

Porovnání nízkoteplotního a vysokoteplotního kontaktního svařování plastů horkým elementem

Bc. Pavla Hradilová

Diplomová práce
2015



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Pavla Hradilová**
Osobní číslo: **T13474**
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Konstrukce technologických zařízení**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Porovnání nízkoteplotního a vysokoteplotního kontaktního svařování plastů horkým elementem**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte literární rešerši na dané téma.
2. Navrhněte vhodné zkoušky svarů.
3. Otestujte navržené zkoušky svarů.
4. Vyhodnoťte a porovnejte zjištěné výsledky.

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

Dle doporučení vedoucí diplomové práce.

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Eva Hnátková
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

30. ledna 2015

Termín odevzdání diplomové práce:

13. května 2015

Ve Zlíně dne 30. ledna 2015


doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan




prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.
ředitel ústavu

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby ¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 27. 4. 2015

Hradilová Pavla
.....

¹⁾ zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevdělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

²⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní dílo).

³⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlídá k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Cílem diplomové práce je porovnání nízkoteplotního a vysokoteplotního kontaktního svařování plastů horkým elementem. Porovnání se provádělo na příkladu dílu z neplněného polyoxymethylenu (kopolymeru). Požadavkem bylo zohlednění krátkodobého a dlouhodobého vlivu teplotní degradace materiálu v ovlivněné oblasti svaru v závislosti na kvalitě a pevnosti spoje. V teoretické části je popsána technologie, hlavní procesní parametry nezbytné pro vývoj procesu svařování a kapitoly s požadavky na svarové spojení a jeho kvalitu provedení. V závěru jsou uvedeny zkoušky tepelné degradace, které by měly být hlavním přínosem diplomové práce v praktické části, která je v první fázi zaměřena na hledání optimálních svařovacích parametrů pro obě oblasti svařování. U optimálních parametrů byla provedena zkouška těsnosti, pevnosti a ověřena kvalita provedení svarového spojení. Poté následovaly zkoušky tepelné degradace materiálu v ovlivněné oblasti svarového spoje.

Klíčová slova: svařování plastů, horký element, DOE, těsnost, destrukční zkoušky, mikroskopická analýza, analýza způsobilosti, degradace.

ABSTRACT

The aim of this master thesis is to compare low-temperature and high-temperature contact welding of plastics with hot plate. The comparison has been made on the part of unfilled polyoxymethylene (copolymer). A request was to consider the short-term and long-term impact of thermal degradation of the material in affected area of weld according to quality and strength of the bond. In theoretical part is described technology, main process characteristics necessary for the development of the process of welding and chapters with demands on welded bond and quality of execution. At the end are mentioned tests of thermal degradation which should be the main gain of this thesis in practical part, which is focused on searching optimum welding parameters for both fields of welding in the first phase. For optimal parameters have been made tests of tightness, strength and quality have been tested for both areas of welding. After tests followed of thermal degradation in affected area of welded bond.

Keywords: welding of plastics, hot plate, DOE, tightness, destructive tests, microscopic analysis, analysis of capability, degradation.

Na tomto místě bych chtěla v úvodu mnohokrát poděkovat všem, kteří se jakýmkoliv způsobem podíleli na vzniku této diplomové práce, snažili se moji cestu k uspokojivému výsledku všemožně ulehčit a byli mi nápomocni svou ochotou i dobrou radou.

Především bych chtěla poděkovat společnosti Robert Bosch, spol. s r.o. v Českých Budějovicích a to mému konzultantovi panu Mgr. Stanislavu Brůhovi a panu Ing. Zdeňku Frčkovi za poskytnutí literatury, plně vybavené laboratoře, odborných rad, meetingů a prezentací, bez čehož by tato práce nemohla vzniknout.

Za univerzitu mé vedoucí diplomové práce paní Ing. Evě Hnátkové za obětavou pomoc a odbornou konzultaci, kterou mi během celé práce poskytla, dále za ochotu s pomocí vypracování praktické části této práce a v neposlední řadě i za to, že jsi na mě vždy našla svůj drahocenný čas.

Chtěla bych poděkovat i všem pracovníkům a doktorandům Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, kteří mi ochotně pomáhali s vypracováním praktické části této diplomové práce a za poskytnutí cenných rad a informací.

V neposlední řadě také děkuji svojí mamince a svému příteli za trpělivost, zájem a podporu během celé této části mého života.

Zvláštní poděkování patří pracovníkům dílny na oddělení TEF3, zejména panu Františku Čistotovi.

Prohlašuji, že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD.....	10
I TEORETICKÁ ČÁST.....	12
1 KONTAKTNÍ SVAŘOVÁNÍ HORKÝM ELEMENTEM.....	13
1.1 PRINCIP METODY	13
1.2 ROZDĚLENÍ.....	16
1.2.1 Nízkoteplotní kontaktní svařování horkým elementem	16
1.2.2 Vysokoteplotní kontaktní svařování horkým elementem	17
1.3 MATERIÁLY	18
1.4 POUŽITÍ	18
2 HLAVNÍ PROCESNÍ PARAMETRY	19
2.1 TEPLOTA NA POVRCHU SVAŘOVACÍCH DESEK	19
2.2 DRÁHA ZAŽEHLENÍ.....	20
2.3 DRÁHA SPOJENÍ.....	21
2.4 ČAS OHŘEVU	21
2.5 ČAS PŘESTAVENÍ.....	21
2.6 ČAS CHLAZENÍ.....	22
3 PLÁNOVÁNÍ EXPERIMENTU.....	23
4 TESTOVÁNÍ SVAROVÉHO SPOJENÍ.....	25
4.1 ZKOUŠKA TĚSNOSTI	25
4.2 KRÁTKODOBÁ TLAKOVÁ DESTRUKČNÍ ZKOUŠKA	26
4.3 DLOUHODOBÁ TLAKOVÁ ZKOUŠKA	27
5 HODNOCENÍ KVALITY SVAROVÉHO SPOJENÍ.....	29
5.1 MIKROSKOPICKÁ ANALÝZA.....	29
5.2 ANALÝZA ZPŮSOBILOSTI	32
5.2.1 Analýza způsobilosti stroje	32
5.2.2 Analýza způsobilosti procesu.....	33
6 ZKOUŠKY TEPELNÉ DEGRADACE.....	35
6.1 DIFERENČNÍ SKENOVACÍ KALORIMETRIE.....	35
6.2 TERMOGRAVIMETRICKÁ ANALÝZA.....	37
6.3 INFRAČERVENÁ SPEKTROSKOPIE S FOURIEROVOU TRANSFORMACÍ.....	40
6.4 SKENOVACÍ ELEKTRONOVÁ MIKROSKOPIE	41
7 SHRUTÍ TEORETICKÉ ČÁSTI.....	44
II PRAKTICKÁ ČÁST	45
8 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE	46
9 ZKUŠEBNÍ SVAŘOVACÍ TĚLÍSKO	47
9.1 TVAR ZKUŠEBNÍCH TĚLÍSEK	47
9.2 POUŽITÝ MATERIÁL.....	48
9.3 VÝROBA ZKUŠEBNÍCH SVAŘOVACÍCH TĚLÍSEK.....	50
9.4 ZKUŠEBNÍ SVAŘOVACÍ STROJ	52
9.4.1 Svařovací přípravky a jejich konstrukce	53

9.4.2	Svařovací desky	54
10	METODY ZKOUŠENÍ.....	56
10.1	MĚŘENÍ ROZMĚRU PŘES SVAR	56
10.2	KRÁTKODOBÁ TLAKOVÁ DESTRUKČNÍ ZKOUŠKA	56
10.3	ZKOUŠKA TĚSNOSTI	57
10.4	MIKROSKOPICKÁ ANALÝZA.....	58
10.5	DLOUHODOBÁ TLAKOVÁ ZKOUŠKA	58
10.6	DIFERENČNÍ SKENOVACÍ KALORIMETRIE	59
10.7	TERMOGRAVIMETRICKÁ ANALÝZA.....	60
10.8	INFRAČERVENÁ SPEKTROSKOPIE S FOURIEROVOU TRANSFORMACÍ.....	61
10.9	SKENOVACÍ ELEKTRONOVÁ MIKROSKOPIE	62
11	HLEDÁNÍ VÝCHOZÍCH SVAŘOVACÍCH PARAMETRŮ	63
12	PROVEDENÍ PLÁNOVANÉHO EXPERIMENTU	69
13	MIKROSKOPICKÁ ANALÝZA	80
14	ANALÝZA ZPŮSOBILOSTI STROJE.....	81
15	DLOUHODOBÁ TLAKOVÁ ZKOUŠKA	83
16	HODNOCENÍ TEPELNÉ DEGRADACE	85
16.1	DIFERENČNÍ SKENOVACÍ KALORIMETRIE	85
16.2	TERMOGRAVIMETRICKÁ ANALÝZA.....	87
16.3	INFRAČERVENÁ SPEKTROSKOPIE S FOURIEROVOU TRANSFORMACÍ.....	88
16.4	SKENOVACÍ ELEKTRONOVÁ MIKROSKOPIE	89
17	PEVNOSTNÍ VÝPOČET SVAROVÉHO SPOJENÍ	91
	ZÁVĚR	93
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	95
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	98
	SEZNAM OBRÁZKŮ	101
	SEZNAM TABULEK.....	103

ÚVOD

V současné době je na světě přibližně 800 miliónů osobních automobilů a do roku 2030 se jejich počet předpokládá na dvě miliardy. Trendem dnešní doby se proto stalo snižování emisí do ovzduší a energetické zátěže na životní prostředí s čímž přicházejí nové inovace. Nejrychleji se rozrůstající inovací je nahrazování kovových dílů u automobilů za součásti vyrobené z plastů, ať už se jedná o polymery či elastomery. Nevýhodou plastů je, že v současnosti nemohou nahradit všechny kovové díly.

Jeden z největších světových výrobců, který investuje do vývoje nových technologií v automobilovém průmyslu je firma BASF, která je v oblasti světa plastů známá především jejich výrobou. Nejdůležitějším požadavkem v automobilovém průmyslu je nutnost splnit náročné technické vlastnosti a přesvědčit výrobce, že nahrazením kovového dílu plastovým je skutečně použitelné a bezpečné. Na plastový výrobek jsou proto kladeny mnohem větší nároky tepelné odolnosti při dlouhodobém zatížení než je tomu u výrobku vyrobeného z kovu (kovové výrobky jsou při dlouhodobém zatížení velmi odolné). Na základě tohoto vyvinula firma BASF speciální polymery. To je možná jeden z důvodů, proč je právě tato firma jedna z největších dodavatelů polymerů do společnosti Robert Bosch, spol. s r.o. v Českých Budějovicích (RBCB).

V již zmiňované společnosti se nejvíce (na plastové výrobky) zpracovává materiál polyoxymethylen s obchodním názvem Ultraform s označením S2320 003 od firmy BASF. RBCB tento materiál používá pro výrobu plastových dílů jako je nádržový čerpadlový modul, filtrační tlaková nádoba či podsestava příruby s tlakovou nádobou, kterých vyrobí několik miliónů kusů ročně a které následně po montáži dodává výrobcům automobilů do celého světa.

Nejdůležitějším požadavkem při spojování těchto dílů, především u filtrační tlakové nádoby, je pevnost a těsnost spoje. To se dá dosáhnout lepením nebo svařováním. Nejosvědčenějším způsobem pro dosažení vysoké pevnosti ve spojení se stalo na základě zkušeností svařování. RBCB používá pro spojování plastů různé druhy svařování, např. ultrazvukem, laserem, vibrační a rotační svařování, svařování horkým plynem a kontaktní svařování horkým elementem, které je v této společnosti v současné době jedním z nejrobustnějších procesů.

Kontaktní metoda svařování horkým elementem se dělí na dva způsoby a to svařování za nízkých teplot a svařování za teplot vysokých. Každá metoda má své výhody i nevýhody a

doposud nikde není uvedeno jejich porovnání. Cílem této diplomové práce je proto provedení tohoto porovnání obou metod svařování a vyhodnocení, která se jeví jako vhodnější. Porovnání bude probíhat s již zmiňovaným materiálem na zkušebním svařovacím tělísku. Toto tělísko se standardně používá pro testování, z důvodu nižších pořizovacích nákladů oproti filtrační tlakové nádobě a především rychlejšímu provedení zkoušek. Navíc také eliminuje vliv designu dílu. [1]

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 KONTAKTNÍ SVAŘOVÁNÍ HORKÝM ELEMENTEM

Kontaktní svařování horkým elementem (SHE) je jedna z nejrozšířenějších technologií pro svařování termoplastů a jeden z nejdéle používaných způsobů pro spojování plastových dílů. SHE je známé také jako tavné svařování. Touto metodou lze velice jednoduše, spolehlivě a ekonomicky dosáhnout výroby pevných a těsných svarových spojů.

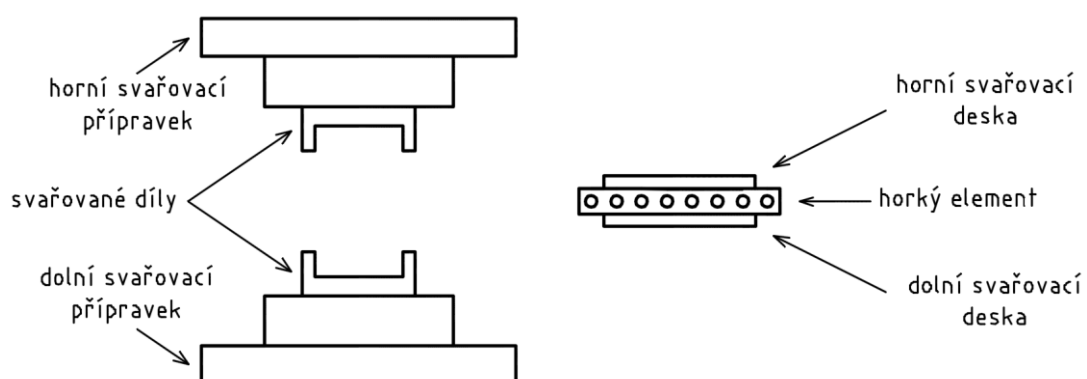
Tato technologie je především vhodná pro tvarové nebo nepravidelné spoje, jako jsou například světlometry a zadní lampy u automobilů, předměty které vyžadují vzduchotěsnost a pro díly vyrobené z polyolefinů, které jdou obtížně spojit jinými technologiemi. [2], [3]

1.1 Princip metody

Princip metody je spojení natavených dílů pro získání pevného a těsného svarového spoje. Ohřev je založen na přenosu tepla ze svařovací desky do svařovaného dílu. Díl se musí prohřát do určité hloubky, aby vzniklo dostatečné množství taveniny potřebné pro spojení. Při této fázi se odstraní veškeré nerovnosti, mastnota a ostré hrany ze svařovací geometrie. Minimální tloušťka stěny pro tento proces není limitována, avšak svařovací parametry musí být přizpůsobeny dané tloušťce stěny. Tímto způsobem lze svařovat i bez přídavného materiálu. Doba cyklu může být v rozsahu od 15 s do několika minut, v závislosti na velikosti spojované plochy. Tvar svařovacích desek je přizpůsoben tvaru svařovací geometrie. Výhodou je možnost nastavení rozdílných teplot na svařovacích deskách. [2], [3], [4]

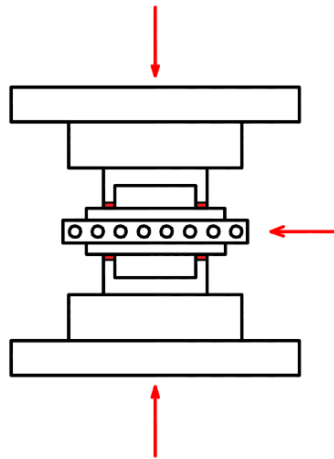
Jednotlivé fáze a postup při kontaktním svařování horkým elementem

1) Svařované díly se upnou do předem zhotovených svařovacích přípravků. Dle použité metody svařování se zvolí vhodné svařovací desky, které se připevní na horký element (HE) (Obr. 1).



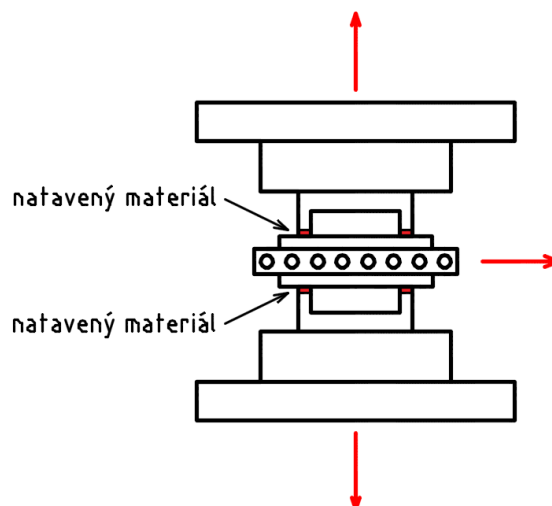
Obr. 1 Základní pozice [2]

2) HE přijede do pozice mezi přípravky. Horní a dolní přípravek přitlačí svařované díly na svařovací desky, kde dochází k jejich roztavení do určité hloubky a k prohřátí jejich povrchu (*Obr. 2*). Během zažehlení jsou z povrchu odstraněny veškeré nedokonalosti a zároveň je povrch vyrovnán. Podstatou této fáze je úplný kontakt svařovací geometrie se svařovací deskou. Teplota na povrchu svařovacích desek výrazně ovlivňuje kvalitu svaru.



Obr. 2 Zažehlení [2]

3) Po zažehlení dochází k ohřevu svařovaných dílů. Podstatou je vytvoření dostatečné vrstvy taveniny pro spojení. Tato fáze obvykle trvá několik sekund v závislosti na použité metodě svařování. U vysokoteplotního svařování je tento čas vlivem vysoké teploty na povrchu svařovacích desek kratší, než u svařování za nízkých teplot.

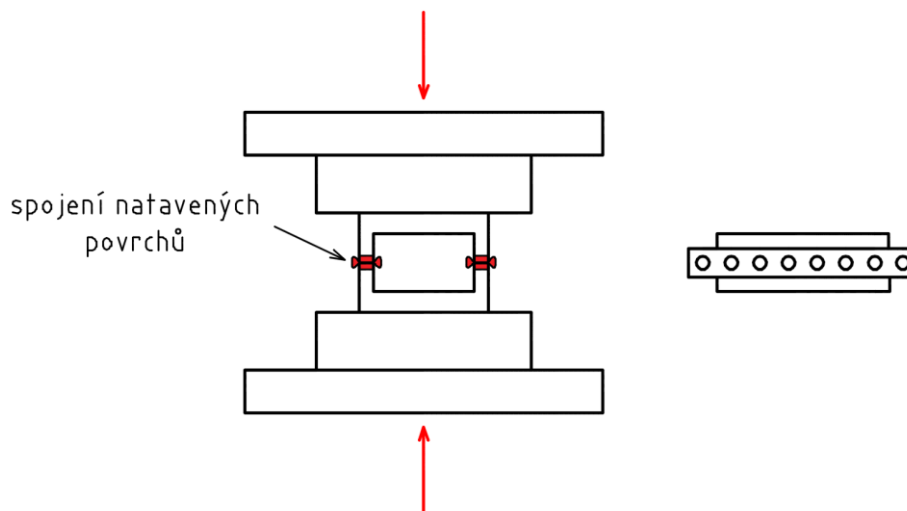


Obr. 3 Přestavení [2]

4) Po ohřátí se horní a dolní přípravek oddálí na takovou vzdálenost, aby se mohl HE vrátit do základní pozice (*Obr. 3*). Tato vzdálenost musí být co nejkratší a zároveň čas přestavení nesmí přesáhnout dobu cca 4 s. Je to z důvodu minimalizace ochlazení prohřáté vrstvy, což

může mít za následek snížení pevnosti svaru a také je to z důvodu úspory času. Při překročení této doby může začínat krystalizace materiálu.

5) Po ustavení HE v základní pozici, dojde ke spojení natavených částí svařovaných dílů a k následnému chlazení (Obr. 4). Díly jsou stlačeny v řádu desetin až jednotek milimetrů (v této vzdálenosti je poté určen výchozí bod pro variaci dráhy spojení). Chlazení trvá přibližně několik sekund a jeho cílem je úplné ztuhnutí taveniny. Celková doba cyklu je zpravidla delší pro nízkoteplotní svařování oproti svařování za vysokých teplot. [3], [4]



Obr. 4 Spojení a chlazení [2]

Tab. 1 Výhody a nevýhody SHE [3]

Výhody	Nevýhody
<ul style="list-style-type: none"> ✓ bez použití přídatných materiálů – jako jsou zpevňovače, lepidla a rozpouštědla ✓ svařování dílů se složitou svařovací geometrií – lze svařovat vnitřní stěny i díly do velikosti 500 x 1 800 mm ✓ pro širokou škálu termoplastů ✓ vysoká produktivita procesu ✓ trvalé spojení 	<ul style="list-style-type: none"> ✗ energetická náročnost – zvláště při svařování za vysokých teplot ✗ nutnost vyhřát HE na požadovanou teplotu před svařováním ✗ možný vznik napětí, která vedou ke vzniku prasklin ✗ nutnost čištění desek – při svařování za vysokých teplot při použití plněných materiálů ✗ vysoká pořizovací cena stroje

Nevýhodou této technologie je relativně dlouhý čas výrobního cyklu, oproti laserovému, vibračnímu, rotačnímu či ultrazvukovému svařování. [2]

1.2 Rozdělení

1.2.1 Nízkoteplotní kontaktní svařování horkým elementem

U nízkoteplotního kontaktního SHE se teplota HE pohybuje v rozmezí od 30°C do 100°C nad bodem tání svařovaného materiálu a nepřesahuje teplotu 260°C. Svařovací desky se nejčastěji používají hliníkové se speciálním ochranným teflonovým (PTFE) povlakem, z důvodu zamezení možného ulpívání taveniny na povrchu svařovací desky. Při použití těchto svařovacích desek, teplota HE nesmí přesáhnout 260°C, protože by mohlo dojít k degradaci a porušení celistvosti povlaku, který je u této technologie pro své antiadhezní vlastnosti nepostradatelný. Nevýhodou je ale omezená životnost tohoto povlaku. [2], [3]

Tab. 2 Výhody a nevýhody nízkoteplotního kontaktního SHE [5]

Výhody	Nevýhody
✓ vysoká pevnost svarového spoje	✗ zpravidla velké rozměry stroje
✓ zaručená těsnost svarového spoje	✗ dlouhý čas cyklu
✓ homogenní tvar přetoku materiálu	✗ omezená životnost povlaků na bázi PTFE
✓ možnost svařování malých i velkých dílů	✗ nemožnost svařování plněných materiálů
✓ vyšší odolnost vůči rozměrovým odchylkám (rovinnost, rovnoběžnost)	✗ nároky na kvalitu svařovací geometrie (hroty, dělení, vyhazovače)
✓ možná svařovací kontura 3D	✗ při svařování možnost uvolňování škodlivin
✓ minimální teplotní zatížení materiálu	✗ vysoká spotřeba energie pro vytápění HE
	✗ dlouhý čas výměny desek za tepla

Nízká teplota svařování má výhodu, že poskytuje větší pevnost svarového spojení než svarový spoj svařený za vysokých teplot. Při nižších teplotách se předpokládá menší projev degradace a lze svařovat širší spektrum polymerů. Nevýhodou je delší čas cyklu a při použití desek s PTFE povlakem nelze svařovat plněné materiály. [3]

1.2.2 Vysokoteplotní kontaktní svařování horkým elementem

Vysokoteplotní kontaktní SHE se používá pro materiály, jejichž teplota tavení je vyšší než 260°C, materiály obsahující plniva s výrazným abrazivním účinkem na PTFE povlak a materiály, které mají taveninu s vysokou tekutostí. Svařovací desky se z důvodu vysoké teploty HE nemohou použít s povlakem na bázi PTFE. Nejčastěji se proto používají desky ocelové bez povlaku nebo s povlakem. Ten bývá na bázi technologie nanášení vysoce odolných povrchů proti otěru, tzv. povlaky PVD (PVD) se sníženou povrchovou energií (např. CrN, TiN). To má za následek, že u většiny materiálů dochází k ulpívání taveniny na povrchu svařovací desky. Proto je důležité použít dostatečně vysokou teplotu na povrchu desky, aby se materiál, který zůstává na desce, vlivem vysoké teploty odpařil, tzv. funkce samočištění desek. To neplatí při použití plněných materiálů, kde plniva zůstávají nadále na desce. Teplota na povrchu desek se pohybuje od 300°C do 400°C a je závislá na druhu použitého materiálu. [2], [3]

Tab. 3 Výhody a nevýhody vysokoteplotního kontaktního SHE [5]

Výhody	Nevýhody
✓ svařovací desky bez povlaku nebo s odolným povlakem (např. PVD)	✗ vysoké pracovní teploty a možnost degradace materiálu
✓ dlouhá životnost povlaku	✗ dlouhý čas výměny desek za tepla
✓ možnost svařovat plněné i neplněné materiály	✗ teplotní ovlivnění dílů v okolí HE, koncentrace napětí
✓ funkce samočištění povrchu svařovací desky (odpaření materiálu)	✗ uvolňování škodlivin, nutnost odsávání, popř. filtrování
✓ vyšší odolnost vůči rozměrovým odchylkám (rovinnost, rovnoběžnost)	✗ možnost kontaminace dílů plnivou a jejich ulpívání na svařovacích deskách
✓ možná svařovací kontura 3D	✗ vysoká spotřeba energie pro vytápění
	✗ zpravidla velké rozměry stroje

Vlivem vysoké teploty je u této technologie zkrácen čas ohřevu. Čím vyšší teplota a čím delší čas ohřevu, tím stoupá riziko degradace materiálu v oblasti svaru, což může mít za následek snížení pevnosti, popř. netěsnost spoje. Navíc v průběhu svařování některých materiálů dochází k výraznému uvolňování škodlivých látek do okolí, a proto je nutné zajistit odsávání, popř. filtrování. [2], [3]

1.3 Materiály

SHE se používá pro díly, které jsou vyrobeny z většiny termoplastů, včetně pěnových materiálů a pro díly, které se vyrábí standardními výrobními procesy. V závislosti na aplikaci může být touto metodou obtížné svařovat materiály jako styren-butadien (SB), polyethyltereftalát (PET), polybutadientereftalát (PBT) a acetát celulózy. Polyamidy (PA) musí být před svařováním důkladně vysušeny, aby se zabránilo pění. Polykarbonáty zase mohou zanechávat vzduchové mezery ve spoji.

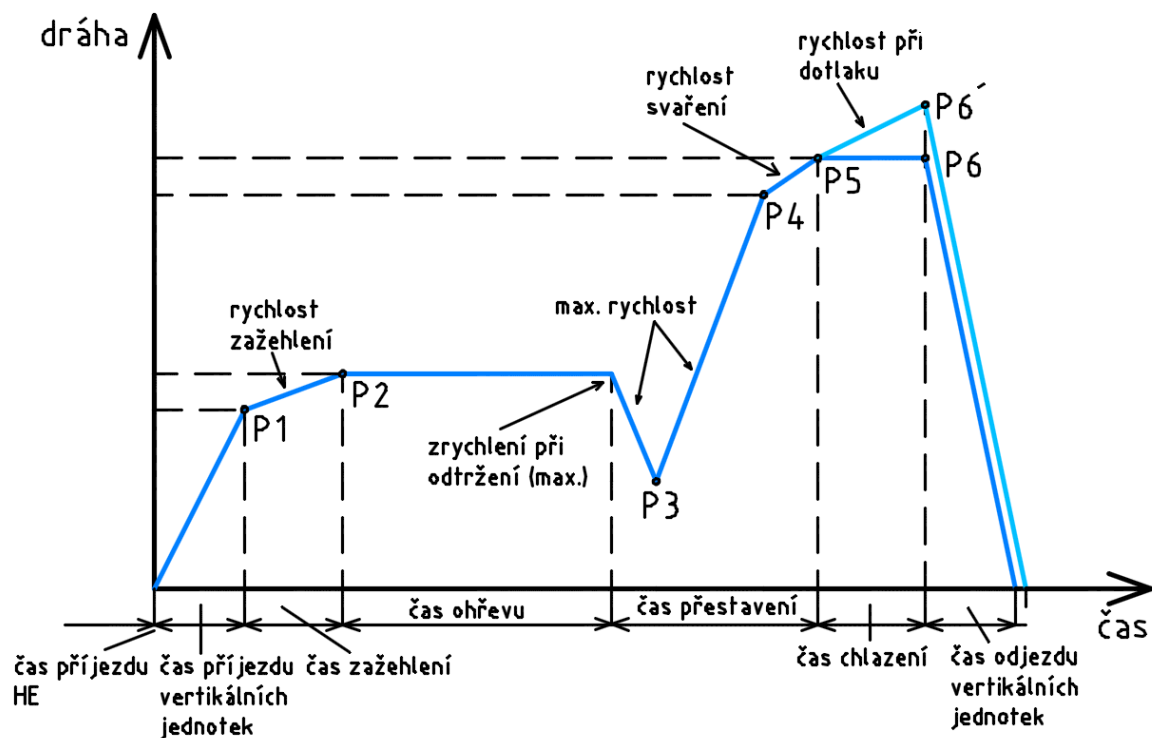
Výplně u materiálů plněných např. skelnými vlákny, snižují pevnost spoje. Čím vyšší je obsah plniva, tím nižší je pevnost svarového spojení. Tyto materiály lze metodou SHE svařovat, pokud obsah plniva nepřekročí 40 %. Při překročení 40 %, není v dílu dostatečný podíl základního polymeru, který vytváří odpovídající vazby. S těmito vazbami může nastat problém i při 35 % výplně. [3]

1.4 Použití

SHE se používá pro spojování dílů od několika centimetrů až do velikosti 1,5 m. Pro snížení nákladů lze svařovat rozdílné materiály. Nejčastěji se používá v automobilovém průmyslu pro svařování světlometů, zadních lamp a směrovek. Dále se používá pro komponenty obsažené v tekutinových a palivových nádržích a větracích průchodech. V palivových nádržích se svařování používá pro funkční části, jako jsou například nádržové čerpadlové moduly. V tekutinových nádržích převážně pro spojení komponent v systému sloužícím pro odbourávání obsahu oxidů dusíku (NOx) ve výfukových plynech (AdBlue). [6], [7]

2 HLAVNÍ PROCESNÍ PARAMETRY

Mezi hlavní procesní parametry patří teplota na povrchu svařovacích desek, dráha zažehlení, dráha spojení, čas ohřevu, čas přestavení a čas chlazení. K těmto parametrům patří ještě celá řada dalších neméně významných parametrů, jako je např. rychlost spojení, rychlost zažehlení, chlazení za přítlaku aj. Všechny tyto parametry určují konečnou kvalitu svaru. Pro dosažení požadovaných výsledků by se neměly tyto parametry posuzovat samostatně, ale vždy by se mělo počítat s jejich vzájemnými interakcemi, které jsou uvedeny v Obr. 5, kde $P1$ je pozice před zažehlením, $P2$ je zažehlení, $P3$ je přestavení, $P4$ je pozice před svařením, $P5$ je svaření a $P6$ a $P6'$ je svaření (přítlak). [5], [7]



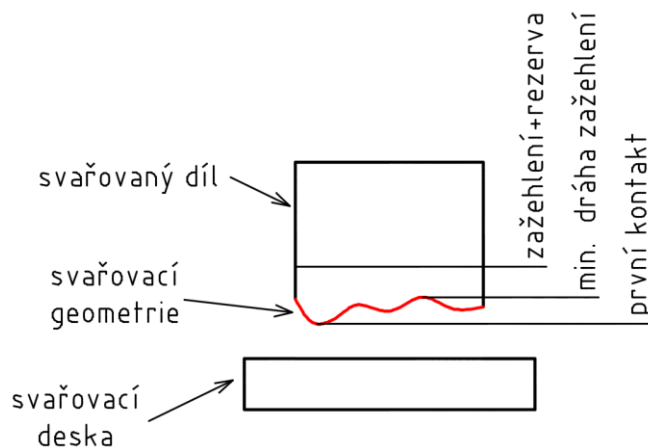
Obr. 5 Celkový průběh svařovacího procesu pro jednu lisovací jednotku [5]

2.1 Teplota na povrchu svařovacích desek

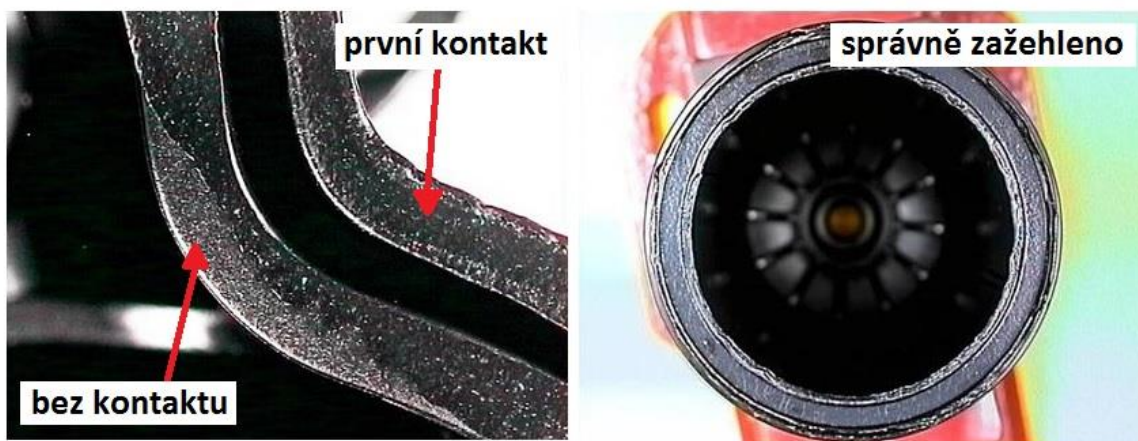
Teplota na povrchu svařovacích desek patří k nejdůležitějším parametrům, které ovlivňují kvalitu svarového spoje. Svařovací desky jsou vyhřívány pomocí HE na teplotu přizpůsobenou svařovací metodě a druhu použitého materiálu a zároveň odvádí teplo do svařovaného materiálu. [2], [3], [4]

2.2 Dráha zažehlení

Dráha zažehlení u kontaktního SHE je taková dráha, která musí zajistit úplný kontakt svařovací geometrie svařovaného dílu se svařovací deskou (*Obr. 6* a *Obr. 7*). Z toho vyplývá, že tato dráha je závislá na velikosti odchylek svařovací geometrie (nejčastěji rovinnosti). Při nedodržení úplného kontaktu, může dojít k nerovnoměrnému prohnutí dílu a tím ke snížení pevnosti svarového spoje a možného vzniku vzduchových dutin. Při příliš dlouhé dráze naopak vzniká riziko ulpívání materiálu na povrchu svařovací desky nebo prohnutí dílu do oblasti mimo svařovací geometrii určenou pro zažehlení. Minimální dráha zažehlení je dráha od úplného kontaktu svařovací geometrie se svařovací deskou (*Obr. 6*). Zažehlení lze poznat pomocí tzv. výronku, který se vytvoří po obvodě svařovací geometrie (*Obr. 7*). [3], [4], [5]



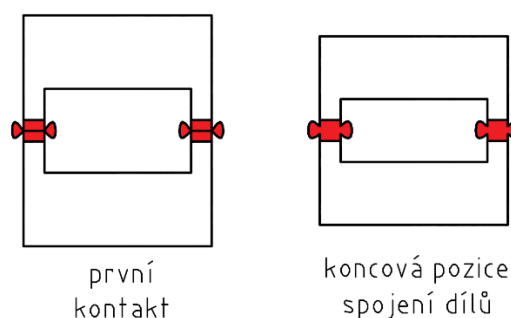
Obr. 6 Dráha zažehlení [5]



Obr. 7 Kontakt dílu se svařovací deskou a správně zažehlený díl [5]

2.3 Dráha spojení

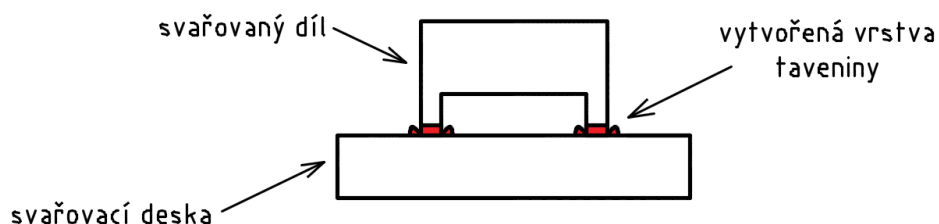
Dráha spojení je dráha od prvního kontaktu obou tavenin do přesně definované pozice, ve které dochází k trvalému spojení svařovaných dílů (Obr. 8). Nevhodně zvolená dráha spojení má za následek negativní ovlivnění kvality a pevnosti spoje. Je také závislá na teplotě na povrchu svařovacích desek a času ohřevu. Použitím příliš krátké dráhy, může dojít k nedodržení úplného kontaktu svařovacích geometrií a možného vzniku vzduchových dutin. Naopak při použití příliš dlouhé dráhy vzniká riziko vytlačení veškeré taveniny z oblasti svaru. Při spojení dílů se na obou stranách vytvoří výronek.



Obr. 8 Dráha spojení

2.4 Čas ohřevu

Čas ohřevu je doba, po kterou jsou svařované díly v kontaktu se svařovací deskou. Po tuto dobu dochází k prohřátí dílů do určité hloubky a tím k vzniku taveniny potřebné pro spojení (Obr. 9). Množství taveniny je závislé na teplotě na povrchu svařovacích desek a času ohřevu. Tyto parametry určují výslednou dráhu spojení. [3], [4], [5]



Obr. 9 Čas ohřevu [5]

2.5 Čas přestavení

Během času přestavení dochází k odtržení svařovaných dílů od povrchu svařovací desky, jednotka HE se vrací do základní pozice a následně dochází ke spojení dílů. Přípravky by se měly oddálit na nejkratší možnou vzdálenost, aby nedocházelo k ochlazování a tuhnutí

natavené vrstvy a tím k nedokonalému spojení svařovaných dílů. Tento čas se pouze sleduje a neměl by přesáhnout dobu cca 4 s. [3], [5]

2.6 Čas chlazení

Čas chlazení je doba, za kterou dochází k úplnému ztuhnutí taveniny v oblasti spojení svařovaných dílů. Pro semi-krystalické termoplasty je tento čas definován po dobu, kdy teplota významně klesne pod hodnotu teploty tání. Naopak pro amorfní termoplasty pod teplotu skelného přechodu. Pokud by byly díly příliš rychle zchlazeny, mohlo by dojít k zamrznutí napětí s následným nežádoucím pnutím ve svarovém spoji. Během chlazení by díly neměly být zatíženy žádným napětím a chlazení by mělo být přirozené. [3], [4], [5]

3 PLÁNOVÁNÍ EXPERIMENTU

Jedním z nejučinnějších nástrojů pro nalezení optimálních podmínek spojování před zavedením výrobku do sériové nebo hromadné výroby je plánování experimentu. Pomocí experimentu lze nalézt optimální hodnoty pro výrobní proces a faktory, které tento proces významně ovlivňují. Experiment bývá často označován zkratkou, která vychází z anglického názvu Design of Experiment (DOE). DOE se využívá především jako nástroj pro optimalizaci procesů nebo při návrhu nových výrobků. Řešení úloh se provádí pomocí matematické statistiky a teorie pravděpodobnosti. [8], [9]

Na výrobní proces nebo výrobek působí vždy řada vlivů. Vlivy, které lze řídit se nazývají faktory a vlivy, které se očekávají na výstupu, se nazývají odezvy (*Tab. 4*). Cílem DOE je najít takovou kombinaci faktorů, aby proces dosahoval požadovaných odezev při maximální stabilitě (minimální variabilitě) a odolnosti proti negativním vlivům. Při plánování experimentu se provádí změna vstupních faktorů a pozoruje se změna výstupní proměnné. [8], [9], [10]

Tab. 4 Vstupní a výstupní proměnné [10]

Vstupní proměnné - faktory	Výstupní proměnné – odezvy
<ul style="list-style-type: none"> • stroje nebo přístroje • technologie nebo metody výroby • použitý materiál • operátoři nebo směny • parametry transformující vstupní materiál na výstupní produkt 	<ul style="list-style-type: none"> • odezva obsahující jednu nebo více jakostních charakteristik • veličina nebo veličiny, které se sledují pro optimalizaci procesu

DOE se využívá při navrhování nebo v již zavedených výrobních procesech v prostředí s proměnlivými vlivy. Nejčastější proměnlivé vlivy jsou vstupní suroviny, prostředí, parametry výroby a pracovníci. Největším přínosem DOE je možnost navržení velkosériových procesů a výrobků, které jsou co nejodolnější vůči proměnlivosti vstupů za využití minimálních nákladů (např. použití 50 ks dílů při využití DOE oproti 500 ks při využití standardních postupů). Výhodou DOE je jeho použití v procesech, které nelze popsat jednoznačnými deterministickými vztahy. [8]

Využití DOE:

- optimalizace výtěžnosti procesu,
- zmenšení variability procesu,
- redukce doby vývoje nového produktu,
- snížení celkových nákladů,
- vyčíslení dopadů různých konfigurací ve výrobě,
- určení klíčových parametrů ovlivňujících výkonnost.

Postup DOE:

- 1) definice nebo popis problému,
- 2) stanovení sledované proměnné – odezvy,
- 3) výběr faktorů a úrovní,
- 4) výběr plánu experimentu,
- 5) provedení experimentu,
- 6) analýza dat,
- 7) závěry a doporučení. [10]

Na základě zkušeností se v prvním experimentu zjistí maximálně 25 % dosažitelných informací. Na začátku se lze jen domnívat, které faktory budou dominantní. Tyto faktory nebo jejich kombinace se zjišťují postupně. Zjišťuje se, v jakém rozmezí se musí jednotlivé faktory udržovat, jak jsou citlivé a kolik měření se musí provést pro ovládnutí procesu. Počet pokusů pro daný experiment není limitován. [5]

4 TESTOVÁNÍ SVAROVÉHO SPOJENÍ

Hlavními požadavky na svarový spoj je zaručená těsnost a vysoká pevnost. Tyto požadavky musí být dodrženy nejen při krátkodobých testech, ale především u dlouhodobých destrukčních testů, které určují životnost dílů z hlediska jejich spojení. Pokud dojde k porušení dílu mimo oblast svarového spojení, je zřejmé, že svarový spoj je navržen optimálně.

4.1 Zkouška těsnosti

Zkouška těsnosti je nedestrukční zkouška, která se u svarového spojení provádí jako první. Cílem je odhalit případnou netěsnost svaru, která se projevuje, pokud se ve svaru vyskytují trhliny, mikrotrhliny nebo mikropóry. Zkušební metoda pro daný vzorek je stanovena na základě požadavků, které jsou nutné k vyhodnocení zkoušky. U některých metod lze určit pouze velikost netěsnosti. To bývá většinou nedostačující, protože je nutné znát i místo nebo místa netěsnosti, pro případnou optimalizaci svařovacího procesu, popř. pro hledání příčin vzniku netěsnosti. V závislosti na způsobu použití dílů, vzorek může být naplněn různými plyny (vzduch, vodík, hélium) a sleduje se únik média, nebo se ponoří do nádrže s vodou (sleduje se únik bublin a místo netěsnosti).

Měření se provádí dvěma způsoby:

- průtokem zkušebního média za daný čas,
- měřením poklesu tlaku za daný čas. [3], [5]

Bublínková metoda

Zkouška těsnosti bublinkovou metodou je z hlediska SHE dostačující a časově a finančně nenáročná. Bublínková metoda je jedna z metod, která dokáže přímo odhalit místo netěsnosti. Zkoušený díl je při této zkoušce ponořen do nádrže s vodou a je tlakován vzduchem. Nevýhodou je nemožnost přesného určení míry netěsnosti, pouze subjektivní hodnocení a rozhodnutí těsný – netěsný.

Princip zkoušky

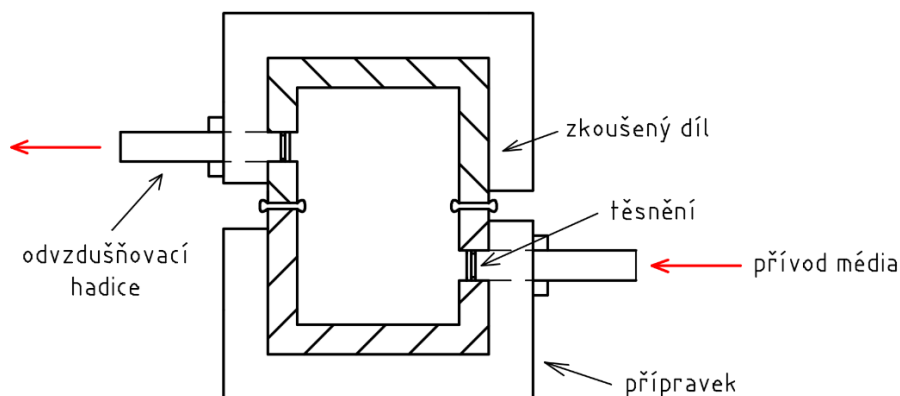
Zkoušený díl se upne do přípravku. Díl musí mít otvor pro připojení přívodu zkušebního média. Pokud má otvorů více, tyto otvory musí být utěsněny. Poté se přípravek se zkušebním dílem umístí pod vodní hladinu a spustí se tlakování zkušebním médiem. V případě netěsnosti je přímo z inkriminovaného místa patrný únik bublin. [5]

Hodnocení těsnosti spoje:

- 1) těsný spoj (bez úniku bublin),
- 2) únik 1 bubliny za několik sekund,
- 3) souvislý proud bublin,
- 4) hrubá netěsnost. [11]

4.2 Krátkodobá tlaková destrukční zkouška

Krátkodobá tlaková destrukční zkouška slouží ke zjišťování odolnosti dílu vůči vnitřnímu přetlaku. Zkouška se provádí zpravidla bezprostředně po svaření dílu, tedy v nepředstátnutém stavu. Pomocí této zkoušky se určuje maximální pevnost svařeného plastového komponentu. Maximální pevnost svarového spoje lze zjistit pouze v případě, že trhлина vznikne ve svarovém spojení. Díl je namáhán lineárním nárůstem tlaku až do destrukce. Musí být uzavřený a opatřen rozhraním pro přívod zkušebního média. Jako zkušební médium se nejčastěji používá voda, která je nezávadná při kontaktu s lidskou pokožkou, ke kterému dochází při vyjímání dílu z pracovního prostoru tlakovacího zařízení nebo při pozdější analýze. Další výhodou je její dostupnost, levné pořizovací náklady a bezpečnost (oproti nebezpečným kapalinám jako jsou např. zkušební paliva). Schématické znázornění zkoušky je zobrazeno na *Obr. 10*. [2], [5]



Obr. 10 Schéma krátkodobé tlakové destrukční zkoušky [5]

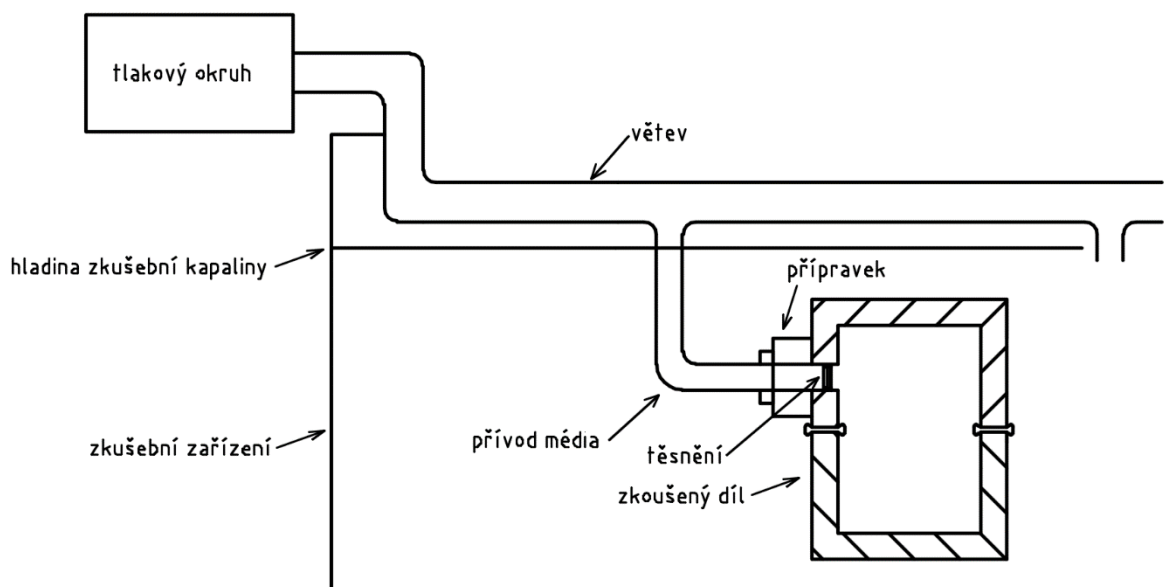
Princip zkoušky

Zkušební díl se upne do přípravku, který musí být vyroben tak, aby nedocházelo k předepínání, přidržování nebo upínání přes svar a tím k ovlivnění celkové pevnosti dílu nebo místa destrukce. Zkušební díl musí mít otvory pro přívod média a odvod vzduchu. Zbylé otvory musí být utěsněny. Přípravek se připojí na tlakový okruh. Je důležité vědět, který otvor dílu slouží na přívod tlakového média a který na odvod vzduchu. Po připojení

je díl naplněn zkušební médiem a zároveň odvzdušněn (poté se odvzdušňovací větev uzavře). Samotná zkouška probíhá zatěžováním dílu lineárním nárůstem tlaku a končí vznikem netěsnosti nebo prasknutím dílu. [2], [5]

4.3 Dlouhodobá tlaková zkouška

Dlouhodobá tlaková zkouška probíhá ve zkušebním tlakovém zařízení, které slouží ke zjišťování odolnosti dílů vůči neměnnému vnitřnímu přetlaku. Zkoušené díly s vnitřní dutinou jsou namáhány konstantním tlakem kapaliny a teplotou až do okamžiku vzniku netěsnosti ve svaru nebo roztržení dílu. Jako zkušební kapalina se používá vysoce kvalitní demineralizovaná voda, která obsahuje minimální podíl minerálních a organických látek a je nezávadná při kontaktu s lidskou pokožkou, ke kterému dochází při manipulaci s dílem v pracovním prostoru zařízení. Zkouška končí vznikem netěsnosti. Tímto způsobem se nejen ověřuje dlouhodobá pevnost svarového spoje, ale i celého plastového komponentu. Schématické znázornění zkoušky je zobrazeno na *Obr. 11*. [5], [12]



Obr. 11 Schéma dlouhodobé tlakové zkoušky

Princip zkoušky

Zkušební díly jsou pomocí různých hadic, přípravků a šroubení přichystány tak, že vzniká větev osazená požadovaným počtem dílů, kde každý díl je k této větvi připojen jedním svým vývodem. Zbylé vývody jsou uzavřeny (pokud je jich na dílu více). Poté je větev s upnutými díly připojena na tlakový okruh. Díly se naplní demineralizovanou vodou a manuálně se odvzdušní. V řídicí aplikaci se nastaví požadované tlakové zatížení a před samotným spuštěním zkoušky proběhne vizuální kontrola těsnosti všech dílů při

požadovaném tlakovém zatížení. Poté se větve se zkušebními díly vloží do zkušebního zařízení a spustí se zkouška. Řídící aplikace kontroluje těsnost v tlakovém okruhu, a pokud zaznamená hodnotu poklesu tlaku o více než 2 bary, tlakový okruh je odstaven a je spuštěna indikace pro zásah obsluhy. Obsluha vyjme netěsný díl a větve umístí zpět pod hladinu zkušební kapaliny a měření zbylých dílů pokračuje. [12]

5 HODNOCENÍ KVALITY SVAROVÉHO SPOJENÍ

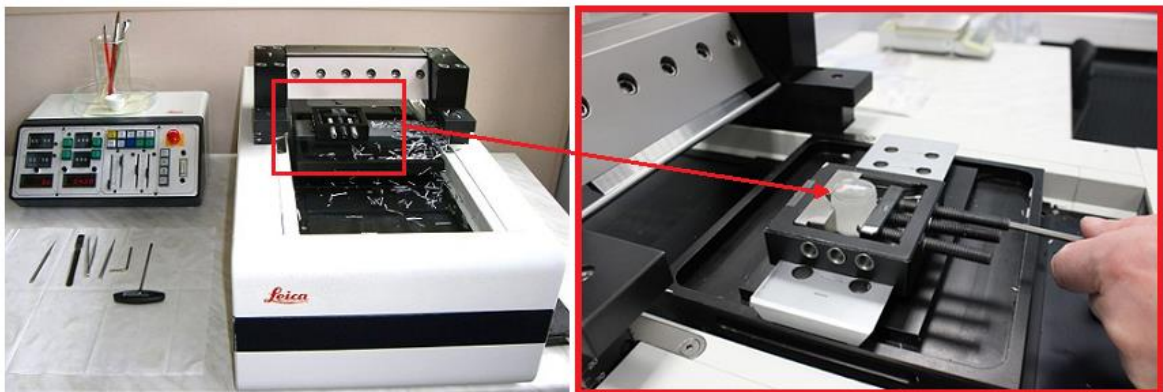
Kvalita svarového spoje se posuzuje z mnoha hledisek, pomocí různých zkoušek a měření. Důležité je, aby díly před samotnou analýzou nebyly poškozeny (např. rozřezány), neobsahovaly nečistoty a mastnotu (především v oblasti svarového spojení), aj. Při zkoušení série dílů je důležité, aby tyto díly byly svařeny za stejných podmínek, v jednom přípravku, stroji, v jeden čas a zároveň, aby zkoušení probíhalo bez přerušení. [5]

5.1 Mikroskopická analýza

Mezi nejdůležitější analýzy svarového spojení patří mikroskopická analýza. Tato analýza zkoumá strukturu a kvalitu svaru (v předem vybraných místech), která je důležitá z hlediska mechanických vlastností a dlouhodobého chování. [2]

Přístroj na řezání vzorků

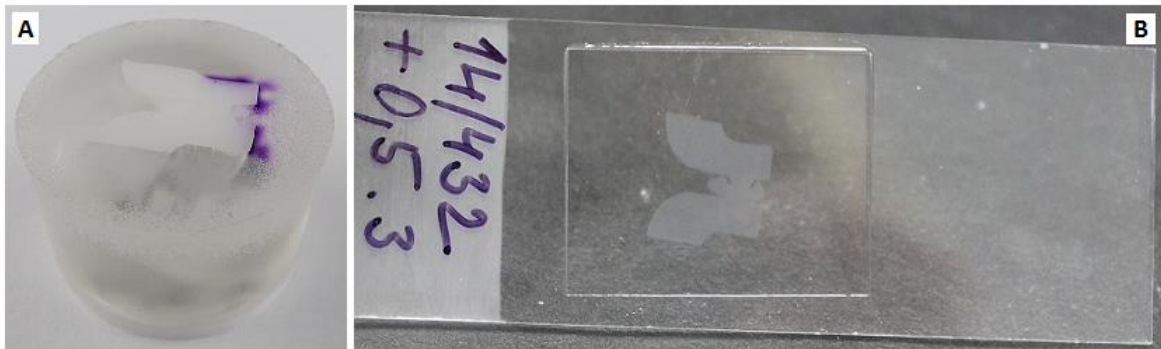
Přístroj na řezání vzorků, nazývaný mikrotom (*Obr. 12*), se používá na řezání velmi tenkých vzorků, umožňujících detailní kontrolu svarového spojení pod mikroskopem pod procházejícím světlem. Nevýhodou je, že mikrotomový vzorek je vyříznut pouze v určité oblasti svarového spojení, a proto nelze zkoumat celý svar.



Obr. 12 Mikrotom Leica [13]

Pro řezání vzorků se používá ocelový nůž z karbidu wolframu. Během řezání vzniká ve vzorku napětí, které se uvolňuje a projevuje změnou délky. Pod mikroskopem se toto napětí jeví jako tzv. vlnění, které se nepovažuje za chybu. Na intenzitu stlačení má vliv úhel břitu a rychlost posuvu nože. V ose posuvu bývá velikost deformace vzorku až do 20 % a v ose kolmé na posuv do 3 %. Velikost deformace záleží na tloušťce řezu, materiálu vzorku apod.

Pro zkoumání mikrotomových řezů je používán mikroskop s polarizačním filtrem a horním a dolním osvětlením. Kontrolovaný vzorek se nejprve vloží mezi PE fólii a sklíčko (*Obr. 13b*) a poté se prosvítí polarizovaným světlem, které odhaluje skryté vady. Tyto vady nemusí být vidět na první pohled, a proto je nutné se na vzorek podívat pomocí různého pootočení. Pokud se v řezu vyskytují bílé částečky, nejprve se zjistí, jestli se jedná o vzduchovou dutinu či jen špatně rozmíchané barvivo. [5], [13], [14]



Obr. 13 Vzorky k analýze: a) zalitý, b) připravený k analýze

Analýzou lze ve vzorku pozorovat:

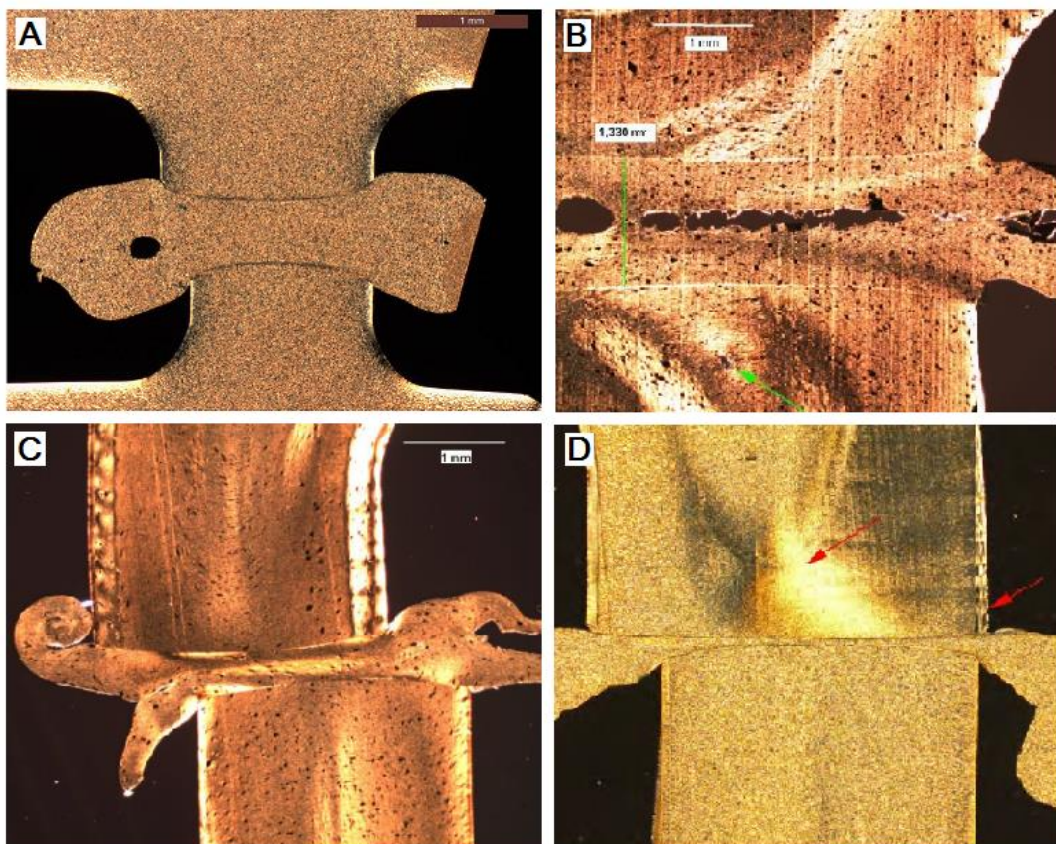
- strukturu materiálu dílů, strukturu materiálu blízko svaru a materiál přímo ve svarovém spojení,
- jestli materiál obsahuje plniva, orientaci vláken (čím více jsou vlákna náhodně uspořádaná, tím lépe),
- vzájemnou polohu horní a spodní svařovací geometrie,
- příměsi, znečištění, vzduchové dutiny, neroztavené částice materiálu,
- stavy napětí způsobené vnějšími a vnitřními silami (deformace),
- tloušťky natavených nebo teplotně ovlivněných vrstev,
- měření tloušťky zbytkové taveniny v místě svaru. [13], [14]

Při přípravě vzorku pro mikroskopickou analýzu je nezbytné dodržovat několik pravidel, která jsou uvedena v principu metody. [13]

Princip metody

Nejprve se vyřízne malý vzorek ze zkušební dílu (vzorek se vyřízne z oblasti, která má být pozorována). Vzorek se zalije do formičky daným poměrem speciální licí pryskyřice určené pro technické použití a tvrdidla (*Obr. 13a*). Tento poměr se mění dle použitého materiálu. Formička se zalitým vzorkem se vloží do přístroje na urychlení tvrdnutí (doba tvrdnutí záleží na druhu použitého materiálu). Poté se nejprve odřízne vrchní vrstva

zalitého vzorku v mikrotomu a dále se řezají vzorky o dané tloušťce (záleží na typu materiálu a množství plniv). Přírodní materiály se řezou na tloušťku od 10 μm do 20 μm , plněné materiály např. sklem na tloušťku od 10 μm do 50 μm . Při tenkých řezech hrozí poškození celistvosti řezu při seřezávání a následné manipulaci. Řez se umístí mezi polyethylenovou (PE) fólii a sklíčko (*Obr. 13b*). Řezy jsou velice malé a tenké, a proto je nutná opatrnost při manipulaci, neboť vzorek se dá velice jednoduše poškodit. Dále probíhá kontrola řezů pod mikroskopem, kde se vyhodnotí vhodný vzorek k analýze. Cílem je získání neporušeného vzorku (*Obr. 14*). Následuje samotná analýza vzorku. [13], [14]



Obr. 14 Příklady mikroskopických analýz svarového spojení: a) bez defektů, b) se vzduchovými dutinami, c) přesazené, d) se špatnou strukturou v místě spojení [5]

Optimálně vypadající svarový spoj je zobrazen na *Obr. 14a*. Při příliš krátké dráze spojení se ve svaru mohou vyskytovat nežádoucí vzduchové dutiny (*Obr. 14b*), které ovlivňují těsnost a pevnost svarového spoje. Při viditelném přesazení dílů (*Obr. 14c*) je riziko krátké nosné délky svaru, která může způsobit malou pevnost ve svarovém spojení. Špatná struktura díky vtoku v dílu a příliš dlouhá dráha spojení (*Obr. 14d*) rovněž působí na výslednou dosahovanou pevnost svarového spoje. [14]

5.2 Analýza způsobilosti

Analýza způsobilosti se provádí u nového nebo optimalizovaného výrobního procesu, včetně montáže. Cílem této analýzy je ověření způsobilosti a výkonnosti procesu a tím získání údajů k řízení procesu. Analýza se dělí na krátkodobou (např. analýza způsobilosti stroje) a dlouhodobou (např. analýza způsobilosti procesu). Krátkodobá analýza se používá pro výrobky vyrobené v kontinuálním výrobním běhu v jeden čas, u kterých se zaznamenávají a hodnotí parametry. Dlouhodobá analýza slouží pro delší časové období (např. sériovou výrobu). [15]

5.2.1 Analýza způsobilosti stroje

Analýza způsobilosti stroje je krátkodobá analýza, která odkrývá vlivy na výrobní proces způsobené především strojem. Cílem zkoušení je vyloučit možné poruchové veličiny a minimalizovat jejich ovlivňování. To se dosahuje konstantním udržováním parametrů stroje.

Příklady neřiditelných veličin:

- člověk – obsluha, střídání směn,
- materiál – polotovary,
- okolní prostředí – teplota okolí (teplotní změny během produkce výběru), vzduch, vlhkost, tlak, otřesy (které působí na obráběcí zařízení), stanoviště stroje (v budově poschodí), mimořádné události (otevřená okna, topení),
- kavita dílu.

Příklady říditelných veličin:

- otáčky vřetena,
- rychlost posuvu,
- nástroje,
- doby výrobního taktu,
- tok a teplota chladicího prostředku,
- pneumatické tlaky,
- elektrický proud (u svařovacích zařízení),
- stav změn v případě optimalizačních opatření.

Předpokládá se působení náhodných (neodstranitelných) vlivů stroje na výrobek a jeho vlastnosti. Cílem je udržovat tyto vlivy konstantní. Pokud to není možné, je nutné změny poruchových veličin dokumentovat. Dokumentace poté umožní optimalizaci, ale pouze v případě, že nebude dosaženo specifikace pro způsobilost.

Postup při vyhodnocování

- 1) Výroba dílů (minimálně 50, optimálně 100) v nepřerušovaném výrobním cyklu (průběžný sled). Nutnost dokumentování odchylek.
- 2) Měření daného parametru, resp. parametrů a dokumentace výsledků v souladu s výrobním pořadím.
- 3) Statické vyhodnocení.

U analýzy způsobilosti se rozeznávají dva indexy způsobilosti. První index se značí C_m a zohledňuje pouze šířku rozptylu. Druhý se značí C_{mk} a zohledňuje nejen šířku rozptylu, ale i polohu souboru dat vzhledem k tolerančnímu poli. Pokud je index C_m nebo $C_{mk} \geq 1,67$ je způsobilost stoje dána.

Z důvodu ekonomicky nákladných měření je v praxi tato analýza často prováděna následujícím dvoustupňovým postupem s redukovanými náklady.

Postup při vyhodnocení s redukovanými náklady

- 1) Nejprve se vyrobí 50 dílů, z nichž se každý 2. díl proměří. Získá se tím 25 skutečných hodnot (pro každý požadavek). Pokud je index způsobilosti (z těchto 25 hodnot) $C_{mk} \geq 2$, je stroj způsobilý.
- 2) Je-li $1,67 < C_{mk} < 2$, proměří se i zbývající díly. Pokud index způsobilosti (z těchto 50 hodnot) $C_{mk} \geq 1,67$, je stroj způsobilý.

V případě použití 25 dílů je jistota měření menší (ve srovnání s použitím 50 dílů), ale kvalita měření tím není ovlivněna. [15]

5.2.2 Analýza způsobilosti procesu

Analýza způsobilosti procesu je dlouhodobá analýza sloužící pro sledování stability procesu po delší časové období (např. sériovou výrobu). Při této analýze by měly být vlivy poruch způsobené strojem minimalizovány a ostatní vlivy působící zvenčí na výrobní proces během delší provozní doby (např. výměna obsluhy stroje, šarže materiálu) podchyceny.

Postup při vyhodnocování

- 1) Minimálně 25 náhodných odběrů po 5 dílech (celkem 125 nepřebraňých dílů). Toto množství je nejmenší možné pro vyhodnocení.
- 2) Měření daných parametrů dílů a dokumentace výsledků podle výrobního pořadí.
- 3) Statické vyhodnocení – nejprve posouzení stability v čase, následně statická distribuce těchto hodnot a závěrem výpočet indexů způsobilosti procesu C_p nebo C_{pk} . Proces je způsobilý pokud C_p nebo $C_{pk} \geq 1,33$. [15]

6 ZKOUŠKY TEPELNÉ DEGRADACE

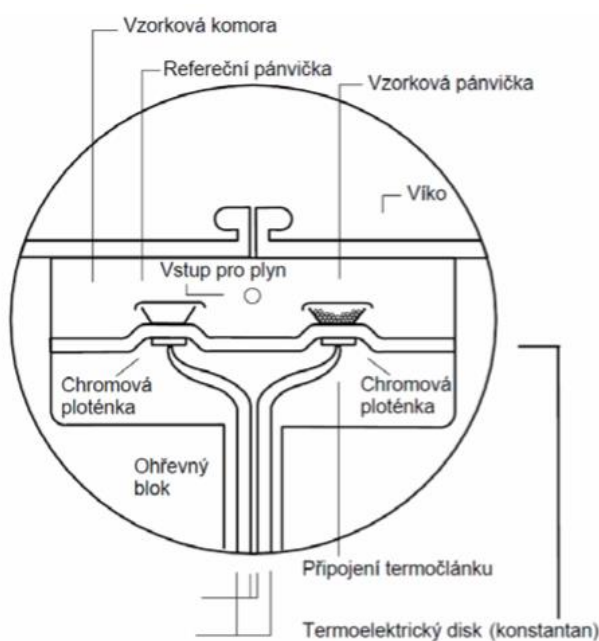
Během fáze zažehlení a ohřevu dochází na svařovací geometrii k tepelnému zatížení, které může způsobit degradaci materiálu. Degradace je závislá na použitých teplotách na povrchu svařovacích desek a času ohřevu.

6.1 Diferenční skenovací kalorimetrie

Diferenční skenovací kalorimetrie (DSC) je metoda termické analýzy, založená na měření změny entalpie ΔH_m ve vzorcích, v důsledku jejich fyzikálních a chemických změn, které jsou funkcí teploty a času. Měřený vzorek a tepelně inertní referenční materiál se podrobují lineárnímu ohřevu nebo chlazení a přitom se plynule mění rychlost tepelného toku ve zkušebním vzorku, která je úměrná okamžitému měrnému teplu. Principem je udržení stejné teploty měřeného a referenčního vzorku, které jsou zahřívány nebo ochlazovány současně vedle sebe.

DSC analýzou lze získat:

- teplotu skelného přechodu T_g , teplotu tání T_m , čas a teplotu krystalizace T_c ,
- procento krystalinity χ_c , tepelnou kapacitu Δc_p , oxidační stabilitu,
- teplotní křivku, tepelnou stabilitu,
- kompatibilitu polymerních směsí, tepelnou historii polymerních směsí,
- slouží také pro kontrolu vyžihání nebo vytvrzení. [16], [17], [18], [19]

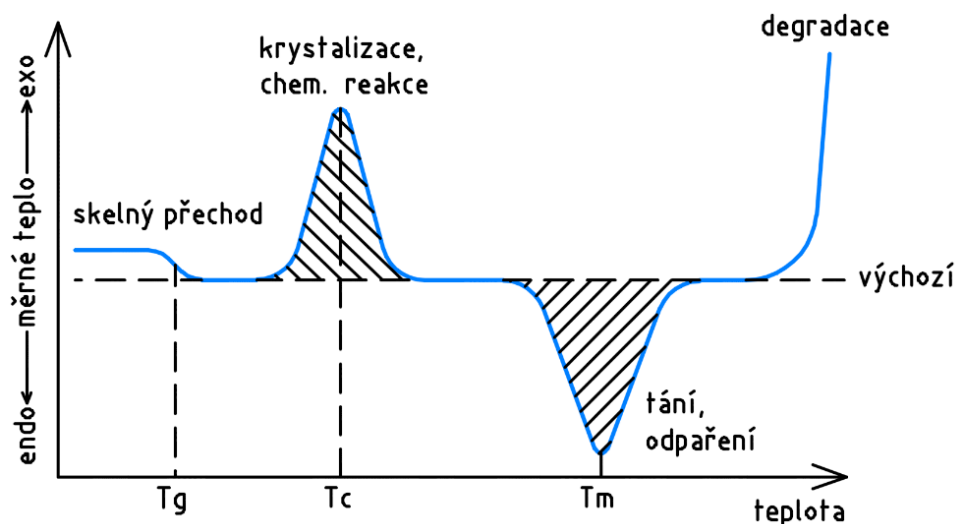


Obr. 15 Schéma měřicí komory [19]

Princip metody

DSC měří množství energie absorbované nebo uvolněné z měřeného vzorku a zároveň sleduje tepelný tok podle předem nadefinovaného teplotního režimu mezi měřeným a referenčním vzorkem. Oba vzorky jsou umístěné do dvou symetrických na sobě nezávislých temperovaných nádobek uvnitř měřicí komory (Obr. 15). Vzorky jsou vyhřívány (exotermní reakce) nebo ochlazovány (endotermní reakce) stejnou rychlostí tak, aby mezi nimi nedocházelo k teplotnímu rozdílu. Množství tepla potřebné k udržení izotermních podmínek je sledováno v závislosti na teplotě anebo času a zajišťuje nulový teplotní rozdíl mezi vzorky.

Měří se velmi malé množství vzorku (v jednotkách miligramů), který je umístěn do kovového kelímku. Jako referenční vzorek se používá prázdný kovový kelímek. Měření lze provádět i při relativně vysokých rychlostech změny teploty (až desítky stupňů za minutu), díky malé tepelné kapacitě celého systému. Čím vyšší je rychlost změny teploty, tím se zvyšuje velikost píku a zároveň se jeho maximum posunuje k vyšším teplotám. Z důvodu možné degradace vzorku se měření provádí za současného promývání měřicí komory inertním plynem. [16], [19], [21]



Obr. 16 Schematický diagram DSC [21]

Schematický diagram DSC je zobrazen na Obr. 16. V oblasti skelného přechodu je patrné klesání specifického tepla v závislosti na teplotě. Toto klesání se projevuje různě. Záleží na typu použitého přístroje. Charakteristický konstantní průběh specifického tepla a jeho následný pík je v oblasti teploty tání. Teplota tání je definována jako teplota, při níž dochází k roztavení většiny krystalů. Teplota i oblast tání jsou závislé na tepelné a

mechanické historii daného materiálu, a proto se měření provádí dvakrát, aby vzorky měly stejnou tepelnou historii pro následné porovnání. Jednou z nejdůležitějších aplikací DSC je identifikace polymerů, která se provádí na základě fázových změn přechodů. [19]

Krystalinita

Podle modernější lamelární teorie, krystalizace je semikrystalický polymer tvořen krystalickou fází. Krystalická struktura vzniká krystalizací ze zředěného roztoku polymeru. Struktura se tvoří ve formě lamel. Pokud je roztok při krystalizaci vystaven smykovému namáhání vznikají vláknité útvary, tzv. fibrily. Krystalizace polymeru probíhá značnou rychlostí až při značném podchlazení taveniny na teplotu mnohem nižší, než je teplota tání daného polymeru. Pomalým ochlazováním se vytváří malé množství zárodků (hrubé krystality). K dosažení jemnozrné struktury je potřeba, aby krystalizace probíhala při teplotě, kdy vzniká velké množství zárodků. [20]

Podíl krystalické fáze (krystalinita) se běžně u studovaného polymeru vypočítá z rovnice (1). Krystalinita polymeru je ovlivněna jeho chemickou strukturou, podmínkami chlazení během procesu a dodatečnými tepelnými úpravami (jeho tepelnou historií). Z vypočteného procenta krystalinity lze za určitých okolností identifikovat polymer. Pro určení krystalinity je nejprve nutné vypočítat změnu entalpie ΔH_m . Ta se vypočítá z DSC křivky z plochy nacházející se pod druhým ohřevem. Pokud je známo o jaký polymer se jedná, z tabulek se vyhledá pro příslušný polymer teoretická hodnota entalpie tání 100 % krystalického polymeru ΔH_m^0 . Tyto hodnoty se dosadí do rovnice pro výpočet krystalinity:

$$\chi_c = \frac{\Delta H_m}{\Delta H_m^0} \cdot 100 [\%] \quad (1)$$

Procento krystalinity se vypočítá porovnáním entalpií ze studovaného vzorku a 100 % krystalického polymeru. Čím nižší je hodnota krystalinity studovaného vzorku s porovnáním krystalinity granulátu materiálu, tím více je možná pravděpodobnost výskytu degradace. [21], [22]

6.2 Termogravimetrická analýza

Termogravimetrická analýza, zkráceně termogravimetrie (TGA), studuje změny hmotnosti, které probíhají v měřeném vzorku v závislosti na teplotě. Výsledkem měření je křivka závislosti hmotnosti na teplotě anebo čase, ze které lze odečíst teploty hmotnostních změn.

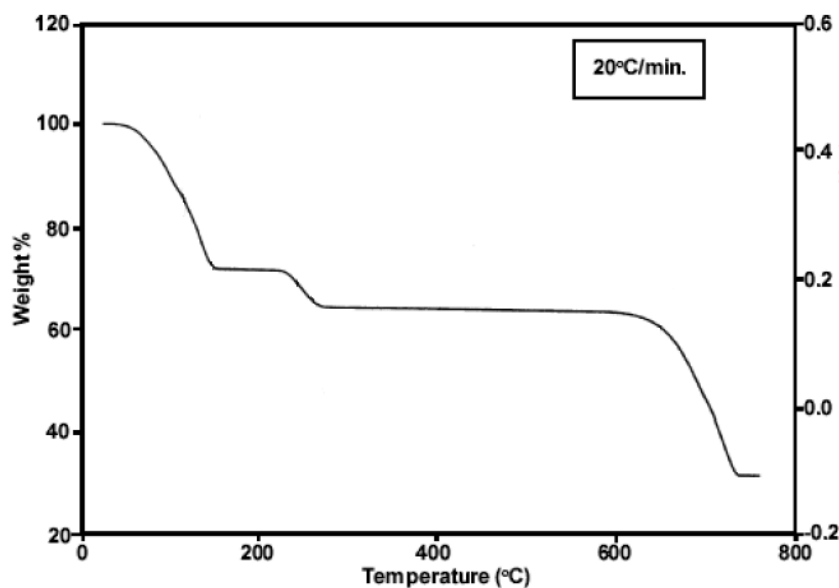
Parametry ovlivňující měření:

- příprava vzorku – navážka, velikost částic, homogenita, napěchování vzorku,
- tvar a velikost nosiče (kelímku),
- pecní atmosféra, pecní tlak a vlhkost,
- teplotní režim,
- rychlost ohřevu, přenos tepla, způsob měření teploty,
- konstrukce přístroje. [18], [23], [24]

Měřený vzorek by měl být homogenní, reprezentovat analyzovaný materiál a neměl by být kontaminován. Je nutné brát v úvahu, že látka s jemnými zrny je reaktivnější než se zrny hrubými. Velikost částic při navážce vzorku rovněž ovlivňuje TGA křivku. Menší kousky vzorku jsou vhodnější než jeden větší. [18], [23]

Princip metody

Měřený vzorek se vloží do kelímku, který je umístěn na termočlánku (snímá aktuální teplotu). Materiálem nosiče (kelímku) je nejčastěji platina, korund nebo oxidová keramika (ZrO_2). Vždy je nutné zvážit oblast stability materiálu nosiče. Vzorek je po celou dobu měření umístěn na stejném místě, v případě posunu (při změně hmotnosti) se vzorek okamžitě vrátí do původní polohy. Tato poloha je snímána nejčastěji optickým senzorem. Nejčastějším materiálem nosiče je již zmiňovaná platina. Její nevýhodou je výrazně vyšší tepelná vodivost než u ostatních materiálů. Jedním z nejdůležitějších parametrů je i teplotní program. [18]



Obr. 17 Ukázka křivky TGA [24]

Výsledkem měření je křivka (*Obr. 17*), kde na ose y mohou být jednotky hmotnosti v miligramech nebo v procentech původní hmotnosti a na ose x je teplota anebo čas. Tvar křivky ovlivňuje rychlost vyhřívání. Čím vyšší je rychlost ohřevu, tím užší je teplotní interval. [24]

Měření probíhá na přístroji, který se skládá z elektrické pece, analytických vah, nosičů vzorků, zařízení pro měření a řízení teploty a počítače. Samotné měření probíhá na termovahách založených na kompenzačním principu. [18], [24]

Z křivek pro které je typický útvar zlom a plato lze odečíst:

- oblasti beze změn – plato (oblast termické stability),
- oblasti se změnami hmotnosti – úbytek nebo nárůst,
- dílčí hmotnostní úbytek,
- celkový úbytek hmotnosti.

Na křivce se mohou objevovat i úseky nesouvisící s měřením. Deformace křivek může být způsobena rozdílem mezi teplotou vzorku a teplotním programem (musí se upravit počítačově).

Tvary křivek:

- křivka bez zlomu – probíhá děj bez změny hmotnosti (např. tání),
- křivka na počátku s úbytkem hmotnosti – typické pro sušení a desorpci,
- na křivce je jeden zlom mezi dvěma platy – typické pro rozklad,
- termický děj probíhá v několika krocích, které jsou odděleny zřetelnými platy,
- termický děj probíhá v několika krocích, které nejsou odděleny jednotlivými platy,
- na křivce mohou být patrné i nárůsty hmotnosti – reakce měřené látky a plynů pecní atmosféry (např. oxidace železa v pecní atmosféře). [18]

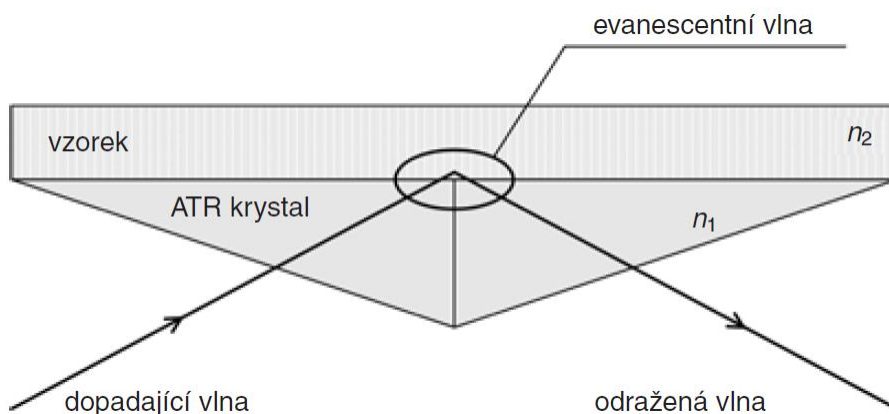
TGA se používá pro identifikaci děje a odečtení velikosti příslušných změn, např. ke sledování sušení, dehydroxylace, tepelného rozkladu, tepelné oxidace, reakce v pevné fázi, reakce pevné a plynné fáze (např. oxidace, redukce, koroze), katalýzy, studiu reakční kinetiky a reakčních mechanismů, identifikaci sloučenin a stanovení jejich čistoty a k určení vlivu aditiv. [18], [23], [24]

6.3 Infračervená spektroskopie s Fourierovou transformací

Infračervená spektroskopie s Fourierovou transformací (FTIR) je název pro univerzální a široce používanou analytickou techniku určenou pro identifikaci a strukturní charakterizaci organických sloučenin a pro stanovení anorganických látek. Metoda je založena na měření pohlcení infračerveného záření o různé vlnové délce při průchodu vzorkem. Infračervené záření je elektromagnetické záření v rozsahu vlnových délek $0,78 - 1000 \mu\text{m}$ (to odpovídá rozsahu vlnočtů $12800 - 10 \text{ cm}^{-1}$). Oblast bývá rozdělena na 3 části. Blízká je $13000 - 4000 \text{ cm}^{-1}$, střední $4000 - 200 \text{ cm}^{-1}$ a vzdálená $200 - 10 \text{ cm}^{-1}$. Nejpoužívanější oblast je oblast střední. [16], [25]

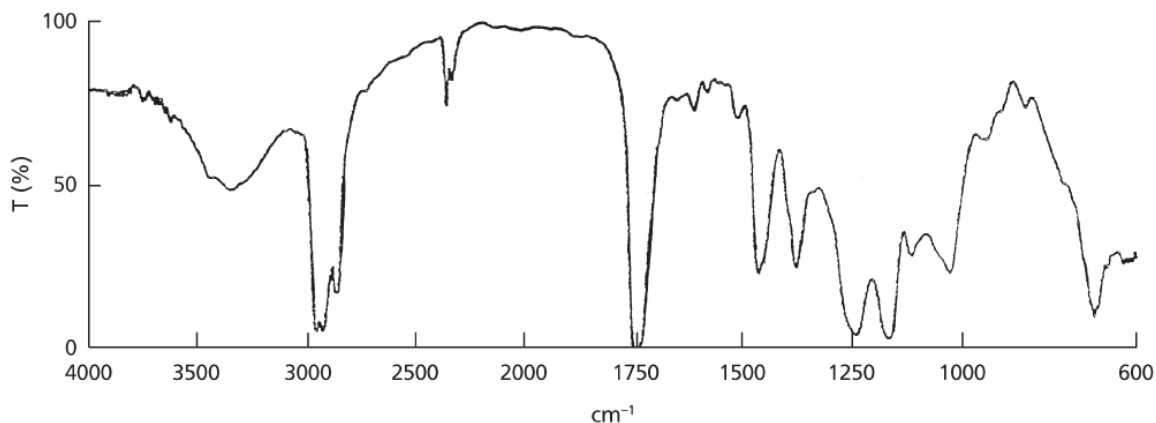
Princip metody ATR

Metoda je založena na principu jednoduchého či vícenásobného úplného odrazu paprsku na rozhraní opticky řidšího prostředí (vzorku) a vnitřního odrazového prvku (Obr. 18). [25], [26]



Obr. 18 Princip ATR metody [26]

Odrazový prvek je krystal, který má vysoký index lomu. Principem metody je absorpce infračerveného záření při průchodu vzorkem, při níž dochází ke změnám rotačně vibračních energetických stavů molekuly v závislosti na změnách dipólového momentu molekuly. Vzniká tzv. evanescentní vlna, která klesá exponenciálně se vzdáleností od rozhraní vzorek – krystal. Výsledkem je graf infračerveného spektra (Obr. 19) v závislosti energie a vlnové délce dopadajícího záření. Energie je vyjádřena v procentech transmitance T nebo jednotkách absorpance A . Touto metodou lze analyzovat pouze povrch vzorku do malé hloubky a je vhodná pro analýzu silnějších vzorků, popř. silně absorbujících vzorků. [25], [26]



Obr. 19 Graf infračerveného spektra pro materiál polyester [16]

Měřicí přístroj (spektrometr) se skládá ze zdroje infračerveného záření, vzorkovací komory a detektoru. Před samotným měřením vzorku je nejdůležitější charakterizovat atmosféru (mohou se zde vyskytovat nežádoucí molekuly). To se provede nejprve očištěním povrchu krystalu, nejčastěji etanolem a poté se změří tzv. pozadí. Vzorek o velikosti několika milimetrů se vloží do vzorkovací komory, kde dochází k měření. Zdroj paprsku je rozdělen na dvě části. Do jedné části je zaveden měřicí se fázový rozdíl a po spojení obou částí se měří výsledné infračervené pásy. Každý polymer má své specifické vazby a infračervené pásy. [16]

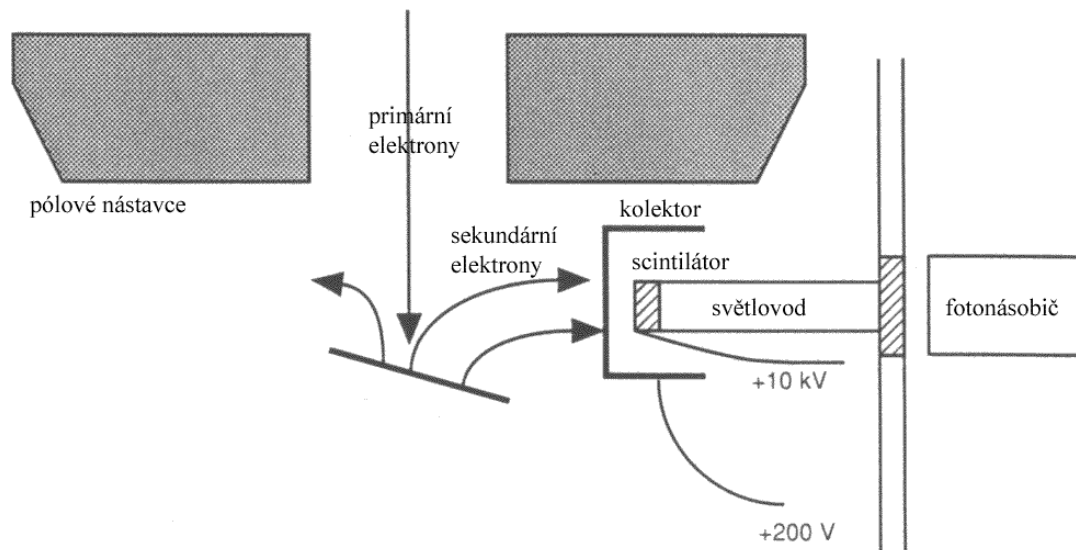
Infračervené pásy mají vrcholy ve střední oblasti $4000 - 1500 \text{ cm}^{-1}$, které jsou vhodné k identifikaci funkčních skupin, např. $-\text{OH}$, $\text{C}=\text{O}$, $\text{N}-\text{H}$, CH_3 . Pomocí infračervených spekter lze snadno identifikovat studovaný polymer. [25]

6.4 Skenovací elektronová mikroskopie

Skenovací elektronová mikroskopie (SEM) známá také jako rastrovací elektronová mikroskopie je metoda, při níž se sleduje povrch zkoumaných vzorků ve velkém zvětšení. Principem je řádkování (rastrování nebo skenování) paprskem elektronů v komoře mikroskopu na malou plochu na povrchu vzorku. Koncentrovaný svazek urychlených elektronů s atomy vzorku produkují signály, které se používají k tvorbě obrazu. Výsledný obraz je tvořen sekundárním signálem odražených nebo sekundárních elektronů, a proto je SEM považováno jako nepřímá metoda měření. [28], [29]

Detektor sekundárních elektronů podle Everhart-Thornley (Obr. 20) je nejčastěji používaný. Tvoří jej scintilátor, který po dopadu uvolní záblesk světla ze středu viditelné oblasti ($550 - 650 \text{ nm}$). Jeho intenzita je přímo úměrná energii elektronů, které ho

vyvolaly. Aby elektrony měly dostatečnou energii na vyvolání světelného pulsu, přivede se potenciál o velikosti 10 kV na tenký kovový film na přední straně scintilátoru, který urychlí dopadající elektrony. Dále je světlo vedeno světlovodem a komoru SEM opouští průchodem přes křemenné okénko. Mimo vakuum je umístěn fotonásobič, který zachycuje světelný signál a převádí jej na elektrický. Přitom signál zesílí o 1000 až 1000000 krát. Nevýhodou detektoru je postupné ztrácení citlivosti scintilátoru. [30]



Obr. 20 Schéma Everhart-Thornleyova detektoru sekundárních elektronů [30]

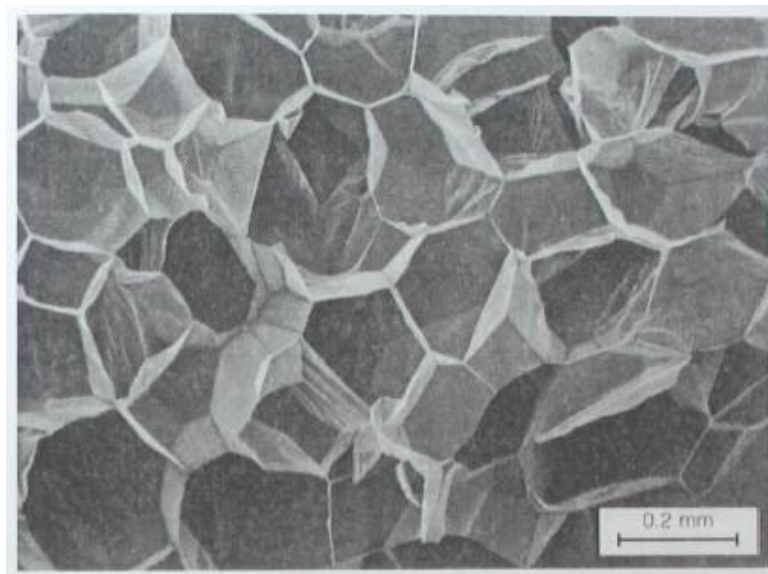
V mikroskopu během měření vzniká rentgenové záření, Augerovy elektrony a katodoluminiscence. Tyto jevy přináší další informace o vzorku, kterými lze určit např. prvkové složení vzorku v dané oblasti a při porovnání s vhodným standardem i kvantitativní zastoupení jednotlivých prvků. Dále SEM přináší informace o fyzikálních a chemických vlastnostech vzorku. [29]

Ke zvětšení obrazu se nepoužívají žádné čočky, zvětšení je dáno poměrem skenované plochy na povrchu vzorku k velikosti monitoru. Čím menší oblast dokáže elektronový svazek na povrchu vzorku vyrašťovat, tím se dosahuje většího zvětšení. Při tomto je potřeba co nejvíce zaostřit svazek elektronů s co nejmenším průměrem svazku. Pokud je vzorkem těžký prvek, dokáže více odrážet paprsky než vzorek tvořený lehkými prvky. [28]

Princip metody

Připravený vzorek se vloží do komory mikroskopu. Principem je řádkování (rastrování nebo skenování) koncentrovaným svazkem elektronů v komoře mikroskopu, které působí na malou plochu na povrchu vzorku. Výstupem je snímek pozorovaného vzorku (Obr. 21).

Obraz se ukládá řádek po řádku. Tímto lze snadno dohledat vhodný detail na povrchu vzorku, který lze ostřit, měnit jeho intenzitu a sledovat vlivy při různém nastavení snímkovací frekvence (nejčastěji se používá 25 snímků za sekundu). Záznam obrazu je prokreslen a je z něj odstraněn šum, při použití pomalejší snímkovací frekvence. Nevýhodou při tomto použití je, že se zvyšuje nabíjení a radiační poškození vzorku. [28]



Obr. 21 Pěnový polystyren [31]

Příprava vzorků:

- odběr vzorku – odstranění povrchových nečistot,
- fixace vzorků – zastavení degradační změny vzorku a zpevnění jeho povrchu,
- dehydratace (odvodnění) vzorku – volná voda ve vzorku se nahradí vhodným organickým rozpouštědlem,
- sušení – vzorek se zbaví organického rozpouštědla, které nahrazovalo vodu,
- lepení vysušených vzorků – připevnění na nosné terčíky, na kterých se vzorky přenáší do komory mikroskopu,
- zvýšení povrchové vodivosti – pokovení vzorku. [28]

SEM se široce používá k identifikaci fáze na základě chemické analýzy kvalitativní anebo krystalické struktury. Dále se využívá ke zkoumání mikrovláken a krystalografické orientaci v různých materiálech. [32]

7 SHRNU TÍ TEORETICKÉ ČÁSTI

V teoretické části diplomové práce bylo popsáno kontaktní svařování horkým elementem, včetně jeho rozdělení na nízkoteplotní a vysokoteplotní svařování. V návaznosti pokračuje popis hlavních procesních parametrů nezbytných pro vývoj procesu svařování. Dále zde bylo popsáno plánování experimentu, které se později v praktické části použilo pro hledání optimálních svařovacích parametrů. Následně navazovaly kapitoly s požadavky na svarové spojení a jeho kvalitu provedení. V závěru jsou uvedeny zkoušky tepelné degradace, které by měly být hlavním přínosem diplomové práce v praktické části.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

8 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Hlavním cílem diplomové práce je porovnání nízkoteplotní a vysokoteplotní oblasti kontaktního SHE. Veškeré zkoušky budou prováděny na zkušebním svařovacím tělísku z neplněného polyoxymethylenu (kopolymeru), konkrétně POM Ultraform S2320 003. Požadavkem je zohlednění krátkodobého a dlouhodobého vlivu teplotní degradace materiálu v ovlivněné oblasti svaru v závislosti na kvalitě a pevnosti spoje.

Účelem praktické části je:

- a) výroba zkušebních svařovacích tělísek,
- b) poté v první fázi najít výchozí parametry pro plánování experimentu (DOE) pro oba způsoby svařování,
- c) provést experiment DOE pro získání optimálních svařovacích parametrů pro obě metody svařování,
- d) na základě provedeného experimentu udělat zkoušku těsnosti a krátkodobou a dlouhodobou destrukční tlakovou zkoušku,
- e) dále zhodnotit kvalitu svarového spojení na základě mikroskopické analýzy a analýzy způsobilosti stroje.

Zkoušky tepelné degradace budou provedeny na základě získaných optimálních svařovacích parametrů v ovlivněné oblasti svarového spojení.

Vybrané zkoušky:

- a) DSC,
- b) TGA,
- c) FTIR,
- d) SEM.

Závěrem bude proveden výpočet pevnosti v tahu svarového spojení pro obě metody svařování.

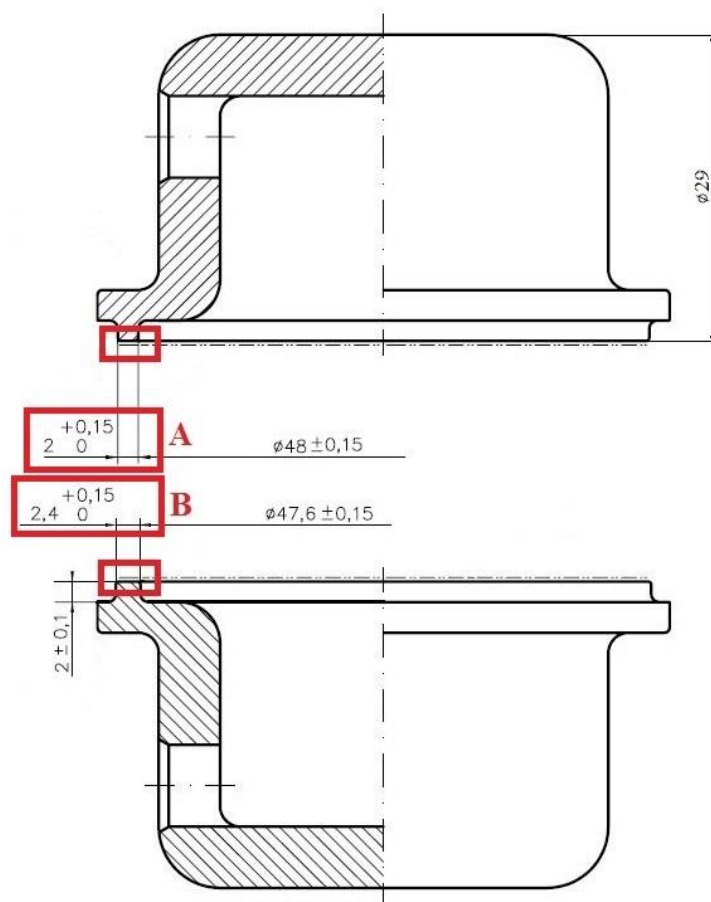
9 ZKUŠEBNÍ SVAŘOVACÍ TĚLÍSKO

9.1 Tvar zkušebních tělísek

Zkušební svařovací tělísko bylo navrženo pouze pro účely vývojových zkoušek na oddělení vývoje procesů (TEF3), v praxi je téměř nepoužitelné.

Stěny tělíska konstrukčně neodpovídají běžným vstřikovaným výrobkům, neboť jsou tlustostěnné. Je to z toho důvodu, aby přednostně docházelo k porušení ve svařovém spojení za účelem testování pevnosti svaru a nikoliv dílu. Pokud tělísko praskne v místě svaru, získá se tím maximální hodnota pevnosti svaru. Obě tělíska mají otvor, který slouží k jejich odvětrání a zároveň k naplnění zkušebním médiem (v tomto případě vodou nebo vzduchem). Mimo jiné, otvor slouží i k upnutí tělísek do přípravku. [11]

Na *Obr. 22* jsou zobrazeny zkušební svařovací tělíska, kde horní tělísko je s označením „A“ a spodní s označením „B“. Tyto tělíska jsou stejná, liší se pouze v šířce svařovací geometrie, která je u tělíska „B“ o 0,4 mm větší, z důvodu zajištění maximální šířky svařového spojení.



Obr. 22 Svařovací geometrie [2]

Pokud by nebyla dodržena sousost tělísek a tím zajištěna maximální šířka svarového spoje, mohlo by dojít k přesazení dílů a tím k redukci nosné plochy svaru s následným ovlivněním pevnosti spoje. Rovinnost svařovací geometrie se pohybuje v toleranci 0,2 mm. V případě větších odchylek od tolerance ji technologie SHE dokáže odstranit během fáze zažehlení. [11]

9.2 Použitý materiál

Zkušební svařovací tělíska byly vyrobeny z materiálu POM ULTRAFORM S2320 003 (Tab. 5) od firmy BASF.

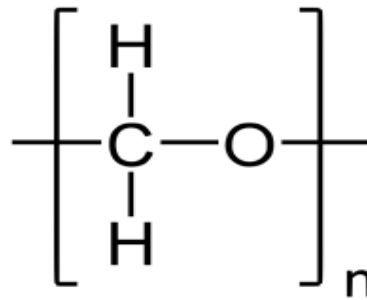
Kde v označení materiálu znamená:

- S – index toku taveniny (N – nejnižší index, Z – nejvyšší index),
- 2320 – rychlost tuhnutí (2320 – nejvyšší),
- 003 – použitý separátor. [5]

Tab. 5 Hlavní vlastnosti POM Ultraform S2320 003 z materiálového listu

Vlastnosti	Jednotka	Hodnota	Testovací metoda
Hustota	kg/m ³	1400	ISO 1183
Teplota tání	°C	167	ISO 11357-1/-3
Index toku taveniny (při 190 °C a zatížení 2,16 kg)	cm ³ /10 min	11	ISO 1133
Modul pružnosti v tahu	MPa	2700	ISO 527-1/-2
Mez pevnosti v tahu	MPa	65	ISO 527-1/-2
Poměrné prodloužení na mezi pevnosti v tahu	%	9	ISO 527-1/-2
Rázová houževnatost Charpyho kladivem (při 23 °C)	kJ/m ²	180	ISO 179/1eU
Vrubová houževnatost Charpyho kladivem	kJ/m ²	5.5	ISO 179/1eA

Polyoxymethylen (POM) patří do skupiny polyacetalů. V technické praxi je známý díky výrobě z formaldehydu jako polyformaldehyd. Jeho chemický vzorec je zobrazen na Obr. 23. [33]



Obr. 23 Chemický vzorec [34]

Vlastnosti

POM je semikrystalický, vysoce nepolární materiál s dobrými elektroizolačními vlastnosti, fyziologicky (zdravotně) nezávadný, má dobré kluzné a otěrové vlastnosti, prakticky vůbec se u něj nevyskytují napěťové trhlinky na vzduchu a má neobyčejně malý tok za studena. Díky vysokému stupni krystalinity (nad 70 %) má velice dobrou odolnost proti slabým kyselinám a zásadám, alkoholům, olejům a organickým rozpouštědlům. Navlhavost je u něj zanedbatelná. POM je citlivý na UV paprsky, proti kterým se nejlépe stabilizuje aktivními sazemi. Odolnost proti hoření se u něj nedá zvýšit přísadami. Vyznačuje se vysokou tvrdostí, pevností a rázovou houževnatostí až do $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Používá se v rozmezí teplot od $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$. [4], [5], [33]

Výroba

POM se vyrábí polymerací zkapalněného formaldehydu při $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ za přítomnosti alkoholátů nebo terciálních aminů. Samotný formaldehyd polymeruje snadno, ale v případě reaktivního monomerního formaldehydu, je jeho polymerace ve vysoce čisté formě obtížná, protože polymerace vyvolává stopy nečistot. Pro výrobu POM pro použití v technické praxi je nutný velice čistý monomerní formaldehyd nebo jeho trimer dioxan bez polárních nečistot. Aby nedocházelo ke vzniku nízkomolekulárních produktů s vysokým obsahem hydroxylových skupin, musí být obsah vody v monomeru minimální. Voda působí při aniontové a kationtové polymeraci jako přenašeč. Každý polymer vzniklý samovolnou neřízenou polymerací je křehký a při tavení se rozkládá na plynný formaldehyd. [4], [33]

Použití

Jako bílý granulát se nejčastěji používá pro vstřikování (až 90 %). Při použití nukleačních činidel, lze zvýšit krystalizační rychlost a zkrátit tak čas vstřikovacího cyklu. Dále je vhodným materiálem ke svařování za nízkých teplot ($210 - 240\text{ }^{\circ}\text{C}$, s časem ohřevu 5 –

30 s). Pro stanovení optimálních svařovacích parametrů je nejvhodnější provést DOE. Mimo jiné je vhodný pro výrobu předmětů, které musí odolávat náhlým nárazům, např. klín západky u dveří automobilu, ozubené kola a jiné. [4], [33]

Aplikace použití

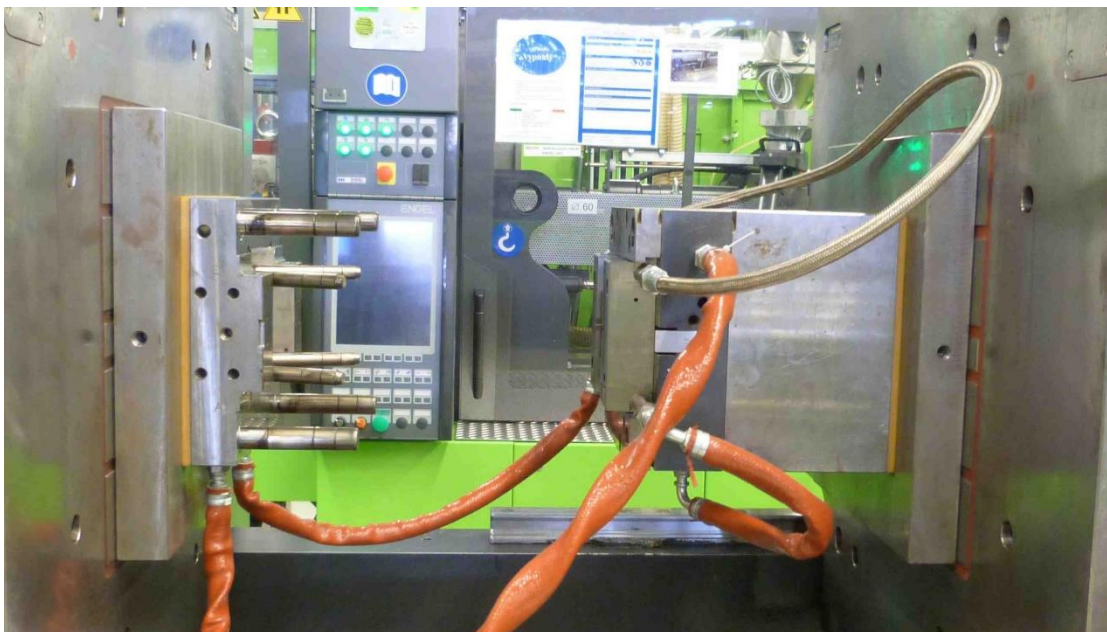
V RBCB se nejvíce používá pro výrobu nádržových čerpadlových modulů, filtračních tlakových nádob a podsestav přírub s tlakovými nádobami.

9.3 Výroba zkušebních svařovacích tělísek

Výroba tělísek probíhala na vstřikovací stroji ENGEL VC 650H/200V/180 Combi (*Obr. 24*) dle procesních parametrů zobrazených v *Tab. 6*. K výrobě dílů byla použita dvojnásobná vstřikovací forma (*Obr. 25*) se svařovací geometrií určenou pro technologii SHE, kde výstřik umístěný do horního svařovacího přípravku má označení „A“ a výstřik umístěný do dolního svařovacího přípravku „B“. Výstřiky obou tělísek jsou zobrazeny na *Obr. 26*.



Obr. 24 Vstřikovací stroj ENGEL [5]



Obr. 25 Vstřikovací forma na zkušební svařovací tělisko [5]

Tab. 6 Vstřikovací parametry

Parametr	Jednotka	Hodnota
Teplota taveniny	°C	210
Teplota temperace	°C	90
Čas vstřiku	s	1,17
Čas dotlaku	s	15
Čas chlazení	s	20
Čas cyklu	s	41,24
Uzavírací síla	kN	600
Vstřikovací tlak (hydraulického lisu/taveniny)	bar	100/847



Obr. 26 Zkušební svařovací tělisko

Po vystříknutí se nechala tělíska před další technologickou operací v exikátoru po dobu 48 hodin a poté byla připravena pro svařování.

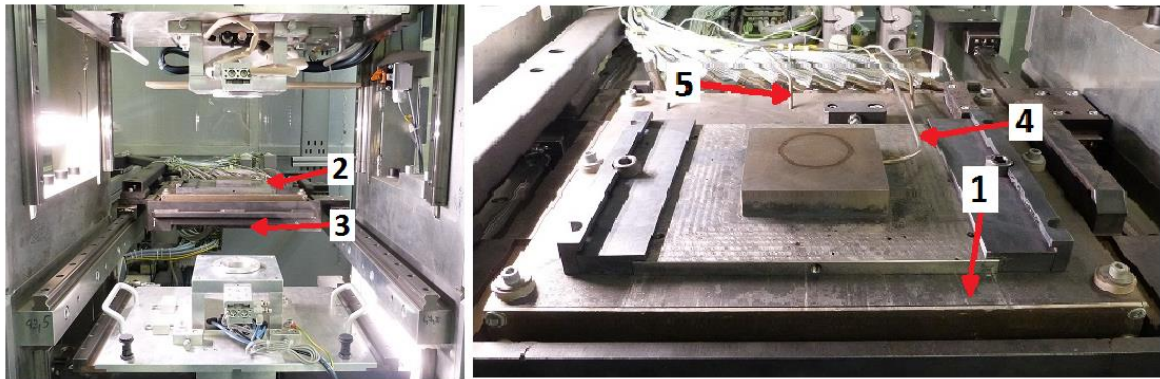
9.4 Zkušební svařovací stroj

Pro svařování zkušebních svařovacích tělísek byl použit zkušební svařovací stroj od firmy TEAZ (Obr. 27). Stroj je vertikální s horizontálně pohyblivým horkým elementem a jednohřízdý se servopohony. Konstrukčně splňuje veškeré požadavky jak pro nízkoteplotní tak vysokoteplotní SHE. Maximální teplota, která lze použít v tomto stroji je 500 °C na povrchu svařovacích desek nebo 570 °C uvnitř HE. [13]



Obr. 27 Zkušební svařovací stroj TEAZ

Nejdůležitějším prvkem celého stroje (Obr. 28) je elektricky vytápěný HE (1), který je tvořen deskami, navzájem oddělenými izolací, která brání vzájemnému teplotnímu ovlivňování horní (2) a dolní (3) svařovací desky. Díky tomuto oddělení lze na obou svařovacích deskách nastavit rozdílnou teplotu pro svařování. Regulace teploty probíhá pomocí snímače teploty buď těsně pod povrchem svařovacích desek (4), nebo uvnitř HE (5). [13]



Obr. 28 Detail vnitřku zkušebního svařovacího stroje

Popis postupu při svařování na zkušebním stroji:

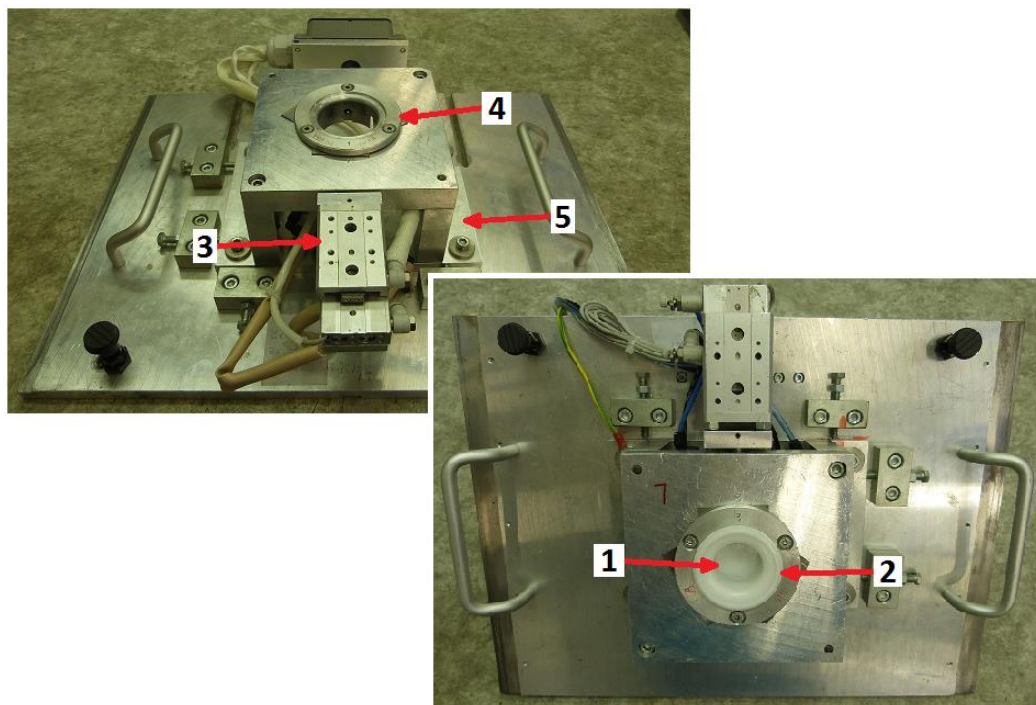
Nejprve se založí díly do svařovacích přípravků (horní díl je do upnutí přidržen předpruženým upínacím prvkem). Poté se spustí automatický cyklus, který se předem nastaví. Nejprve se uzavře horní a spodní ochranný kryt. Poté se upne horní a spodní díl do svařovacích přípravků (přípravky obsahují optické senzory pro kontrolu založení dílů). Obě vertikální a horizontální jednotky HE najedou do startovní polohy. Poté obě vertikální jednotky přijedou ke svařovacím deskám (zatím bez kontaktu dílu se svařovací deskou). Dochází k zažehlení dílů (od prvního kontaktu až do definované dráhy zažehlení). Ihned po zažehlení dochází k ohřevu dílů. Po ohřevu se natavené díly odtrhnou od svařovacích desek a vertikální jednotky odjedou od HE do bezpečné vzdálenosti. Horizontální jednotka HE odjede do výchozí pozice. Vertikální jednotky přijedou těsně k sobě, ale zatím bez dotyku dílů. Poté dojde ke spojení natavených dílů do definované hloubky. Následuje chlazení spojených dílů s dotlakem nebo bez dotlaku. Po chlazení se nejprve horní část svařence uvolní z přípravku a horní vertikální jednotka odjede do výchozí pozice. Poté se uvolní dolní část svařence z přípravku a spodní vertikální jednotka odjede do výchozí pozice (svařený díl zůstává ve spodním svařovacím přípravku). Ochranný kryt se otevře a dochází k vyjmutí svařence. [13]

Během veškerého svařování byly teploty na povrchu svařovacích desek hlídány externím zařízením pyrometr RAYNGER MX4 od výrobce Raytek s kontaktní sondou.

9.4.1 Svařovací přípravky a jejich konstrukce

Hlavními funkcemi svařovacích přípravků (Obr. 29) jsou upínání a kontrola přítomnosti a správného uložení svařovaných dílů. Svařovací přípravky musejí být konstruovány tak, aby v žádném případě nepoškodily svařované díly (1), umožňovaly přesně definované ustavení

dílů a podepíraly je co nejlíže pod svařovací geometrií (2). Upnutí dílů je pomocí pneumatických upínačů (3), které musejí být umístěny mimo funkční plochy. Svařovací přípravky jsou složeny z jednotlivě seřiditelných segmentů (4), které jsou uloženy na seřiditelné mezidesce (5) pro snazší nastavování souososti. Všechny pohyblivé části svařovacích přípravků jsou vybaveny snímači koncových poloh. Tvarové segmenty a svařovací desky musejí mít vhodnou povrchovou ochranu, aby se zabránilo případné korozi. [5]



Obr. 29 Svařovací přípravky pro zkušební svařovací tělísko

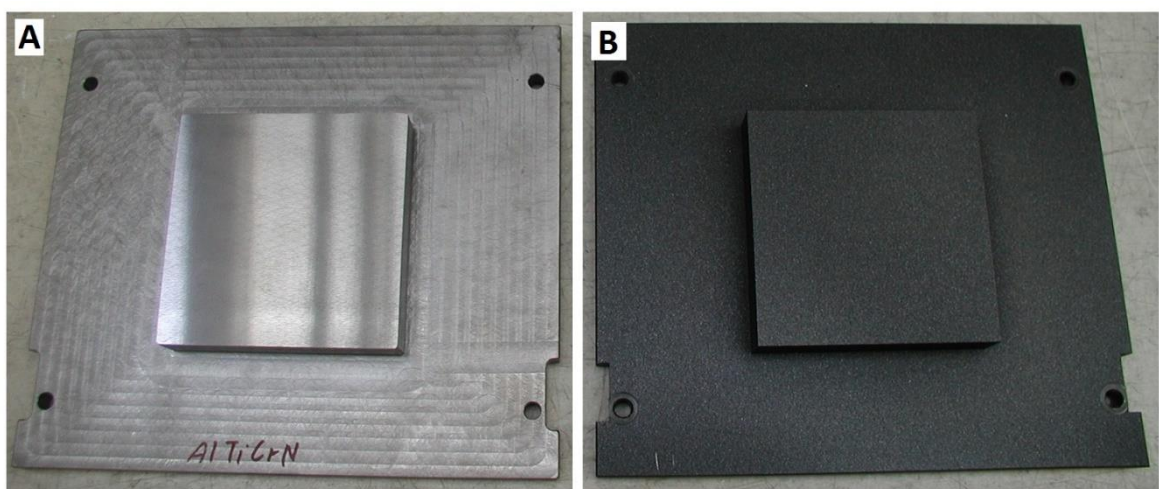
9.4.2 Svařovací desky

Svařovací desky jsou hlavním nositelem energie dodané HE do svařovací geometrie dílů. Přenos tepelné energie zajišťuje vznik taveniny, která po spojení dílů tvoří svarový spoj. Při používání kontaktní metody svařování jsou na desky kladeny přísné požadavky, protože jsou v přímém kontaktu se svařovanými díly a ovlivňují tak výslednou kvalitu svarového spoje a stabilitu procesu svařování. Desky tvoří jeden pár, který se skládá z horní a spodní svařovací desky. To znamená, že horní deska je určena pro přenos tepelné energie do horního dílu a spodní deska do spodního dílu.

Materiál POM má velmi nízkou povrchovou energii, tzn., má vyšší tendenci k lepidlosti. Proto se používá jako základní materiál svařovacích desek slitina AlMg5 (Alplan). Tento materiál je vhodný pro nanášení/repovlakování antiadhezních povlaků na bázi PTFE a má

výbornou tepelnou vodivost. Nevýhoda PTFE povlaků je, že maximální teplota použití na povrchu svařovacích desek je omezena na cca 270 °C. Pro svařování nad tuto teplotu se nejčastěji používají svařovací desky s antiadhezními PVD povlaky, které zaručují stálost povrchových vlastností svařovacích desek. PVD povlaky se nanášejí ve vakuu na desky vyrobené z oceli třídy 14, například 14 220 (1.7131). [5]

V praktické části byly použity svařovací desky pro nízkoteplotní svařování hliníkové s povlakem na bázi PTFE do 260 °C (Obr. 30b) a pro vysokoteplotní svařování ocelové s povlakem AlTiCrN (Obr. 30a).



Obr. 30 Svařovací desky: a) ocelová s povlakem AlTiCrN, b) hliníková s povlakem na bázi PTFE [13]

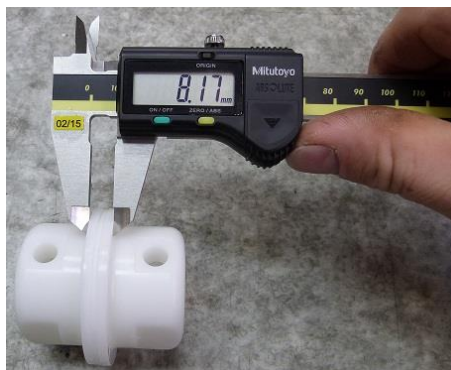
Upínání svařovacích desek na HE

Svařovací desky jsou na HE upnuty pomocí rychloupínacích ližin. Před upnutím jsou doraženy na koncový doraz a zajištěny. Levá i pravá ližina je opatřena šroubem, který při dotažení pevně sevře horní i spodní svařovací desku. Pozice svařovací desky závisí na správném doražení na koncový doraz. [5]

10 METODY ZKOUŠENÍ

10.1 Měření rozměru přes svar

Rozměr přes svar byl vždy měřen ve stejném místě pomocí digitálního posuvného měřidla MITUTOYO s rozsahem 0 – 150 mm a odchylkou $\pm 0,02$ mm (Obr. 31). Velikost rozměru přes svar u nesvařených zkušebních svařovacích tělísek je 10 mm.



Obr. 31 Měření rozměru přes svar

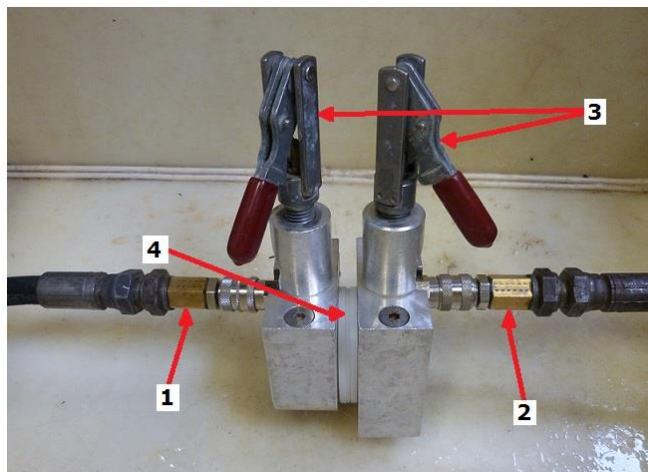
10.2 Krátkodobá tlaková destrukční zkouška

Zkouška se prováděla na zařízení pro tlakovou destrukční zkoušku (Obr. 32). Zkušební zařízení je samostatně stojící stroj se zakrytým pracovním prostorem, počítačem s řídicí aplikací, pohonem a hydraulickým testovacím obvodem. Pro bezpečnost pracovníků a pro kontrolu místa průběhu testu je kryt pracovního prostoru vyroben z průhledné polykarbonátové desky. Hlavní zdroj tlaku tvoří dva tlakové válce (první má rozsah do 120 bar, druhý do 250 bar).



Obr. 32 Zkušební tlakovací zařízení

Přípravek (*Obr. 33*) na zkušební svařovací tělísko (4) musí být vyroben tak, aby při upnutí nebyla v žádném případě ovlivněna pevnost a místo destrukce testovaného vzorku, tzn., testovaný vzorek nesmí být předepínán, přidržován ani upínán přes svar. Přípravek se skládá z odvzdušňovací hadice (1), přívodu média (2) a pákových upínačů pro utěsnění otvorů (3). Připojení na tlakovou a odvzdušňovací hadici je řešeno pomocí rychlospojek. [5]



Obr. 33 Přípravek na zkušební svařovací tělísko

Parametry nutné pro nastavení zkoušky jsou uvedeny v *Tab. 7*. Jako zkušební médium byla použita voda.

Tab. 7 Parametry pro tlakovou destrukční zkoušku

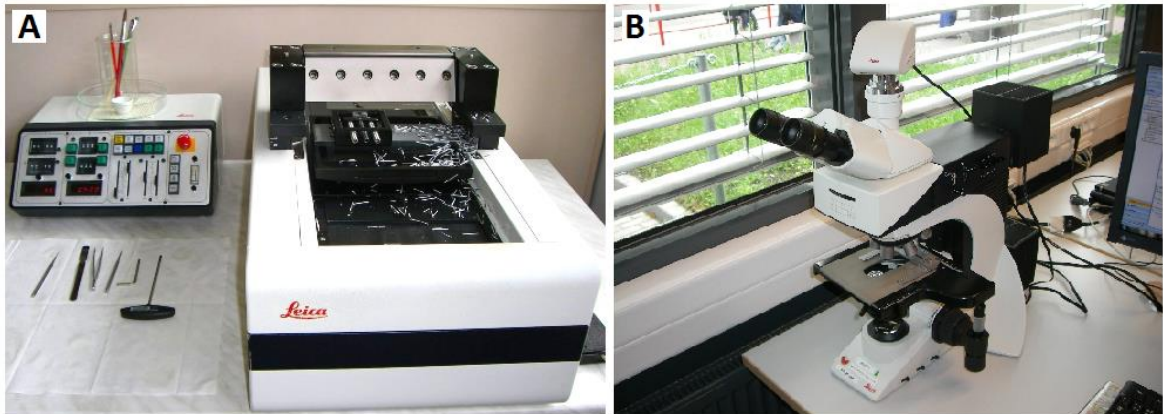
Doba proplachu	7 s
Max. doba tlakování s regulací	300 s
Mezní tlak pro tlakování s regulací	250 bar
Gradient nárůstu tlaku	1 bar/s
Pokles tlaku pro detekci porušení	5 bar

10.3 Zkouška těsnosti

Zkouška těsnosti se prováděla v zařízení na tlakovou destrukční zkoušku pomocí bublinkové metody. Do pracovního prostoru zařízení byla vložena nádoba s vodou, do které se vkládal přípravek s upnutým zkušebním svařovacím tělískem. Přípravek byl použit stejný jako u tlakové destrukční zkoušky. Rozdílem bylo použití pouze jedné hadice s přívodem vzduchu. Svařovací tělísko bylo tlakováno vzduchem o zkušebním tlaku 2 bar po dobu 30 s.

10.4 Mikroskopická analýza

Řezání vzorků probíhalo na mikrotomu Leica (*Obr. 34a*) ocelovým nožem z karbidu wolframu (WC). Mikrotomový řez byl zkoumán pod mikroskopem Leica (*Obr. 34b*) s polarizovaným světlem, které dokáže odhalit skryté vady. [14]



Obr. 34 Přístroje na mikroskopickou analýzu: a) přístroj na řezání vzorků, b) mikroskop [13]

Zaliti vzorku do formičky bylo daným poměrem pryskyřice metylmetakrylátu (MMA) a tvrdidla s dobou tvrdnutí 15 – 20 min při 2 bar. Poté byl vzorek řezán na tloušťku 10 μm a vložen mezi PE fólii a sklíčko. [14]

10.5 Dlouhodobá tlaková zkouška

Dlouhodobá tlaková zkouška se prováděla na speciálním zařízení (*Obr. 35*), které má samostatně stojící zásobník s pracovním prostorem, do kterého se vkládají jednotlivé větve se zkušebními díly. Počet větví v tomto zařízení je 5 a větve mohou být zatěžovány rozdílným tlakem. Zařízení je do poloviny své výšky naplněno demineralizovanou vodou a pracuje nepřetržitě. Teplota kapaliny je nastavována a udržována pomocí temperačního zařízení. K zaznamenávání a sledování průběhu zkoušky slouží počítač s řídicí aplikací. Aplikace sleduje aktuální výšku a teplotu kapaliny a zaznamenává tlakovou zátěž na díly a čas testu. [2], [5], [12]

Přípravek na zkušební svařovací tělísko (*Obr. 36*) je konstruován z hadice s přívodem zkušebního média a šroubu sloužícího pro ucpání otvoru. Zkušební svařovací tělísko je k hadici upevněno pomocí šroubení. Jako zkušební médium byla použita demineralizovaná voda s teplotou 60 $^{\circ}\text{C}$. Zkouška probíhala na 2 hladinách zatížení. První byla se zatížením 9 bar a druhá se zatížením 5 bar.



Obr. 35 Zařízení na dlouhodobou tlakovou zkoušku



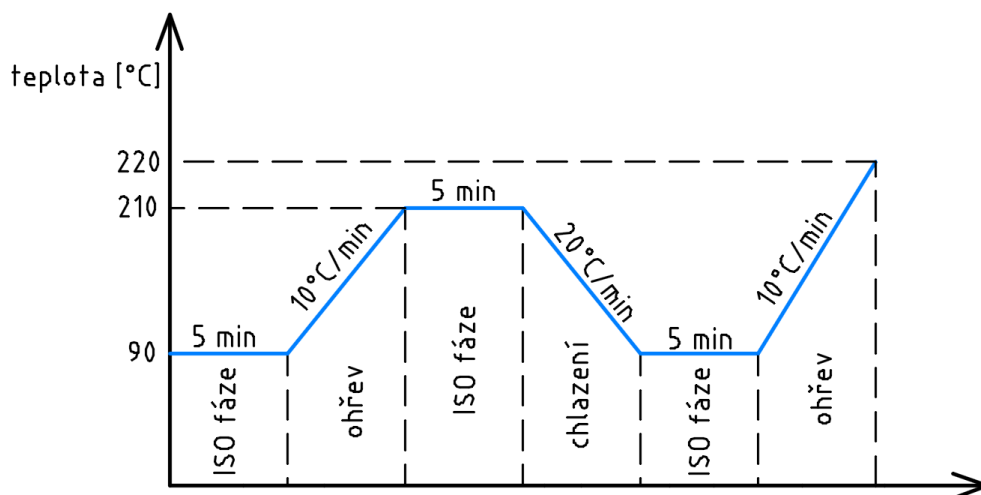
Obr. 36 Přípravek na dlouhodobou tlakovou zkoušku

10.6 Diferenční skenovací kalorimetrie

Na měření DSC byl použit měřicí přístroj Mettler Toledo DSC 1 START (*Obr. 37*). Na přístroji byly nastaveny teplotní režimy zobrazené na obrázku (*Obr. 38*). Samotné měření probíhalo při teplotním ohřevu/chlazení 10 °C/min v atmosféře při průtoku 25 ml/min dusíku. Hmotnost vzorků byla vážena v rozmezí od $5,5\text{ mg}$ do $6,5\text{ mg}$ na mikrovahách. Poté byly vzorky zalisovány do kovového kelímku. Jako referenční vzorek byl použit prázdný kovový kelímek.



Obr. 37 Měřicí přístroj Mettler Toledo DSC 1 START [35]



Obr. 38 Teplotní režimy DSC

10.7 Termogravimetrická analýza

TGA bylo měřeno na termogravimetrickém analyzátoru TGA Q500 od společnosti TA Instruments (Obr. 39). Měřicí zařízení se skládá z elektrické pece, analytických vah, nosičů vzorků, zařízení pro měření a řízení teploty a počítače. Samotné měření probíhalo na termovahách založených na kompenzačním principu.

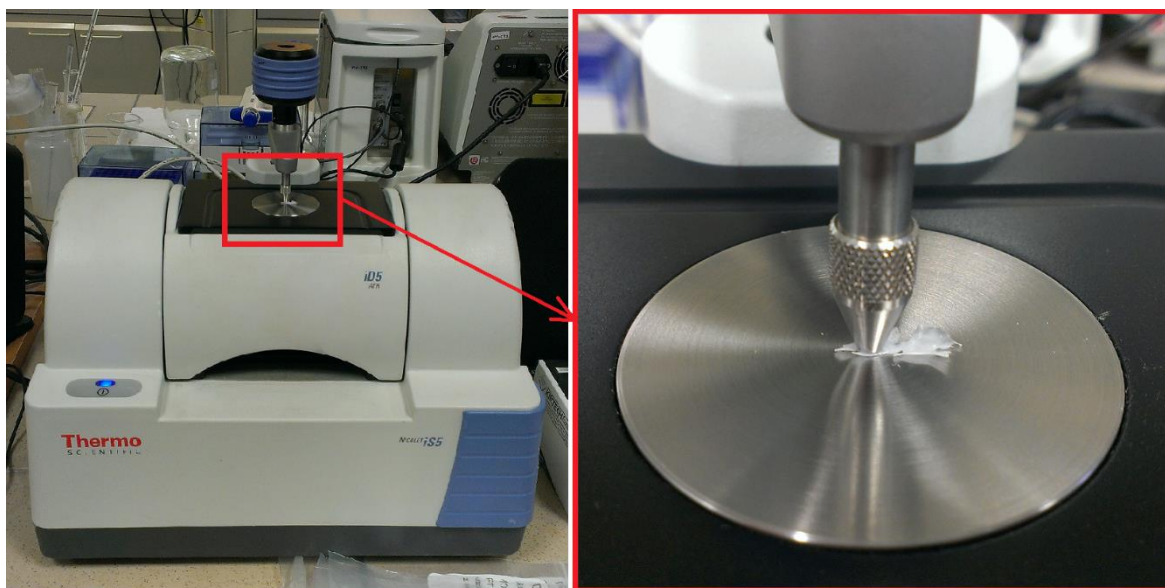


Obr. 39 Termogravimetrický analyzátor [35]

Měřený vzorek byl umístěn do kelímku z materiálu hliníku. Měření probíhalo za proudění vzduchu 100 ml/min při teplotním rozmezí 25 – 650 °C s ohřevem 10 °C/min.

10.8 Infračervená spektroskopie s Fourierovou transformací

FTIR se prováděla na měřicím přístroji Thermo SCIENTIFIC Nicolet iS5 (Obr. 40). Přístroj se skládá ze zdroje infračerveného záření, vzorkovací komory a detektoru. Při vkládání vzorku byl kladen důraz na možnost poškrábání krystalu, proto byly použity plastové pomůcky (pinzeta a tyčinka).



Obr. 40 Přístroj Thermo SCIENTIFIC Nicolet iS5

Krystal byl použit Zinek seleniový (ZnSe). Před vlastním měřením vzorku proběhlo vždy měření pozadí pro charakterizaci atmosféry. Povrch krystalu byl čištěn etanolem $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$. Skenování bylo nastaveno na 64 snímků s rozlišením 2 cm^{-1} . Měření probíhalo odrazovou metodou, neboli technikou zeslabeného úplného odrazu ve střední oblasti s rozsahem měření $4000 - 675 \text{ cm}^{-1}$.

10.9 Skenovací elektronová mikroskopie

SEM byla provedena na přístroji TESCAN VEGA II (Obr. 41). Na přístroji byl použit detektor sekundárních elektronů. Snímky byly pořízeny se zvětšením 500x a 2000x. Urychlovací napětí bylo nastaveno na 5 kV.



Obr. 41 Měřicí přístroj TESCAN VEGA II [36]

11 HLEDÁNÍ VÝCHOZÍCH SVAŘOVACÍCH PARAMETRŮ

Vývoj procesu

Před zahájením každého nového experimentu je nejdůležitější udělat tzv. vývoj procesu, který spočívá v hledání prvotních svařovacích parametrů. Veškeré svařování zkušebních svařovacích tělísek probíhalo na zkušebním svařovacím stroji.

Přípravek

Nejprve se musí zhotovit přípravek pro zkušební svařovací tělísko na zkušební svařovací stroj (v tomto případě byl přípravek již dříve vyroben na dílně oddělení RBCB/TEF3). Tělíska musí být v přípravku upnuta tak, aby jejich svařovací geometrie byla rovnoběžná se svařovací deskou a po upnutí nedocházelo k jejich pohybu. Pozice dílu musí být opakovatelná.

Souosost

Souosost se nastavuje pomocí mezi-desky přípravku tak, aby po svaření nedocházelo k většímu přesazení dílu vůči dílu. Při správném nastavení dochází téměř k úplnému kontaktu obou svařovacích geometrií. Cílem je získat maximální plochu svarového spoje.

Pracovní pozice HE

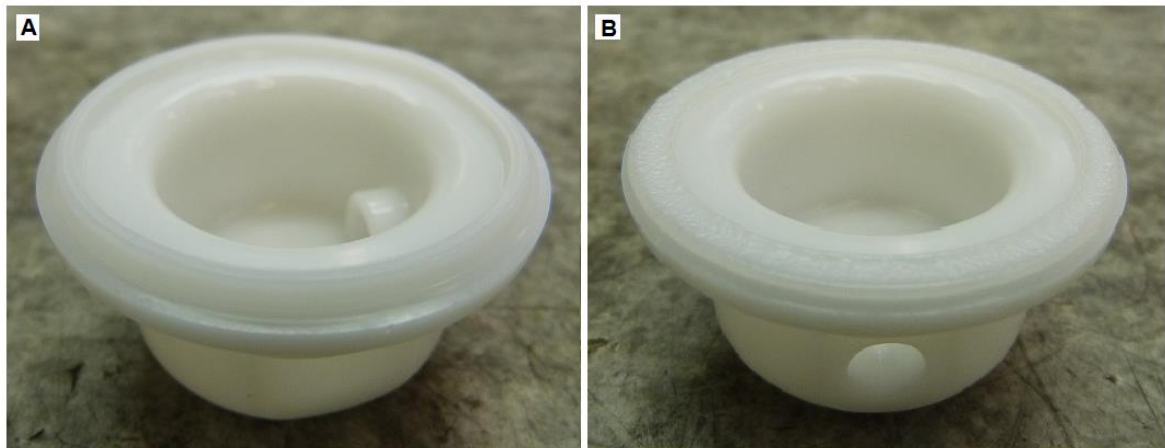
Svařovací geometrie tělísek by měla být uprostřed svařovací desky, která je umístěná na HE.

Hledání pozice zažehlení

Hledání pozice zažehlení probíhá v ručním režimu. Přípravky s vloženými a mechanicky upnutými díly se z výchozí polohy horní a dolní lisovací jednotky přibližují ke studeným svařovacím deskám tak dlouho, dokud nedojde k prvnímu kontaktu svařovací geometrie tělíska se svařovacími deskami (získá se tak pozice prvního kontaktu). Dále se zvolí bezpečná vzdálenost (v tomto případě 1 mm před prvním kontaktem) od této dráhy (pozice *P1*).

V dalším kroku, již při nahřátých svařovacích deskách, se přidává po 0,1 mm na obě strany dráhy, která se měří od výchozí polohy horní a spodní lisovací jednotky (*Obr. 43*). Přidává se tak dlouho, dokud se nenajde pozice, kde celá svařovací geometrie bude natavena (pozice *P2*).

U nízkoteplotního svařování lze správné zažehlení velice dobře poznat ze vzniklého výronku podél svařovací geometrie (Obr. 42a). U vysokoteplotního svařování je to těžší, z důvodu většího roztavení povrchu, vlivem vysokých teplot na povrchu svařovacích desek (Obr. 42b).



Obr. 42 Svařovací geometrie po zažehlení: a) nízkoteplotní, b) vysokoteplotní svařování

Přestavení

Přestavení je pozice, kdy přípravky odjedou do bezpečné vzdálenosti od svařovacích desek (pozice *P3*), aby se HE mohl vrátit do základní polohy. Čas přestavení by měl být co nejkratší, z důvodu možného začátku krystalizace natavené vrstvy. Hodnota času je ovlivněna nastavením bezpečné vzdálenosti svařovacích přípravků od svařovacích desek (v tomto případě 10 mm). Tento čas je pouze kontrolován, jestli nedochází k jeho překročení (v tomto případě by neměl přesáhnout 2,5 s).

Pozice před svařením

V pozici před svařením jsou díly těsně u sebe, ale bez kontaktu (pozice *P4*). Zpravidla je tato pozice o 1 mm kratší než pozice *P5* (poloha svaření).

Svaření

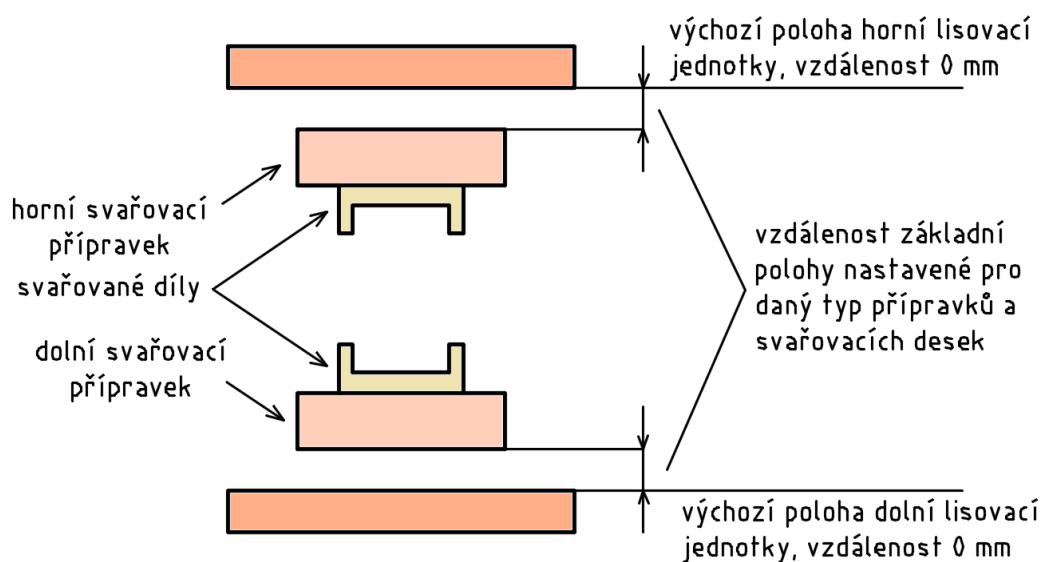
U zažehlených dílů se odstraní přetoky. Přetoky se chovají pokaždé jinak a jsou umístěné výše než svařovací geometrie. Po prvním společném kontaktu dílů se přidá k dráze spojení cca 0,2 mm (pozice *P5*). [11]

Tímto postupem se získá prvotní nastavení drah. V případě použití jiného materiálu se postupuje stejným způsobem.

Nízkoteplotní svařování

Parametry k hledání

V této fázi je nutné znát vstupní teplotní rozmezí pro DOE, které bylo v tomto případě zvoleno od 180 °C do 230 °C. Teplota tavení použitého materiálu je 167 °C, která se získá z materiálového listu. K této teplotě se zpravidla přidává ještě cca 10 °C (na základě zkušeností). Při experimentu DOE se vychází ze střední hodnoty teplot, které se pro tento experiment zvolily. V tomto případě byla teplota na povrchu svařovacích desek nastavena na 205 °C. Čas ohřevu byl zvolen 20 s, čas přestavení, který se pouze kontroluje 2,5 s a čas chlazení 10 s. Všechny tyto časy byly zvoleny na základě zkušeností.



Obr. 43 Schéma základní polohy přípravků na svařovacím stroji

Průběh hledání

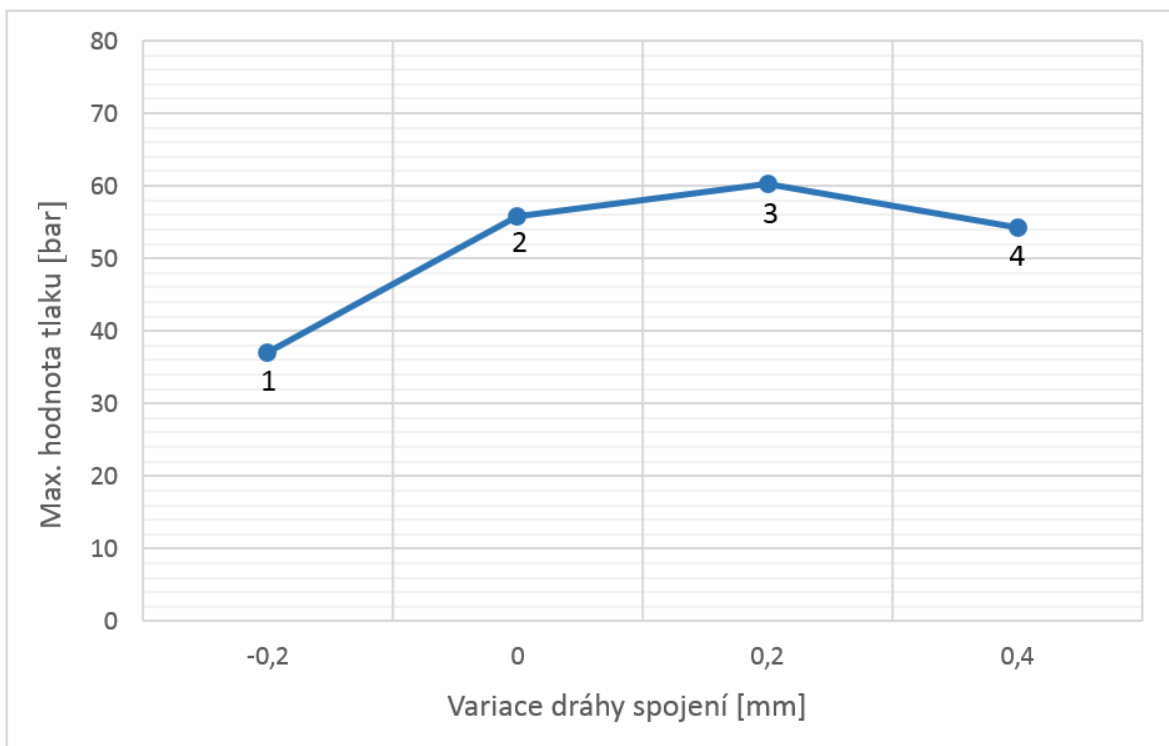
Základní poloha horního svařovacího přípravku byla 50 mm od horní lisovací jednotky a dolního svařovacího přípravku 65 mm od dolní lisovací jednotky (Obr. 43). První kontakt dílů se svařovací deskou byl na dráze 236,5 mm u tělíska A a 252,1 mm u tělíska B. Na dráze u tělíska A bylo přidáno 0,3 mm a u tělíska B 0,4 mm. Optimální dráha pro zažehlení (pozice P2) byla pak u tělíska A 236,8 mm a u tělíska B 252,5 mm. Poté následovalo hledání dráhy spojení. První společný kontakt dílů byl na dráze 299 mm od horní lisovací jednotky a 315 mm od dolní lisovací jednotky. K drahám bylo přidáno 0,2 mm a získalo se tak prvotní nastavení pro svaření zkušebních svařovacích tělísek za nízkých teplot.

V dalším kroku byla provedena variace dráhy spojení (Tab. 8). Variace probíhala přidáním/úběrem 0,2 mm na dráze spojení u horní lisovací jednotky (rovněž lze použít i u dolní lisovací jednotky) u pozic P4, P5 a P6. Pro kontrolu byl změřen rozměr přes svar a byla provedena krátkodobá tlaková destrukční zkouška, na základě které se stanovily výchozí parametry pro DOE u nízkoteplotního svařování.

Tab. 8 Variace dráhy spojení

Díl	Variace dráhy spojení [mm]	Pozice horního lisu P5 [mm]	Rozměr přes svar [mm]	Max. hodnota tlaku [bar]	Místo praskliny
1	-0,2	299,0	9,55	37	svar
2	0,0	299,2	9,37	55,8	svar
3	+0,2	299,4	9,18	60,3	svar
4	+0,4	299,6	9,01	54,2	svar

Z Obr. 44 vyplývá, že při prodloužení dráhy spojení u dílu 3 o +0,2 mm se dosahuje nejvyššího tlaku, a proto byla tato dráha volena jako výchozí. Při zkrácení dráhy o -0,4 mm by mohlo dojít k netěsnosti svarového spojení (vlivem vzduchových dutin) a velikost tlaku by byla dle trendu nižší.



Obr. 44 Závislost dráhy spojení na tlaku

Vysokoteplotní svařování

Parametry k hledání

U vysokoteplotního svařování se vycházelo z výchozích parametrů pro nízkoteplotní svařování. Teplota na povrchu svařovacích desek byla nastavena na 360 °C. Pro DOE bylo zvoleno rozmezí teplot 310 – 410 °C. Čas ohřevu byl zvolen nižší a to 10 s, z toho důvodu, že u vysokoteplotního svařování dochází k rychlejšímu natavení povrchu vlivem vysokých teplot na povrchu svařovacích desek.

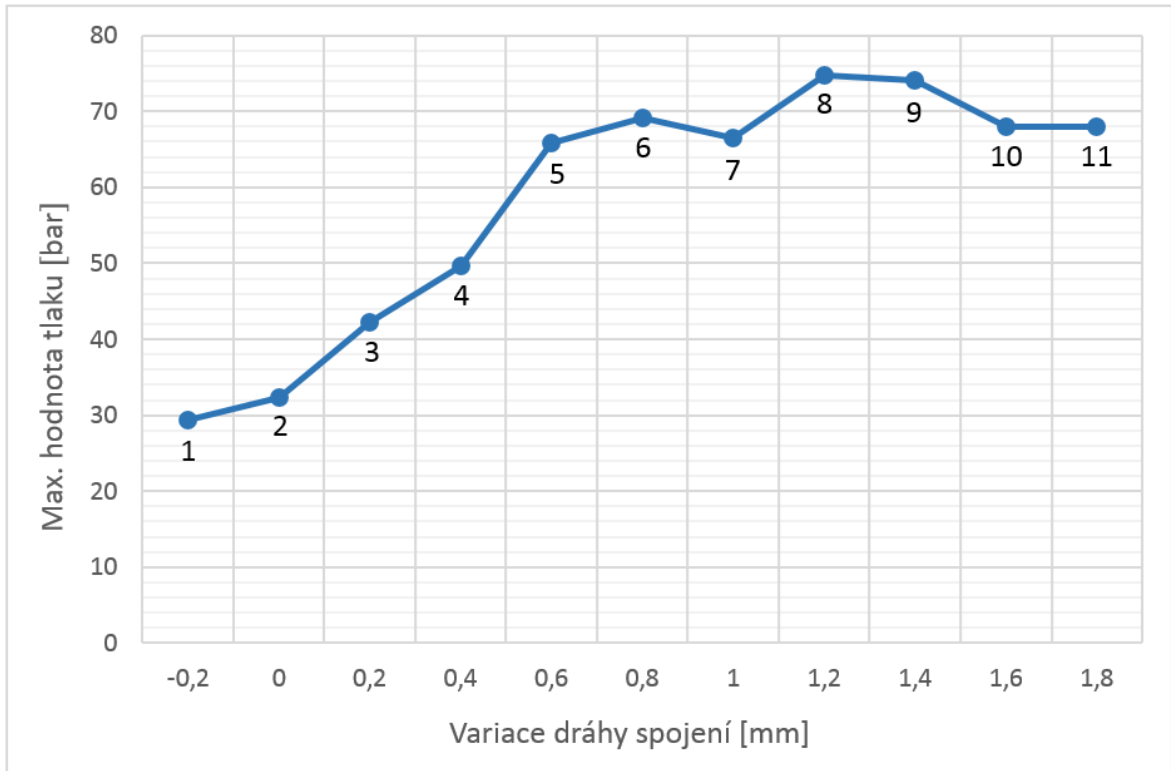
Průběh hledání

Dráha zažehlení i dráha spojení zůstala stejná jako u výchozího nastavení pro nízkoteplotní svařování. Dle tohoto nastavení se prováděla opět variace dráhy spojení (Tab. 9).

Tab. 9 Variace dráhy spojení

Díl	Variace dráhy spojení [mm]	Pozice horního lisu P5 [mm]	Rozměr přes svar [mm]	Max. hodnota tlaku [bar]	Místo praskliny
1	-0,2	299,2	9,37	29,3	svar
2	0,0	299,4	9,16	32,3	svar
3	+0,2	299,6	8,95	42,2	svar
4	+0,4	299,8	8,76	49,7	svar
5	+0,6	300,0	8,54	65,9	svar
6	+0,8	300,2	8,37	69,1	svar
7	+1,0	300,4	8,15	66,5	svar
8	+1,2	300,6	8,02	74,7	svar
9	+1,4	300,8	7,9	74,1	svar
10	+1,6	301,0	7,86	68	svar
11	+1,8	301,2	7,86	67,9	svar

Z Obr. 45 vyplývá, že při prodlužování dráhy spojení se dosahuje vyšších tlaků, než při jejím zkracování. Při změně dráhy u dílu 8 o +1,2 mm se dosahuje nejvyššího tlaku, a proto tato dráha byla volena jako výchozí. Nepatrná změna vznikla u dílu 7 při změně dráhy o +1,0 mm, kdy náhle poklesla hodnota tlaku. To mohlo být způsobeno přirozenou variabilitou procesu, jako vadným plastovým dílem, výskytem vzduchové dutiny či nehomogenitou svaru. [11]



Obr. 45 Závislost dráhy spojení na tlaku

Shrnutí výsledků

Při porovnání dílu 2 u nízkoteplotního a vysokoteplotního svařování lze vidět velký rozdíl v maximální hodnotě dosaženého tlaku. Tento rozdíl je způsoben teplotou na povrchu svařovacích desek. U vysokoteplotního svařování vzniká větší množství taveniny a díl je více prohřátý do hloubky. To lze vidět i na hodnotě rozměru přes svar. Proto je vždy nutné variovat dráhu spojení.

U výchozího nastavení u obou metod je rozdíl tlaků 14,4 bar. Tato hodnota je však pro tuto chvíli pouze orientační. Vše bude záležet na výsledných hodnotách tlaků u optimálních svařovacích parametrů z DOE.

12 PROVEDENÍ PLÁNOVANÉHO EXPERIMENTU

Ve společnosti RBCB se používají 2 hlavní způsoby pro plánování experimentů. První způsob je pomocí matematického modelu v programu ETAS ASCMO 4.2. (ASCMO) a druhý je pomocí statistického modelu v programu MINITAB 15. Každý z těchto programů má své výhody i nevýhody. Před zvolením správné metody plánování se musí mít o daném procesu určité informace, např. maximální nebo minimální použitelné parametry stroje, předpokládaný počet dílů určených k testu atd.

Nízkoteplotní svařování

Experiment DOE byl naplánován a vyhodnocen v programu ASCMO pomocí matematického modelu pro 50 ks zkušebních svařovacích tělísek se vstupními faktory uvedenými v *Tab. 10*, za použití jednoho bloku bez opakování.

Tab. 10 Vstupní faktory s min. a max. hranicemi

Vstupní faktor	Minimum	Maximum	Přesnost
Teplota [°C]	180	230	10
Čas ohřevu [s]	15	30	5
Dráha spojení [mm]	-0,2	+0,2	0,1

Rozmezí hodnot času ohřevu bylo voleno na základě doporučených časů ohřevu pro nízkoteplotní svařování. Zkrácení dráhy spojení o -0,2 mm bylo voleno jako největší možné, kde ještě není pravděpodobnost výskytu vzduchových dutin ve svarovém spojení (na základě zkušeností). Naopak prodloužení o více než +0,2 mm by mohlo zkreslit výsledky z důvodu absence taveniny. Ukázka vygenerované tabulky naplánovaného experimentu i s výsledky zkoušek je zobrazena na *Obr. 46*.

Během svařování se sledovala lepivost materiálu ke svařovací desce. Jelikož materiál nejevil známky žádného ulpívání na povrchu desky, nebylo nutné vyhodnotit lepivost materiálu.

Po svaření byly zkušební svařovací tělíška uloženy na 48 hodin do exikátoru před dalšími zkouškami. Na 48 hodin z toho důvodu, aby materiál dosáhl dodatečného smrštění a tím k ustálení rozměrů. Poté byl u každého dílu změřen rozměr přes svar, byla provedena zkouška těsnosti a krátkodobá tlaková destrukční zkouška.

Číslo ZST ¹	Teplota [°C]	Čas ohřevu [s]	Dráha spojení [mm]	Lepení ²	Rozměr ³ [mm]	Těsnost ⁴	TDZ ⁵ [bar]
1	180	20	0	0	9,32	1	35,6
2	210	30	0,2	0	8,93	1	85,8
3	220	15	0,1	0	9,11	1	59
4	190	25	-0,1	0	9,26	1	67,3
5	200	10	0,1	0	9,26	1	51,5
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
48	180	30	-0,1	0	9,29	1	65,5
49	180	20	-0,1	0	9,34	1	52,9
50	210	30	0,1	0	9,02	1	84,7

vysvětlivky

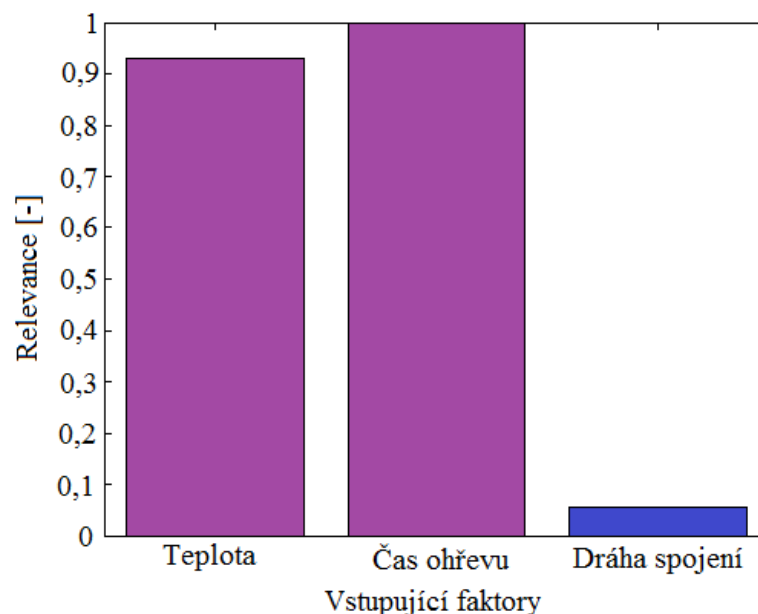
¹ ZST - zkušební svařovací tělísko² 0 - nelepí, 1 - lepí³ Rozměr přes svar [mm]⁴ 1 - svarové spojení je těsné⁵ Tlaková destrukční zkouška

Obr. 46 Ukázka DOE pro nízkoteplotní svařování

Vyhodnocení DOE

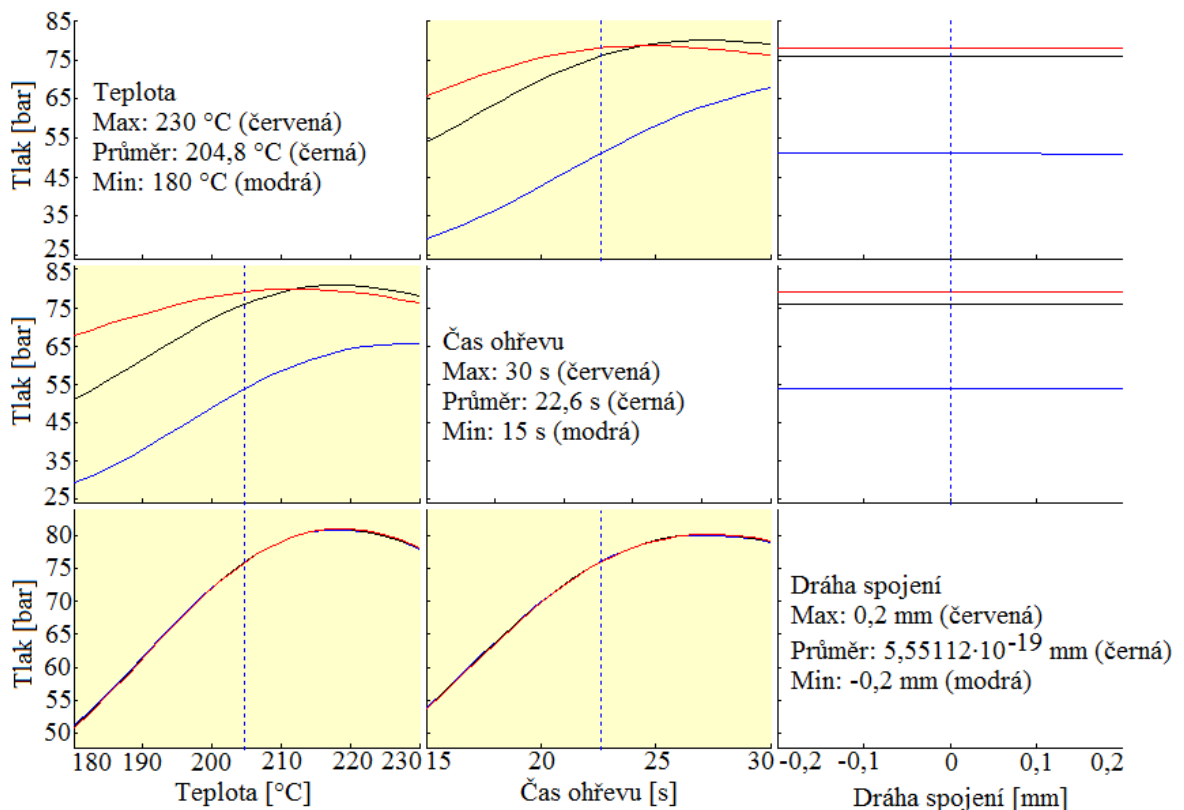
Hlavním výstupním faktorem byla pevnost a těsnost svarového spojení. Všechny díly při krátkodobé tlakové destrukční zkoušce praskaly stejným způsobem a žádný z dílů nepraskl mimo oblast svarového spojení. V případě prasknutí mimo svar by nesměl být tento díl uvažován, protože celkový výsledek experimentu by mohl být zkreslen, z důvodu odlišného mechanismu selhání. U zkoušky těsnosti byly všechny díly těsné, tudíž nebylo nutné zkoušku vyhodnotit a zařadit tyto hodnoty jako výstupní faktor do DOE.

Z Obr. 47 je vidět, že největší vliv na proces svařování má čas ohřevu (relevance 1) a teplota (relevance 0,94). Dráha spojení v tomto případě nemá žádný vliv a tudíž je považována za bezpředmětnou pro další vyhodnocování.



Obr. 47 Vliv vstupujících faktorů

Závislost jednotlivých vstupujících faktorů mezi sebou je důležitá pro další vyhodnocování. Z Obr. 48 lze vyčíst, že největší závislost mají mezi sebou teplota a čas ohřevu a to pro maximální, minimální i střední hodnoty. Čím větší je interakce těchto křivek, tím větší je závislost těchto faktorů.

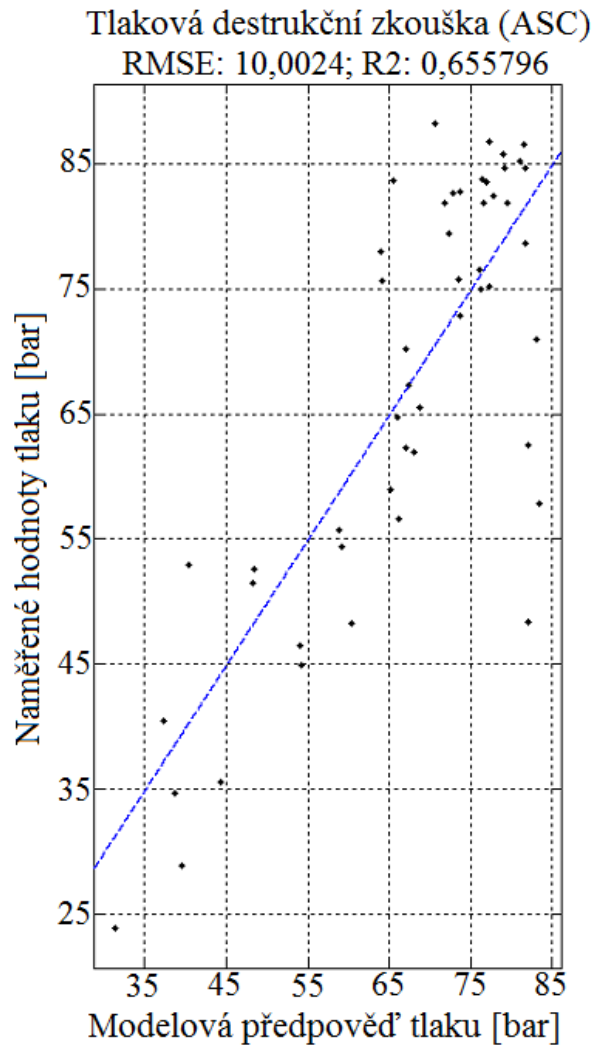


Obr. 48 Závislost vstupujících faktorů mezi sebou

Na Obr. 49 je zobrazena modelová nabídka poskytující řadu funkcí pro porovnání s modelovou předpovědí pro příslušný výstup s naměřenými výstupními daty. Naměřené hodnoty jsou zobrazeny na ose y a hodnoty modelové předpovědi na ose x. Body zobrazují maximální velikost tlaku z krátkodobé tlakové destrukční zkoušky pro jednotlivé díly. Tyto body jsou proloženy modrou přímkou a pro dosažení dokonalého výsledku by tato přímka měla mít závislost $x = y$. Čím větší je odchylka hodnot od modré přímky, tím je větší rozdíl mezi naměřenými hodnotami a modelovou předpovědí. Díky tomu je možné vizuálně zjistit kvalitu modelu a rozpoznat odlehlé hodnoty. Na Obr. 49 nebyly rozpoznány žádné odlehlé hodnoty.

Regresní koeficient R^2 je odvozený z porovnání odchylky, která zůstala po tréninkovém modelu (SSR) s odchylkou o střední hodnotě ze všech naměřených dat (SST) (2).

$$R^2 = 1 - \frac{SSR}{SST} [1] \quad (2)$$



Obr. 49 Modelová nabídka

Regresní koeficient je relativní míra pro hodnocení chyby modelu, neboli indikuje, která část z celkového rozptylu dat měření je popsána modelem.

Naměřené výsledky mají následující hodnocení R^2 :

- $0 < R^2 < 0,5$ – tento model není vhodný pro spolehlivou předpověď,
- $0,6 < R^2 < 0,8$ – tento model je vhodný pro kvalitativní předpověď,
- $0,9 < R^2 < 1$ – tento model je velmi dobrý, a proto spolehlivý pro kvalitativní předpověď.

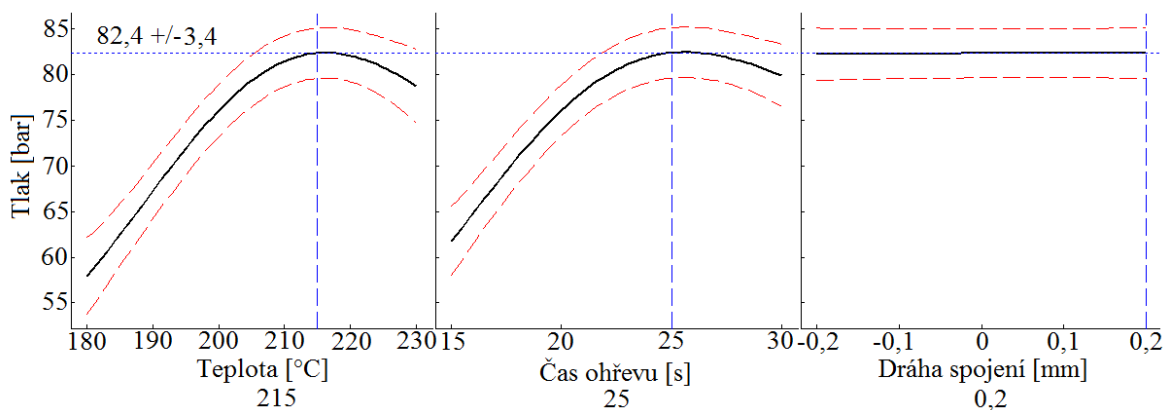
Z Obr. 49 je regresní koeficient R^2 roven 0,65 a je tedy vhodný pro kvalitativní předpověď.

V dalším kroku vyhodnocování, ASCMO vygeneruje optimální svařovací parametry, které jsou zobrazeny v Tab. 11. Rozměr v tomto případě není klíčový, a proto byly optimální parametry vyhodnoceny pouze na základě maximálního tlaku z krátkodobé tlakové destrukční zkoušky.

Tab. 11 Optimální svařovací parametry vyhodnocené z programu ASCMO

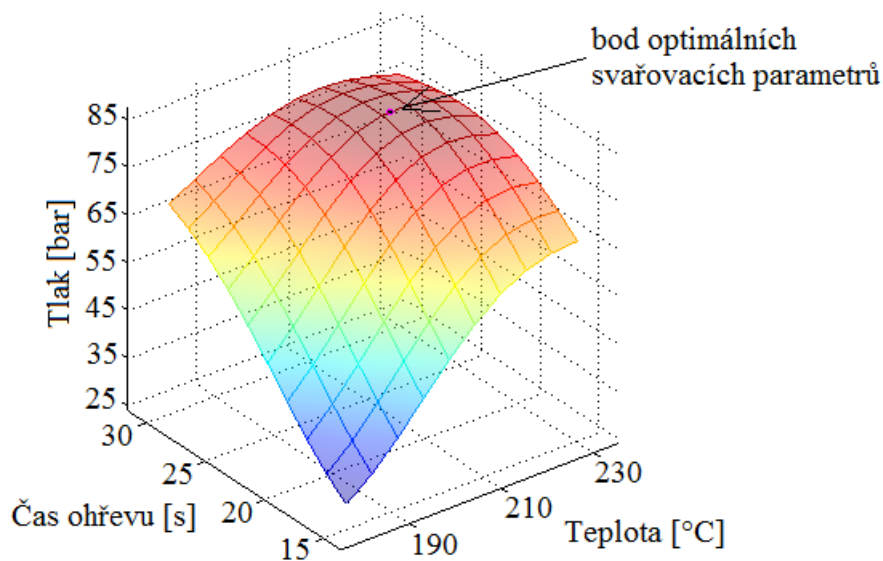
Vstupující faktory	
Teplota [°C]	215
Čas ohřevu [s]	25
Dráha spojení [mm]	0,2
Výstupní faktory	
Rozměr [mm]	8,9
Maximální hodnota tlaku [bar]	82,4

Černé křivky na *Obr. 50* zobrazují naměřené hodnoty tlaku z DOE. Přerušované červené čáry ukazují velikost standardní odchylky. Čím menší je tato odchylka, tím menší je hodnota odchylky od černé křivky a tím více se blíží modelové předpovědi. Modrá přerušovaná čára zobrazuje aktuálně zvolené parametry. Při posunutí této čáry lze okamžitě vidět hodnotu maximálního tlaku s příslušnou odchylkou. Na optimální parametry je velikost tlaku předpovězena 82,4 bar s odchylkou $\pm 3,4$ bar.



Obr. 50 Zobrazení odchylky v průsečíku ploch

3D model plochy závislosti času ohřevu, teploty a tlaku je zobrazen na *Obr. 51*. Bod ukazuje aktuální hodnotu vstupů (a také operační bod), které nemohou být změněny v rámci plochy. Z 3D modelu lze vyčíst, že při posunutí bodu v rámci tmavě červené oblasti, nedojde k příliš velkému rozdílu hodnot maximálního tlaku. To je dobré v případě výkyvů svařovacího cyklu či jiných faktorů ovlivňujících proces. [37]



Obr. 51 3D model plochy závislosti času ohřevu, teploty a tlaku

Vysokoteplotní svařování

DOE pro vysokoteplotní svařování byl proveden stejným způsobem jako pro nízkoteplotní svařování. Čas ohřevu byl volen opět z rozmezí doporučených časů ohřevu pro vysokoteplotní svařování. Dráha spojení byla o 0,1 mm prodloužena/zkrácena z důvodu většího množství taveniny u vysokých teplot. Vstupní faktory s minimálními a maximálními hranicemi jsou uvedeny v Tab. 12.

Tab. 12 Vstupní faktory s min. a max. hranicemi

Vstupní faktor	Minimum	Maximum	Přesnost
Teplota [°C]	310	410	10
Čas ohřevu [s]	10	20	1
Dráha spojení [mm]	-0,3	+0,3	0,1

Ukázka vygenerované tabulky naplánovaného experimentu i s výsledky zkoušek je zobrazena na Obr. 52.

Při svařování opět nedocházelo k žádnému ulpívání materiálu ke svařovací desce. Materiál sice vykazoval nepatrný náznak lepení, ale jelikož u svařovacích desek s PVD povlakem je tzv. funkce samočištění, materiál se vlivem vysokých teplot ihned odpařil.

Číslo ZST ¹	Teplota [°C]	Čas ohřevu [s]	Dráha spojení [mm]	Lepení ²	Rozměr ³ [mm]	Těsnost ⁴	TDZ ⁵ [bar]
1	310	13	0	0	8,37	1	60
2	350	17	0,3	0	7,7	1	63,4
3	380	11	0,1	0	7,96	1	75,7
4	330	15	-0,2	0	8,19	1	70,8
5	340	10	0,2	0	8,46	1	61,3
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
48	320	17	-0,1	0	8,09	1	68,7
49	320	13	-0,2	0	8,3	1	73,5
50	350	17	0,1	0	7,84	1	60,3

vysvětlivky

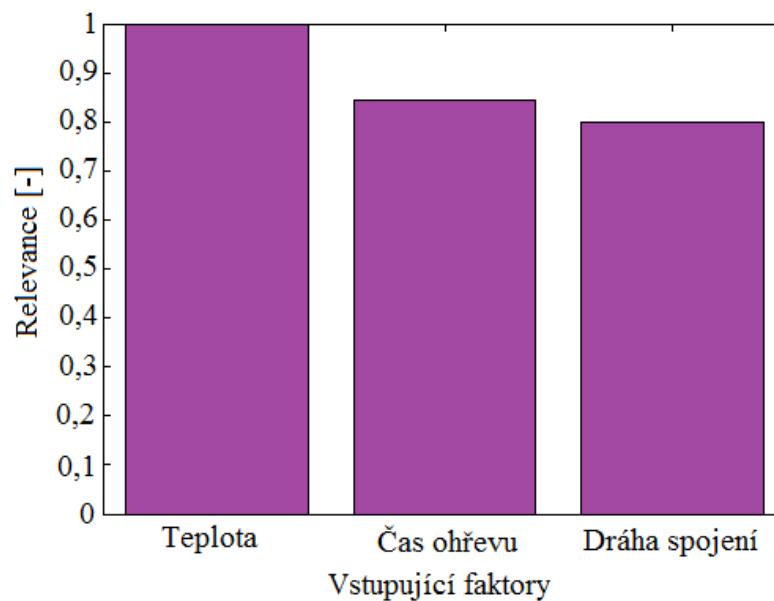
¹ ZST - zkušební svařovací tělísko² 0 - nelepí, 1 - lepí³ Rozměr přes svar [mm]⁴ 1 - svarové spojení je těsné⁵ Tlaková destrukční zkouška

Obr. 52 Ukázka DOE pro vysokoteplotní svařování

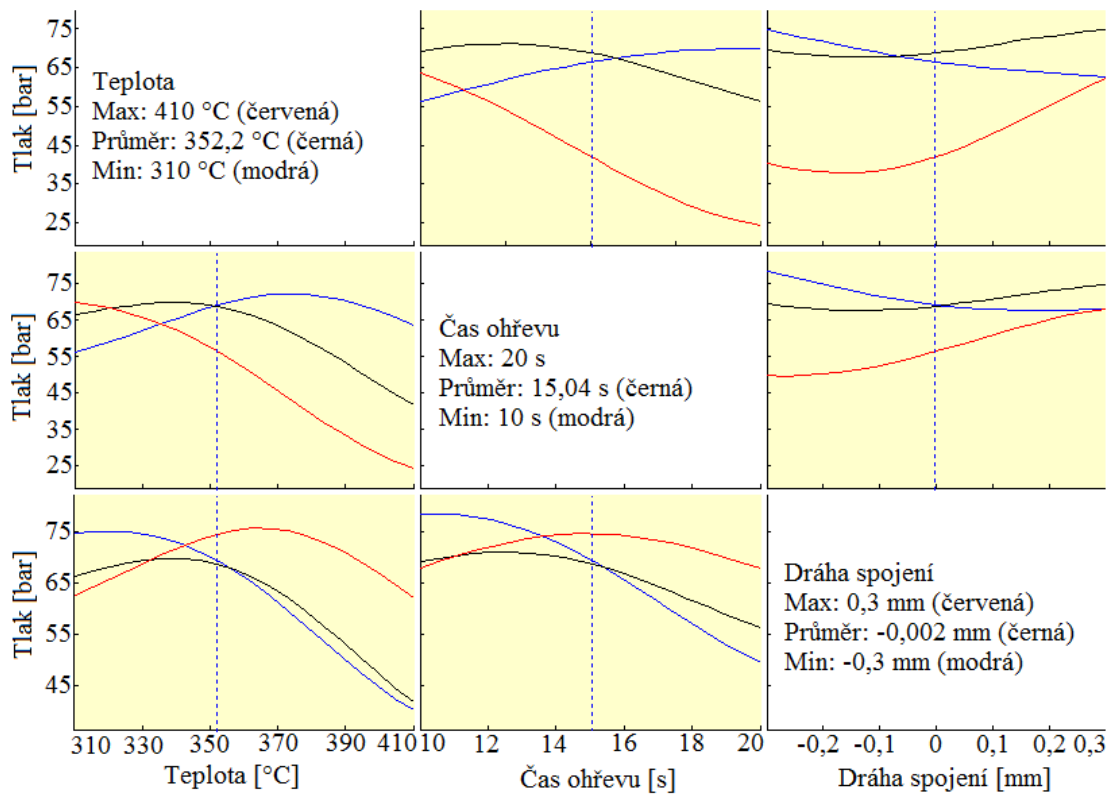
Vyhodnocení DOE

Všechny díly při krátkodobé tlakové destrukční zkoušce opět praskaly stejným způsobem a žádný z dílů nepraskl mimo oblast svarového spojení. U zkoušky těsnosti byly všechny díly těsné.

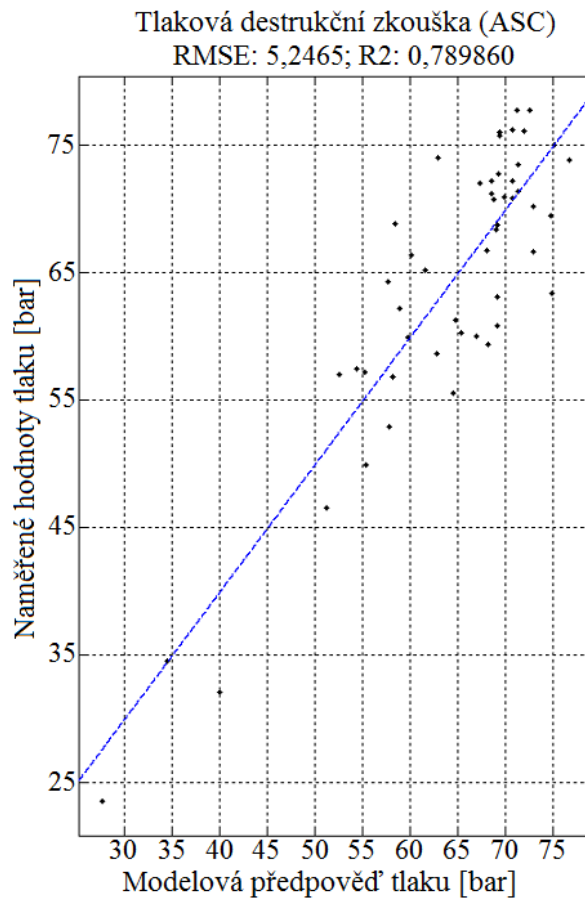
Z Obr. 53 je vidět, že největší vliv na proces svařování má jak teplota (relevance 1) tak i čas ohřevu (relevance 0,85) a i dráha spojení (relevance 0,8). Z Obr. 54 lze vyčíst, že jednotlivé vstupující faktory jsou mezi sebou závislé a to pro maximální, minimální i střední hodnoty.



Obr. 53 Vliv vstupujících faktorů



Obr. 54 Závislost vstupujících faktorů mezi sebou



Obr. 55 Modelová nabídka

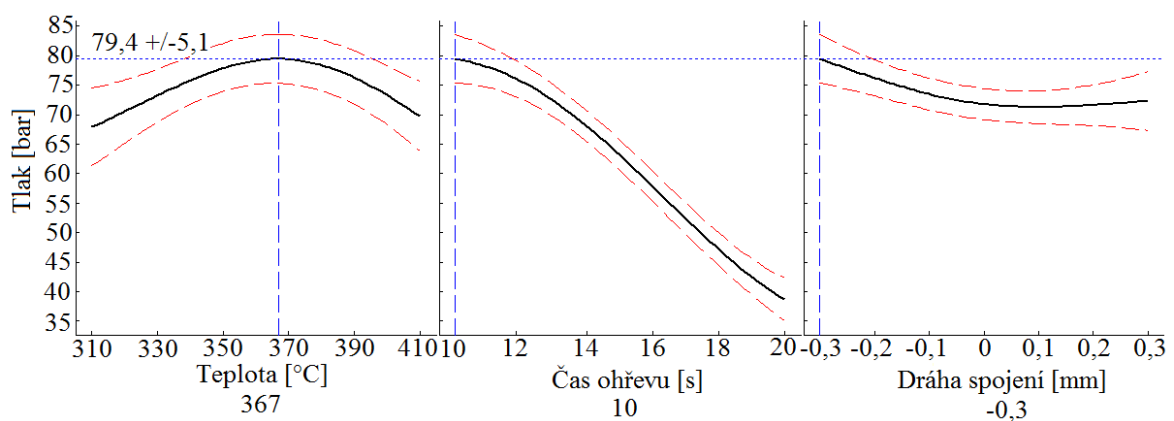
Na Obr. 55 je zobrazena modelová nabídka pro příslušný výstup s naměřenými výstupními daty. Nebyly zde rozpoznány žádné odlehlé hodnoty. Regresní koeficient R^2 je roven 0,78 a je tedy vhodný pro kvalitativní předpověď.

Optimální svařovací parametry pro vysokoteplotní svařování jsou zobrazeny v Tab. 13. Aby bylo dosaženo stejného postupu jako u nízkoteplotního svařování, optimální parametry byly vyhodnoceny na základě maximálního tlaku z krátkodobé tlakové destrukční zkoušky.

Tab. 13 Optimální svařovací parametry vyhodnocené z programu ASCMO

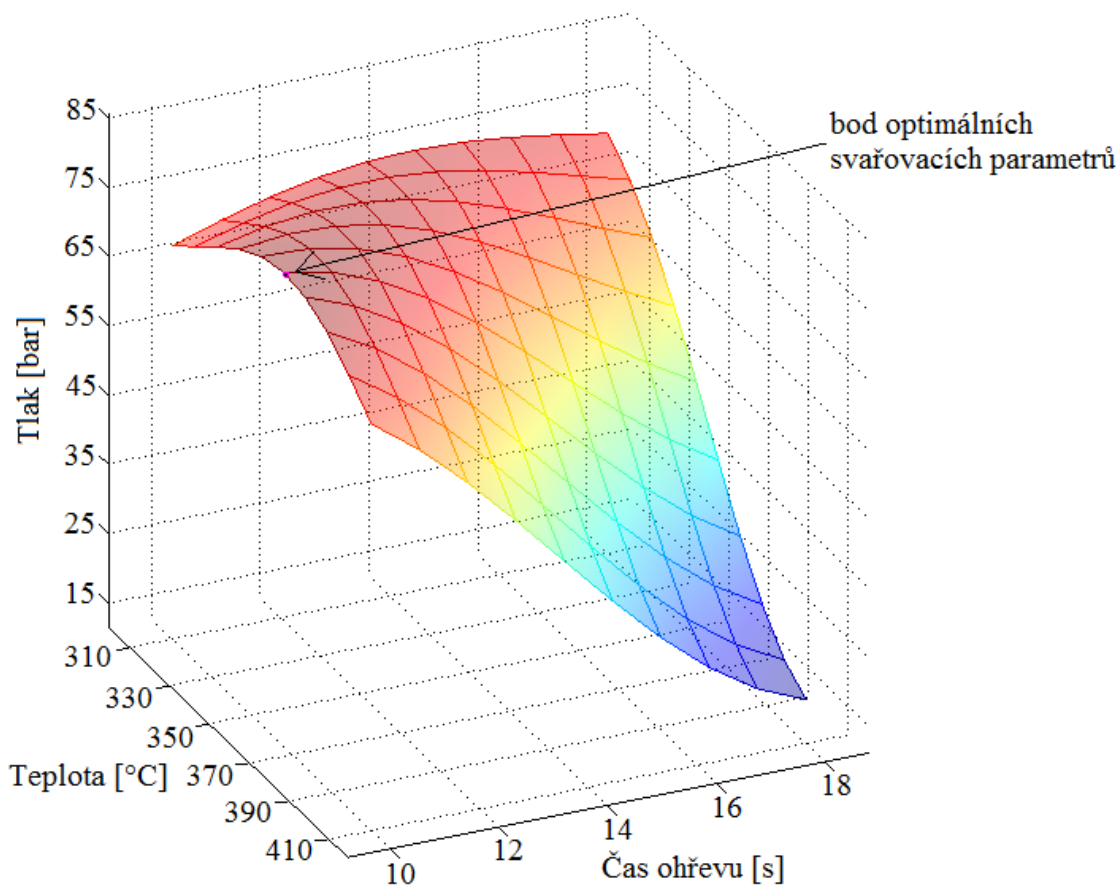
Vstupující faktory	
Teplota [°C]	367
Čas ohřevu [s]	10
Dráha spojení [mm]	-0,3
Výstupní faktory	
Rozměr [mm]	8,4
Maximální hodnota tlaku [bar]	79,4

Na optimální parametry je velikost tlaku předpovězena 79,4 bar s odchylkou $\pm 5,1$ bar (Obr. 56).



Obr. 56 Zobrazení odchylny průsečíku ploch

3D model plochy závislosti času ohřevu, teploty a tlaku zobrazuje Obr. 57. Při posunutí bodu v rámci tmavě červené oblasti, nedojde k příliš velkému rozdílu hodnot maximálního tlaku. To je dobré v případě výkyvů svařovacího cyklu či jiných faktorů ovlivňujících proces. Jelikož je ale bod na hranici variace času ohřevu, je nutné dodržet minimální čas ohřevu a to 10 s. [37]



Obr. 57 3D model plochy závislosti času ohřevu, teploty a tlaku

Shrnutí výsledků

Obě metody svařování byly vyhodnoceny pouze na základě maximálního tlaku z krátkodobé tlakové destrukční zkoušky. Zkouškou těsnosti byla prokázána těsnost u všech zkoušených dílů, a proto nebylo nutné zkoušku vyhodnotit a zařadit tyto hodnoty jako výstupní faktor z DOE. Přehledné porovnání výsledků je uvedeno v Tab. 14.

Tab. 14 Shrnutí výsledků získaných z DOE

Parametry	Nízkoteplotní svařování	Vysokoteplotní svařování
Faktory ovlivňující proces	teplota, dráha spojení	teplota, dráha spojení, čas ohřevu
Regresní koeficient R^2	0,65	0,78
Optimální teplota [°C]	215	367
Optimální čas ohřevu [s]	25	10
Předpokládaná velikost tlaku [bar]	$82,4 \pm 3,4$	$79,4 \pm 5,1$

Při porovnání nízkoteplotního a vysokoteplotního svařování má největší vliv na proces u obou metod teplota a čas ohřevu, u vysokoteplotního navíc ještě dráha spojení. Jednotlivé vstupní faktory jsou mezi sebou závislé a to pro maximální, minimální i střední hodnoty.

Z modelové předpovědi je regresní koeficient pro nízkoteplotní svařování roven 0,65 a pro vysokoteplotní 0,78. Z toho vyplývá, že modelová předpověď pro vysokoteplotní svařování je přesnější o 0,13. Předpokládá se, že předpokládaná velikost tlaku se bude přesněji shodovat s modelovou předpovědí než u nízkoteplotního svařování. Naopak při porovnání odchylky měření je variabilita rozmezí od naměřených hodnot u nízkoteplotního svařování menší o cca 1,7 bar. Tato hodnota je ale z důvodu porovnávání tlaků o velikosti přes 60 barů zanedbatelná. Oba modely jsou vhodné pro kvalitativní předpověď.

Vysokoteplotní svařování je ekonomicky náročnější a vzniká zde větší riziko úniku škodlivého plynu (formaldehydu), než u nízkoteplotního svařování. Proto se nízkoteplotní svařování z hlediska energetické náročnosti, zdravotní nezávadnosti a emisí jeví jako vhodnější.

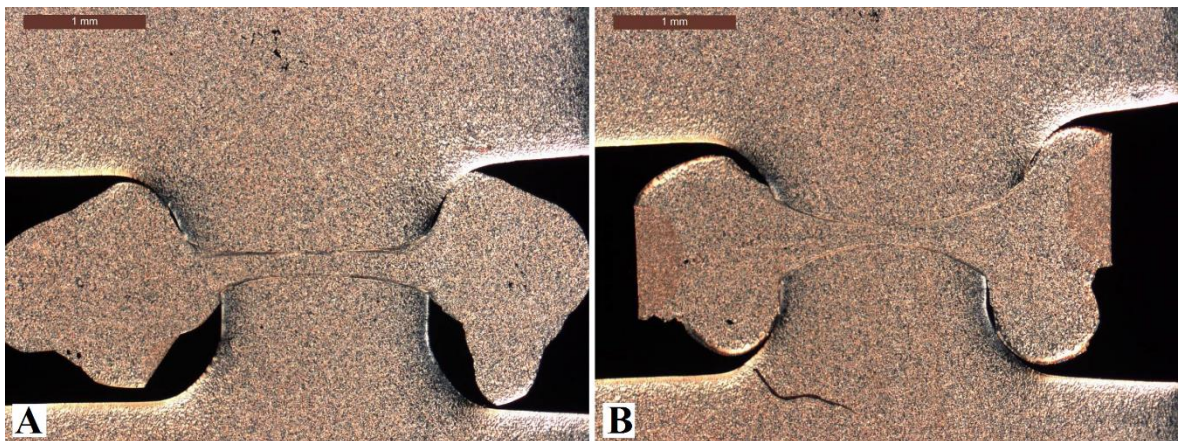
Čas ohřevu je u nízkoteplotního svařování o 15 s delší. Z toho vyplývá, že je o tuto hodnotu delší i celkový čas cyklu. Z Obr. 51 lze vyčíst, že u nízkoteplotního svařování se dá variovat tento čas na základě získání nejvyššího tlaku, naopak pro vysokoteplotní svařování musí být dodržen minimální a to 10 s, z toho důvodu, že se bod vyskytuje na hranici variace času ohřevu.

13 MIKROSKOPICKÁ ANALÝZA

Na optimální svařovací parametry pro nízkoteplotní a vysokoteplotní svařování (získané z DOE) byl svařen jeden díl, u kterého byla provedena mikroskopická analýza na vizuální kontrolu svaru.

Vyhodnocení

Na *Obr. 58* jsou zobrazeny řezy svarového spojení, které byly provedeny v místě, kde se měří rozměr přes svar. Z hlediska vizuálního pohledu se ve svarech nevyskytují žádné vady jako příměsi, znečištění, neroztavené částice materiálu, vzduchové dutiny nebo nehomogenity. Vzájemná poloha horní a spodní svařovací geometrie je s nepatrným přesazením na vnitřní straně u dílu svařeného nízkoteplotně a na vnější straně u dílu svařeného vysokoteplotně. Toto přesazení nemá zásadní vliv na svarový spoj, jelikož nosná délka svaru je dostatečně velká. Nečistota na *Obr. 58b* byla pravděpodobně způsobena při řezání vzorku. Z vizuálního pohledu lze poznat, zda svařování bylo za nízkých nebo vysokých teplot. U svařování za nízkých teplot je rozhraní mezi roztaveným a neroztaveným materiálem s větším rádiusem a u vysokoteplotního svařování s menším rádiusem. [14]



Obr. 58 Mikroskopická analýza: a) dílu pro nízkoteplotní svařování, b) dílu pro vysokoteplotní svařování

Mikroskopická analýza u obou dílů neprokázala žádné negativní výsledky a zásadní rozdíl mezi metodami, a proto ji lze zanedbat při celkovém zhodnocení.

14 ANALÝZA ZPŮSOBILOSTI STROJE

Analýza způsobilosti stroje byla ověřena pomocí statistického softwaru QS STAT ME 5 od společnosti Q-DAS s redukovanými náklady, který je v RBCB standardním nástrojem pro statistická vyhodnocování.

Pro analýzu bylo svařeno 25 ks zkušebních svařovacích tělísek na optimální svařovací parametry získané z DOE, které byly uloženy na 48 hodin do exikátoru před dalšími zkouškami. Poté byl u každého dílu změřen rozměr přes svar, byla provedena zkouška těsnosti a krátkodobá tlaková destrukční zkouška.

Vyhodnocení u nízkoteplotního svařování

Hlavním výstupním parametrem byla pevnost a těsnost svarového spojení. Všechny díly při krátkodobé tlakové destrukční zkoušce praskaly stejným způsobem a žádný z dílů nepraskl mimo oblast svarového spojení. U zkoušky těsnosti byly všechny díly těsné, tudíž nebylo nutné zařadit tento výsledek jako výstupní parametr. Způsobilost svařovacího stroje proto byla vyhodnocena pouze na základě maximální hodnoty pevnosti svaru. Z důvodu nedefinované dolní toleranční meze pevnosti u zkušebních svařovacích tělísek, bylo nutné najít takovou dolní toleranční mez pevnosti, která bude mít koeficient způsobilosti svařovacího stroje $C_{mk} = 2$.

Dolní toleranční mez (DTM) pevnosti zkušebního svařovacího tělíska svařeného nízkoteplotní metodou je 56,1 bar. Tato hodnota udává, že žádný z dílů by neměl s pravděpodobností 99,97 % mít hodnotu tlaku nižší.

Vyhodnocení u vysokoteplotního svařování

Všechny díly při krátkodobé tlakové destrukční zkoušce opět praskaly stejným způsobem a žádný z dílů nepraskl mimo oblast svarového spojení. U zkoušky těsnosti byly všechny díly těsné. DTM pevnosti zkušebního svařovacího tělíska svařeného vysokoteplotní metodou je 63,9 bar.

Shrnutí výsledků

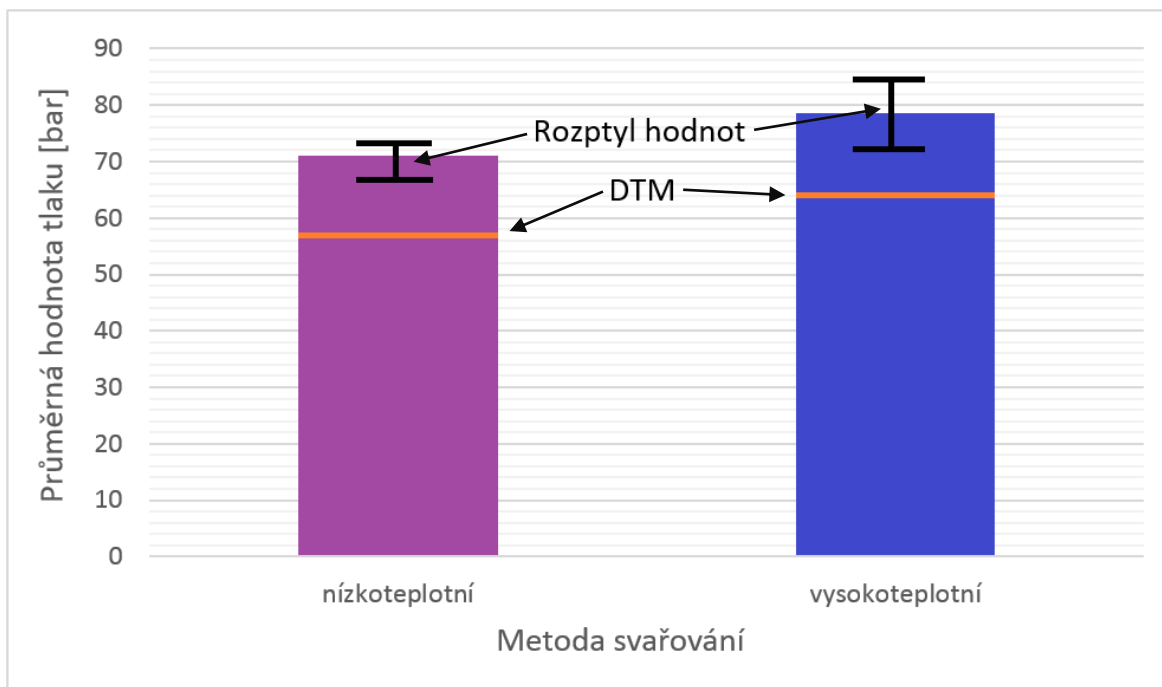
Analýza způsobilosti stroje ukázala poněkud překvapivé výsledky tlaku, oproti předpokládaným hodnotám z experimentu DOE (Tab. 15). Zatím co vysokoteplotní svařování je v porovnání s předpovědí téměř stejné, nízkoteplotní svařování se výrazně liší. To se dalo předpokládat i podle hodnoty regresivního koeficientu. Rozdíl průměrného

tlaku cca 8 bar mezi metodami je již znát. Během měření nebyly zaznamenány u žádné z metod výpadky, a proto lze způsobilost stroje považovat za stabilní.

Tab. 15 Porovnání maximální, průměrné a minimální hodnoty tlaku a DTM

Parametr	Nízkoteplotní svařování	Vysokoteplotní svařování
Průměrná hodnota tlaku [bar]	70,9	78,7
Maximální hodnota tlaku [bar]	73	83,8
Minimální hodnota tlaku [bar]	65,6	72,1
Dolní toleranční mez [bar]	56,1	63,9

Pro lepší přehlednost je porovnání výsledků zobrazeno na Obr. 59. U vysokoteplotního svařování se dosahuje průměrně vyšších tlaků než u svařování nízkoteplotního. Rozptyl hodnot je zde o něco málo větší, což ukazuje na lepší stabilitu stroje u nízkoteplotního svařování. DTM je v závislosti na naměřených hodnotách posunuta o cca 7 bar výše u vysokoteplotního svařování. Ze získaných výsledků analýzy způsobilosti stroje se zdá být svařování za vysokých teplot vhodnější.



Obr. 59 Porovnání výsledků z analýzy způsobilosti stroje

15 DLOUHODOBÁ TLAKOVÁ ZKOUŠKA

Cílem dlouhodobé tlakové zkoušky bylo ověření pevnosti a kvality provedení nejen svarového spojení, ale celého plastového komponentu. Výsledky z této zkoušky patří k nejdůležitějším pro zjištění dlouhodobé pevnosti a odolnosti svarového spoje.

Zkouška probíhala na 2 tlakových hladinách. První větev byla zatížena tlakem 9 bar a druhá tlakem 5 bar. Na zkoušku bylo svařeno po 5 zkušebních svařovacích tělískách na každou hladinu na optimální svařovací parametry pro obě metody svařování.

Vyhodnocení

Nejprve byla zkouška provedena na 1. hladině a poté na 2. hladině. Bohužel z časových důvodů nebylo možné do práce zahrnout výsledky z 2. hladiny pro vysokoteplotní svařování, protože zkouška stále probíhala.

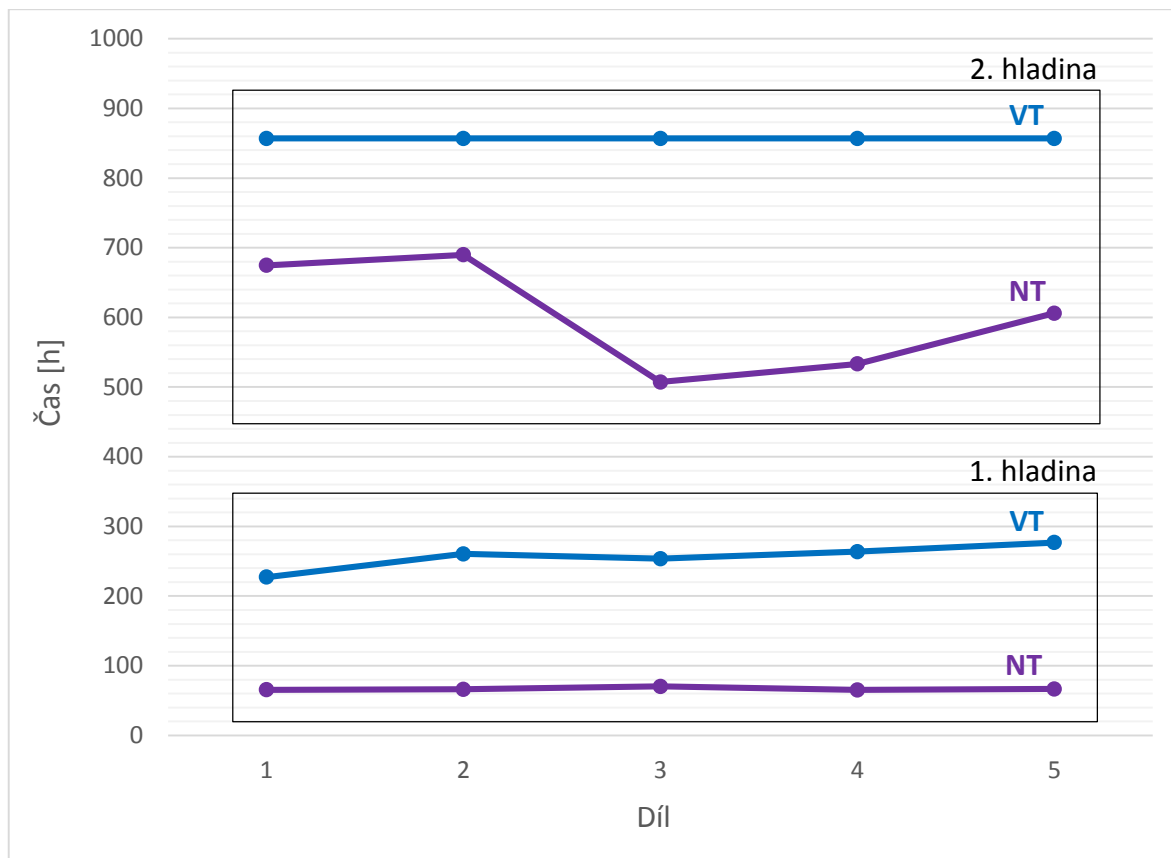
Hlavním kritériem, které se u dlouhodobé tlakové zkoušky vyhodnocuje, je čas, který se měří do porušení zkoušeného dílu. Všechny díly praskaly v oblasti svarového spojení a žádný z dílů nepraskl mimo tuto oblast. Tímto se získaly výsledky času výdrže pevnosti svaru při dlouhodobém konstantním namáhání. Z *Tab. 16* vyplývá, že díly svařené nízkoteplotní metodou vydrží při dlouhodobém zatížení tlakem 9 bar cca 3x kratší dobu, než díly svařené za vysokých teplot. U 2. hladiny je výdrž dílů svařených nízkoteplotně rovněž nižší při porovnání s časem, který díly svařené vysokoteplotně prozatím vydržely.

Tab. 16 Výsledky z dlouhodobé tlakové zkoušky

Hladina	Díl	Nízkoteplotní svařování	Vysokoteplotní svařování
		čas [h]	čas [h]
1. hladina (p = 9 bar)	1	65,4	227,3
	2	66,3	260,6
	3	70,4	253,7
	4	65,3	263,8
	5	66,6	276,8
2. hladina (p = 5 bar)	1	674,8	probíhá (856,9)
	2	689,8	probíhá (856,9)
	3	507,2	probíhá (856,9)
	4	533,1	probíhá (856,9)
	5	605,9	probíhá (856,9)

Tyto výsledky jsou překvapivé, protože předpokladem byla delší výdrž u dílů svařených nízkoteplotně, z hlediska možné degradace materiálu a tím s následnou menší pevností svaru u vysokoteplotního svařování.

Pro přehlednější porovnání jsou časy výdrže pevnosti svaru zaznamenány v Obr. 60. Ze získaných výsledků dlouhodobé tlakové zkoušky je zřejmé, že vysokoteplotní svařování je výrazně lepší.



Obr. 60 Výsledky dlouhodobé tlakové zkoušky

* pozn.: VT – vysokoteplotní svařování, NT – nízkoteplotní svařování

16 HODNOCENÍ TEPELNÉ DEGRADACE

Pro jednotlivé zkoušky tepelné degradace materiálu v ovlivněné oblasti svaru byly zkušební svařovací tělíska zažehlena a vystaveny času ohřevu. Teplota na povrchu svařovacích desek byla nastavena na optimální pro nízkoteplotní a vysokoteplotní svařování (215 °C a 367 °C), která vyšla z DOE. Variován byl čas ohřevu.

Pro nízkoteplotní svařování byl použit čas ohřevu:

- 20 s – čas použitý pro hledání optimálních svařovacích parametrů,
- 25 s – optimální čas ohřevu stanovený z předešlých zkoušek,
- 30 s – čas, který byl předpokládán jako nejdelší v rámci nízkoteplotního svařování.

Pro vysokoteplotní svařování byl použit čas ohřevu:

- 10 s – optimální čas ohřevu stanovený z předešlých zkoušek,
- 15 s – čas ohřevu, u kterého byl předpoklad viditelné degradace materiálu,
- 20 s – čas, u kterého nebyl předpoklad použití pro vysokoteplotní svařování, z důvodu předpokládané výrazné degradace materiálu a dlouhého času ohřevu.

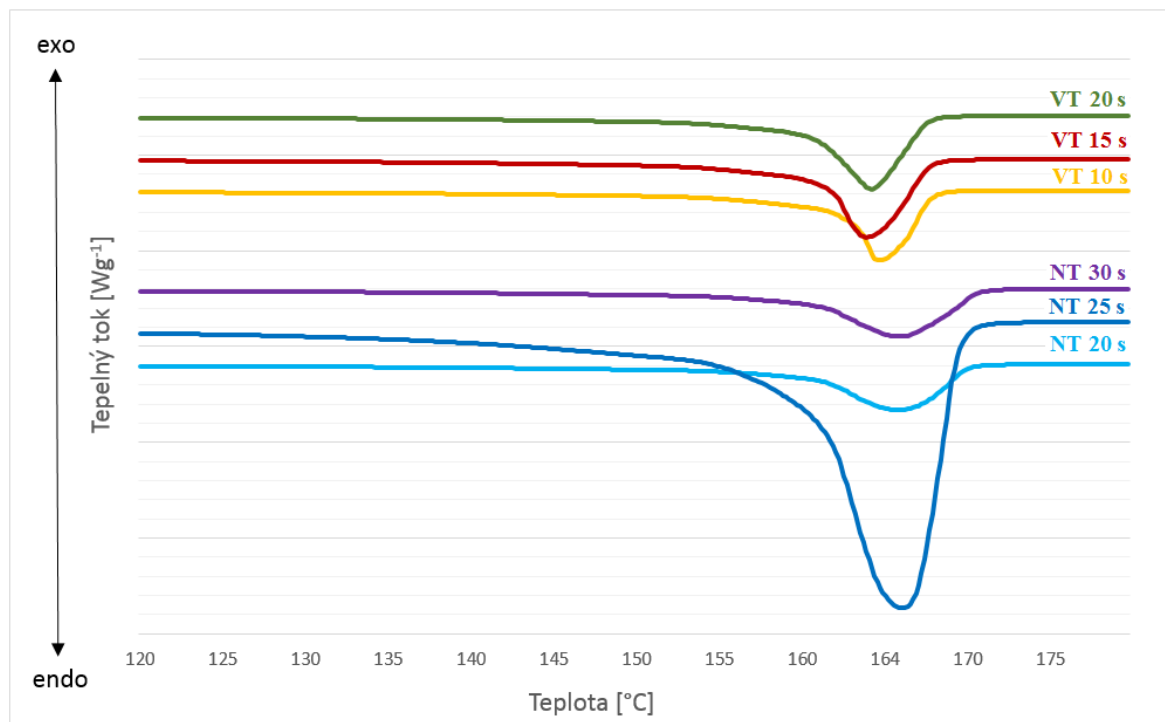
Z oblasti vystavené ohřevu byl z každého dílu odebrán malý tenký plátek o hmotnosti několika miligramů, který byl použit pro následující měření.

16.1 Diferenční skenovací kalorimetrie

Cílem měření bylo zjistit, jestli se v měřených vzorcích vyskytuje degradace a pokud ano, v jak velkém rozsahu. Degradace byla posuzována na základě posunutí počáteční a konečné teploty tání. Měření bylo provedeno na všech vzorcích.

Vyhodnocení

Nejprve byly změřeny všechny vzorky u obou metod svařování. Poté byl změřen granulát materiálu pro porovnání výsledků. Jak je vidět na *Obr. 61*, píky jsou téměř stejné a nelze zde vidět žádná změna posunutí. Pokud by se zde degradace projevovala, byla by názorně vidět, právě posunutím píku. Z tohoto důvodu, byl jako další postup zvolen výpočet krystalinity. Naměřené hodnoty změny entalpie s vypočteným procentem krystalinity jsou uvedeny v *Tab. 17*. Výpočet procenta krystalinity byl podle vzorce (1). Počítána byla z entalpie tání z druhého ohřevu.



Obr. 61 DSC křivka 2. ohřevu

* pozn.: VT – vysokoteplotní svařování, NT – nízkoteplotní svařování

Tab. 17 Výpočet procenta krystalinity

Metoda	Čas ohřevu [s]	ΔH_m [J/g]	ΔH_m^0 [J/g]	x_c [%]
Granulát	-	156	250	63
Nízkoteplotní svařování	20	129	250	52
	25	136	250	54
	30	134	250	54
Vysokoteplotní svařování	10	131	250	52
	15	150	250	60
	20	139	250	56

Z vypočteného procenta krystalinity vyplývá, že čím delší čas ohřevu a čím větší teplota, tím dochází k hlubšímu prohřátí a delšímu chladnutí a tedy k větším hodnotám procenta krystalinity. Čím déle se vzorek drží na teplotě píku a v její blízkosti, tím lépe krystalizuje. U vzorku nízkoteplotního svařování s časem ohřevu 25 s a u vysokoteplotního svařování s časem ohřevu 15 s došlo k výkyvu z trendu. Tento výkyv mohl být způsoben kolísáním teploty na svařovacím stroji při výrobě vzorku. Navíc u vyšších teplot se nastavené teploty na stroji udržují těžce. Vypočtené hodnoty procenta krystalinity se od sebe liší v řádech

jednotek procent. K nějakému extrémně velkému rozdílu procent nedochází, a proto zde nelze poznat degradaci. Pokud by se zde degradace vyskytovala, procenta krystalinity by se lišily v řádech desítek procent.

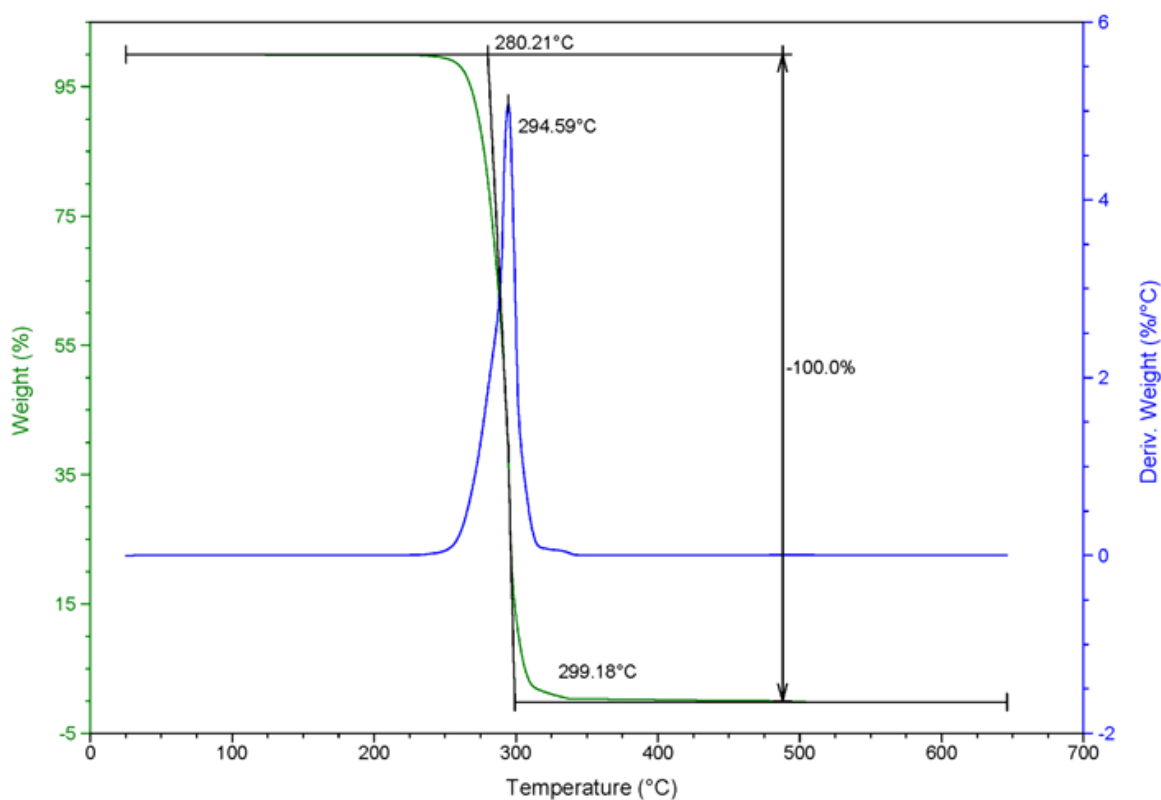
Měření neprokázalo výskyt degradace u žádného vzorku, a proto nelze v tomto případě porovnávat nízkoteplotní a vysokoteplotní svařování na základě DSC.

16.2 Termogravimetrická analýza

Cílem měření bylo zjistit začátek degradace materiálu POM. Jako vzorek byl použit granulát.

Vyhodnocení

Naměřená křivka je zobrazena na *Obr. 62*. Z křivky lze vyčíst, že úbytek hmotnosti vzorku začínal od teploty 250 °C, což je cca 80 °C nad teplotou tání tohoto polymeru. Od této teploty docházelo k degradaci až do cca 340 °C, kde došlo k veškerému odpaření vzorku. Hlavním cílem bylo zjistit, kde začíná degradace materiálu. Jak je vidět na křivce, degradace začíná těsně pod teplotou 300 °C.



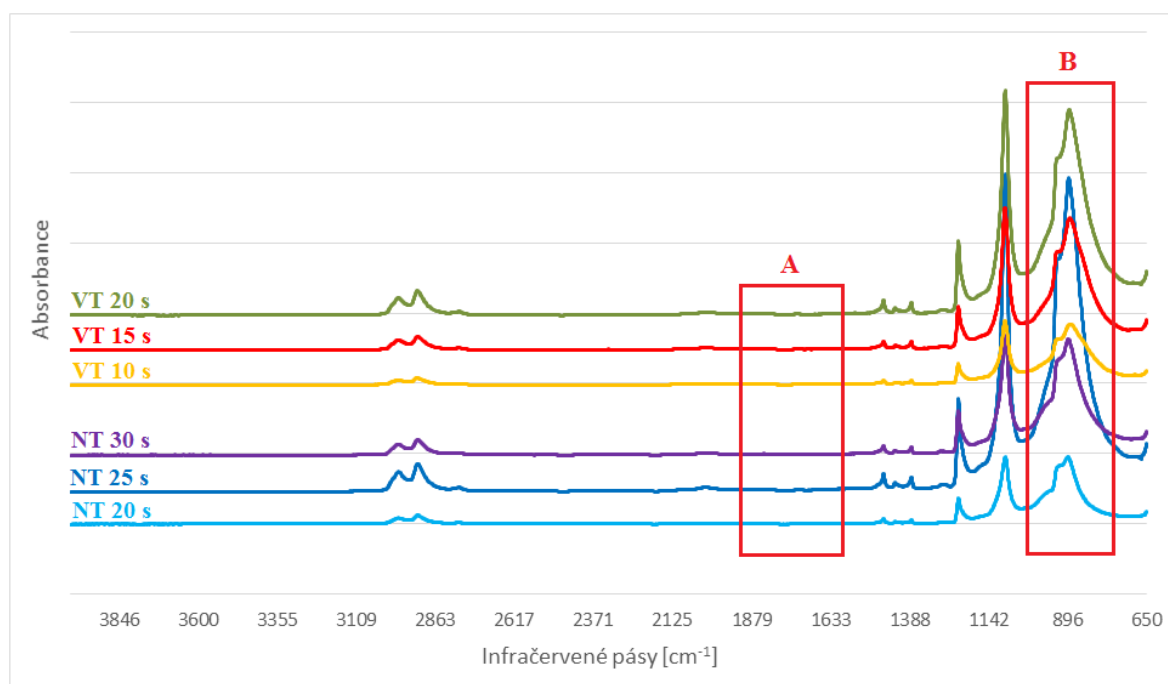
Obr. 62 TGA granulátu POM Ultraform S2320 003

16.3 Infračervená spektroskopie s Fourierovou transformací

Cílem měření bylo zjistit, jestli se v měřených vzorcích vyskytuje degradace a pokud ano, v jak velkém rozsahu. Měření bylo provedeno na všech vzorcích.

Vyhodnocení

Naměřené křivky všech vzorků byly vloženy do jednoho obrázku a pro přehlednější porovnání byly od sebe odsazeny (Obr. 63).



Obr. 63 FTIR analýza

* pozn.: VT – vysokoteplotní svařování, NT – nízkoteplotní svařování

Tab. 18 Infračervené pásy a funkční skupiny pro materiál POM [27]

Infračervené pásy	Funkční skupina
3000 – 2800 cm^{-1}	C – H
2400 – 2300 cm^{-1}	CO ₂
1800 – 1680 cm^{-1}	C=O
1300 – 1000 cm^{-1}	C – O – C
1000 – 900 cm^{-1}	CH=CH ₂

Jednotlivé vrcholy (píky) odpovídají hodnotám infračervených pásů a příslušným funkčním skupinám (Tab. 18). Každý pás má své specifické označení pro tvoření vazeb.

Při porovnání jednotlivých křivek není patrná výrazná změna (křivky mají téměř stejný průběh).

Měření bylo zaměřeno na oblast degradace materiálu, která by se měla projevit v oblasti pásu cca 1740 cm^{-1} , kde je tvoření C=O vazby. Při pohledu na oblast A na *Obr. 63* se degradace nevyskytuje. Pokud by se zde vyskytovala výrazná degradace, pík by v této oblasti dosahoval velmi výrazné výšky. Byl by výrazný z důvodu uvolňování formaldehydu, který je obsažen v materiálu a docházelo by zde ke vzniku C=O vazeb, které samotný materiál neobsahuje.

V oblasti B lze vidět menší odskok mezi křivkami. Ten je způsoben s největší pravděpodobností vazbou CH_2 , kterou je tvořen základní materiál. Tento odskok však nemá zásadní vliv na výsledky měření, a proto nebyl dále zkoumán.

Měření neprokázalo výskyt degradace u žádného vzorku, a proto nelze v tomto případě porovnávat nízkoteplotní a vysokoteplotní svařování na základě FTIR.

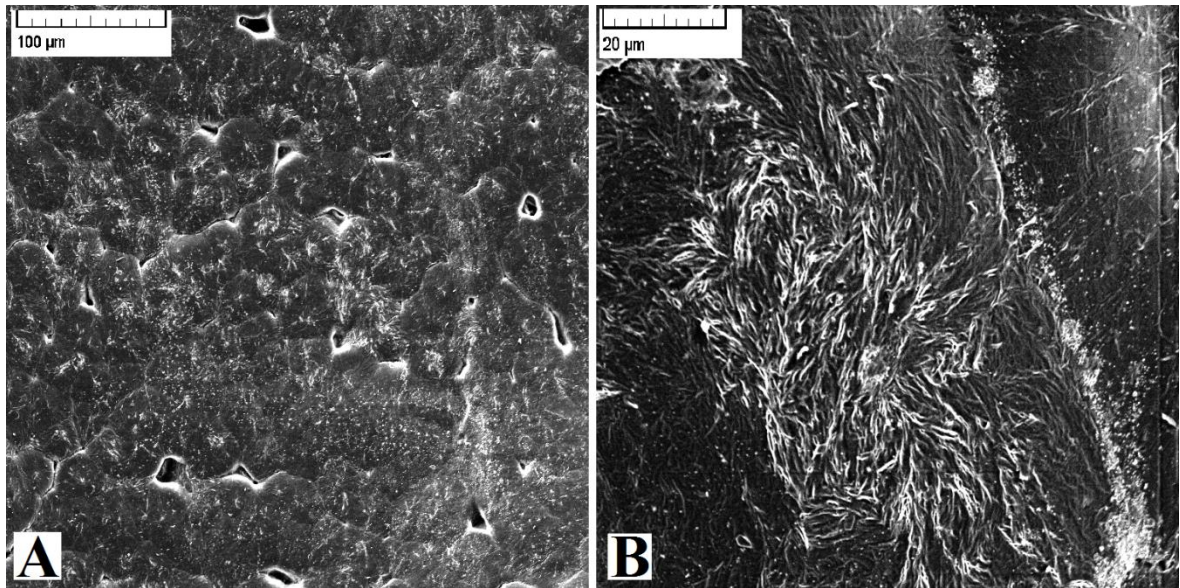
16.4 Skenovací elektronová mikroskopie

Cílem měření bylo zjistit, jestli se v měřených vzorcích vyskytuje degradace a pokud ano, v jak velkém rozsahu. Měření bylo provedeno na vzorku pro nízkoteplotní svařování s časem ohřevu 30 s a vzorku pro vysokoteplotní svařování s časem ohřevu 20 s. Před samotnou zkouškou se předpokládalo, že zde žádná degradace vidět nepůjde, proto byly vybrány tyto vzorky, aby se měření neprovádělo zbytečně na všech vzorcích.

Vyhodnocení

Nejprve byl pořízen snímek vzorku nízkoteplotního svařování se zvětšením 500x (*Obr. 64a*). Snímek zobrazuje studovanou oblast, ve které se nevyskytují výraznější nehomogenity, které jsou známkou viditelné degradace. Z toho vyplývá, že u nízkoteplotního svařování s časem ohřevu 30 s nelze vidět degradaci, a proto nebylo nutné provádět měření na vzorcích s kratším časem ohřevu pro zjištění začátku výskytu degradace.

U vzorku vysokoteplotního svařování byl postup obdobný s tím rozdílem, že snímek byl pořízen se zvětšením 2000x (*Obr. 64b*). Opět zde nebyl výskyt výraznějších nehomogenit. Z toho vyplývá, že i u vysokoteplotního svařování s časem ohřevu 20 s nelze vidět degradaci, a proto opět nebylo nutné provádět měření na vzorcích s kratším časem ohřevu.

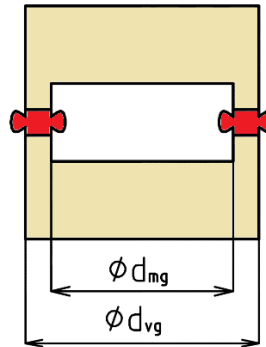


Obr. 64 SEM: a) nízkoteplotního svařování se zvětšením 500x, b) vysokoteplotního svařování se zvětšením 2000x

Měření neprokázalo výskyt viditelné degradace u žádného vzorku, a proto nelze v tomto případě porovnávat nízkoteplotní a vysokoteplotní svařování na základě SEM.

17 PEVNOSTNÍ VÝPOČET SVAROVÉHO SPOJENÍ

Výpočet slouží ke zjištění, jaké maximální pevnosti v tahu svarového spojení se dosahuje ve srovnání se základním materiálem. Namáhání ve smyku bylo zanedbáno.



Obr. 65 Průměry
svarovacího tělíska

Tab. 19 Parametry nutné pro výpočet

Průměr svařovací geometrie (vnitřní část) d_{mg}	48 mm
Průměr svařovací geometrie (vnější část) d_{vg}	52 mm
Maximální hodnota tlaku u nízkoteplotního svařování p_n	70,9 bar
Maximální hodnota tlaku u vysokoteplotního svařování p_v	78,7 bar
Dovolená pevnost v tahu σ_{Dt}	65 MPa

Pevnostní rovnice [38]:

$$\sigma_t = \frac{F}{S} \leq \sigma_{Dt} \quad (3)$$

kde σ_t [MPa] je pevnost v tahu, F [N] je síla S [mm²] je plocha.

Plocha svařovací geometrie:

$$S_n = \frac{\pi \cdot (d_{vg}^2 - d_{mg}^2)}{4} = \frac{\pi \cdot (52^2 - 48^2)}{4} = 314,2 \text{ mm}^2$$

kde S_n [mm²] je plocha svařovací geometrie a π je Ludolfovo číslo.

Vnitřní plocha svařovací geometrie zatížená tlakem:

$$S_p = \frac{\pi \cdot d_{mg}^2}{4} = \frac{\pi \cdot 48^2}{4} = 1\,809,6 \text{ mm}^2$$

kde S_p [mm²] je vnitřní plocha svařovací geometrie zatížená tlakem.

Nízkoteplotní svařování

Působící síla:

$$F = p_n \cdot S_p = \frac{70,9}{10} \cdot 1\,809,6 = 12\,830,1 \text{ N}$$

Pevnost svarového spojení:

$$\sigma_t = \frac{F}{S_n} = \frac{12\,830,1}{314,2} = 40,8 \text{ MPa}$$

Poměr pevnosti:

$$\frac{\sigma_t}{\sigma_{Dt}} = \frac{40,8}{65} = 0,63 \rightarrow 63 \% \text{ pevnosti základního materiálu}$$

Vysokoteplotní svařování

Působící síla:

$$F = p_v \cdot S_p = \frac{78,7}{10} \cdot 1\,809,6 = 14\,241,6 \text{ N}$$

Pevnost svarového spojení:

$$\sigma_t = \frac{F}{S_n} = \frac{14\,241,6}{314,2} = 45,3 \text{ MPa}$$

Poměr pevnosti:

$$\frac{\sigma_t}{\sigma_{Dt}} = \frac{45,3}{65} = 0,70 \rightarrow 70 \% \text{ pevnosti základního materiálu}$$

Shrnutí výsledků

Výpočtem bylo zjištěno, že maximální pevnost svaru v tahu je přibližně na 2/3 pevnosti základního materiálu. Při porovnání výsledků, svarový spoj svařený za vysokých teplot má o 4,5 MPa větší pevnost než svarový spoj svařený nízkoteplotně. Ze získaných výsledků se zdá být svařování za vysokých teplot vhodnější.

ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo porovnání nízkoteplotního a vysokoteplotního kontaktního svařování plastů horkým elementem. Důraz byl kladen na možnou degradaci materiálu v oblasti svarového spoje. Veškeré experimenty a měření byly realizovány na zkušebním svařovacím tělísku z hlediska vysokých pořizovacích nákladů filtrační tlakové nádoby, rychlejšímu provedení zkoušek a eliminování vlivu designu dílu.

Při svařování docházelo k uvolňování nebezpečného plynu – formaldehydu, z kterého se vyrábí materiál POM Ultraform S2320 003 použitý v praktické části.

Za nízkých teplot při krátkém času ohřevu (15 s) byly v oblasti natavené vrstvy malé bublinky ve velkém množství a naopak při delším času ohřevu (30 s) větší bubliny v menším množství. Tyto bubliny zůstávaly v natavené vrstvě, protože zde nebyly tak velké síly, aby povrchovou vrstvu rozrušily. U vysokoteplotního svařování vznikaly rovněž bubliny, ale vlivem vysokých teplot a velkých sil docházelo k rozrušování natavené povrchové vrstvy a tím k jejich uvolňování. Vizuálně při 10 s ohřevu byl povrch více pórovitý než při 20 s, kde byl spíše vlnovitý. Mikroskopická analýza dílů svařených na optimální parametry z DOE neukázala žádný výskyt těchto vzduchových dutin. Během spojení došlo k jejich vytlačení a tím k dokonalému spojení.

Z měření TGA bylo zjištěno, že degradace materiálu začíná těsně pod teplotou 300 °C. Zkoušky tepelné degradace však neprokázaly její výskyt u žádného ze vzorků. To může být způsobeno příliš krátkým teplotním ovlivněním dílu. Z toho vyplývá, že při svařování na optimální svařovací parametry k degradaci nedochází a pro její výskyt by musela být zvýšena teplota na povrchu svařovacích desek nebo prodloužen čas ohřevu.

Z krátkodobé tlakové destrukční zkoušky a analýzy způsobilosti stroje se zdá být svařování za vysokých teplot nepatrně lepší. Ale z výsledků dlouhodobé tlakové zkoušky je znatelnější, že se jeví jako výrazně lepší. Zbylé zkoušky nelze v tomto případě porovnávat, protože se rozdíl mezi metodami neprojevil.

Ovšem je zde spousta faktorů, které by se zde musely zohlednit. Čím vyšší teploty jsou na stroji použity, tím větší je energetická náročnost a tím větší tvorba nebezpečného plynu – formaldehydu. RBCB by se tímto způsobem dostalo z kategorie malý znečišťovatel ovzduší do kategorie střední znečišťovatel, z důvodu většího uvolňování již zmiňovaného plynu. Stroje by musely být vybaveny důkladným odsáváním a filtrací, aby nedocházelo k ohrožování zdraví pracovníků. Navíc by ještě musely být nadimenzovány na svařování

za vyšších teplot. Stroje dodávané do výroby jsou konstruovány na design a velikost dílu, použitý materiál a procesní časy. Proto by udržování vysokých teplot bylo na současných strojích obtížně udržovatelné z důvodu velkého kolísání teploty (stroje by musely být speciálně zaizolovány). Vysokoteplotní svařování by ale nemohlo být použito na všechny výrobky vyráběné v RBCB. U některých výrobků by mohlo docházet k tepelnému ovlivnění a porušení funkčních částí na dílu. Pro nízkoteplotní svařování jsou výsledky až na dlouhodobou tlakovou zkoušku, nepatrně horší. Ovšem všechny zmíněné negativní faktory pro svařování za vysokých teplot jsou zde výhodnější.

Závěrem lze říci, že vysokoteplotní svařování se sice jeví jako vhodnější, ale pouze pro plastové díly, u nichž by nedocházelo k teplotnímu ovlivňování funkčních částí na výrobku.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] DOBRONĚ, M. Plasty v automobilovém průmyslu. *MM Průmyslové spektrum: Strojírenský měsíčník přinášející aktuální technické informace z tuzemska i ze zahraničí* [online]. 2013, č. 1, s. 1 [cit. 2015-03-02]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/plasty-v-automobilovem-prumyslu.html/>
- [2] BRŮHA, S. *Optimalizace svařovacích parametrů pro technologii svařování horkým elementem u vybraných termoplastů*: bakalářská práce. České Budějovice, 2010. 70 s. Vedoucí práce Bedřich Veselý.
- [3] ROTHEISER, J. *Joining of Plastics: Handbook for Designers and Engineers*. 2. ed. Munich: Hanser, 2004. 565 s. ISBN 3-446-22454-8.
- [4] LOYDA, M. *Svařování termoplastů*. 2., dopl. a rozš. vyd. Praha: UNO Praha, 2011. 530 s. ISBN 978-80-904949-0-9.
- [5] Firemní materiály Robert Bosch, spol. s r. o. v Českých Budějovicích.
- [6] *Bosch Česká republika* [online]. [cit. 2015-02-16]. Dostupné z: <http://www.bosch.cz/>
- [7] TROUGHTON, M. J. *Handbook of plastics joining: a practical guide*. 2nd ed. Norwich, NY: William Andrew, c2008, 1 online zdroj (xxii, 590 p.). ISBN 9780815519768.
- [8] *Interquality* [online]. [cit. 2014-07-25]. Dostupné z: <http://www.interquality.cz//INTERNIKURZY/DOEInterquality/tabid/79/Default.aspx/>
- [9] TOŠENOVSKÝ, J. *Plánování experimentů*. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2012. 230 s. ISBN 978-80-248-2592-2.
- [10] *Humusoft: Technické výpočty, řídicí technika, simulace* [online]. [cit. 2014-07-25]. Dostupné z: <http://www2.humusoft.cz/www/akce/witkonf06/prispevky/ppt//maros.ppt/>
- [11] KUČERA, P. *Odborná konzultace*. ROBERT BOSCH, spol. s r.o. v Českých Budějovicích: Oddělení TEF31. 2014.
- [12] VEBER, T. *Odborná konzultace*. ROBERT BOSCH, spol. s r.o. v Českých Budějovicích: Oddělení TEF31. 2014.

- [13] BRŮHA, S. *Optimalizace svařovacích parametrů pro bezkontaktní svařovací technologie vybraných termoplastů*: diplomová práce. České Budějovice, 2013. 82 s. Vedoucí práce Bedřich Veselý.
- [14] KOUBLOVÁ, K. *Odborná konzultace*. ROBERT BOSCH, spol. s r.o. v Českých Budějovicích: Oddělení QMM8. 2014.
- [15] Centrála řízení jakosti Robert Bosch: *Způsobilost strojů a procesů*: Firemní materiály, sešit č. 9. Robert Bosch, spol. s r. o., 2004.
- [16] CROMPTON, T. R. *Polymer Reference Book*. 1. ed. United Kingdom: Rapra Technology Limited, 2006. 704 s. ISBN 098-1-84735-025-1.
- [17] HNÁTKOVÁ, E. *Design and Construction of Medical Device for ENT applications Based on Biodegradable Polymer*: diplomová práce. Zlín, 2012. 97 s. Vedoucí práce Zdeněk Dvořák.
- [18] KLOUŽKOVÁ, A., ZEMENOVÁ, P., KLOUŽEK, J. a W. PABST. *Termická analýza*. PRAHA: VŠCHT, 2012. 66 s.
- [19] *Ústav fyziky a materiálového inženýrství* [online]. [cit. 2014-12-26]. Dostupné z: http://ufmi.ft.utb.cz/texty/kzm/KZM_06.pdf/
- [20] *Technická univerzita v Liberci: Katedra strojírenské technologie* [online]. [cit. 2015-04-13]. Dostupné z: <http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/Intech//Morfologie.pdf/>
- [21] EHRENSTEIN, G. W., RIEDEL G. a P. TRAWIEL. *Thermal analysis of plastics: theory and practice*. Munich: Hanser Publishers, 2004. 368 s. ISBN 1-56990-362-x.
- [22] CHAMRADOVÁ, I. *Studium biodegradability polykaprolaktonu*: bakalářská práce. Brno, 2010. 39 s. Vedoucí práce Stanislava Voběrková.
- [23] *PerkinElmer: For the Better* [online]. [cit. 2015-02-23]. Dostupné z: <http://www.perkinelmer.com-cmsresources-images-447455gde //tgabeginnersguide.pdf/>
- [24] *Technická univerzita v Liberci: Katedra textilních materiálů* [online]. [cit. 2015-02-23]. Dostupné z: <http://www.ft.tul.cz-depart-ktm-files-20060106-prednaska6.pdf/>
- [25] *Infračervená spektroskopie* [online]. [cit. 2015-02-17]. Dostupné z: <http://old.vscht.cz/lms/Zverze/Infrared.htm/>

- [26] PROSR, P. a R. POLANSKÝ. Využití infračervené spektroskopie s Fourierovou transformací v technické diagnostice. *Elektro: odborný časopis pro elektrotechniku* [online]. 2013, roč. 23, č. 12, s. 4 [cit. 2015-04-10]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/flipviewer/Elektro/2013/12/Elektro_12_2013//output/web/Elektro_12_2013_opf_files/WebSearch/page0010.html/
- [27] *The Japan Society of Calorimetry and Thermal Analysis* [online]. [cit. 2015-02-11]. Dostupné z: http://www.netsu.org/j+/Jour_J/pdf/25/25-3-56.pdf/
- [28] JURAČKA, P. J. a J. NEBESÁŘOVÁ. *Skenovací elektronový mikroskop (SEM) ve službách biologie*. PřF OU, 2010. 18 s.
- [29] POSPIECH, M., TREMLOVÁ, B., JAVŮRKOVÁ, Z., LUKÁŠKOVÁ, Z. a M. PETRÁŠOVÁ. *Mikroskopie potravin*. 1. vyd. BRNO: Veterinární a farmaceutická univerzita Brno, 2014. 150 s. ISBN 978-80-7305-697-1.
- [30] NEBESÁŘOVÁ, J. Elektronová mikroskopie pro biologie. *Parazitologický ústav: Biologické centrum AV ČR, v.v.i.* [online]. 2001 [cit. 2015-04-13]. Dostupné z: <http://www.paru.cas.cz/lem/book/Podkap/7.3.html/>
- [31] CAMPBELL, D., PETHRICK, R. A. a J. R. WHITE. *Polymer Characterization: Physical Techniques*. 2. ed. Boca Raton: CRC, 2000. 481 s. ISBN 0-7487-4005-8.
- [32] *SERC: the Science Education Resource Center at Carleton College* [online]. [cit. 2015-02-19]. Dostupné z: http://serc.carleton.edu/research_education//geochemsheets/techniques/SEM.html/
- [33] MLEZIVA, J. a J. ŠŇUPÁREK. *Polymery: výroba, struktura, vlastnosti a použití*. 2. přep. vyd. PRAHA: Sobotáles, 2000. 544 s. ISBN 80-85920-72-7.
- [34] *Resinex: Distribution of Plastics & Elastomers* [online]. [cit. 2015-02-19]. Dostupné z: <http://www.resinex.cz/polymerove-typy/pom.html/>
- [35] *Centrum polymerních systémů* [online]. [cit. 2015-03-26]. Dostupné z: <http://www.cps.utb.cz/index.php/pistrojove-vybaveni/>
- [36] SANÉTRNÍK, D. Měřicí přístroj TESCAN VEGA II. [fotografie]. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2011.
- [37] BEČVÁŘ, M. *Odborná konzultace*. ROBERT BOSCH, spol. s r.o. v Českých Budějovicích: Oddělení QMM. 2014.
- [38] VOLEK, F. *Základy konstruování a části strojů I*. 1. vyd. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2009. 167 s. ISBN 978-80-7318-654-8.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

A	Absorbance
AdBlue	Systém sloužící pro odbourávání obsahu oxidů dusíku ve výfukových plynech
ASCMO	ETAS ASCMO 4.2.
ATR	Jednoodrazová technika zeslabeného úplného odrazu
C	Uhlík
C_m	Index způsobilosti stroje
C_{mk}	Index způsobilosti stroje
C_p	Index způsobilosti procesu
C_{pk}	Index způsobilosti procesu
CrN	Nitrid chromu
d_{mg}	Průměr svařovací geometrie (vnitřní část – menší)
DOE	Design of Experiment
d_{vg}	Průměr svařovací geometrie (vnější část – větší)
DSC	Diferenční skenovací kalorimetrie
DTM	Dolní toleranční mez
F	Síla
FTIR	Infračervená spektroskopie s Fourierovou transformací
H	Vodík
HDPE	Vysoko-hustotní polyetylen
HE	Horký element
MMA	Methylmetakrylát
NO _x	Oxidy dusíku
O	Kyslík
p_n	Maximální hodnota tlaku u nízkoteplotního svařování
p_v	Maximální hodnota tlaku u vysokoteplotního svařování

PA	Polyamid
PBT	Polybutadientereftalát
PE	Polyethylen
PET	Polyethylentereftalát
POM	Polyoxymethylen
POM-C	Polyoxymethylen kopolymer
POM-H	Polyoxymethylen homopolymer
PTFE	Polytetrafluoretylen (např. teflon)
PVD	Technologie nanášení vysoce odolných povrchů proti otěru
R ²	Regresní koeficient
RBCB	Robert Bosch, spol. s r.o. v Českých Budějovicích
S	Plocha
SB	Styren-butadien
SEM	Skenovací elektronová mikroskopie
SHE	Svařování horkým elementem
S _n	Plocha svařovací geometrie
S _p	Vnitřní plocha svařovací geometrie zatížená tlakem
T	Transmitance
T _c	Teplota krystalizace
TEF3	Oddělení vývoje procesů
T _g	Teplota skelného přechodu
TGA	Termogravimetrická analýza
TiN	Nitrid titanu
T _m	Teplota tání
WC	Karbid wolframu
ZnS	Sulfid zinečnatý

ZnSe	Zinek seleniový
ZrO ₂	Oxidová keramika
Δc_p	Tepelná kapacita
ΔH_m	Změna entalpie
ΔH_m^0	Referenční změna entalpie
π	Ludolfovo číslo
σ_{Dt}	Dovolená pevnost v tahu
σ_t	Pevnost svarového spojení
χ_c	Procento krystalinity

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Základní pozice [2].....	13
Obr. 2 Zažehlení [2].....	14
Obr. 3 Přestavení [2].....	14
Obr. 4 Spojení a chlazení [2].....	15
Obr. 5 Celkový průběh svařovacího procesu pro jednu lisovací jednotku [5].....	19
Obr. 6 Dráha zažehlení [5].....	20
Obr. 7 Kontakt dílu se svařovací deskou a správně zažehlený díl [5].....	20
Obr. 8 Dráha spojení.....	21
Obr. 9 Čas ohřevu [5].....	21
Obr. 10 Schéma krátkodobé tlakové destrukční zkoušky [5].....	26
Obr. 11 Schéma dlouhodobé tlakové zkoušky.....	27
Obr. 12 Mikrotom Leica [13].....	29
Obr. 13 Vzorky k analýze.....	30
Obr. 14 Příklady mikroskopických analýz svarového spojení [5].....	31
Obr. 15 Schéma měřicí komory [19].....	35
Obr. 16 Schematický diagram DSC [21].....	36
Obr. 17 Ukázka křivky TGA [24].....	38
Obr. 18 Princip ATR metody [26].....	40
Obr. 19 Graf infračerveného spektra pro materiál polyester [16].....	41
Obr. 20 Schéma Everhart-Thornleyova detektoru sekundárních elektronů [30].....	42
Obr. 21 Pěnový polystyren [31].....	43
Obr. 22 Svařovací geometrie [2].....	47
Obr. 23 Chemický vzorec [34].....	49
Obr. 24 Vstřikovací stroj ENGEL [5].....	50
Obr. 25 Vstřikovací forma na zkušební svařovací tělísko [5].....	51
Obr. 26 Zkušební svařovací tělísko.....	51
Obr. 27 Zkušební svařovací stroj TEAZ.....	52
Obr. 28 Detail vnitřku zkušební svařovacího stroje.....	53
Obr. 29 Svařovací přípravky pro zkušební svařovací tělísko.....	54
Obr. 30 Svařovací desky [13].....	55
Obr. 31 Měření rozměru přes svar.....	56
Obr. 32 Zkušební tlakovací zařízení.....	56

Obr. 33 Přípravek na zkušební svařovací tělísko.....	57
Obr. 34 Přístroje na mikroskopickou analýzu [13].....	58
Obr. 35 Zařízení na dlouhodobou tlakovou zkoušku.....	59
Obr. 36 Přípravek na dlouhodobou tlakovou zkoušku	59
Obr. 37 Měřicí přístroj Mettler Toledo DSC 1 START [35].....	60
Obr. 38 Teplotní režimy DSC.....	60
Obr. 39 Termogravimetrický analyzátor [35].....	61
Obr. 40 Přístroj Thermo SCIENTIFIC Nicolet iS5	61
Obr. 41 Měřicí přístroj TESCANA VEGA II [36].....	62
Obr. 42 Svařovací geometrie po zažehlení	64
Obr. 43 Schéma základní polohy přípravků na svařovacím stroji	65
Obr. 44 Závislost dráhy spojení na tlaku	66
Obr. 45 Závislost dráhy spojení na tlaku	68
Obr. 46 Ukázka DOE pro nízkoteplotní svařování.....	70
Obr. 47 Vliv vstupujících faktorů	70
Obr. 48 Závislost vstupujících faktorů mezi sebou	71
Obr. 49 Modelová nabídka	72
Obr. 50 Zobrazení odchylky v průřezu ploch.....	73
Obr. 51 3D model plochy závislosti času ohřevu, teploty a tlaku	74
Obr. 52 Ukázka DOE pro vysokoteplotní svařování	75
Obr. 53 Vliv vstupujících faktorů	75
Obr. 54 Závislost vstupujících faktorů mezi sebou	76
Obr. 55 Modelová nabídka	76
Obr. 56 Zobrazení odchylky průřezu ploch.....	77
Obr. 57 3D model plochy závislosti času ohřevu, teploty a tlaku	78
Obr. 58 Mikroskopická analýza.....	80
Obr. 59 Porovnání výsledků z analýzy způsobilosti stroje.....	82
Obr. 60 Výsledky dlouhodobé tlakové zkoušky.....	84
Obr. 61 DSC křivka 2. ohřevu	86
Obr. 62 TGA granulátu POM Ultraform S2320 003	87
Obr. 63 FTIR analýza	88
Obr. 64 SEM.....	90
Obr. 65 Průměry svařovacího tělíska.....	91

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Výhody a nevýhody SHE [3].....	15
Tab. 2 Výhody a nevýhody nízkoteplotního kontaktního SHE [5]	16
Tab. 3 Výhody a nevýhody vysokoteplotního kontaktního SHE [5].....	17
Tab. 4 Vstupní a výstupní proměnné [10]	23
Tab. 5 Hlavní vlastnosti POM Ultraform S2320 003 z materiálového listu.....	48
Tab. 6 Vstřikovací parametry	51
Tab. 7 Parametry pro tlakovou destrukční zkoušku	57
Tab. 8 Variace dráhy spojení	66
Tab. 9 Variace dráhy spojení	67
Tab. 10 Vstupní faktory s min. a max. hranicemi.....	69
Tab. 11 Optimální svařovací parametry vyhodnocené z programu ASCMO.....	73
Tab. 12 Vstupní faktory s min. a max. hranicemi.....	74
Tab. 13 Optimální svařovací parametry vyhodnocené z programu ASCMO.....	77
Tab. 14 Shrnutí výsledků získaných z DOE	78
Tab. 15 Porovnání maximální, průměrné a minimální hodnoty tlaku a DTM	82
Tab. 16 Výsledky z dlouhodobé tlakové zkoušky	83
Tab. 17 Výpočet procenta krystalinity.....	86
Tab. 18 Infračervené pásy a funkční skupiny pro materiál POM [27]	88
Tab. 19 Parametry nutné pro výpočet	91