maximální a teplo přivedené na stěnu desky vedením je odvedeno přestupem do okolí – získám průběh teploty jako funkci vzdálenosti od středu desky:

$$T(x) = T_f + \frac{\dot{Q}}{2\lambda} \left(\frac{a}{2}\right)^2 \left[1 + \frac{4}{Bi} - \left(\frac{2x}{a}\right)^2\right] \quad ; \quad Bi = \frac{\alpha a}{\lambda}$$

kde Bi je tzv. Biotovo číslo, které vyjadřuje poměr mezi vnějším a vnitřním tepelným odporem.^[49] Dosazením do těchto rovnic tak získám:

$$Bi = \frac{\alpha a}{\lambda} = \frac{185 \cdot 0,1}{40} = 0,4625$$

$$T_{MAX} = T(x = 0) = 140 + \frac{2,4 \cdot 10^6}{2 \cdot 40} \left(\frac{0,1}{2}\right)^2 \left[1 + \frac{4}{0,4625}\right] = 863,6^\circ C$$

$$T_{MIN} = T(x = a/2) = 140 + \frac{2,4 \cdot 10^6}{2 \cdot 40} \left(\frac{0,1}{2}\right)^2 \left[1 + \frac{4}{0,4625} - \left(\frac{2 \cdot 0,05}{0,01}\right)^2\right] = 788,6^\circ C$$

Pro výpočet pomocí MKP v ABAQUSu jsem nejprve vytvořil CAD model kvádrů. Tomu jsem přiřadil materiál s potřebnými fyzikálními vlastnostmi – v tomto případě pouze vodivostmi (*Conductivity, Electrical Conductivity*). Po vložení součásti do sestavy (*Assembly*) jsem provedl vysíťování (*Mesh Part Instance*) elementy typu *DC3D8E* (lineární kvádrové elementy s 8 uzly pro svázanou teplotně-elektrickou analýzu). Dodatečnou úpravou sítě (*Seed Edges*) jsem zvětšil počet elementů ve směru x na 10.

Pro řešení teplotního a elektrického pole současně musí být nadefinován krok (*Step*) pro spojené teplotně-elektrické analýzy (*Coupled Thermal-Electric*). Defaultně je nastavena nestacionární analýza (*Transient*), takže pro řešení stacionárního vedení tepla (*Steady-State*) je zapotřebí provést příslušnou změnu.

Výpočtovou součást jsem zatížil (*Load*) na levé ploše proudovou hustotou (*Surface Current*), která odpovídá:

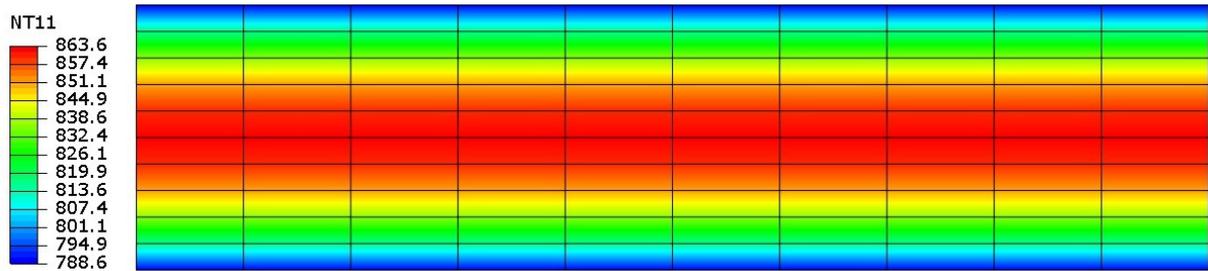
$$j = \frac{I}{S} = \frac{20000}{0,1 \cdot 0,1} = 2 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$$

Toto řešení jsem zvolil z důvodu rovnoměrného rozložení proudu v celém průřezu vodiče, což odpovídá nejvíce realitě. Aby ABAQUS věděl, „odkud kam“ má proud téct, je zapotřebí mu nadefinovat alespoň jednu okrajovou podmínku (*Boundary Condition*) definující hodnotu elektrického potenciálu (*Electrical Potential*). Proto jsem umístil nulový potenciál na protilehlou (pravou) plochu kvádrů. Protože se jedná o okrajovou podmínku, přiřadil jsem jí do počátečního kroku (*Initial Step*).

Pro interakci s okolím (*Interaction*) jsem nadefinoval na 2 boční protilehlé plochy podmínku přestupu tepla (*Surface Film Condition*). Zde se dá nadefinovat jak velikost součinitele přestupu tepla (*Film Coefficient*), tak okolní teplota (*Sink Temperature*).

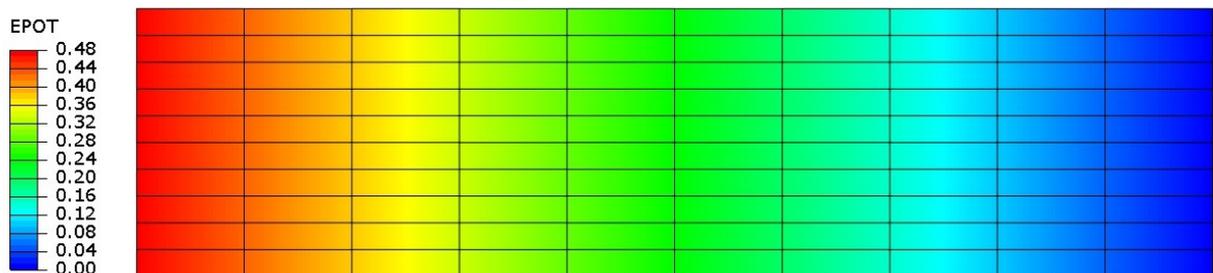
Abych obdržel řešení rovnou ve stupních Celsia a nikoliv v Kelvinech, stačí přenastavit absolutní nulu na $-273,15$. To se provede jednoduše úpravou vlastností modelu (*Edit Attributes*), čímž ABAQUS automaticky posune celou teplotní stupnici.

Tím je celý model připravený a stačí ho odeslat výpočtovému jádru. Výsledné teplotní zatížení v uzlech (výstupní proměnná *NT11*) je vidět na *obrázku 53a*. Ze stupnice na levé straně je vidět, že jsem docílil 100% shody s analytickým výpočtem.



obr. 53a: 1D teplotní pole vzniklé průchodem elektrického proudu.

Obrázek 53b pak ukazuje ohmický úbytek napětí (výstupní proměnná *EPOT*), který zcela odpovídá představě spojitého vnitřního odporu vodiče.



obr. 52b: Ohmický úbytek napětí.

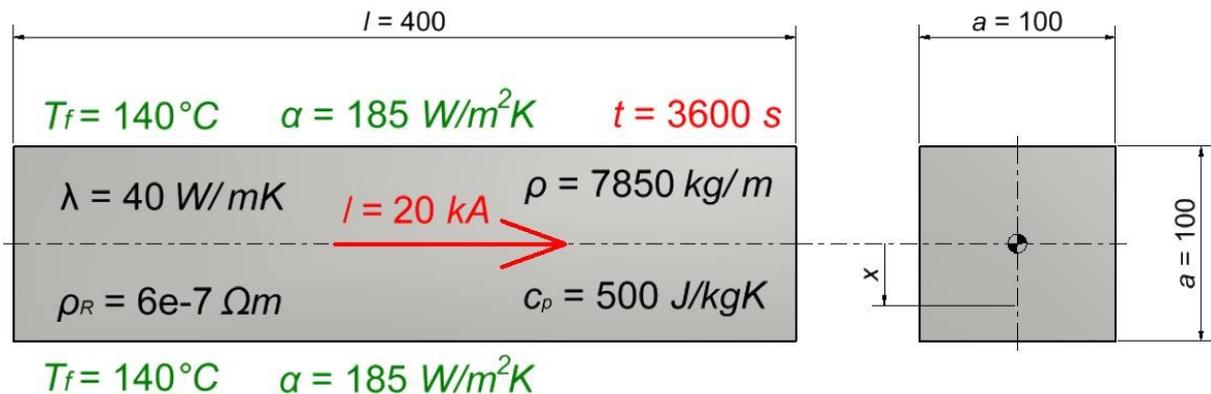
Protože jsem nadefinoval na pravou plochu nulový potenciál, bude levá hodnota potenciálu odpovídat přímo napětí. To si lze snadno ověřit výpočtem z integrálního tvaru Ohmova zákona:

$$U = RI = 2,4 \cdot 10^{-5} \cdot 20000 = 0,48 \text{ V}$$

I zde vychází hodnota shodně s MKP řešením. ^[51]

4.3.2 Nestacionární analýza ohřevu průchodem el. proudu

V návaznosti na předchozí úlohu provedu na stejném kvádru nestacionární úlohu, která již plně odpovídá procesu svařování. Analytické řešení této úlohy vyžaduje řešení parciální diferenciální rovnice, a proto je velmi obtížné či dokonce nemožné. Proto celou úlohu budu řešit pouze numericky, opět pouze v 1D. Zadání je na obrázku 54.



obr. 54: Modelový příklad č. 2 – Kvádr, nestacionární ohřev elektrickým proudem.

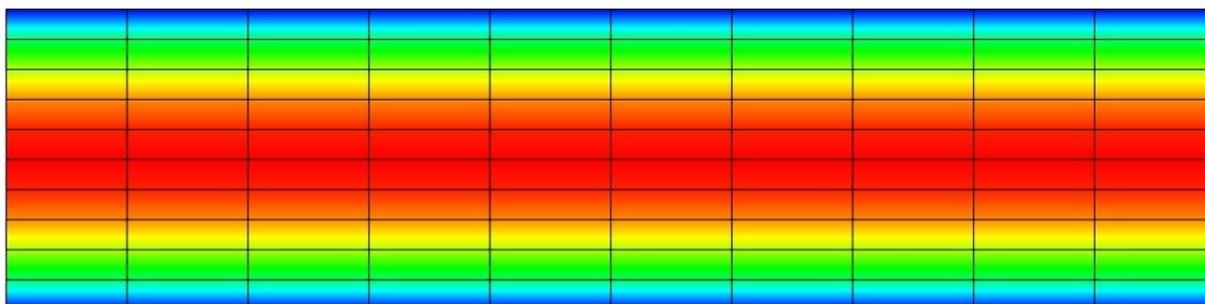
Oproti minulé úloze je třeba předefinovat především krok (*Step*) řešící současně elektrické a teplotní pole (*Coupled Thermal-Electric*) na nestacionární (*Transient*). Určí se výsledný čas, kdy má simulace přestat počítat (*Time Period*) a nadefinuje se maximální povolená změna teploty na jednu iteraci (*Max. Allowable Temperature Change Per Increment*), kterou kvůli dobré přesnosti volím jako $\Delta T = 2 \text{ }^\circ\text{C}$. V mém případě provedu výpočet do času $t = 1 \text{ hod} = 3600 \text{ s}$, kde je velká pravděpodobnost, že by se výsledky měly blížit stacionárním hodnotám. Ve skutečnosti se teplota blíží k ustálenému stavu asymptoticky, takže nulový teplotní gradient nastane teoreticky až v nekonečnu. Aby se výpočet nezastavil kvůli přílišnému počtu kroků, nastavil jsem jejich maximální počet (*Maximum Number Of Increments*) na hodnotu $n = 10\,000$

Dále dodefinuji další důležité vlastnosti materiálu, které budu potřebovat. Vedle tepelné a elektrické vodivosti to jsou hustota materiálu (*Density*) a měrná tepelná kapacita (*Specific Heat*).

Nakonec stanovím počáteční teplotu kvádrů rovnou teplotě okolí. To se provede nastavením předdefinovaného pole (*Predefined Field*) teploty (*Temperature*) v sekci ostatní (*Other*), přičemž musí být jako aktivní nastaven počáteční krok (*Initial Step*).^[51]

Všechny ostatní veličiny jako zatížení, okrajové podmínky apod. zůstávají stejné jako v předchozí úloze, takže nyní stačí model předat výpočtovému jádru programu. Výsledné rozložení teplot pro vybrané časové okamžiky v jednotlivých uzlech je na

obrázku 55 a v tabulce 7. Teplotní pole nabyde velmi rychle svůj výsledný tvar a jednotlivé časové okamžiky se od sebe odlišují pouze rozdílnými hodnotami na barevné stupnici. Ze získaných výsledků je vidět, že těleso skutečně spěje k rovnovážnému stavu, který jsem vypočítal v předchozím příkladu.



obr. 55: 1D teplotní pole vzniklé průchodem elektrického proudu.

Teplotní stupnice pro vybrané doby trvání ohřevu				
$t = 150 \text{ s}$	$t = 500 \text{ s}$	$t = 1000 \text{ s}$	$t = 2000 \text{ s}$	$t = 3600 \text{ s}$
NT11	NT11	NT11	NT11	NT11
227.5	395.2	561.2	737.6	832.1
226.8	393.1	557.6	732.5	826.1
226.2	390.9	554.0	727.3	820.1
225.5	388.8	550.4	722.2	814.2
224.8	386.7	546.8	717.0	808.2
224.2	384.5	543.2	711.9	802.2
223.5	382.4	539.6	706.7	796.2
222.9	380.3	536.0	701.6	790.3
222.2	378.1	532.4	696.5	784.3
221.5	376.0	528.9	691.3	778.3
220.9	373.9	525.3	686.2	772.4
220.2	371.7	521.7	681.0	766.4
219.6	369.6	518.1	675.9	760.4

tab. 7: Teplotní stupnice pro vybrané doby trvání ohřevu.

Pro porovnání, jak ovlivní výsledek zavedení teplotní závislosti konstant, upravím výpočtový model kvádrů. Zvolené hodnoty všech konstant odpovídaly přibližně prostředku intervalu, v němž se pohybovaly teploty v průběhu předešlé analýzy, tedy v rozmezí asi $400 - 500 \text{ }^\circ\text{C}$. Teplotně závislé hodnoty jsem získal na portálu *MatWeb* a *efunda* a přísluší oceli *AISI 1040* (v evropském značení se jedná o ocel *C40*). Protože data nejsou kompletní, využil jsem evropskou směrnici *EN 1993, Eurocode 3*, v níž jsou obecně platné vztahy pro uhlíkové oceli (viz příloha 6).^{[54],[55],[56]}

Pro všechna uváděná data jsem sestrojil grafy, které jsou k dispozici v *příloze 7*. Z nich je patrné, že všechny fyzikální vlastnosti vykazují zlom či skok v oblasti okolo $800\text{ }^{\circ}\text{C}$. Na vině je fázová přeměna na austenit, který má, na rozdíl od feritu alfa, mřížku kubickou plošně středěnou, a chová se tak odlišně. Z rovnovážného diagramu železo – karbid železa, který je k dispozici v *příloze 9*, je zřejmé, že fázová přeměna u oceli C40 s obsahem 0,4% začíná částečně již na teplotě $723\text{ }^{\circ}\text{C}$ a k celkové překrytalizaci dojde právě v okolí $800\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ve zmíněných zdrojích končí popis závislostí na teplotě $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Protože se ale oblast austenitu nachází bezpečně až do teploty $1400\text{ }^{\circ}\text{C}$, využil jsem uváděné funkce až do této teploty. Nad teplotou $1400\text{ }^{\circ}\text{C}$ se již ocel blíží k částečnému a následně i plnému roztavení, kde se budou vlastnosti opět výrazně měnit. V této fázi nebudu tuto skutečnost uvažovat a od teploty $1400\text{ }^{\circ}\text{C}$ výše budu počítat s neměnnými hodnotami.

Do ABAQUSu se tato data zavedou v definici materiálu, kde je třeba vždy u příslušné vlastnosti zvolit použití teplotně závislých dat (*Use Temperature-Dependant Data*). Protože řeším v této úloze pouze teplotně-elektrickou analýzu, ABAQUS nebude uvažovat žádné rozměrové změny, které vznikají v důsledku teplotní roztažnosti, ani když bude v materiálu nastavena.^[51]

Za pomoci teplotní roztažnosti ještě musím vypočítat teplotní závislost hustoty, která je způsobená změnou objemu z původní hodnoty V_0 na novou hodnotu V při konstantní hmotnosti. Objem součásti při ohřevu o ΔT vypočítám podle známého vztahu, který po drobné úpravě dostane tvar:

$$V = V_0(1 + 3\alpha\Delta T) = V_0\left(1 + 3\frac{\Delta l}{l_0}\right) = V_0(1 + 3\varepsilon)$$

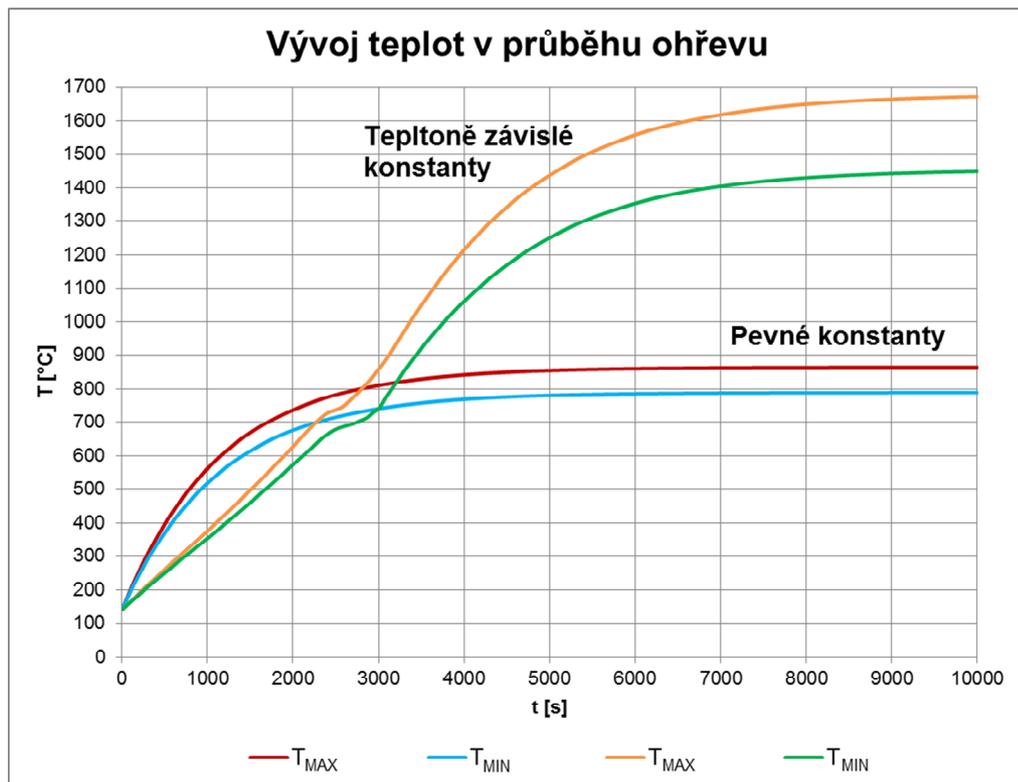
Díky známé hodnotě hustoty pro jednu konkrétní teplotu $\rho_{20\text{ }^{\circ}\text{C}} = 7845\text{ kg/m}^3$ je už možné spočítat celkovou teplotní závislost.

Protože zbytek nastavení modelu zůstane stejný, stačí spustit simulaci. Rozložení teplotního pole se opět velmi rychle ustálí v již známém tvaru, které odpovídá *obrázku 55*. Rozdíl je ale patrný z velikostí teplot ve vybraných časových okamžicích, které jsou shrnuty v *tabulce 8*. Je vidět, že až do času $t = 2000\text{ s}$ jsou teploty vždy menší než pro případ neměnných konstant. Oproti tomu ale v čase $t = 3600\text{ s}$ místo přiblížení k ustáleným hodnotám dochází k výraznému navýšení teplot.

Teplotní stupnice pro vybrané doby trvání ohřevu – nekonstantní parametry				
$t = 150 \text{ s}$	$t = 500 \text{ s}$	$t = 1000 \text{ s}$	$t = 2000 \text{ s}$	$t = 3600 \text{ s}$
NT11	NT11	NT11	NT11	NT11
177.1	260.4	376.3	627.5	1085.7
176.8	259.6	374.4	622.9	1074.5
176.6	258.7	372.5	618.2	1063.2
176.3	257.8	370.6	613.6	1052.0
176.1	256.9	368.7	609.0	1040.7
175.9	256.0	366.8	604.4	1029.4
175.6	255.2	365.0	599.8	1018.2
175.4	254.3	363.1	595.1	1006.9
175.2	253.4	361.2	590.5	995.7
174.9	252.5	359.3	585.9	984.4
174.7	251.6	357.4	581.3	973.2
174.4	250.7	355.5	576.6	961.9
174.2	249.9	353.6	572.0	950.7

tab. 8: Změna teplotní stupnice pro nekonstantní parametry.

Abych zjistil, jak přesně vypadají průběhy teplot a jaká je výsledná teplota ustálení nelineární soustavy, provedl jsem obě analýzy ještě jednou, tentokrát do času $t = 10000 \text{ s}$. Z každé analýzy jsem získal data vývoje hodnot (XY data) pro uzel na povrchu a pro uzel uprostřed součásti, která jsem vynesl do grafu na obrázku 56.

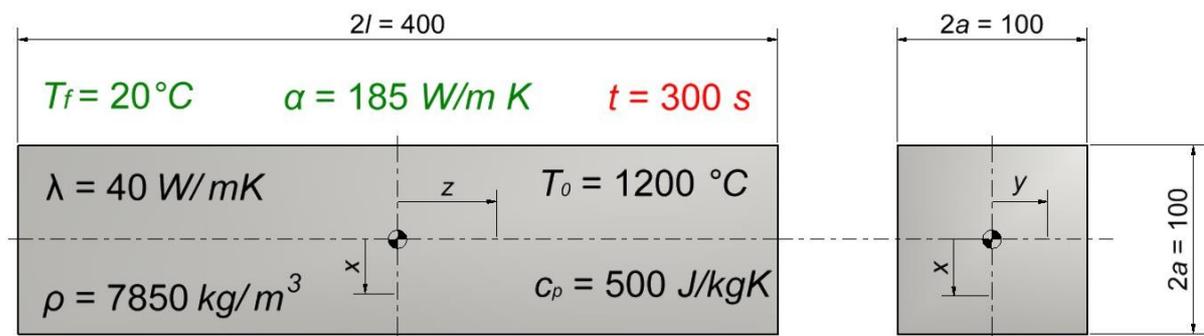


obr. 56: Porovnání vývoje teplot pro lineární a nelineární model fyzikálních konstant.

Z průběhu teplot v čase je patrné, jak výrazně se odlišuje chování ideálního modelu od modelu blížícího se realitě. Jasně patrná je i fázová přeměna z feritu- α na austenit.

4.3.3 Nestacionární analýza volného ochlazování

Po vytvoření svaru dochází k jeho chladnutí. Abych mohl tuto skutečnost nasimulovat, je potřeba provést opět nestacionární analýzu. Protože v tuto dobu už elektrický proud svařencem neprochází, je problém pro jednoduché geometrie těles analyticky dobře řešitelný. Jako druhý modelový příklad, jehož zadání je na *obrázku 57*, si volím stejný kvádr jako v předchozím případě, který nechám volně ochlazovat v okolním prostředí. Opět nebudu uvažovat radiaci ani teplotní závislost konstant. Cílem je opět určení minimální a maximální teploty, a to po 5 minutách ochlazování.



obr. 57: Modelový příklad č. 3 – Kvádr, nestacionární volné ochlazování v okolním prostředí.

Úlohu budu tentokrát řešit ve všech 3 rozměrech. Je jasně patrné, že nejteplejší místo bude ve středu kvádrů, čili $T_{MAX} = T(x = y = z = 0)$. Oproti tomu minimální teplota bude v každém rohu kvádrů, takže např. $T_{MIN} = T(x = y = a/2, z = l/2)$.

Řešení 3D tělesa o konečném objemu vypočítám jako průnik 3 nekonečných desek. Pro každou z nich si vyčísím Biotovo a Fourierovo číslo, s jejichž pomocí určím z Heislerova diagramu (viz *příloha 5*) bezrozměrné hodnoty teploty D^* . Toto provedu pro střed nekonečné desky a pro její povrch. Bezrozměrnou teplotu konečného tělesa T^* získám matematicky vynásobením všech 3 veličin D^* .^[49]

Postupně si určím požadované hodnoty pro nekonečné desky. Z *obrázku 54* je patrné, že označení geometrie je v tomto případě lehce odlišné od předchozí úlohy, aby reflektovalo požadavky Heislerových grafů. Všechny výsledky jsem pro přehlednost sepsal do *tabulky 7*. Do tabulky jsem rovnou zahrnul i odečtené bezrozměrné teploty pro obě požadovaná místa – střed nekonečné desky $x^* = x/L = 0$ a její povrch $x^* = 1$.

Deska 1	Deska 2	Deska 3
$ Fo_1 = \frac{\lambda t}{\rho a^2 c_p} = \frac{40 \cdot 300}{7850 \cdot 0,05^2 \cdot 500} = 1,22 $	$ Fo_2 = Fo_1 = 1,22 $	$ Fo_3 = \frac{40 \cdot 300}{7850 \cdot 0,2^2 \cdot 500} = 0,08 $
$ Bi_1 = \frac{\alpha a}{\lambda} = \frac{185 \cdot 0,05}{40} = 0,231 $	$ Bi_2 = Bi_1 = 0,231 $	$ Bi_3 = \frac{185 \cdot 0,2}{40} = 0,925 $
$ \frac{1}{Bi_1} = \frac{1}{0,231} = 4,32 $	$ \frac{1}{Bi_2} = \frac{1}{Bi_1} = 4,32 $	$ \frac{1}{Bi_3} = \frac{1}{0,925} = 1,08 $
$ D_1^*(x^* = 0) = 0,81 $	$ D_2^*(x^* = 0) = 0,81 $	$ D_3^*(x^* = 0) = 0,97 $
$ D_1^*(x^* = 1) = 0,72 $	$ D_2^*(x^* = 1) = 0,72 $	$ D_3^*(x^* = 1) = 0,75 $

tab. 9: Hodnoty potřebné pro a získané z Heislerova diagramu.

Výsledná bezrozměrná teplota pro střed kvádrů o konečných rozměrech tak bude:

$$T^*(x^* = 0) = D_1^* \cdot D_2^* \cdot D_3^* = 0,81 \cdot 0,81 \cdot 0,97 = 0,636$$

a pro jeho povrch pak:

$$T^*(x^* = 1) = D_1^* \cdot D_2^* \cdot D_3^* = 0,72 \cdot 0,72 \cdot 0,75 = 0,389$$

Požadované teploty pak vypočtu z definice bezrozměrné teploty:

$$T^* = \frac{T - T_f}{T_0 - T_f} \Rightarrow \begin{cases} T_{MIN} = T^*(x^* = 1) \cdot (T_0 - T_f) + T_f = 0,389 \cdot (1200 - 20) + 20 = 479^\circ C \\ T_{MAX} = T^*(x^* = 0) \cdot (T_0 - T_f) + T_f = 0,636 \cdot (1200 - 20) + 20 = 770,5^\circ C \end{cases}$$

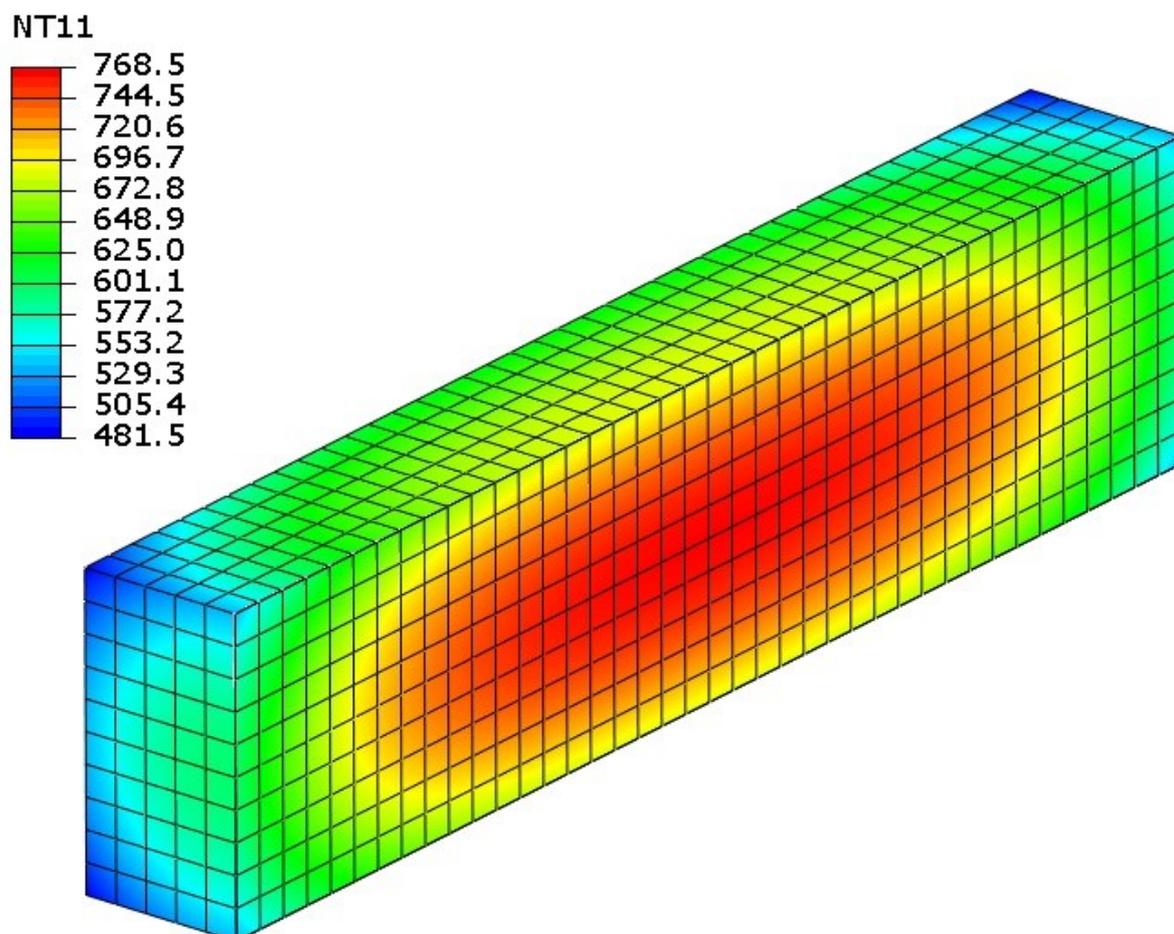
Pro simulaci nestacionárního ochlazování v ABAQUSu jsem použil již vytvořený CAD model kvádrů. Vytvořím a přiřadím materiál, kterému nadefinuji požadované veličiny. Těmi budou teplotní vodivost (*Conductivity*), měrná tepelná kapacita (*Specific Heat*) a hustota (*Density*). Součást vložím do sestavy (*Assembly*) a provedu vysíťování (*Mesh Part Instance*) elementy typu *DC3D8* (lineární kvádrové elementy s 8 stupni volnosti pro analýzu vedení tepla). Protože řeším úlohu ve všech rozměrech, volím rovnoměrnou velikost elementů o hraně 10 mm , což zajistí dostatečnou hustotu sítě.

Pro řešení čistě teplotního pole musí být nadefinován krok (*Step*) pro analýzu teplotního pole (*Heat Transfer*). Zkontroluji nastavení nestacionárního řešení (*Transient*) a doplním požadovaný čas trvání výpočtu (*Time Period*) – v mém případě požadovaných 300 s . Nakonec doplním maximální počet kroků (*Maximum Number Of Increments*)

$n = 1000$ a povolenou změnu teploty na 1 krok (*Max. Allowable Temperature Change Per Increment*) $\Delta T = 5 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Při volném ochlazování není definováno žádné zatížení (*Load*), ale pouze interakce s okolním prostředím (*Interaction*). Na všechny plochy kvádru zavedu součinitel přestupu tepla společně s teplotou okolí (*Surface Film Condition*). Úpravou vlastností modelu (*Edit Attributes*) opět posunu teplotní stupnici o $-273,15$. Počáteční teplotu kvádru stanovím pomocí předdefinovaného pole (*Predefined Field*) teploty (*Temperature*) pro počáteční krok (*Initial Step*).^[51]

Matematický model je tak hotový a stačí ho odeslat výpočtovému jádru. Výsledné teplotní pole je na *obrázku 58*, kde jsem pro názornost provedl podélný řez středovou rovinou kvádru.



obr. 58: 3D teplotní pole po 300 s volného ochlazování v okolním prostředí.

Porovnáním numericky vypočtených hodnot s analytickým řešením je vidět minimální chyba ($\approx 0,5\%$), která je velmi pravděpodobně způsobena nepřesným odečtem z Heislerových diagramů.

4.3.4 Způsob modelování kontaktní úlohy 2 těles

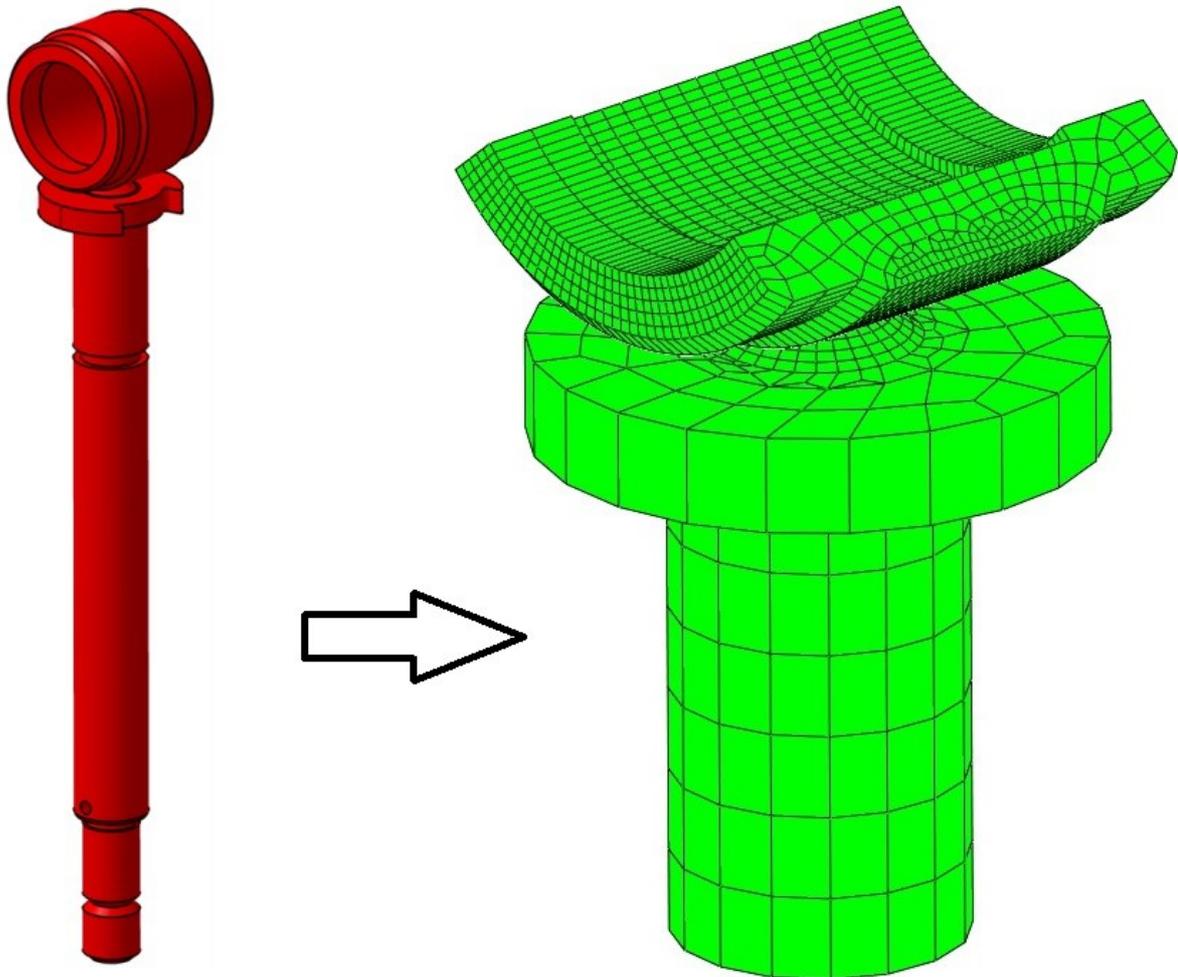
Protože v reálné praxi je často zapotřebí řešit interakci více dílů současně, provedu na závěr ještě simulaci průchodu elektrického proudu z jedné součásti do druhé. Za tímto účelem jsem zvolil sestavu pístnice, kterou budu namáhat ve zjednodušeném zatěžovacím režimu. Nejprve dojde k přitlačení dílů a následně je při stálém působení síly vpuštěn elektrický proud. Výstupem analýzy bude opět teplotní pole. Tento způsob odpovídá první fázi výstupkového svaření obou dílů.

V případě řešení takto komplexních úloh hraje nejvýznamnější roli použitý materiálový model a kontaktní vlastnosti ve styku těles jako např. velikost přechodových odporů. Získání těchto dat by vyžadovalo mnohá měření na reálných dílech v provozních podmínkách a následnou verifikaci matematického modelu, což však nebylo cílem této práce. Proto se v této kapitole budu soustředit především na metodiku výpočtu a výsledky analýzy budu hodnotit pouze relativně (dle očekávání) a nikoliv absolutně (konkrétní číselné hodnoty vypočtených veličin).

Abych přesto dostal hodnoty odpovídající alespoň rámcově realitě, využiji co možná nejvíce zjištěný materiálový model pro ocel C40 viz *příloha 7*. K simulaci kontaktu mezi okem a pístnicí využiji částečně data z *přílohy 8*, která jsou sice pro ocel s nižším obsahem uhlíku (AISI 1008), ale rámcově jsou zcela dostačující.^{[19],[59],[60]}

Nejprve vytvořím zjednodušenou geometrii součástí, kterou vysítuji (*Mesh Part*) elementy typu Q3D8 (kvádrové elementy s 8 uzly pro trilineární deformaci, elektrický potenciál a teplotu), přičemž každý díl sítuji samostatně (*Mesh On Part*). Velikost sítě lokálně upravím (*Seed Edges*) tak, abych docílil jemné struktury v kontaktní ploše dílů. V okrajových místech naopak nechám síť relativně hrubou, abych minimalizoval celkový výpočtový čas. Pohled na výslednou diskreditaci kontinua pomocí konečných prvků je na *obrázku 59*.

Pro úlohu je třeba nadefinovat tentokrát alespoň 2 kroky (*Step*). První bude řídit čistě mechanický přitlak dílů, a proto ho volím jako statický, obecný (*Static, General*). Druhý krok musí umět propojit mechanickou, elektrickou a teplotní závislost a řešit všechny rovnice simultánně. Za tímto účelem je v ABAQUSu tzv. plně propojený teplotně-elektricko-mechanický krok (*Coupled Thermal-Electrical-Structural*). Simulace bude nestacionární (*Transient*) s délkou trvání (*Time Period*) $t = 0,54 \text{ s}$. Maximální povolená změna teploty (*Max. Allowable Temperature Change Per Increment*) bude $\Delta T = 10 \text{ }^\circ\text{C}$ a počet kroků (*Maximum Number Of Increments*) volím $n = 10000$.



obr. 59: Zjednodušení sestavy pístnice a pohled na výslednou konečně-prvkovou síť.

Materiál (*Material*) obou součástí bude ocel C40 se všemi potřebnými konstantami, jejichž hodnoty budou teplotně závislé (*Use Temperature-Dependant Data*) viz příloha 7.

Celou sestavu upevním v prostoru pomocí okrajových podmínek (*Boundary Condition*) tak, jak to odpovídá založení ve svařovacím přípravku, přičemž všechny vazby aplikuji v počátečním kroku (*Initial Step*). Současně zavedu hodnotu nulového potenciálu na válcovou část pístnice, kde dochází k reálnému odvodu elektrického proudu, abych tak definoval směr jeho toku. Navíc určím počáteční teplotu (*Predefined Field* → *Temperature*) oběma součástem na $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, přičemž opět posunu teplotní stupnici tak, aby odpovídala Celsiově (*Edit Attributes* → *Absolute Zero Temperature*).

Hlavní interakcí (*Interaction*) modelu bude definice kontaktu mezi oběma díly (*Surface-To-Surface Contact*), který bude opět v počátečním kroku (*Initial Step*). Jako hlavní plochu (*Master Surface*) volím pístnici, jako podřízenou plochu (*Slave Surface*) pak oko. Pro definici vlastností kontaktu (*Contact Interaction Property*) je třeba nastavit

součinitel tření (*Tangential Behavior* → *Friction Coeff.*) $f = 0,1$ a normálové chování kontaktu (*Normal Behavior* → *Pressure-Overclosure*) na “tvrdý” kontakt (“*Hard*” *Contact*). Pro definici teplotních vlastností stykové plochy součástí se přiřadí tepelná vodivost (*Thermal Conductance*) v závislosti na vzdálenosti (*Use Only Clearance-Dependency Data*), kdy pro 5 mm od plochy považují vodivost za nulovou. Pro nedostatek dat zde neuvažují teplotní závislost. Vznikající teplo (*Heat Generation*) ponechám na výchozích hodnotách. Přechodový odpor zavedu pomocí elektrické vodivosti (*Electrical Conductance*) v závislosti na tlaku a teplotě (*Use Only Pressure-Dependency Data + Use Temperature-Dependent Data*), přičemž hodnoty určím orientačně podle přílohy 8.

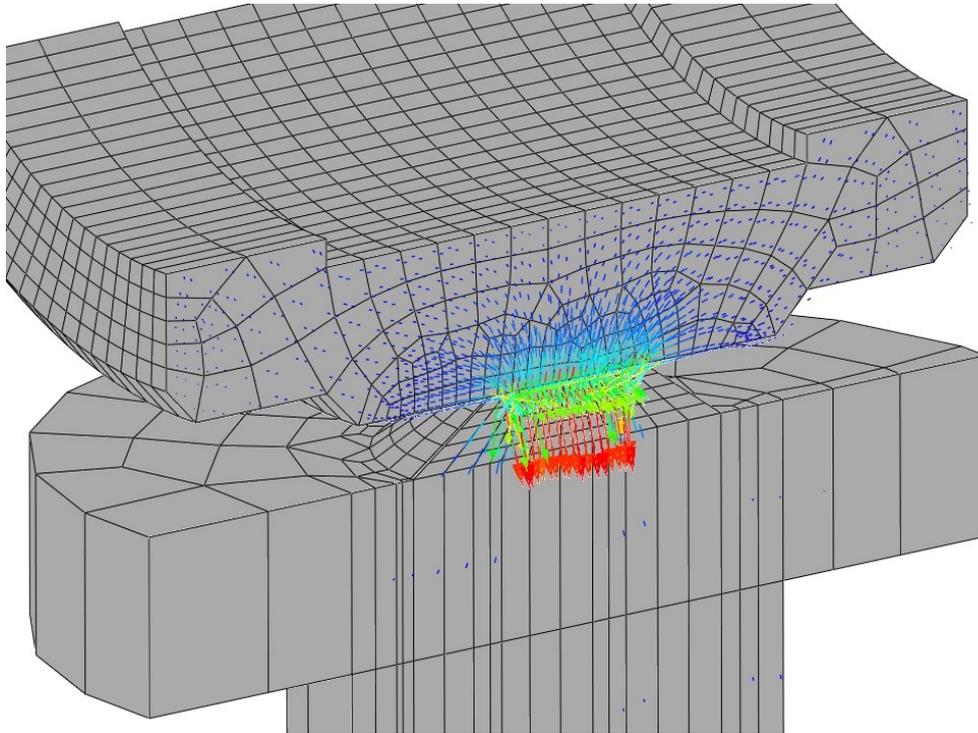
Pro odvod tepla použiji součinitel přestupu tepla (*Surface Film Condition*) zavedený v teplotním kroku ve 2 velikostech – pro plochy, které jsou ve styku s elektrodami $\alpha = 300\text{ W/m}^2\text{K}$ a pro ostatní volně ochlazované plochy $\alpha = 50\text{ W/m}^2\text{K}$, přičemž teplota okolí (*Sink Temperature*) bude $T = 20\text{ }^\circ\text{C}$.

Pro správné zavedení silového působení jsem vytvořil 2 referenční body (*Reference Point*) ve středech bočních kružnic oka. Tyto body jsem následně spojil (*Coupling*) s vnitřními plochami oka, na které se přenáší síla z čepu horní elektrody. Jako typ volím spojení uzlu – plocha (*Node Region*)

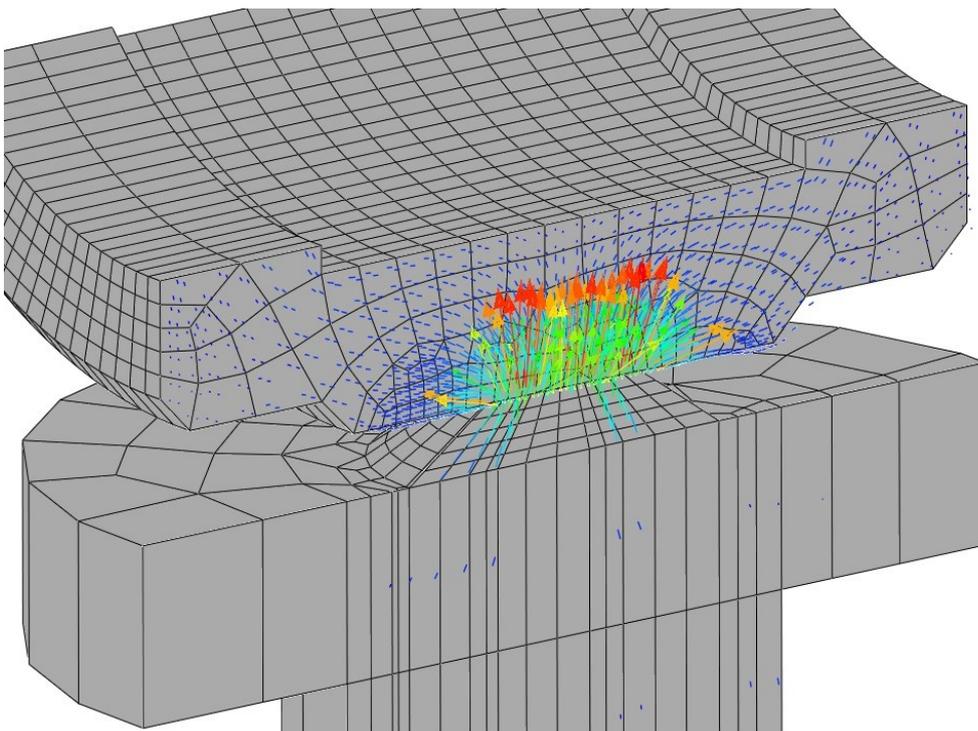
Všechna zatížení (*Load*) vždy aplikuji v jim příslušném kroku (*Step*). Nejprve to budou bodové síly (*Concentrated Force*) o celkové velikosti $F = 3700\text{ N}$ zavedené do referenčních bodů (*Reference Point*). Následně v dalším kroku definuji proudovou hustotu (*Surface Current*) o celkové velikosti odpovídající efektivní hodnotě proudu $I_{ef} = 3000\text{ A}$ rozdělenou do obou přírodních ploch oka. Abych nasimuloval střídavý průběh proudu, vytvořím periodickou funkci (*Amplitude* → *Periodic*), která se zadává ve formě Fourierovy řady. Časový rozsah bude počítán od aktuálního kroku (*Step Time*), úhlová frekvence (*Circular Frequency*) odpovídá běžné frekvenci rozvodné sítě $f = 50\text{ Hz} \Rightarrow \omega = 314,16\text{ rad/s}$. Čas počátku (*Starting Time*) a počáteční amplituda (*Initial Amplitude*) budou nulové a vypočtené koeficienty pro Fourierovu řadu pro sinusový průběh jsou $A = 0$, $B = 1$.

Celá simulace je tím nastavená, a stačí ji tak pouze spustit. Vzhledem k velké náročnosti iteračního výpočtu vlivem teplotní a místy i tlakové závislosti parametrů trval výpočet poměrně dlouho a objem vygenerovaných dat byl řádově 10 GB. Celkem rozdělil ABAQUS výpočet na téměř 3700 kroků.

Na *obrázcích 60a a 60b* je vidět vektorové pole popisující směr a velikost proudové hustoty (výstupní proměnná ECD) v časech $t = 0.005$ a $t = 0.015$, což odpovídá maximu a minimu první periody. Ze směru šipek je jasně patrné opakující se přepólování toku proudu. Pro názornost je sestava zobrazena v řezu.

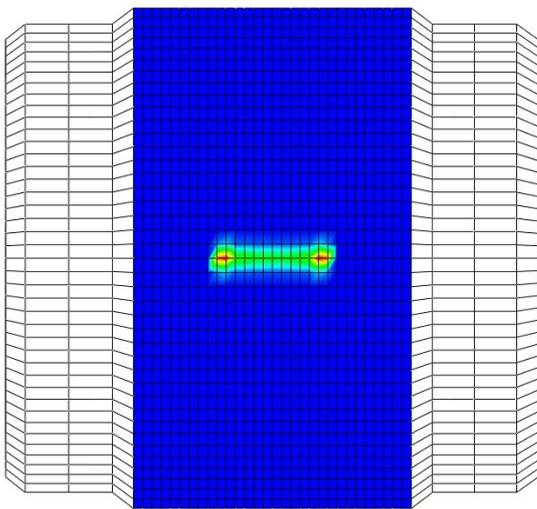


obr. 60a: Vektorové pole proudové hustoty v čase $t = 0,005$ s.

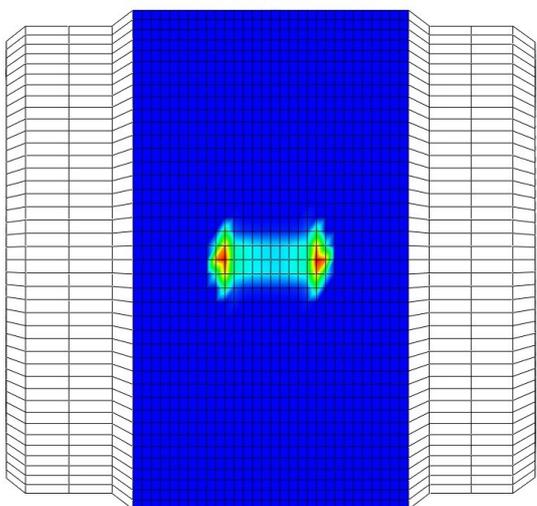
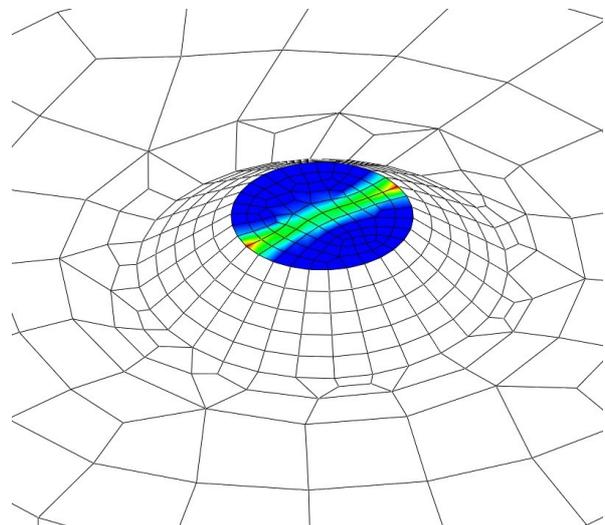


obr. 60b: Vektorové pole proudové hustoty v čase $t = 0,015$ s.

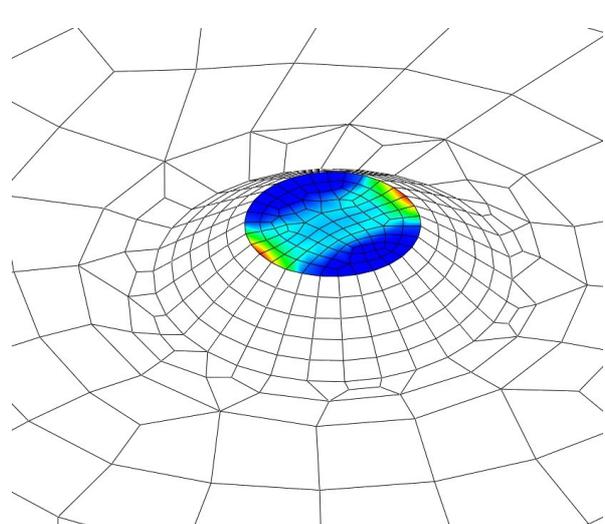
Na *obrázku 61a* je znázorněn stykový tlak (výstupní proměnná *CPRESS*) mezi okem a pístnicí na počátku simulace průchodu proudu ($t = 0 \text{ s}$), na *obrázku 61b* je pak stykový tlak na konci simulace ($t = 0,54 \text{ s}$). Levá část ukazuje dotykovou plochu oka, pravá pak zobrazuje pístnici. Za povšimnutí stojí, že největší kontaktní tlak je po stranách a naopak prostředek součásti je lehce odlehčen. To plně odpovídá způsobu působení síly z čepu na oko. Maximální tlak v čase $t = 0 \text{ s}$ je $\sigma_{t=0}^{MAX} = 3140 \text{ MPa}$, v čase $t = 0,54 \text{ s}$ je však tato hodnota výrazně menší, a to $\sigma_{t=0,54}^{MAX} = 1820 \text{ MPa}$. Na vině je klesající tuhost elementů s jejich rostoucí teplotou, díky čemuž se se vzrůstající teplotou rozšiřuje styčná plocha mezi svařovanými součástmi.



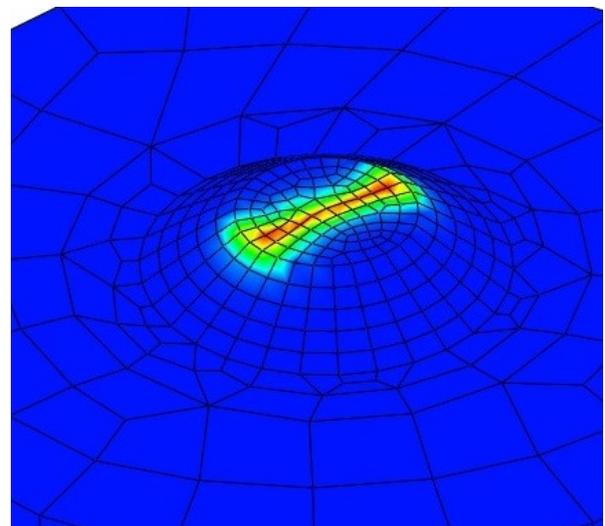
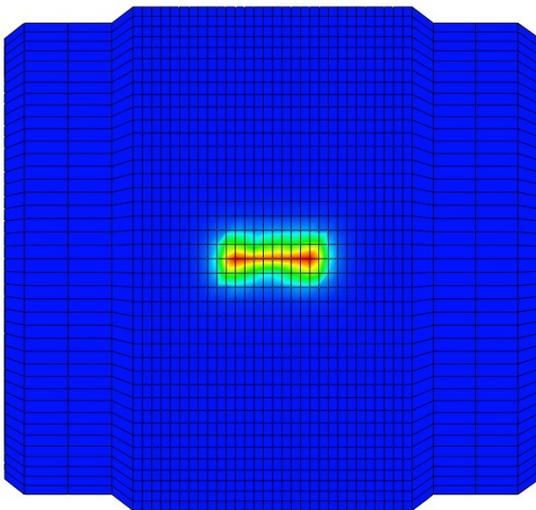
obr. 61a: Dotykový tlak mezi okem a pístnicí na počátku simulace ($t = 0 \text{ s}$).



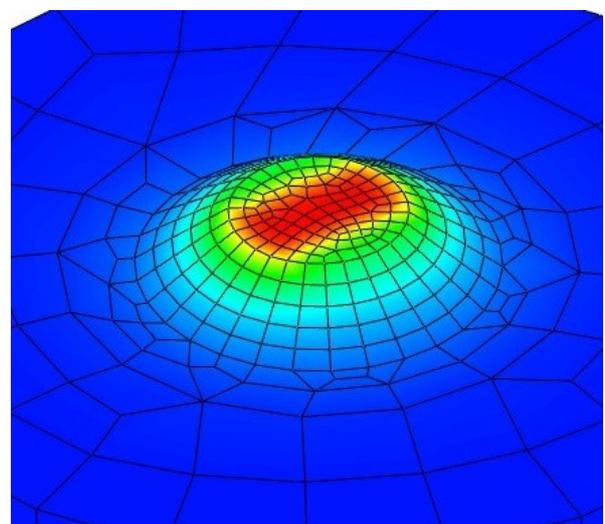
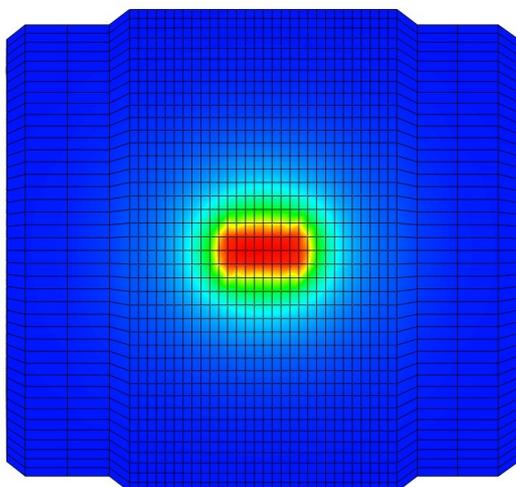
obr. 61b: Dotykový tlak mezi okem a pístnicí na konci simulace ($t = 0,54 \text{ s}$).



Na *obrázcích 62a* a *62b* je pak obdobná situace pro teplotu na povrchu součástí (výstupní proměnná $NT11$), pro čas po jedné periodě proudu ($t = 0,02 \text{ s}$) a opět pro konec simulace ($t = 0,54 \text{ s}$). Z rozložení pole je patrné, že zpočátku se vznikající teplo soustředí do úzké oblasti dotyku. Postupně se díky zvětšení kontaktní plochy a vedení tepla rozšíří na několikanásobně větší část. Maximální teplota je v prvním případě $T_{t=0,02}^{MAX} = 820 \text{ }^\circ\text{C}$, v druhém pak dosahuje hodnoty $T_{t=0,54}^{MAX} = 1170 \text{ }^\circ\text{C}$. Z vypočtených hodnot je patrné, že svařovací proud $I_{ef} = 3000 \text{ A}$ je s velkou pravděpodobností malý a za daný čas nedokáže ani natavit oblast ani ji dostatečně prohřát (roztavit větší část výstupku).

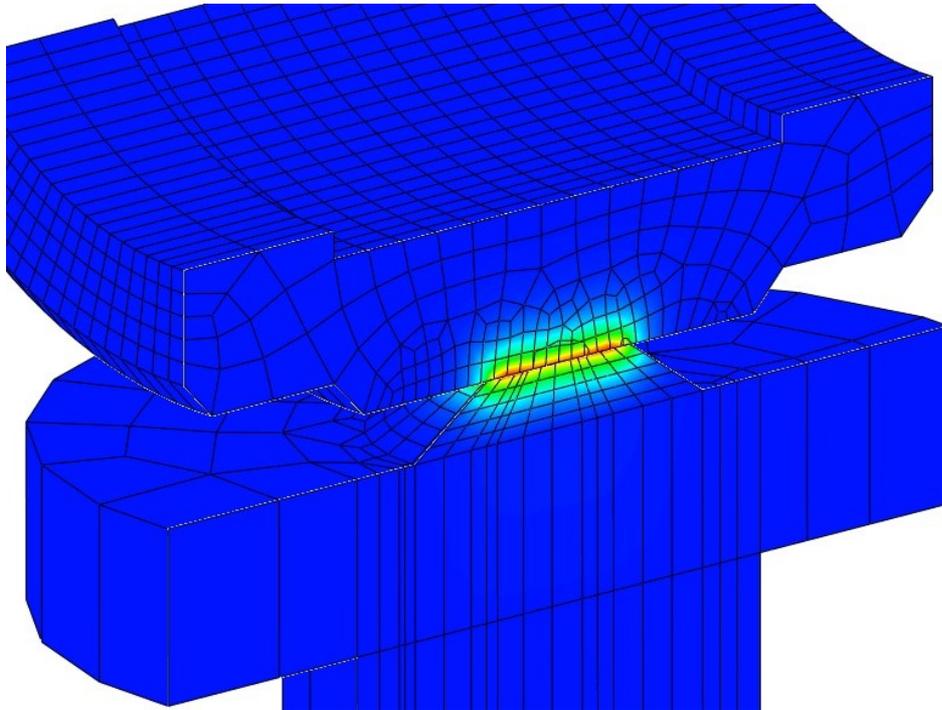


obr. 62a: Teplota mezi okem a pístnicí po 1 periodě proudu ($t = 0,02 \text{ s}$).

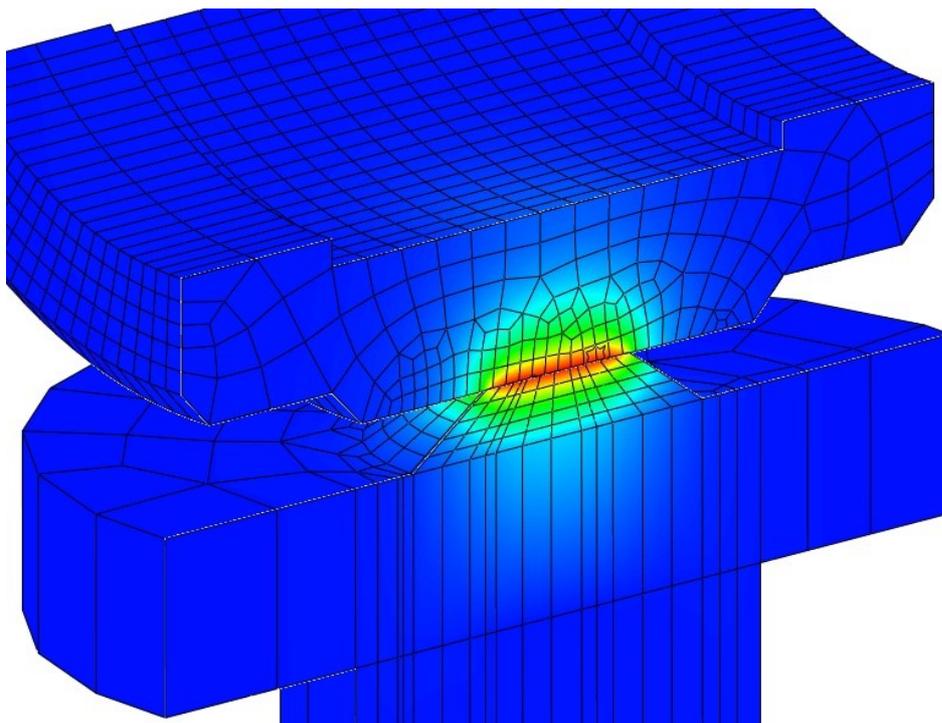


obr. 62b: Teplota mezi okem a pístnicí na konci simulace ($t = 0,54 \text{ s}$).

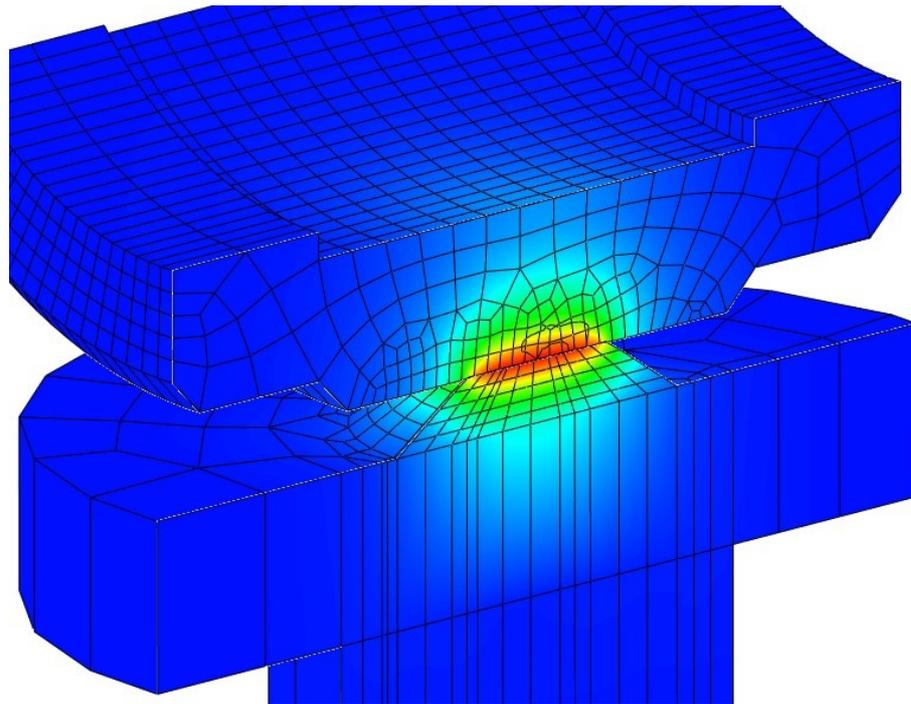
Poslední série obrázků 63a – 63d demonstruje na řezu sestavou vývoj teplot uvnitř součástí. Díky teplotní vodivosti a nárůstu celkové dodané tepelné energie dochází k postupnému prohřívání obou součástí směrem do materiálu. Vzhledem k velmi krátkému času simulovaného děje se téměř neuplatňuje ochlazování vlivem přestupu tepla.



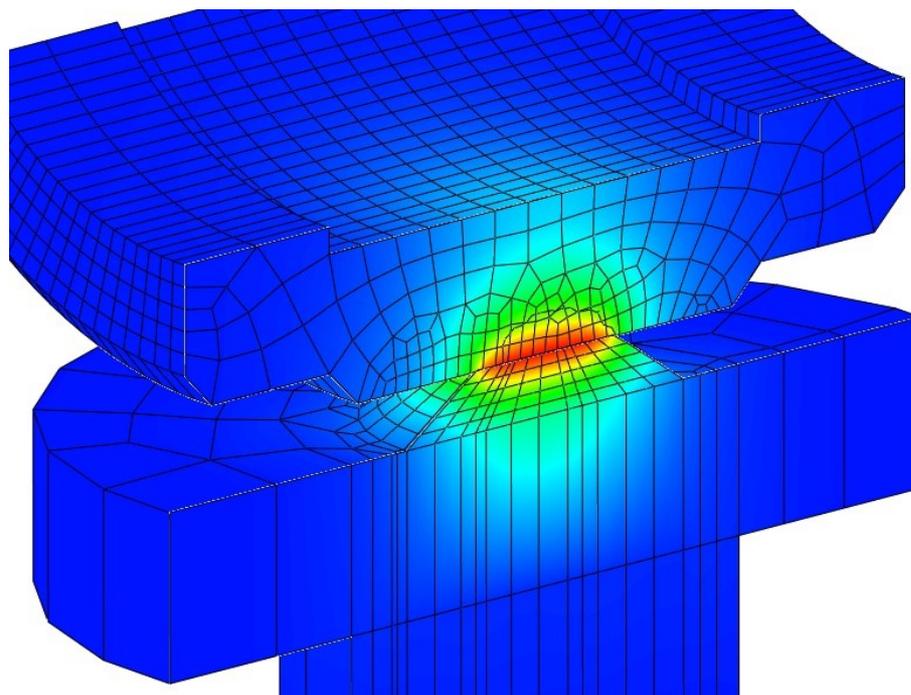
obr. 63a: Teplotní pole v pístnici a oku v čase $t = 0,02$ s.



obr. 63b: Teplotní pole v pístnici a oku v čase $t = 0,20$ s.



obr. 63c: Teplotní pole v pístnici a oku v čase $t = 0,38$ s.



obr. 63d: Teplotní pole v pístnici a oku v čase $t = 0,54$ s.

Závěrem bych chtěl podotknout, že prezentovaný model si neklade za cíl plně simulovat proces svařování. K zjištění skutečné míry provaření, velikosti roztavené oblasti atd. by bylo zapotřebí začlenit další mechanismy, jakými je např. plasticita, využít elementy simulující správně tekutou lázeň apod. To výrazně převyšuje rámec této práce. Z prezentovaných výsledků je však vidět, že již takto relativně jednoduchý model dokáže poskytnout plně uspokojivý řádový odhad (či verifikaci) svařovacích parametrů.

5. Závěr

Ve své diplomové práci jsem se zabýval přestavbou lisu pro odporové svařování. Konkrétně se jednalo o konstrukci svařovacího přípravku pro výstupkové svařování dvou částí automobilového tlumiče. Zadavatelem byla firma Tenneco, Monroe Czechia, s.r.o., zhotovitelem pak firma KOPR spol. s r.o., zastoupená mnou a panem Ing. Růžkem. Celé zařízení jsem detailně popsal včetně nejdůležitějších pevnostních a kontrolních výpočtů vybraných uzlů a vysvětlil jsem princip jeho funkce.

Teoretický úvod jsem přizpůsobil potřebám této práce a popsal jsem v něm jak základy teorie výstupkového svařování, tak i fakta týkající se technologičnosti konstrukce. Celá problematika svařování je výrazně svázána normami a dalšími předpisy, kterými je třeba se řídit, aby byla zabezpečena požadovaná a hlavně opakovatelná jakost vytvářených spojů.

Podle těchto norem a dalších doporučení jsem provedl návrh svařovacích parametrů pro obtížně svařitelnou ocel C40. Vzhledem k tomuto druhu oceli a nestandardnímu tvaru spojovaných dílů nelze předem stanovit vyhovující parametry. Je to záležitostí především zkušeností s obdobnými výrobky, které jsou výrobním know-how firmy Tenneco. Pro případ nových výrobků, kdy tyto zkušenosti nemáme, musíme vycházet z určitých předpokladů, a právě k tomuto účelu slouží mnou stanovený předběžný postup svařování (pWPS).

V poslední řadě jsem se proto věnoval základním simulacím odporového svařování. Odladěný matematický model může ušetřit značné výrobní náklady a čas spojený s verifikací a následnou úpravou svařovacích parametrů. Pro ověření MKP modelu jsem provedl jak stacionární, tak nestacionární analýzu ohřevu způsobeného průchodem elektrického proudu a následně nestacionární analýzu volného ochlazování. Právě z těchto 2 fází se skládá proces odporového svařování. Srovnáním analyticky vypočtených výsledků s výsledky získanými simulací v ABAQUSu jsem ověřil správnost vytvořeného modelu. Zároveň jsem porovnal výsledky obdržené při neuvažování a uvažování teplotní závislosti fyzikálních konstant, kdy rozdíly byly velmi výrazné.

Nakonec jsem nastínil princip a vytvořil zjednodušený MKP model pro svařování pístitnice + oka. Při uvažování teplotní závislosti materiálových konstant a definování kontaktních vlastností jsem získal výsledky, které svou podobou odpovídají realitě. Pro využití modelu k ověření konkrétních hodnot odpovídajících realitě by se musel model ještě více rozvinout, avšak pro řádové testování je i v této podobě použitelný.

Seznam obrázků

obr. 1: Držák elektrody pro obloukové svařování. Ukázka z patentu Benardose a Olszewského. ^[12a]	4
obr. 2: První obalovaná elektroda sestavená Oscarem Kjellbergem. Ukázka z jím podaného patentu z roku 1907. ^[12b]	5
obr. 3: Tyršův most z roku 1933. Svého času nejdelší celosvařovaný most na světě. ^[13]	6
obr. 4: Skica z patentu Elihu Thomsona pojednávající o metodách odporového svařování. ^[12c]	8
obr. 5: Základní druhy odporového svařování – schéma a) – e). ^[14]	11
obr. 6: Režimy svařování v závislosti na množství přivedeného tepla Q. ^[14]	12
obr. 7: Svařovací cyklus pro výstupkové svařování na lisech. ^[14]	13
obr. 8: Vnitřní a přechodové odpory u výstupkového svařování. ^[17]	14
obr. 9a: Tvary výstupků (levý = dle ČSN EN 28167; pravý = vhodný pro tenké plechy). ^{[11],[17],[N]}	15
obr. 9b: Tvary výstupků (levý = pro velký svar; pravý = upravený pro tenké plechy). ^{[11],[17],[N]}	16
obr. 10: Typy spojů dle konstrukce. V pořadí zleva – přeplátované, tupé, kolmé a křížové. ^[14]	17
obr. 11: Průběhy svařovacího proudu v závislosti na použitém zdroji proudu a řídicí jednotce. ^[19]	18
obr. 12: Princip ultrazvukového zkoušení svarů.	19
obr. 13: Příklady DT a NDT zkoušek u výstupkových odporových svarů a)-e). ^{[21],[22]}	21
obr. 14a: Část výkresu svařence pístitnice	22
obr. 14b Část výkresu svařence pláště	22
obr. 15: Konstruktivní uspořádání sestavy automobilového tlumiče. ^[23]	23
obr. 16: Svařovací lis s původním přípravkem – dolní elektroda (vlevo) + horní elektroda (vpravo).....	24
obr. 17: Štítek svařovacího lisu	25
obr. 18: Příklad jevu zvaného shunting (u bodového svařování) – část proudu protéká jinou cestou, než je požadováno. ^[24]	27
obr. 19: Teplotní pole elektrod při bodovém svařování (velikost proudu odpovídá svarové čochce o velikosti 5 mm, přítláčná síla = 1900 N, čas = 10 period). ^[16]	28

obr. 20: Ukázka změknutí slitin Cu-Cr-Zr pro výdrž jedné hodiny na příslušné teplotě. ^[25]	28
obr. 21a: Přední pohled na horní elektrodu.	30
obr. 21b: Zadní pohled na horní elektrodu.....	30
obr. 22: Schematický průchod proudu horní elektrodou (řez sestavou).....	31
obr. 24a: Schematické zobrazení uložení E7/g6 pro průměr 16 mm.	33
obr. 24b: Schematické zobrazení uložení H7/r6 pro průměr 22 mm.	33
obr. 25: Rozměry styčné plochy mezi čepem a okem.	35
obr. 26: Rozvrtání kostky pro chlazení horní elektrody.....	36
obr. 27: Stanovení optimálního průtoku chladicí kapaliny. ^[32]	37
obr. 28: Zatížení a uložení čepu.....	38
obr. 29: Krajiní polohy čepu (pohled ze spodu).	41
obr. 30: Silový rozbor působení pneumatického válce na čep.....	42
obr. 31: Poka – Yoke.....	44
obr. 32: Frézování ploch kontrolního palce.....	45
obr. 33: Schéma realizace logických funkcí.....	47
obr. 34: Způsob nezávislého šimsování válce a vedení.....	48
obr. 35: Pohled na dolní elektrodu (modifikace pro svařování pístnic).....	49
obr. 36: Detail modifikace pro svařování pístnic (řez osou). Vlevo řez zepředu, vpravo řez zleva.....	50
obr. 37: Detail modifikace pro svařování plášťů (řez osou). Vlevo řez zepředu, vpravo řez zleva.....	52
obr. 38a: Schematický průchod proudu skrz dolní elektrodu pro založenou pístnici (řez sestavou).	53
obr. 38b: Schematický průchod proudu skrz dolní elektrodu pro založený plášť (řez sestavou).	53
obr. 39: Průchod proudu jednotlivými větvemi při paralelním zapojení obvodů.....	54
obr. 40: Schéma průtoku chladicí kapaliny mosaznou kostkou.	55
obr. 41: Stavitelný mechanismus dolní elektrody.	56
obr. 42: Rozbor sil v horním kloubu dolní elektrody (řez spojením).	57
obr. 43: Rozbor sil v dolním kloubu dolní elektrody (řez spojením).....	59
obr. 44: Aretace pomocí odpružených šroubů s kuličkou.....	60
obr. 45: Hlavní tyč dolní elektrody.	61
obr. 46: Horní část přípravku před započítáním svařování pístnice.....	62

obr. 47: Postup založení a vyjmutí svařovaných dílů pístnice.....	64
obr. 48a: Celkový pohled na pracoviště s instalovaným svařovacím přípravkem.	65
obr. 48b: Detail svařovacího prostoru stroje v modifikaci pro svařování pístnic.	66
obr. 48c: Detail založených dílů (pístnice + oko).	67
obr. 49: Závislost tvrdosti na obsahu uhlíku u běžných uhlíkových ocelí. ^[45]	68
obr. 50: Typické podmínky pro výstupkové svařování (nepovlakované měkké oceli). ^[N]	70
obr. 51: Extrapolace podmínek svařování.	71
obr. 52: Modelový příklad č. 1 – Kvádr, stacionární ohřev elektrickým proudem.....	78
obr. 53a: 1D teplotní pole vzniklé průchodem elektrického proudu.	80
obr. 52b: Ohmický úbytek napětí.	80
obr. 54: Modelový příklad č. 2 – Kvádr, nestacionární ohřev elektrickým proudem.	81
obr. 55: 1D teplotní pole vzniklé průchodem elektrického proudu.....	82
obr. 56: Porovnání vývoje teplot pro lineární a nelineární model fyzikálních konstant.	84
obr. 57: Modelový příklad č. 3 – Kvádr, nestacionární volné ochlazování v okolním prostředí.....	85
obr. 58: 3D teplotní pole po 300 s volného ochlazování v okolním prostředí.	87
obr. 59: Zjednodušení sestavy pístnice a pohled na výslednou konečně-prvkovou síť.	89
obr. 60a: Vektorové pole proudové hustoty v čase $t = 0,005$ s.	91
obr. 60b: Vektorové pole proudové hustoty v čase $t = 0,015$ s.	91
obr. 61a: Dotykový tlak mezi okem a pístnicí na počátku simulace ($t = 0$ s).....	92
obr. 61b: Dotykový tlak mezi okem a pístnicí na konci simulace ($t = 0,54$ s).....	92
obr. 62a: Teplota mezi okem a pístnicí po 1 periodě proudu ($t = 0,02$ s).....	93
obr. 62b: Teplota mezi okem a pístnicí na konci simulace ($t = 0,54$ s).....	93
obr. 63a: Teplotní pole v pístnici a oku v čase $t = 0,02$ s.....	94
obr. 63b: Teplotní pole v pístnici a oku v čase $t = 0,20$ s.....	94
obr. 63c: Teplotní pole v pístnici a oku v čase $t = 0,38$ s.....	95
obr. 63d: Teplotní pole v pístnici a oku v čase $t = 0,54$ s.....	95

Seznam tabulek

tab. 1: Základní metody svařování podle ČSN EN ISO 4063. ^[N]	9
tab. 2: Přehled nejdůležitějších metod svařování podle ČSN EN ISO 4063. ^[N]	10
tab. 3: Vybrané materiály elektrod a jejich vlastnosti dle ČSN EN ISO 5182. ^[N]	29
tab. 4: Statické koeficienty tření vybraných kombinací materiálů. ^{[37],[38],[39],[40],[41]}	43
tab. 5: Pravdivostní tabulka vstupů a výstupu.....	46
tab. 6: Návrh parametrů pro výstupkové svařování pístnic resp. plášťů z oceli C40.....	73
tab. 7: Teplotní stupnice pro vybrané doby trvání ohřevu.	82
tab. 8: Změna teplotní stupnice pro nekonstantní parametry.	84
tab. 9: Hodnoty potřebné pro a získané z Heislerova diagramu.	86

Seznam příloh

1. Soupis vybraných norem vztahujících se k výstupkovému svařování.....	1
2. Technické zadání	3
3. Materiálový list oceli C40 (ČSN 12 041, AISI 1040) ^[47]	5
4. Materiálový list slitiny CuCrZr ^[36]	6
5. Heislerův diagram pro nestacionární teplotní pole nekonečné desky ^{[52],[53]}	7
6. Teplotní vlastnosti uhlíkových ocelí dle směrnice EN 1993, Eurocode 3 ^[55]	9
7. Grafy teplotní závislosti vybraných fyzikálních konstant pro ocel C40 ^{[54],[55],[56]}	11
8. Přechodový odpor jako funkce kontaktního tlaku a teploty ^{[19],[60]}	12
9. Rovnovážný diagram železo – karbid železa ^[57]	13
10. Výkresová dokumentace	
11. CD s dodatečnými materiály	

Použité zdroje

- [1] *A History of Welding* [online] – [cit. 2015-03-08]
<<http://weldinghistory.org/whfolder/folder/wh1800.html>>
- [2] *Incredible People – Biography of Robert Hare* [online] – [cit. 2015-03-08]
<<http://incredible-people.com/biographies/robert-hare>>
- [3] KOLAŘÍK, L.: *Svařování el. obloukem obalenou elektrodou*, Přednáška z kurzu IWE/IWT, ČVUT FS, Praha, 2015
- [4] *Historický vývoj tavného spojování kovů* [online] – [cit. 2015-03-08]
<http://www.czweld.cz/oc_historie.htm>
- [5] *Historie svařování* [online] – [cit. 2015-03-08]
<<http://coptel.coptkm.cz/reposit.php?action=0&id=19306&instance=2>>
- [6] *Historie svařování v českých zemích* [online] – [cit. 2015-03-08]
<<http://www.cws-anb.cz/t.py?t=2&i=282>>
- [7] *Historie technických plynů v České republice* [online] – [cit. 2015-03-08]
<<http://old.vscht.cz/document.php?docId=11218>>
- [8] *AGA history - Gustaf Dalén* [online] – [cit. 2015-03-08]
<http://www.aga.com/web/web2000/com/wppcom.nsf/pages/History_GustafDalen>
- [9] *A Brief History of Filler Metals* [online] – [cit. 2015-03-08]
<<http://files.aws.org/wj/2007/10/wj200710/wj1007-113.pdf>>
- [10] *Historie svařování v českých zemích – příspěvek č. 2* [online] – [cit. 2015-03-08]
<<http://www.cws-anb.cz/t.py?t=2&i=239>>
- [11] PLÍVA, L.: *Odporové svařování*, SNTL, Praha, 1975
- [12] *Patenty* [online] – [cit. 2015-03-08]
a) <<http://www.google.com/patents/US363320?hl=cs>>
b) <<http://www.google.com/patents/US948764?hl=cs>>
c) <<http://www.google.com/patents/US347142?hl=cs>>
- [13] *Vlastnosti ocelí C38 v porovnání s jemnozrnnými normalizovanými ocelmi S355N...* [online] – [cit. 2015-03-08]
<<http://www.konstrukce.cz>>
- [14] BARTÁK, J.; KUBÍČEK, J.; DANĚK, L.; KANDUS, B.: *Technologie svařování a zařízení*, Učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů, UNO Praha spol. s r.o., Plzeň, 2014
- [15] KLEIN, M.: *Einführung in die DIN-Normen*, Springer-Verlag, 2013 [online] –
– [cit. 2015-03-10] (náhled e-knihy)
<<https://books.google.cz/books?id=rnGoBgAAQBAJ&dq=schwei%C3%9Fverfahren+din+1910&hl=cs>>

- [16] KOLAŘÍK, L.: *Svařování elektrickým odporem*, Přednáška z kurzu IWE/IWT, ČVUT FS, 2014
- [17] NEUMANN, H.: *Odporové svařování*, Přednáška z kurzu IWE/IWT, ČVUT FS, 2014
- [18] ISF AACHEN, *Resistance Spot Welding...*, [online] – [cit. 2015-03-17]
<<http://mercury.kau.ac.kr/welding/Welding%20Technology%20I%20-%20Welding%20Processes/Chapter%208%20-%20Resistance%20Spot%20Welding,%20Resistance%20Projection%20Welding%20and%20Resistance%20Seam%20Welding.pdf>>
- [19] *Parameters in resistance welding*, [online] – [cit. 2015-03-17]
<<http://www.swantec.com/parameters-in-resistance-welding.php>>
- [20] LEINVEBER, J.; VÁVRA, P.: *Strojnické tabulky*, Úvaly, ALBRA, 2005, ISBN 978-80-7361-051-7
- [21] ISO 10447:2015(en) [online] – [cit. 2015-03-19]
<<https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:10447:ed-3:v1:en>>
- [22] ISO 14329:2003(en) [online] – [cit. 2015-03-19]
<<https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:14329:ed-1:v1:en>>
- [23] *Main Structure and Working Principle of Shock Absorber* [online] – [cit. 2015-03-20]
<http://en.focusautoparts.com/cpyy/&FrontComContent_list01-cpyyContId=11&comContentId=11&comp_stats=comp-FrontComContent_list01-cpyy.html>
- [24] WEST, M.: *Spot-On* [online] – [cit. 2015-03-26]
<<http://www.bodyshopbusiness.com/spot-on/>>
- [25] *European Copper Institute – CuCr1Zr* [online] – [cit. 2015-03-26]
<<http://www.conductivity-app.org/alloy-sheet/19>>
- [26] MISUMI online katalog dílů [online] – [cit. 2015-03-30]
<<http://uk.misumi-ec.com>>
- [27] ŠEDIVÝ, P.: *Teplotní závislosti fyzikálních veličin* [online] – [cit. 2015-03-30]
<<http://fyzikalniolympiada.cz/texty/teplota.pdf>>
- [28] *Materiálový list mosazi BS1400 HTB1* [online] – [cit. 2015-03-30]
<<http://www.copperalloys.net/alloys/htb1.php>>
- [29] Fyzikální kabinet Gymnázia. J. Vrchlického, Klatovy – *Tepel. roztažnost a měrná tepel. kapacita* [online] – [cit. 2015-03-30]
<<http://kabinet.fyzika.net/studium/tabulky/tepelna-kapacita-roztaznost.php>>
- [30] *Electrical Conductivity of Materials* [online] – [cit. 2015-03-30]
<<https://www.bluesea.com/resources/108>>
- [31] HINDERT, P.; KRIDER, H.: *Thermal Expansion of Some Copper Alloys* [online] – [cit. 2015-03-30]
<http://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/jres/39/jresv39n5p419_A1b.pdf>

- [32] *Encyklopedie EMC* [online] – [cit. 2015-03-31]
<<http://www.radio.feec.vutbr.cz/emc/index.php?src=node6>>
- [33] *Benteler - Technical information* [online] – [cit. 2015-04-03]
<http://www.helens.dk/fileadmin/author/Technical_info/Bars_Technical_information_hot_rolled.pdf>
- [34] Technical card S355J2 [online] – [cit. 2015-04-03]
<<http://www.novacciai.org/CMS/assets/2014/02/S355J2.pdf>>
- [35] Měření tvrdosti – Tabulka srovnání tvrdosti podle různých metod měření [online] – [cit. 2015-04-03]
<<http://www.merenitvrdosti.cz/tabulka-srovnani-tvrdosti-podle-ruznych-metod-menreni.html>>
- [36] CuCrZr datový list [online] – [cit. 2015-04-02]
<http://www.zmrzlik.cz/pdfzel/cucr_zr_xs_mc.pdf>
- [37] Friction and Coefficients of Friction [online] – [cit. 2015-04-04]
<http://www.engineeringtoolbox.com/friction-coefficients-d_778.html>
- [38] Typical Coefficient of Friction Values for Common Materials [online] – [cit. 2015-04-04]
<<http://blog.mechguru.com/machine-design/typical-coefficient-of-friction-values-for-common-materials/>>
- [39] Coefficient of Friction Equation and Table Chart [online] – [cit. 2015-04-04]
<http://www.engineersedge.com/coefficients_of_friction.htm>
- [40] Coefficient of Friction [online] – [cit. 2015-04-04]
<<http://www.engineershandbook.com/Tables/frictioncoefficients.htm>>
- [41] Reibung (Haft- und Gleitreibung) [online] – [cit. 2015-04-04]
<http://www.chemgapedia.de/vsengine/vlu/vsc/de/ph/14/ep/einfuehrung/dynamik/reibung.vlu/Page/vsc/de/ph/14/ep/einfuehrung/dynamik/kap3_reibung/reibung_01/reibung_01_01.vscml.html>
- [42] Poka-joke / Poka-Yoke [online] – [cit. 2015-04-04]
<<http://cs.wikipedia.org/wiki/Poka-joke>> , <<http://en.wikipedia.org/wiki/Poka-yoke>>
- [43] ŠVEC, V.: *Části a mechanismy strojů – Příklady*, Praha, ČVUT, 1991
- [44] ŠVEC, V.: *Části a mechanismy strojů, spoje a části spojovací*, Praha, ČVUT, 2008, ISBN 978-80-01-04138-3
- [45] KOUKAL, J.; SCHWARZ, D.; HAJDÍK, J.: *Materiály a jejich svařitelnost*, Učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů, Český svářečský ústav s.r.o. & VŠB-TUO, Ostrava, 2009, ISBN 978-80-248-2025-5
- [46] Miller – Handbook for resistance spot welding [online] – [cit. 2015-04-21]
<<https://www.millerwelds.com/pdf/Resistance.pdf>>
- [47] MAURI – Materiálový list oceli C40 [online] – [cit. 2015-04-23]
<http://www.trafileriamauri.com/allegati/prodotti/de/de_C40.pdf>

- [48] ŠPANIEL, M.: Přednášky z předmětu *MKP1*, ČVUT FS, 2013/2014
- [49] ŠESTÁK J; RIEGER, F.: *Přenos hybnosti, tepla a hmoty*, Praha, ČVUT, 1993
- [50] ČERNÝ, F.; SAMEK, L.; SOPKO, B.: *Fyzika I*, Praha, ČVUT, 2009
- [51] ABAQUS Online Documentation
- [52] GUTIERREZ-MIRAVETE, E.: *Separation of Variables in Rectangular Coordinates*
[online] – [cit. 2015-04-28]
<http://www.ewp.rpi.edu/hartford/~ernesto/C_S2000/cht/Notes/cht02a.html>
- [53] *Heat transfer and Aerodynamics* [online] – [cit. 2015-04-28]
<<http://lib.convdocs.org/docs/index-133507.html>>
- [54] MatWeb: *AISI 1040 Steel, as rolled* [online] – [cit. 2015-04-29]
<<http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?MatGUID=c8ada14779744d008a6c3e80f035c5d5&ckck=1>>
- [55] *Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-2: General rules – Structural fire design* [online] – [cit.2015-04-30]
<<https://law.resource.org/pub/eur/ibr/en.1993.1.2.2005.html>>
- [56] Efunda: *Carbon steel AISI 1040* [online] – [cit.2015-04-30]
<http://www.efunda.com/materials/alloys/carbon_steels/show_carbon.cfm?ID=AISI_1040&show_prop=elec&Page_Title=Carbon%20Steel%20AISI%201040>
- [57] Fakulta špeciálnej techniky – TnUAD v Trenčíně – *rovnovážny binárny diagram Fe-Fe₃C* [online] – [cit. 2015-04-30]
<http://fm.tnuni.sk/files/image/km/subory/diagram_Fe_Fe3C.jpg>
- [58] MIETTINEN, J.; LOUHENKILPI, S.: *Calculation of Thermophysical Properties of Carbon and Low Alloyed Steels for Modeling of Solidification Processes*
[online] – [cit. 2015-05-01]
<<http://www.gotrawama.eu/Siderurgia/Calculation%20of%20thermophysical%20properties%20of%200carbon%20and%20low%20alloyed%20steels%20for%20modeling%20of%20solidification%20processes.pdf>>
- [59] VOGLER, M.; SHEPPARD, S.: *Electrical Contact Resistance under High Loads and Elevated Temperatures*, *Welding journal*, 1993 [online] – [cit.2015-05-26]
<https://app.aws.org/wj/supplement/WJ_1993_06_s231.pdf>
- [60] ROGEON, P.; CARRE, P.; COSTA, J.; SIBILIA, G.; SAINDERNAN, G.:
Characterization of electrical contact conditions In spot welding assemblies, *Journal of materials procesing technology*, 2008 [online] – [cit.2015-05-26]
<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013607004773>>
- [N] Označení odkazující na použití příslušné normy jako zdroje. Tato norma je vždy uvedena přímo v textu svým označením i názvem.

PŘÍLOHY

1. Soupis vybraných norem vztahujících se k výstupkovému svařování

Výběr platných českých norem týkajících se výstupkového svařování k 19. 3. 2015

(soupis není úplný)

Označení normy	Název normy
ČSN EN ISO 15609-5	Stanovení a kvalifikace postupů svařování kovových materiálů - Stanovení postupu svařování - Část 5: Odporové svařování
ČSN EN ISO 14554-1,2	Požadavky na jakost při svařování - Odporové svařování kovových materiálů
ČSN EN ISO 15614-12	Stanovení a kvalifikace postupů svařování kovových materiálů - Zkouška postupu svařování - Část 12: Bodové, švové a výstupkové svařování
ČSN EN ISO 6520-2	Svařování a příbuzné procesy - Klasifikace geometrických vad kovových materiálů - Část 2: Tlakové svařování
ČSN EN ISO 14270	Rozměry vzorku a postup pro mechanizované odlupovací zkoušení odporových bodových, švových a výstupkových svarů
ČSN EN ISO 14271	Odporové svařování - Zkoušení tvrdosti podle Vickerse (nízká síla a mikrotvrdost) odporových bodových, výstupkových a švových svarů
ČSN EN ISO 14272	Rozměry vzorku a postup pro křížové zkoušení tahem odporových bodových a výstupkových svarů
ČSN EN ISO 14273	Rozměry vzorku a postup pro zkoušení stříhem odporových bodových, švových a výstupkových svarů
ČSN EN ISO 14323	Odporové bodové a výstupkové svařování - Destruktivní zkoušky svarů - Rozměry vzorku a postup pro rázovou zkoušku stříhem a rázovou křížovou zkoušku tahem
ČSN EN ISO 10447	Odporové svařování - Odlupovací a sekáčové zkoušení odporových bodových a výstupkových svarů



ČSN EN ISO 14329	Odporové svařování - Destruktivní zkoušky svarů - Typy porušení a geometrická měření odporových bodových, švových a výstupkových svarů
ČSN EN ISO 18278-1,2	Odporové svařování - Svařitelnost
ČSN EN 20865	Drážky v upínacích deskách výstupkových svařovacích strojů (ISO 865:1981)
ČSN EN ISO 17677-1	Odporové svařování - Slovník - Část 1: Bodové, výstupkové a švové svařování
ČSN EN ISO 14327	Odporové svařování - Způsoby určení diagramu oblasti svařování při odporovém bodovém, výstupkovém a švovém svařování
ČSN EN ISO 18594	Odporové bodové, výstupkové a švové svařování - Způsob určování přechodového odporu u hliníkových a ocelových materiálů
ČSN EN ISO 16432	Odporové svařování - Postup pro výstupkové svařování nepovlakovaných a povlakovaných nízkouhlíkových ocelí
ČSN EN 28167	Svařování - Výstupky pro odporové svařování (ISO 8167:1989)
ČSN EN ISO 17657-1,2,3,4,5	Odporové svařování - Měření svařovacího proudu při odporovém svařování
ČSN EN ISO 5182	Odporové svařování - Materiály pro elektrody a pomocné vybavení



2. Technické zadání

1/2

TECHNICKÉ ZADÁNÍ

Číslo zakázky : 1276
Název zakázky : Přestavba lisu pro svařování „Base assy chart“ a „Rod upper Washer assy“ + kontrolní přípravek
Zadavatel : Tenneco Europe Monroe Czechia
Vedoucí projektu : Miroslav Štverák
HKP : Ivan Růžek/Marek Sýkora
Projektant : -
Elektro : -
Identifikační číslo : viz. popis zadání

Popis zadání :

1. Přestavba stávajícího svařovacího lisu - identifikační číslo K1925

1.1. Přípravek pro horní zakládání „Loop“ č.v.14.01.01.79 a 14.01.06.32

- předmětem zadání je konstrukce a výroba 1 ks přípravku pro horní zakládání „Loop“ č.v.14.01.01.79 a 14.01.06.32 do zákaznickem repasovaného svařovacího lisu firmy Coskunoz a.s
- konstrukce přípravku bude vycházet z Vaší konstrukční dokumentace „Upper Loop Die“ č.v.28.08.02.00
- přípravek bude dodán vč.snímačů správného založení dílů
- dodávka bude ukončena dopravou přípravku do závodu Tenneco
- *součástí zakázky není* - dodávka náhradních dílů ani spotřebního materiálu
 - zapojení pneuválce do pneuobvodu svařovacího lisu
 - zapojení snímačů do elektroobvodu svařovacího lisu
 - programování a oživení svařovacího lisu

1.2. Rozměrově nastavitelná spodní tyč

- předmětem zadání je konstrukce a výroba 1 ks stranově i výškově rozměrově nastavitelné spodní podpěrné tyče pro zákaznickem repasovaný svařovací lis od firmy Coskunoz a.s.
- konstrukční provedení podpěrné tyče viz.foto v příloze
- dodávka bude ukončena dopravou podpěrné tyče do závodu Tenneco
- *součástí zakázky není* - dodávka náhradních dílů ani spotřebního materiálu

1.3. Spodní přípravek

- předmětem zadání je konstrukce a výroba spodního universálního přípravku vč.nové sady upínacích čelistí lisu z CuCrZr pro svařování sestav „Base assy Chart“ č.v.AD.01.02.53, „Base assy Chart“

2/2

č.v.AD.01.02.36 a „Rod Upper Washer assy“ č.v.01.71.16.93 do žákazníkem repasovaného svařovacího lisu firmy Coskunoz a.s.

- dodávka bude ukončena dopravou dílů do závodu Tenneco
- **součástí nabídky není** - dodávka náhradních dílů ani spotřebního materiálu
 - repase pneumaticky ovládané upínací části svařovacího lisu
 - programování a oživení svařovacího lisu

2. Universální kontrolní přípravek - identifikační číslo K1926

- předmětem zadání je konstrukce a výroba 1 ks universálního přípravku pro kontrolu svařených sestav „Base assy Chart“ č.v.AD.01.02.53, „Base assy Chart“ č.v.AD.01.02.36 a „Rod Upper Washer assy“ č.v.01.71.16.93
- přípravek bude určen pro kontrolu vyosení ok DIM B a rozměry DIM A na výše uvedených svařených sestavách
- konstrukční provedení přípravku obdobné viz.přípravek K1858 ze zakázky 1177 : společná základová deska osazená pro každý kontrolovaný svařenec skupinou s výsuvným kalibrem a skupinou s příkládacím kalibrem pro kontrolu vyosení přivařených ok; upínání každé ze svařených sestav jednou ruční upínkou

Termínový plán :

viz.harmonogram firmy KOPR

V Praze dne 26.09.2014

Vypracoval : Miroslav Štverák

3. Materiálový list oceli C40 (ČSN 12 041, AISI 1040) ^[47]

	C40 Unlegierter Qualitätsstahl	(W. NR. 1.0511)
---	--	-----------------

CHEMISCHE ZUSAMMENSETZUNG: (Chargenanalyse nach der Norm EN 10277-2)

	C %	Si %	Mn %	P %	S %	Cr %	Ni %	Mo %	Cr+Mo+Ni %
VON	0,37	-	0,50	-	-	-	-	-	-
BIS	0,44	0,40	0,80	0,045	0,045	0,40	0,40	0,10	0,63

* MECHANISCHE EIGENSCHAFTEN: (nach der Norm EN 10277-2)

Dicke mm	Gewalzt + geschält poliert (+SH)		kaltgezogen (+C)		
	Härte HB	Rm (MPa)	Rp _{0,2} Mindestwerte (MPa)	Rm (MPa)	A ₅ % Mindestwerte
≥5≤10			540	700 - 1000	6
>10≤16			460	650 - 980	7
>16≤40	163 - 211	550 - 710	365	620 - 920	8
>40≤63	163 - 211	550 - 710	330	590 - 840	9
>63≤100	163 - 211	550 - 710	290	550 - 820	9

* Lieferzustand: unbehandelt.

EIGENSCHAFTEN :

Verbesserte Zerspanbarkeit:

Auf Anfrage kann diese Stahlgüte mit Pb (Blei) – Zusatz zum Beispiel Pb=0,15%±0,35% zur Verbesserung der Zerspanbarkeit geliefert werden.

Schweißbarkeit:

Auf Grund des mittleren-hohen Kohlenstoffgehalts kann diese Stahlgüte mit einigen Vorsichtsmaßnahmen geschweißt werden.

Härtbarkeit:

Niedrige Härtbarkeit; die Eigenschaften dieser Stahlgüte liegen zwischen denjenigen der Stähle mit mittlerem und denjenigen der Stähle mit hohem Kohlenstoffgehalt; deswegen ist die Erhaltung der gewünschten Eigenschaften durch Ölhärten nicht leicht und das Wasserhärten kann zu Brüchen führen.

Anmerkungen :

ÜBEREINSTIMMUNG MIT ANDEREN NORMEN (zur Info) :

UNI 7845 C40	DIN 17200 C40	ISO 683-1 C40	AISI-SAE 1040	AFNOR 35-552 AF60C40
-----------------	------------------	------------------	------------------	-------------------------

4. Materiálový list slitiny CuCrZr [36]

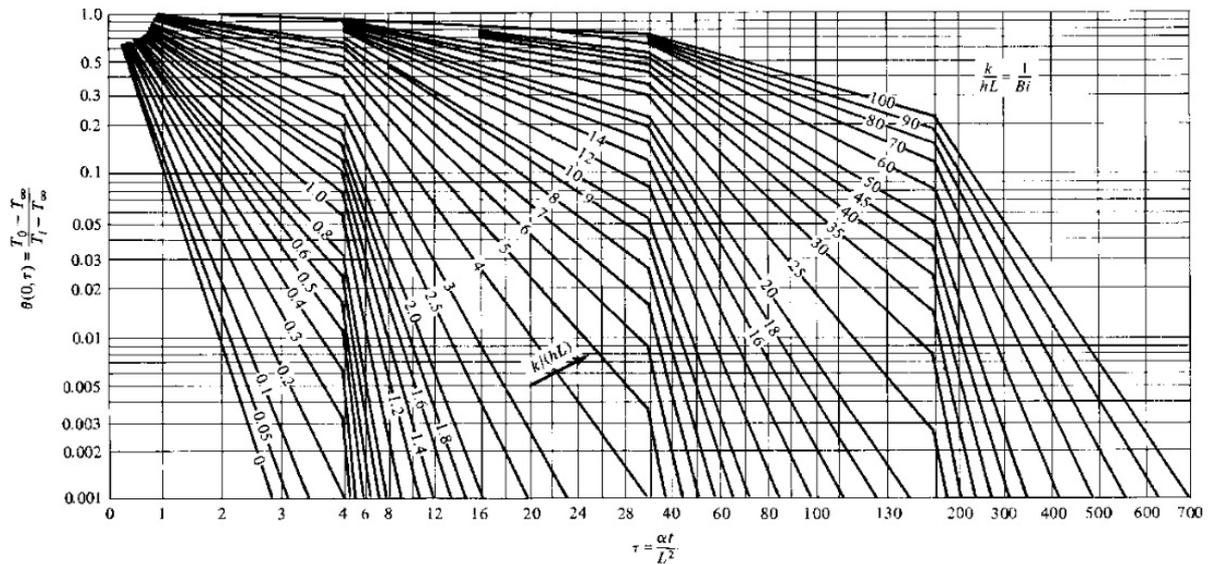
CuCrZr

Datový list

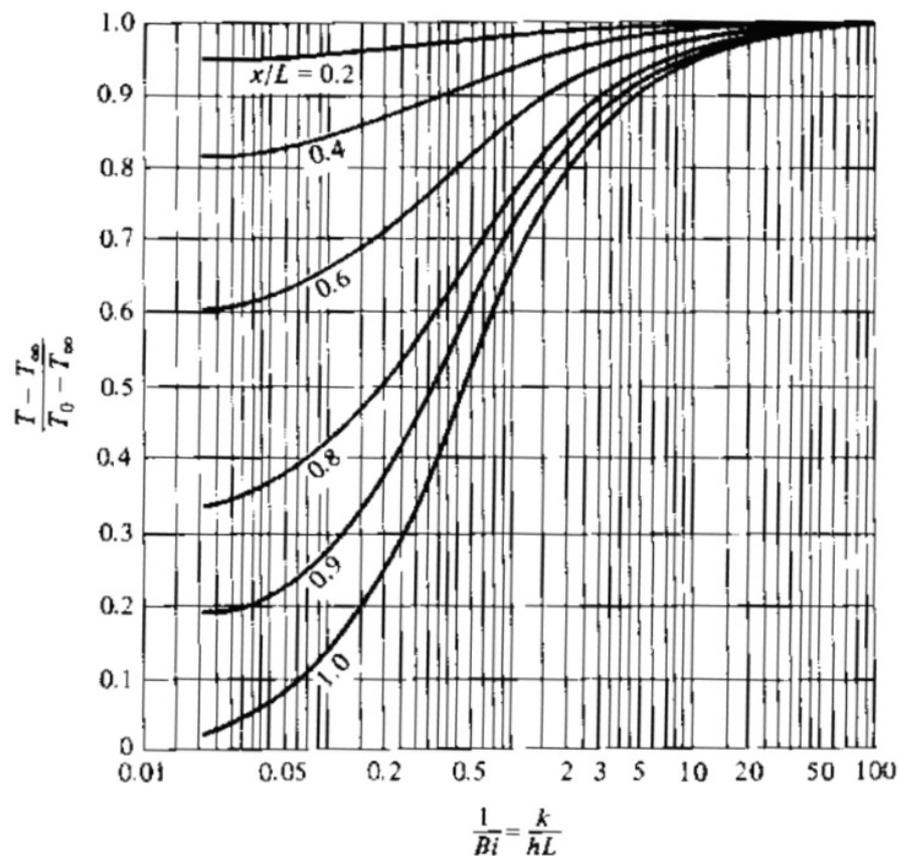
Zkrácené označení	CW106C	Chemické složení	Cr	Zr	Cu
Zkrácené pojmenování	CuCrZr	(údaje v %)	0,8	0,08	zbytek
Klasifikace	DIN ISO 5782 R.W.M.A.	Třída A 2/3 Třída 2			
Vlastnosti materiálu	Tepelně vytvrzená slitina mědi s vysokou tvrdostí a pevností při vysoké elektrické vodivosti, třískově obrobitelná				
Pokyny k použití	<ul style="list-style-type: none"> Vysoce zatížitelné elektrody pro odporové svařování 				
Mechanické vlastnosti	Stav	po popouštěcím žhání taženo a vytvrzeno			
	Průřez		do 20 mm Ø		
	Tvrдость	HB 10/2,5	160		
	Pevnost v tahu	N/mm ²	min. 540		
	Mez kluzu	N/mm ²	min. 450		
	Tažnost L=5D	%	min. 8		
	Modul pružnosti	kN/mm ²	108		
	Modul torze	kN/mm ²	45		
	Mez stlačitelnosti	%	95 – 100% meze kluzu		
Fyzikální vlastnosti	Elektrická vodivost 293 K (20 °C)	MS/m	min. 43		
	Elektrický odpor 293 K (20 °C)	Ωmm ² m ⁻¹	0,023		
	Teplotní koeficient elektrického odporu 273-573 K (0- 300 °C)	K ⁻¹	0,00367		
	Teplotní koeficient termické roztažnosti 273-573 K (0- 320 °C)	K ⁻¹	17,0 · 10 ⁻⁶		
	Měrné teplo	Jg ⁻¹ K ⁻¹	0,376		
	Tepelná vodivost 293 K (20 °C)	Wm ⁻¹ K ⁻¹	ca. 320		
	Hustota	gcm ⁻³	8,9		
Dodávaná provedení	Kulaté tyče				

5. Heislerův diagram pro nestacionární teplotní pole nekonečné desky [52],[53]

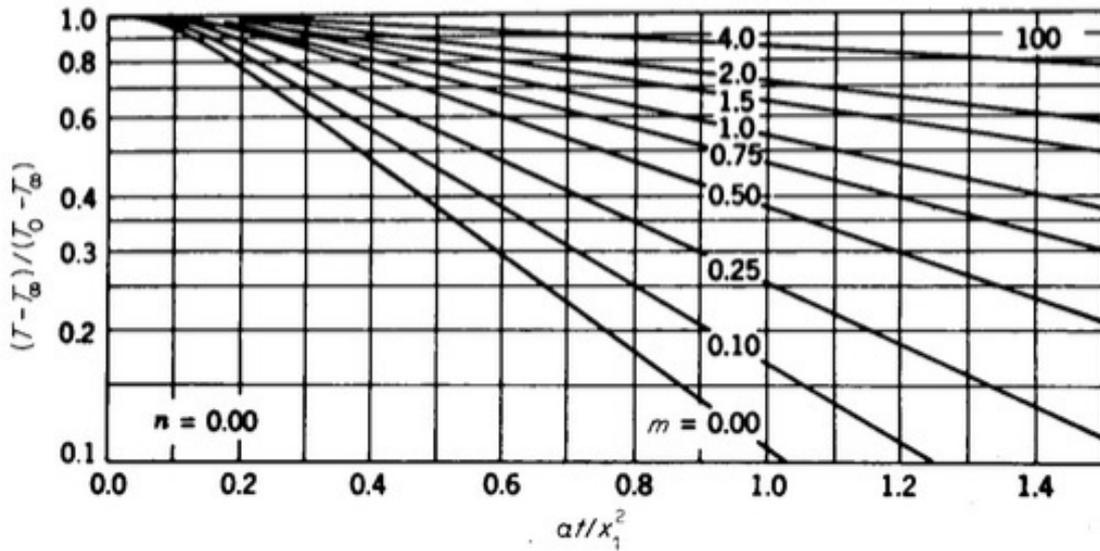
- Pro široký interval hodnot $\left(Fo = 0 - 700 ; \frac{1}{Bi} = 0 - 100 \right)$ a střed desky $\left(\frac{x}{L} = 0 \right)$



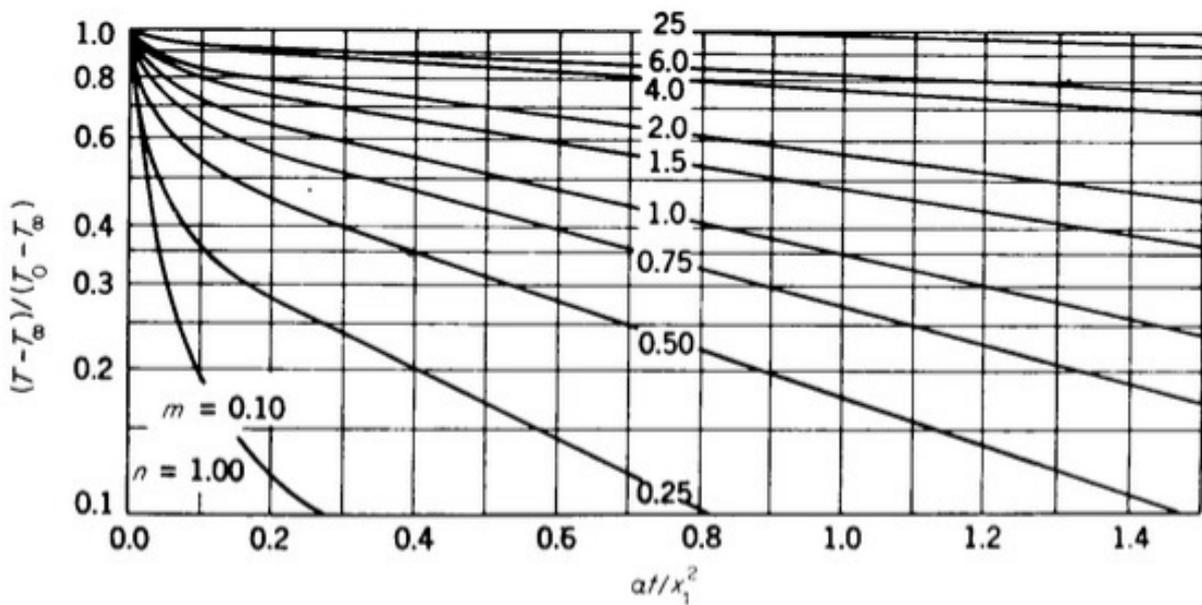
- Přepočít pro různé vzdálenosti od středu desky $\left(\frac{x}{L} = 0 - 1 \right)$



- Pro úzký interval hodnot $\left(Fo = 0 - 1,4; \frac{1}{Bi} = 0 - 4, 100\right)$ a střed desky $\left(\frac{x}{L} = 0\right)$



- Pro úzký interval hodnot $\left(Fo = 0 - 1,4; \frac{1}{Bi} = 0 - 4, 100\right)$ a kraj desky $\left(\frac{x}{L} = 1\right)$



6. Teplotní vlastnosti uhlíkových ocelí dle směrnice EN 1993, Eurocode 3 ^[55]

- Délková teplotní roztažnost – relativní prodloužení

– for $20\text{ °C} \leq \theta_a < 750\text{ °C}$:

$$\Delta l/l = 1,2 \times 10^{-5} \theta_a + 0,4 \times 10^{-8} \theta_a^2 - 2,416 \times 10^{-4}$$

– for $750\text{ °C} \leq \theta_a \leq 860\text{ °C}$:

$$\Delta l/l = 1,1 \times 10^{-2}$$

– for $860\text{ °C} < \theta_a \leq 1200\text{ °C}$:

$$\Delta l/l = 2 \times 10^{-5} \theta_a - 6,2 \times 10^{-3}$$

- Měrná tepelná kapacita

– for $20\text{ °C} \leq \theta_a < 600\text{ °C}$:

$$c_a = 425 + 7,73 \times 10^{-1} \theta_a - 1,69 \times 10^{-3} \theta_a^2 + 2,22 \times 10^{-6} \theta_a^3 \text{ J/kgK}$$

– for $600\text{ °C} \leq \theta_a < 735\text{ °C}$:

$$c_a = 666 + \frac{13002}{738 - \theta_a} \text{ J/kgK}$$

– for $735\text{ °C} \leq \theta_a < 900\text{ °C}$:

$$c_a = 545 + \frac{17820}{\theta_a - 731} \text{ J/kgK}$$

– for $900\text{ °C} \leq \theta_a \leq 1200\text{ °C}$:

$$c_a = 650 \text{ J/kgK}$$

- Tepelná vodivost

– for $20\text{ °C} \leq \theta_a < 800\text{ °C}$:

$$\lambda_a = 54 - 3,33 \times 10^{-2} \theta_a \text{ W/mK}$$

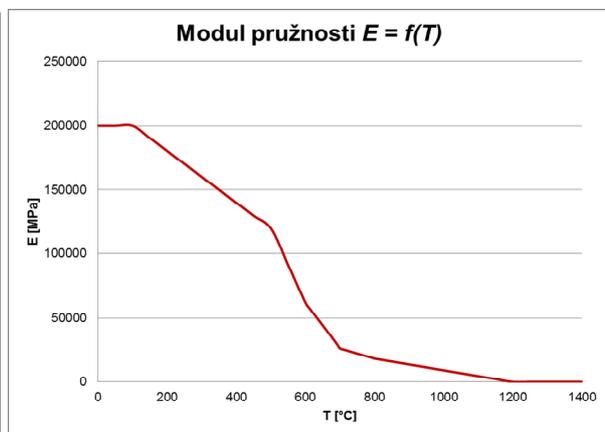
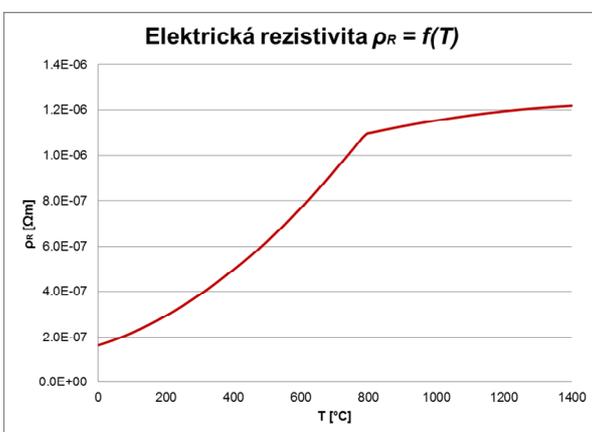
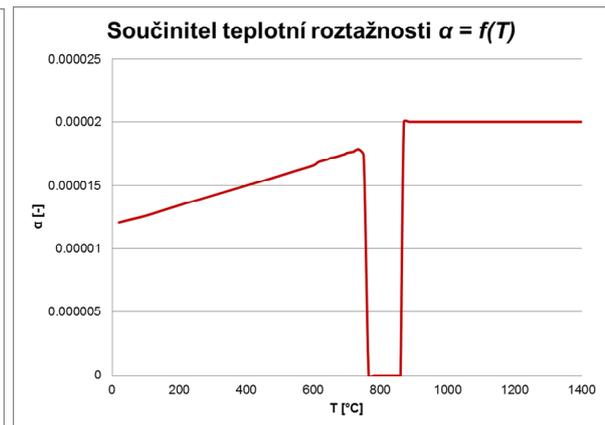
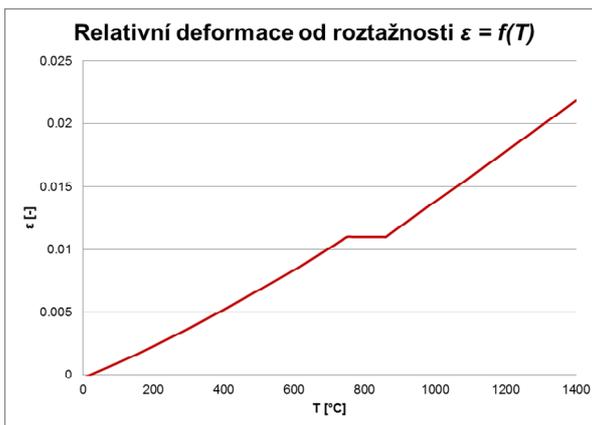
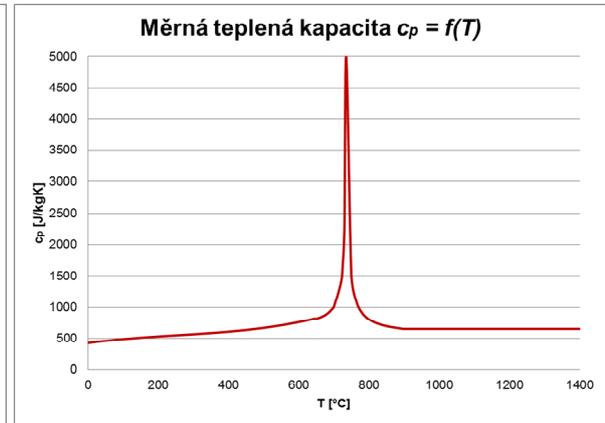
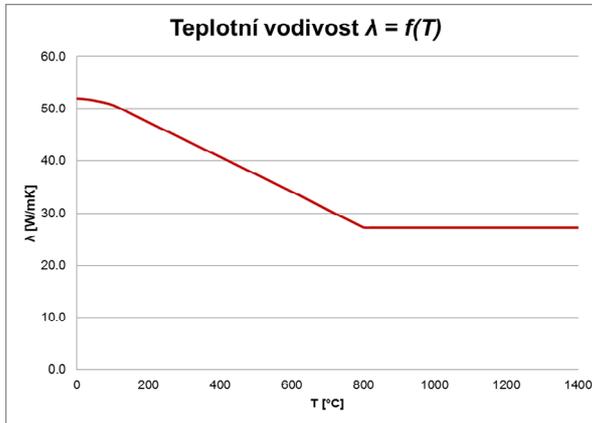
– for $800\text{ °C} \leq \theta_a \leq 1200\text{ °C}$:

$$\lambda_a = 27,3 \text{ W/mK}$$

- Modul pružnosti

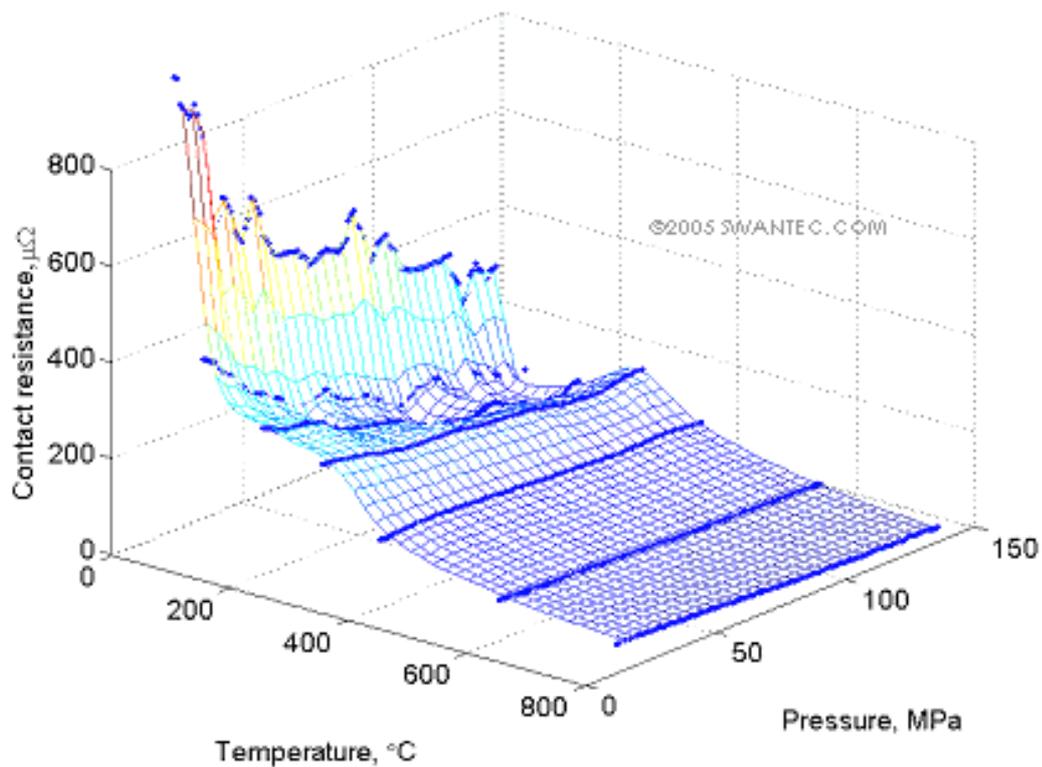
Steel Temperature θ_a	Reduction factor (relative to E_a for the slope of the linear elastic range $k_{E,\theta} = E_{a,\theta}/E_a$)
20 °C	1,000
100 °C	1,000
200 °C	0,900
300 °C	0,800
400 °C	0,700
500 °C	0,600
600 °C	0,310
700 °C	0,130
800 °C	0,090
900 °C	0,0675
1000 °C	0,0450
1100 °C	0,0225
1200 °C	0,0000

7. Grafy teplotní závislosti vybraných fyzikálních konstant pro ocel C40 [54],[55],[56]

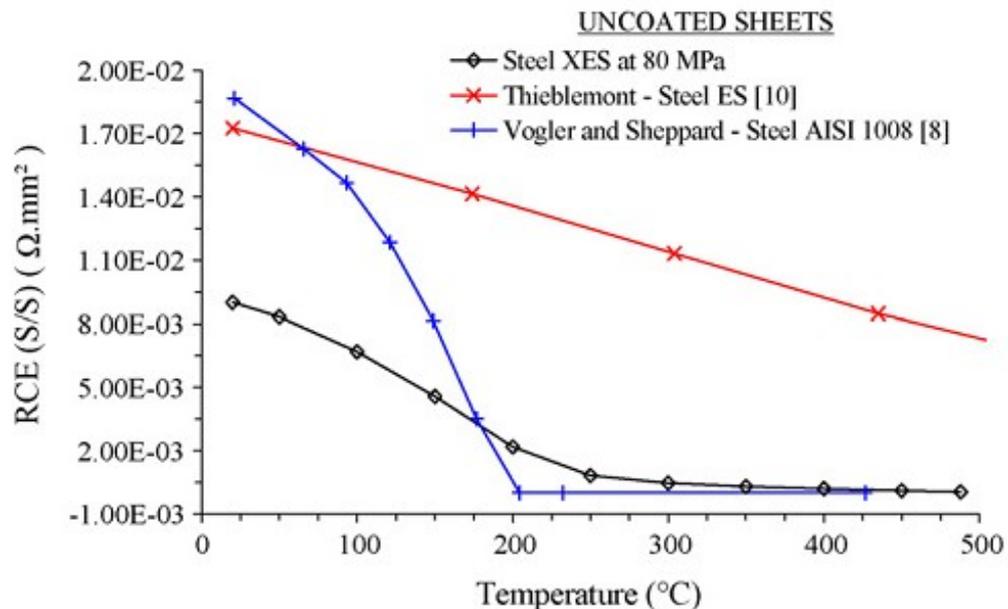


8. Přejchodový odpor jako funkce kontaktního tlaku a teploty [19],[60]

- Charakteristický průběh přechodového odporu



- Charakteristický průběh přechodového odporu



9. Rovnovážný diagram železo – karbid železa [57]

