

# **Optimalizace svařovacích parametrů pro technologii svařování laserem u vybraných termoplastů**

**Bc. Václav Bartoš**

---

**Diplomová práce  
2009**



**Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická**

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2008/2009

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Václav BARTOŠ**  
Studijní program: **N 3909 Procesní inženýrství**  
Studijní obor: **Konstrukce technologických zařízení**

Téma práce: **Optimalizace svařovacích parametrů pro technologii svařování laserem u vybraných termoplastů**

Zásady pro vypracování:

**A) Vypracujte rešerši se zaměřením na tyto oblasti:**

- 1. popis procesu laserového svařování**
- 2. popis laserové svářečky**
- 3. přehled použitých materiálů**
- 4. popis testovacích zařízení**
- 5. metody vyhodnocování**

**B) Praktická část:**

- 1. Nalezněte optimální svařovací parametry pro daný produkt za důsledného dodržování systematiky Design of Experiment (DoE).**
- 2. Pro materiály ze skupiny termoplastů proveďte sérii experimentů vedoucí k nalezení optimálních svařovacích parametrů a to s ohledem na krátkodobé a dlouhodobé zkoušky.**

Rozsah práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

[1] MAŇKOVÁ, I.: **Progresívne technologie, 1.vyd. Košice: Vienela, 2000**

[2] ZÁMORSKÝ, Z.: **Nauka o polymerech, VUT Brno, 1980**

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Libuše Sýkorová, Ph.D.**

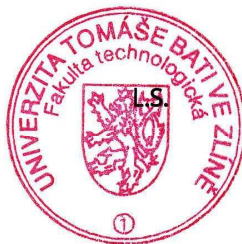
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **20. února 2009**

Termín odevzdání diplomové práce: **20. května 2009**

Ve Zlíně dne 16. února 2009

  
doc. Ing. Petr Hlaváček, CSc.  
*děkan*



  
doc. Ing. Miroslav Maňas, CSc.  
*vedoucí katedry*

## **ABSTRAKT**

Tato diplomová práce se zabývá optimalizací svařovacích parametrů pro technologii svařování laserem u vybraných termoplastů, konkrétně PA66 a POM. V teoretické části jsou v jednotlivých kapitolách shrnuty: princip laseru, rozdělení laserů, technologie laserového svařování plastů, popis laserové svářečky, přehled použitých materiálů, metodika plánování, ověřování a vyhodnocování. V praktické části jsou za důsledného dodržování systematiky Design of Experiment optimalizovány svařovací parametry pro oba materiály a následně je provedeno ověření pomocí krátkodobé analýzy způsobilosti stroje. Na závěr jsou optimální svarové spoje zhodnoceny pomocí metody mikrotomových řezů.

Klíčová slova: laser, PA66, POM, optimální parametry, těsnost spoje, pevnost spoje

## **ABSTRACT**

This diploma thesis deals with the technology of laser beam welding and with the optimizing of welding parameters of the chosen thermoplastics, especially of PA66 and POM. The individual chapters in the theoretical part focus on following topics: principle of laser, laser classification, technology of the laser beam welding of plastics, description of a laser welding machine, list of used materials, methods of planning, verification and evaluation. In the practical part the welding parameters of both materials are being optimized, all thoroughly in accordance with the Design of Experiment methods. It is followed by a verification which is based on a short analysis of the competence of a machine. In the end the optimal weld joints are evaluated by using the method of microtome sections.

Keywords: laser, PA66, POM, optimal parameters, leakage air, burst pressure

## **PODĚKOVÁNÍ**

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucí diplomové práce paní Ing. Libuši Sýkоровé, Ph.D. za cenné rady a připomínky. Mé velké díky patří panu Ing. Miloslavu Kulhánkovi, který svými zkušenostmi, pomocí a ochotou přispěl ke vzniku této práce. Dále děkuji panu Ing. Michalu Bečvářovi za konzultace v oblasti statistických metod řešení a také všem pracovníkům oddělení TEF3 ve společnosti Robert Bosch spol. s r.o v Českých Budějovicích za cenné rady a poskytnutý prostor při provedení experimentu.

V neposlední řadě mé poděkování patří rodině, která mě po celou dobu studia výrazně podporovala.

## **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem na diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků, je-li to uvedeno na základě licenční smlouvy, budu uveden jako spoluautor.

Ve Zlíně, 20. 5. 2009

.....

Podpis diplomanta

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>9</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>10</b>
<b>1 LASER</b> .....	<b>11</b>
1.1 FYZIKÁLNÍ PODSTATA LASERU.....	11
1.2 ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI LASEROVÉHO SVAZKU.....	13
1.3 KONSTRUKCE LASERU .....	17
1.4 ROZDĚLENÍ LASERŮ.....	18
1.4.1 Pevnolátkové lasery.....	20
1.4.2 Kapalinové lasery .....	20
1.4.3 Plynové lasery .....	21
1.4.4 Polovodičové (diodové) lasery.....	21
<b>2 PROCES LASEROVÉHO SVAŘOVÁNÍ PLASTŮ</b> .....	<b>23</b>
2.1 LASERY PRO SVAŘOVÁNÍ PLASTŮ .....	23
2.2 SVAŘOVÁNÍ PLASTŮ LASEREM.....	24
2.2.1 Svařování na tupo (Butt Welding) .....	24
2.2.2 Propustné svařování (Transmission Welding) .....	26
2.2.2.1 Obrysově svařování (Contour Welding).....	27
2.2.2.2 Kvazi-simultánní svařování (Quasi-Simultaneous Welding) .....	27
2.2.2.3 Simultánní svařování s více diodami (Simultaneous Welding).....	28
2.2.2.4 Svařování s maskou (Mask Welding).....	29
2.2.2.5 Příklady použití transmisivního svařování.....	30
<b>3 POPIS LASEROVÉ SVÁŘEČKY</b> .....	<b>32</b>
3.1 GENERÁTOR LASEROVÉHO PAPRSKU LDM.....	33
3.2 OVLÁDACÍ PANEL VPP 21 .....	34
3.3 OVLÁDACÍ SOFTWARE SAMLIGHT (SCAPS) .....	35
3.4 POPIS POSTUPU SVAŘOVÁNÍ.....	36
<b>4 BEZPEČNOST PRÁCE S LASEROVÝMI ZAŘÍZENÍMI</b> .....	<b>38</b>
4.1 ROZDĚLENÍ LASERŮ O BEZPEČNOSTNÍCH TŘÍD .....	38
4.2 EKOLOGICKÉ HLEDISKO LASEROVÉHO SVAŘOVÁNÍ.....	39
<b>5 PŘEHLED POUŽITÝCH MATERIÁLŮ</b> .....	<b>40</b>
5.1 POM – POLYOXYMETHYLEN .....	40
5.2 PA 66 – POLYAMID 66 .....	40
<b>6 POPIS ZKUŠEBNÍCH METOD</b> .....	<b>42</b>
6.1 ZKOUŠKY TĚSNOSTI.....	42
6.1.1 Zkouška těsnosti heliem.....	43
6.1.2 Zkoušky těsnosti suchým vzduchem.....	44

6.2	TLAKOVÁ DESTRUKČNÍ ZKOUŠKA - BERSTDRUCK .....	46
<b>7</b>	<b>METODY PLÁNOVÁNÍ, OVĚŘOVÁNÍ A VYHODNOCOVÁNÍ.....</b>	<b>50</b>
7.1	STATISTICKÉ PLÁNOVÁNÍ.....	50
7.1.1	Plackett-Burman.....	50
7.1.2	Systematika Design of Experiment .....	51
7.1.2.1	Postup pro Design of Experiment.....	53
7.2	OVĚŘOVÁNÍ ZPŮSOBILOSTI STROJŮ A PROCESŮ .....	54
7.2.1	Analýza způsobilosti stroje .....	55
7.2.2	Analýza způsobilosti procesu.....	55
7.3	VYHODNOCOVÁNÍ FRAKTOGRAFIE .....	56
7.3.1	Lomy .....	57
7.3.2	Únava .....	58
7.3.3	Tečení (creep).....	58
7.3.4	Analýza lomů .....	58
7.4	VYHODNOCOVÁNÍ MIKROTOMIE.....	59
7.4.1	Podmínky řezání.....	61
7.4.2	Mikroskopie v odraženém světle.....	61
<b>8</b>	<b>POPIS FORMY NA VÝROBU ZKUŠEBNÍCH TĚLÍSEK.....</b>	<b>62</b>
<b>II</b>	<b>PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>65</b>
<b>9</b>	<b>OPTIMALIZACE PARAMETRŮ SVAŘOVACÍHO PROCESU.....</b>	<b>66</b>
9.1	PŘÍPRAVA A POŽADAVKY .....	66
9.2	MATERIÁL .....	67
9.3	VARIOVANÉ PARAMETRY STROJE .....	67
9.4	SVAŘOVACÍ PŘÍPRAVEK.....	68
9.5	MĚŘÍCÍ PŘÍPRAVKY .....	69
9.5.1	Přípravek pro měření těsnosti.....	69
9.5.2	Přípravek pro měření pevnosti spoje.....	69
<b>10</b>	<b>PROVEDENÍ EXPERIMENTU .....</b>	<b>70</b>
10.1	PLACKETT-BURMAN TEST .....	70
10.1.1	Naplánování Plackett-Burmanova testu .....	70
10.1.2	Měření výstupních veličin .....	71
10.1.3	Vyhodnocení .....	72
10.2	DESIGN OF EXPERIMENT.....	81
10.2.1	Naplánování DoE .....	81
10.2.2	Měření výstupních veličin .....	83
10.2.3	Vyhodnocení .....	84
10.3	OVĚŘENÍ ZPŮSOBILOSTI STROJE.....	95
10.3.1	Parametry a postup .....	95
10.3.2	Měření výstupních veličin .....	95
10.3.3	Vyhodnocení .....	96
<b>11</b>	<b>HODNOCENÍ MIKROTOMOVÝCH ŘEZŮ .....</b>	<b>99</b>

<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>101</b>
<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>102</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>105</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>107</b>
<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>110</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>111</b>



## ÚVOD

Plasty a jejich aplikace zasahují v současné době význačně do našeho života a tvoří jeho nedílnou součást. Vzdůst jejich výroby a spotřeby velmi podstatně převyšuje podobné ukazatele u materiálů klasických (kovových i nekovových).

Rostoucí počet dílů z plastu si žádá nutnost jejich rychlého spojování. Pokud nebudeme brát v úvahu metodu lepení, tak hlavní oblastí spojování je svařování, která je aplikovatelná pro řadu plastických materiálů. Stejně jako u kovů i zde dochází ke spojení v důsledku působení teploty. V průběhu několika let byly vyvinuty různé metody zahřívání (tavení) svařované oblasti. Mezi tyto metody patří:

- svařování horkým elementem
- rotační (třecí) svařování
- ultrazvukové svařování

Žádná z těchto metod není dokonale aplikovatelná na všechny materiály a každá má své výhody a nevýhody.

Poměrně novým přístupem při svařování plastů je použití laserové techniky, kde teplo potřebné k tavení spojovaných dílů je do oblasti sváru dodáváno pomocí vysokoenergetického laserového paprsku. Hlavní výhody laserového svařování jsou:

- ✓ laserový paprsek je nekontaktní nástroj, tzn. neopotřebovává se
- ✓ laser působí pouze do svařované oblasti, tzn. svár může být i v blízkosti komponentů citlivých na teplotu (elektronické obvody, atd.)
- ✓ laserový paprsek je flexibilní a volně programovatelný, tzn. je možné svářet komplexní trojrozměrné součásti

Další výhody i nevýhody této technologie určitě existují. Jsou ale součástí dalšího výzkumu, který má za úkol určit hranice, kde lze laserové svařování plastů aplikovat. Doufejme, že praktická část této diplomové práce bude mít pro tento výzkum určitý přínos a pomůže tak stanovit oblast použití zmíněné metody.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 LASER

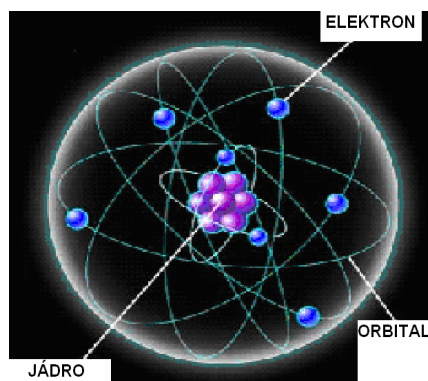
Slovo **laser** [lejzr] pochází z angličtiny. Je složené z počátečních písmen anglického názvu popisujícího jeho funkci: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, což znamená zesílení světla pomocí vynucené (stimulované) emise záření. Používá se také pojmenování laseru je kvantový generátor světla, což se nepoužívá, protože zažité **laser** je kratší. Z anglického názvu je zřejmé, že laser vyzařuje světlo. Od normálního světla se laserové světlo liší tím, že je monochromatické (jednobarevné) koherentní (uspořádané) a má malou divergenci (rozbíhavost). Z definice vyplývá, že laser je zařízení, které přeměňuje dodávanou energii na laserové světlo. energii můžeme dodávat různým způsobem, například opticky (světlem výbojky), chemicky, elektricky atd. Konstrukce samotných laserů je velmi různorodý. Záleží hlavně na druhu laseru, na jeho konstrukci a v neposlední řadě na jeho použití. [21]



Obr. 1. Srovnání světla vyzařovaného laserem se světlem žárovky [23]

### 1.1 Fyzikální podstata laseru

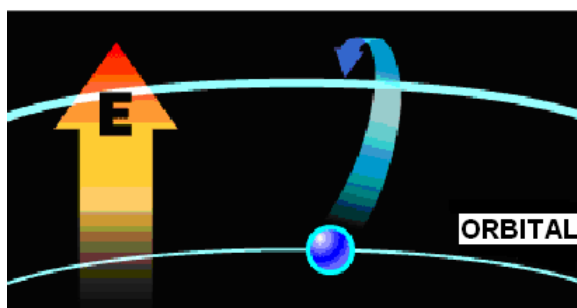
Princip funkce laseru je možné objasnit na základě pojmu kvantové fyziky pomocí zjednodušeného planetárního modelu atomu (Obr. 2.).



Obr. 2. Model atomu [22]

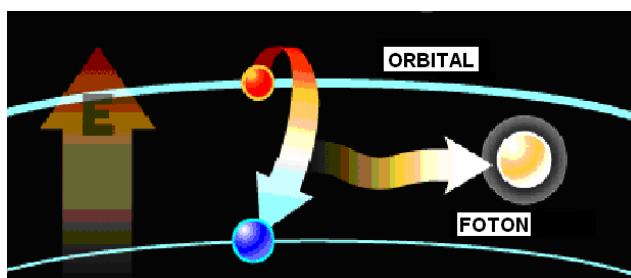
Kolem kladně nabitého jádra (protonu) krouží v různých elektronových drahách (orbitech) elektrony, které podléhají přitažlivým elektrostatickým silám. Přitom každé dráze (orbitálu) přísluší přesně určené množství energie, zvané energetická hladina. [7]

Atomy se mohou nacházet v různých stavech excitace - vybuzení. To znamená, že mohou mít různou energii. Dodáme-li atomu dostatečnou dávku energie, může opustit tzv. základní energetickou hladinu a přejít do excitované – vybuzené hladiny. Úroveň excitace závisí na množství dodané energie, kterou přivádíme prostřednictvím tepla, světla nebo elektřiny. Vyvineme-li tedy na atom teplo, některý z elektronů v nižším energetickém orbitálu přejde do vyššího energetického orbitálu, vzdálenějšího od jádra atomu (Obr. 3.). [22]



Obr. 3. Přechod elektronu [22]

Jestliže se některý z elektronů přesune do vyššího energetického orbitálu, má posléze snahu vrátit se do základního stavu. Jestliže se to stane, uvolní svou energii v podobě fotonu - částice světla (Obr. 4.). [22]



Obr. 4. Excitace atomu a vyzáření fotonu [22]

Vše co vysílá světlo (zářivky, plynové lampy, žárovky, atd.) pracuje na principu elektronů měnících své orbitály za současného uvolňování fotonů [22]. Elektron se může nacházet pouze na vymezených energetických hladinách. V závislosti na rozdílu těchto hladin vzniká infračervené, ultrafialové anebo viditelné světelné záření. [7]

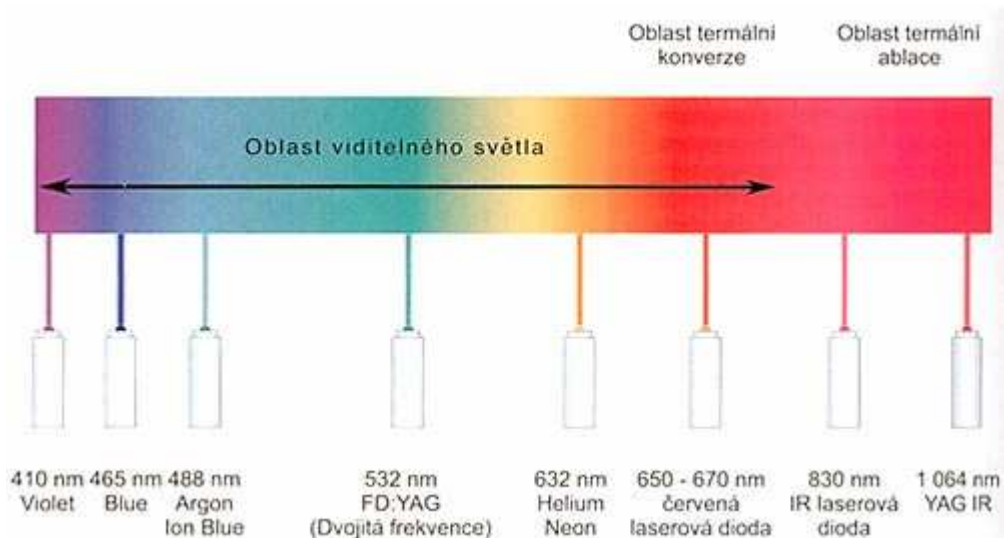
## 1.2 Základní vlastnosti laserového svazku

- mimořádná monochromaticnost záření
- vysoká koherence svazku záření
- stejná polarizace jednotlivých fotonů
- možnost dosažení vysoké intenzity záření
- módová struktura

### a) mimořádná monochromaticnost záření

Světlo laserového paprsku má prakticky jen jednu vlnovou délku (udávaná v nanometrech), která určuje, v jaké části spektra se bude laserový paprsek pohybovat. Vlnová délka je navíc důležitá i pro velikost stopy laseru. Podle vlnové délky (Obr. 5.) se také dělí lasery na termální (IR), u kterých je vlnová délka vyšší než 630 nm, lasery pracující ve viditelném světle (380 – 630 nm) a lasery pracující v UV oblasti (pod 380 nm).

[23]

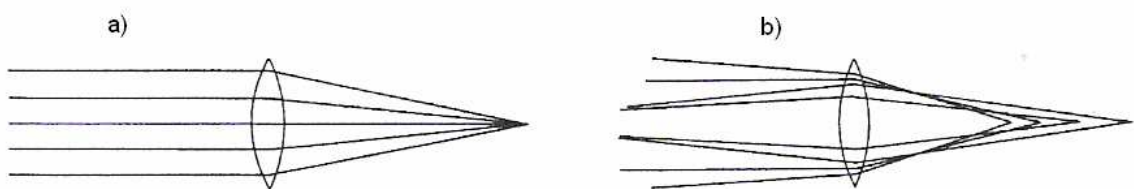


Obr. 5. Vlnové délky pro různé typy laserů [23]

Laserovým paprskem v současnosti s nejnižší vlnovou délkou v oblasti viditelného spektra je fialový laser (violet, 395 - 410 nm). Jde o laserovou diodu s velmi nízkou energetickou náročností (asi 5 mW). Druhou laserovou diodou s velmi nízkou vlnovou délkou a podobnou energetickou náročností je modrý laser (blue, 465 nm). Oba tyto druhy jsou žhavými favority v oblasti viditelného spektra. Nejnižší vlnovou délku mezi plynovými

lasery má argonový laser (Argon Ion Blue 488 nm). Jedním z nejběžněji používaných laserů je krystalový Nd:YAG laser se zdvojenou frekvencí o vlnové délce 532 nm s energetickou náročností okolo 100 mW. Dalším používaným laserem je plynový, Helium Neon laser o vlnové délce 632 nm. Na vlnové délce 650 nm začíná skupina červených laserových diod, emitujících na vlnových délkách 650, 670, 680 nebo 780 nm. Následují výkonné laserové diody s vlnovou délkou 830 a 870 nm a Nd:YAG IR lasery s vlnovou délkou 1 064 nm. [23]

Díky tomu, že laserové světlo je monochromatické a rovnoběžné, lze ho soustředit do intenzivního úzkého bodového svazku. Na obrázku (Obr. 6.) vidíme srovnání laserového světla (a) a fokusovaného neparalelního světla (b), kde ohnisková vzdálenost závisí na úhlu dopadu částic paprsku. [23]



Obr. 6. Srovnání laserového světla (a) a fokusovaného neparalelního světla (b) [23]

b) vysoká koherence svazku záření

Záření je prostorově koherentní (všechny částice světelné vlny kmitají se stejnou fází v rovině kolmé na směr šíření paprsku), záření je časově koherentní (všechny částice světelné vlny kmitají se stejnou fází ve směru šíření paprsku)

c) stejná polarizace jednotlivých fotonů

d) možnost dosažení vysoké intenzity záření

Není nijak limitována zákony záření absolutně černého tělesa a platí pro ni vztah:

$$I = I_0 \cdot \exp\left(-2r^2 / r_0^2\right)$$

kde  $I_0$  je intenzita záření ve středu paprsku

$r_0$  je poloměr, ve kterém je intenzita redukována ze střední hodnoty faktorem  $e^2$

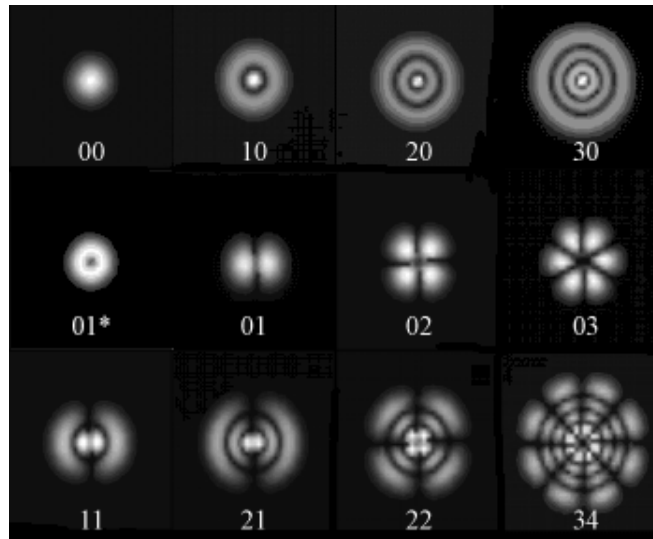
e) módová struktura (TEM – „Transverse Elektromagnetic Mode“)

Tvar průřezu svazku záření je významně závislý nejen na vlnové délce fotonů, ale také na sousostí, vzdálenosti a zakřivení zrcadel a na průměru laserové trubice. V příčném průřezu paprsek vytváří buď jen jednoduchou stopu – základní mód nebo složitější obrazce pravoúhle nebo kruhově symetrické. Je to dané tím, že uvnitř laserového rezonátoru získává elektromagnetické pole generované stimulovanou emisí záření určitou konfiguraci - mód, v závislosti na okrajových podmínkách rezonátoru. Největší hustoty energie při dané výstupní energii laseru je možné dosáhnout lasery pracujícími v základním módu označovaném  $TEM_{00}$  (index charakterizuje symetrii elektromagnetického pole v rovině kolmé na směr šíření paprsku). Mód laseru určuje jeho vhodnost pro průmyslové použití, jako například pro řezání, svařování apod. (Obr. 7.) [7]

průřez A v rovině kolmé na směr paprsku	průřez B kolmý na A	půdorys	označení TEM (použití)
			TEM00 řezání
			TEM01 svařování, kalení
			TEM21
			TEM32
			multimód (řezání)
			multimód (nevhodné pro řezání)

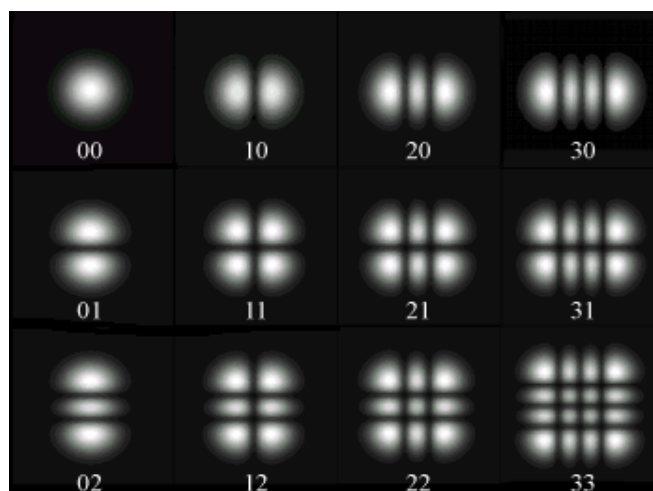
Obr. 7. Vybrané módy s jejich označením a vhodností použití [7]

Na obrázku (Obr. 8.) jsou příklady osově symetrických módů (válcovité módy) zachycených CCD kamerou. V symbolech  $TEM_{m,n}$  vyjadřují indexy  $m, n$  počty minim intenzity ve směrech dvou na sebe kolmých os.



Obr. 8. Příklady osově symetrických módů [7]

Na obrázku (Obr. 9.) jsou příklady středově symetrických módů (obdélníkových módů) zachycených CCD kamerou.

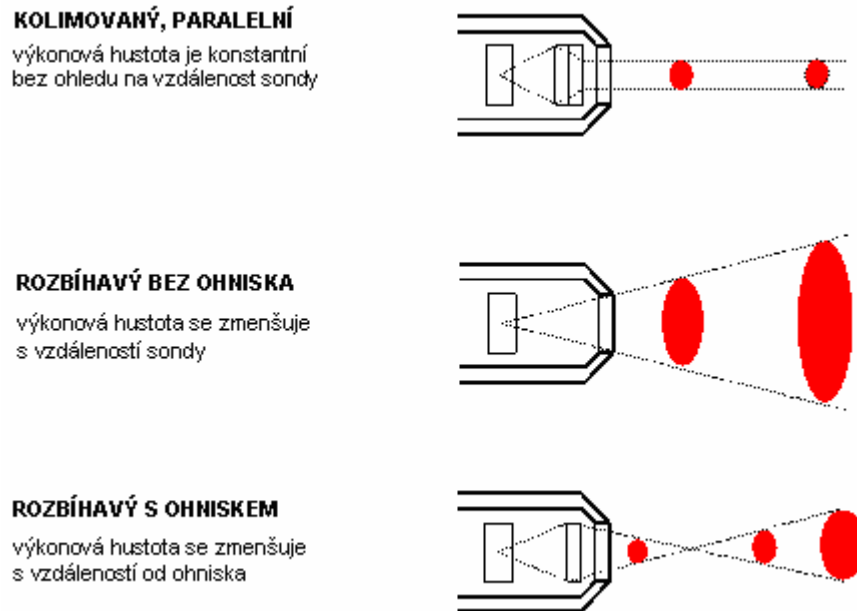


Obr. 9. Příklady středově symetrických módů [7]

Jak již bylo řečeno dříve, laserový paprsek díky jeho vlastnostem umožňuje jeho fokusaci (pomocí vhodné optické soustavy) do malého bodu s mimořádně vysokou hustotou energie v místě dopadu paprsku, což má za následek natavení až odpaření materiálu, čímž se dosahuje výsledného efektu obrábění. Průměr nefokusevaného paprsku bývá řádově až několik milimetrů, takový paprsek není vhodný pro aplikace, kde je potřeba malá tepelně ovlivněná oblast jako třeba u řezání a svařování, proto je nutné laserový paprsek soustředit do úzkého svazku. Například fokusovaný paprsek pro řezání CO<sub>2</sub> laserem s výkonem do 1kW má průměr okolo 0,3 mm a dosahuje energie až  $1,4 \cdot 10^{10} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ . [7]



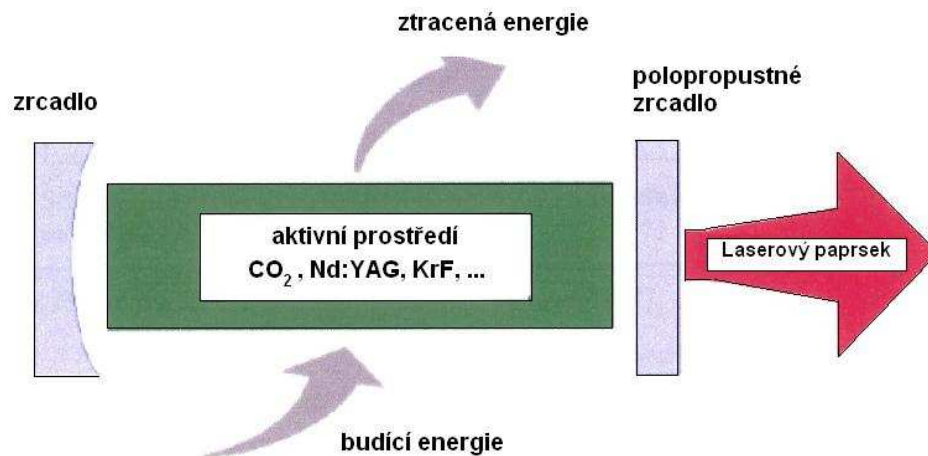
Na obrázku (Obr. 10.) můžeme vidět různé tvary paprsku laseru, které jsou určeny tvarem zrcadel rezonátoru, případně optickou soustavou na výstupu laseru.



Obr. 10. Tvary paprsku laseru [7]

### 1.3 Konstrukce laseru

U laserů založených na buzení aktivního média vzniká paprsek v tzv. rezonátorech. To jsou generátory elektromagnetického záření o určité vlnové délce, dané vlastní konstrukcí rezonátoru. [27] Každá struktura laseru (Obr. 11.) se skládá ze tří hlavních částí: z aktivního prostředí (aktivní látka), z budícího zdroje (čerpání) a z rezonančního systému.



Obr. 11. Schéma struktury laseru [27]

Aktivní látka je buď ve formě přesných geometrických útvarů u pevnolátkových laserů, nebo v plynu naplněných trubicích pro plynové lasery. V důsledku dodané energie (např. el. proudu, výbojky, ...) dochází v aktivním prostředí k vybuzení elektronů (excitaci) a následnému vyzáření kvant energie formou fotonů. Pro znásobení počtu vybuzených elektronů je aktivní médium ohraničeno dvěma zrcadly. Vyzářený foton je odražen zpátky k průchodu aktivním prostředím a tím dochází k exponenciálnímu zesilování toku fotonů. Jedno ze zrcadel je polopropustné a umožňuje část fotonů letících v kolmém směru vyzářit již známou formou laserového paprsku. Rezonátor je tedy nejčastěji tvořen dvěma zrcadly, z nichž jedno je zcela odrazivé a druhé částečně propustné. Používají se dielektrická zrcadla, popř. leštěný kov, zlato, ... Zrcadla v rezonátoru zdaleka nemusí být rovinná. Naopak, v řadě případů je výhodné použít konkávní nebo konvexní zrcadla. Stabilita zařízení v rezonátoru závisí právě na poloměrech křivosti zrcadel a délce rezonátoru. Navrhnout takový rezonátor je velice složitý výpočetní proces, který ve výsledku určuje rozložení energie ve vyzářeném paprsku. Některé lasery s dostatečně velkým zesílením v aktivním prostředí rezonátor nepotřebují a pracují superradiačně, tzn. že záření stačí jediný průchod k získání dostatečné intenzity. V případě diodových laserů má dostatečnou odrazivost samotné aktivní prostředí (tvořené polovodičem s P-N přechodem) se vzduchem. [27]

## 1.4 Rozdělení laserů

V současné době jsou v mnoha oblastech vědy, techniky a průmyslu využívány různé typy laserů, kterých je velké množství a každý něčím vyniká a je vhodný k určitému použití. Postupem času se jednotlivé typy zdokonalovaly a vylepšovaly se tak jejich parametry. Vzhledem k rozmanitosti dostupných laserů, rozdílnosti vlastností, dosahovaných výkonů, oblasti použití, je potřebné dělení laseru do určitých kategorií. [7] Hlavní rozdělení charakterizuje následující tabulka (Tab. 1.).

Tab. 1. Rozdělení laserů podle aktivního prostředí [28]

Typ laseru	Aktivní prostředí	Vlnová délka	Spektrální oblast	Příklady použití
<b>Pevnolátkové</b>				
Rubínový laser	Rubín	694,3 nm	červená	holografie, odstraňování tetování
Nd:YAG laser	Neodym, YAG	1064 nm	IR	litografie, chirurgie, strojírenství
Ho:YAG laser	Ho:YAG	2,1 μm	IR	chirurgie, stomatologie
Er:YAG laser	Erbium, YAG	2,94 μm	IR	chirurgie, stomatologie
Titan-safírový laser	titan, safír	690 - 1000 nm	červená, IR	spektroskopie, fs pulsy
Alexandritový laser	Alexandrit	700 - 800 nm	červená, IR	žhánání, řezání
<b>Barvivové</b>				
Rhodamin 6G laser	Rhodamin 6G	570-650 nm	žlutá, oranžová, červená	dermatologie
Kumarin C30 laser	Kumarin C30	504 nm	zelená	oftalmologie, chirurgie
<b>Plynové – Atomární</b>				
He-Ne laser	hélium, neon	543 nm, 633 nm	zelená, červená	zaměřování polohy
Měděný laser	měď	510 nm, 578 nm	zelená	podmořská komunikace a lokace
Jodový laser	jód	342 nm, 612 nm, 1315 nm	viditelné, IR	věda, termojaderná syntéza
<b>Plynové – Iontové</b>				
Argonový laser	argon	488 nm, 514 nm	modrá, zelená	oftalmologie, spektroskopie
Hélium-kadmiový laser	hélium, kadmium	325 nm, 442 nm	UV, modrá	věda
<b>Plynové – Molekulární</b>				
Vodíkový laser	vodík	100 - 120 nm, 140 - 165 nm	UV	věda
CO <sub>2</sub> laser	Oxid uhličitý	10,6 μm	IR	sváření, řezání, gravírování

CO laser	Oxid uhelnatý	5 - 6,5 $\mu\text{m}$	IR	věda
Excimerové lasery	ArF, KrCl, KrF, XeCl, XeF	193 - 351 nm	UV	oftalmologie, laserová ablace
Dusíkový laser	dusík	337 nm	UV	věda
<b>Polovodičové</b>				
GaAs laser	GaAs	650 nm, 840 nm	červená, IR	laser. ukazovátka, laserová tiskárna
GaAlAs laser	GaAlAs	670-830 nm	červená	telekomunikace, přehrávače CD
AlGaInP laser	AlGaInP	650 nm	červená	přehrávače DVD
GaN laser	GaN	405 nm	modrá	Blu-ray disky
InGaAlP laser	InGaAlP	630-685 nm	červená	lékařství

pozn.: UV ~ ultraviolet (ultrafialová), IR ~ infrared (infračervená)

#### 1.4.1 Pevnolátkové lasery

Tato konstrukce laserů využívá aktivní prostředí ve formě pevné látky, která obsahuje ionty vzácných zemin eventuálně některé další prvky. Těmito prvky je obohacena krystalová mřížka, popř. amorfni matrice nosného materiálu. Aktivní ionty jsou zdrojem stimulovaného záření. Přes absorpční pásy těchto iontů se obsazují příslušné energetické hladiny, mezi kterými dochází k inverzi. Pevnolátkové lasery využívají nejrůznější aktivní prostředí, avšak k technologicky nejvíce používaným patří lasery Nd:YAG s neodymovým sklem. [27]

Tyto lasery mohou pracovat v různých režimech a také za různých provozních podmínek, jsou stabilní a mají malé nároky na údržbu. Jejich záření má vlnové délky v oblasti infračerveného a viditelného světla. [7]

#### 1.4.2 Kapalinové lasery

Aktivním prostředím těchto laserů jsou roztoky různých organických barviv. Pomocí několika druhů barviv a metod tzv. nelineární optiky je možno dosáhnout prakticky všech vlnových délek od 300 nm do 1500 nm. Proto se kapalinové lasery používají např. ve spektroskopii a informační technice. Mohou zabírat neomezeně velký objem a jsou do-

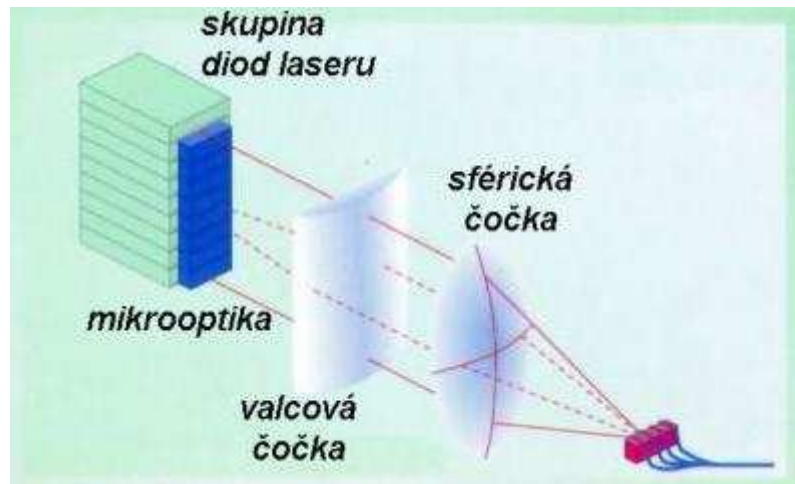
konale homogenní. Jejich nevýhodou je toxicita a krátká životnost aktivního prostředí, které se teplem a světlem rozkládá. Typickým představitelem je rhodamový laser generující pulzní záření od zelené až po červenou oblast spektra. Pro průmyslové aplikace, kde je nutno dosáhnout velké energie paprsku, nemají praktické využití. Ve většině případů dochází k jejich nahrazení přesaditelnými pevnolátkovými lasery. [27]

### 1.4.3 Plynové lasery

Z plynových laserů je nejvíce rozšířen  $\text{CO}_2$  laser, jehož aktivní prostředí tvoří z velké části molekuly oxidu uhličitého ( $\text{CO}_2$ ) buzené doutnavým elektrickým výbojem. V dnešní době lasery tohoto typu mohou pracovat v pulzním i kontinuálním režimu a to s nízkou módovou strukturou. Z hlediska vlastního konstrukčního uspořádání se tyto typy laserů vyrábějí s axiální a příčnou excitací aktivního prostředí.  $\text{CO}_2$  lasery dosahují výkonů až 45kW a vyznačují se relativně dobrou účinností 8-15 %. Výkony desítek až stovek wattů se generují systémy s několika metry dlouhými, vodou chlazenými trubicemi, ve kterých proudí aktivní plyn. Důležitým parametrem tohoto typu laseru je, že se emituje infračervené záření o vlnové délce 10,6  $\mu\text{m}$ . Nevýhodou tohoto typu laseru je, že tato vlnová délka neprochází optickými vlákny a laserové záření je nutno do místa určení dopravit systémem zrcadel. Použití  $\text{CO}_2$  laseru je hlavně v oblastech svařování a řezání kovových plechů značných tlouštěk. [27]

### 1.4.4 Polovodičové (diodové) lasery

Aktivním prostředím polovodičových laserů je polovodičový materiál, ve kterém je možno dosáhnout velkého optického zesílení. Vzhledem k tomu jsou, tedy rozměry aktivního elementu polovodičového laseru mnohem menší než u ostatních laserů. Mezi polovodičové lasery buzené svazkem elektronů, kde je aktivní prostředí tvořeno vlastním polovodičem, patří např. galium arsenidový (Ga-As) polovodičový laser, kadmium sulfidový (Cd-S) a kadmium selenidový (Cd-Se) polovodičový laser. Velký komerční význam mají polovodičové lasery především pro aplikace v počítačové technice a v samotné technice laserů, protože jsou využívány jako zdroje záření pro buzení pevnolátkových laserů. [7]



Obr. 12. Princip diodového laseru [28]

Jako velmi perspektivní se dnes zdají být polovodičové vysokovýkonné diodové lasery (HDL – High-power diode laser), které jsou však teprve na začátku průmyslového využívání. Tyto systémy s vynikající elektrickou účinností (25-50 %) přeměňují elektrický proud přímo na světelné záření. Pracují v kontinuálním i pulzním režimu. Vlnová délka emitovaného záření je také velmi příznivá 780 – 980 nm a dnes se již vyrábí laserové diody, jejich záření je přímo navedeno do optického vlákna (Obr. 12.). Od ostatních laserů se liší tím, že nepracují s přechodem elektronů mezi diskrétními hladinami, ale využívají elektronové přechody mezi vodivostním a valenčním pásem polovodiče. Laserový paprsek lze snadno modulovat změnou budícího elektrického proudu.

Systémy HDL jsou také velmi kompaktní, nenáročné na údržbu a velice lehké ve srovnání např. s CO<sub>2</sub> lasery. Díky tomu se snadno integrují do stávajících zařízení. Zároveň mají také všechny technické a provozně-ekonomické předpoklady pro využití při pájení, lepení, popouštění, kalení, přetváření, obrábění, navařování, popisování, svařování plastů, potrubí a taky pro hloubkové svařování. Technologické problémy, jako např. velká divergence laserového svazku, teplotní závislost výkonu a provozní životnost jsou postupně optimalizovány. Kromě aplikací k přímému použití se diodové lasery rozšiřují jako podpora obrábění. Hlavní nevýhodou vysokovýkonných laserových diod je jejich značná pořizovací cena. [27]

## 2 PROCES LASEROVÉHO SVAŘOVÁNÍ PLASTŮ

### 2.1 Lasery pro svařování plastů

Podle druhu použitého aktivního prostředí laseru a druhu buzení můžeme použít různé typy laseru. V oblasti svařování plastů se využívá hlavně CO<sub>2</sub> – plynný laser, Nd:YAG – pevnolátkový laser (**N**eodym:**Y**trium-**A**luminium-**G**ranat) a vysocevýkonný diodový laser. Tyto typy laserů mohou být použity jak v cw (continuous wave, tj. časově konstantní vyzařování), tak v pulzním režimu (diskontinuální výkon) s emitovanými krátkými pulzy. [26]

V tabulce (Tab. 2.) jsou srovnány tři typy laserů využívané při laserovém svařování podle významných charakteristických hodnot. Významný rozdíl mezi danými typy laserů je ve vlnové délce emitovaného záření. Jak u Nd:YAG tak i u vysocevýkonného diodového laseru je emitováno záření blízké infračervené oblasti při 1,064 μm, příp. 0,8 – 1 μm, u CO<sub>2</sub> laseru leží hodnota vlnové délky řádově výše, na 10,6 μm. Tento rozdíl má výrazný vliv na absorpci paprsku ve svařovaném plastu. Laserové světlo (svazek) Nd:YAG a paprsky vysoce-výkonného diodového laseru jsou vedeny optickým kabelem. [26]

Tab. 2. Srovnávací tabulka laserů na svařování plastů [26]

vlastnosti / typ laseru	CO <sub>2</sub> – laser	Nd:YAG – laser	vysocevýkonný diodový laser
vlnová délka [μm]	10,6	1,064	0,8-1,0
účinnost [%]	5-10	1-3	30-40
velikost laserové hlavy [dm <sup>3</sup> ]	10 <sup>3</sup>	10 <sup>2</sup>	1
střední výstupní výkon [kW]	do 30	do 3	do 2
střední intenzita fokusovaných paprsků [W/cm <sup>2</sup> ]	10 <sup>6...30</sup>	10 <sup>5...9</sup>	10 <sup>3...5</sup>
cena [\$ /W]	150-300	200-600	100-300
interval údržby [h]	1000	500	2000-10000

Velké rozdíly mezi lasery jsou i ve stupni účinnosti. Zatímco u Nd:YAG – laseru musí být chlazením odvedeno 97 – 99 % přivedené energie, tzn. účinnost je 1 - 3 %, u CO<sub>2</sub>

laseru leží hodnota účinnosti na 5 - 10 % a u vysoce-výkonného diodového laseru dokonce na 30 - 40 %. Naproti tomu leží dosažitelná hodnota intenzity záření (energie vztažená na jednotku plochy). U vysoce-výkonného diodového laseru je hodnota intenzity znatelně pod hodnotami dosažitelnými Nd:YAG nebo CO<sub>2</sub> laserem. Minimální dosažitelná stopa vysoce-výkonného diodového laseru je elipsa o rozměrech obou hlavních průměrů (0,25 mm a 0,5 mm), např. u Nd:YAG – laseru je nastavitelný minimální průměr ohniska několik málo μm. Méně dobrá schopnost fokusování emitovaného záření vysoce-výkonného diodového laseru není u svařování plastů nevýhodou. Obecně (ve srovnání s mnoha jinými laserovými technologiemi) jsou zde používány větší průměry záření. [26]

## 2.2 Svařování plastů laserem

Při svařování laserem dochází k zahřívání a plastifikaci svařované oblasti díky absorpci infračervených paprsků do materiálu. Absorpce (tj. přeměna infračerveného záření v teplo) se liší podle použitého typu laseru, podle druhu materiálu a jeho přísad.

Výhody laserového svařování plastů:

- žádné kmitání spojovaných částí
- žádný brusný otěr
- žádné problémy s adhezí
- místně omezený přívod tepla

Jako u jiných svařovacích technologiích tak i zde lze svařovat jen termoplasty nebo termoplastické elastomery (TPE). Za dané chemické kompatibility můžeme spolu svařovat i různé plasty. Pevnost svaru vyplývá ze souhrnu veličin: teplota, čas teplotního účinku, tlak, případně přetok taveniny. [26]

Rozeznávají se dvě procesní varianty svařování plastů laserem:

- 1) svařování na tupo - není moc běžné
- 2) transmisivní (propustné) svařování [20]

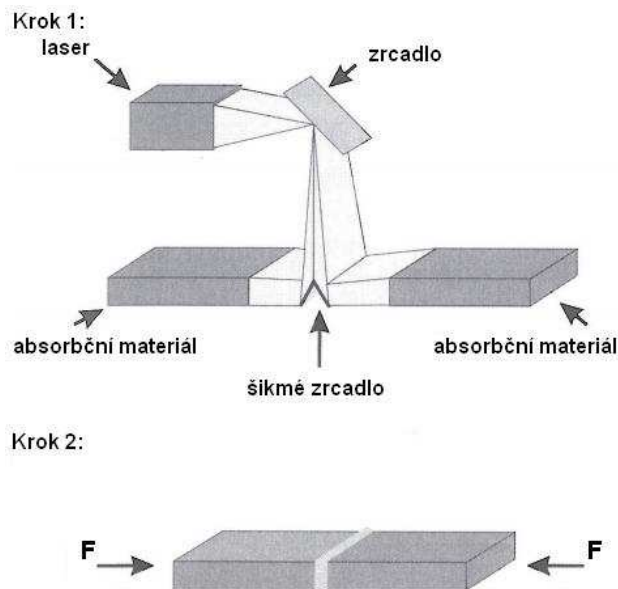
### 2.2.1 Svařování na tupo (Butt Welding)

Jsou využívány dvě varianty pro svařování plastů na tupo za využití laseru:

- a) s šikmým zrcadlem - díly jsou spojené způsobem, který je podobný zahřátým svařovacím nástrojům. Laserový paprsek se odrazí od vychýleného zrcadla do oblasti

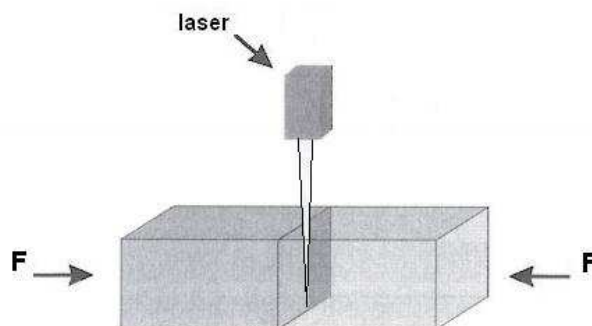


sváru, viz. Krok 1 na obrázku (Obr. 13.). Energie z laserového paprsku se absorbuje na povrchu dílů a přetvoří se v teplo, které způsobí jejich roztavení. Samotné spojení se děje v druhé fázi, kdy je laser vypnut, zrcadlo odstraněno a svařené části silou  $F$  stlačeny k sobě, viz. Krok 2 na obrázku (Obr. 13.). Nejdůležitější proměnné mající vliv na proces jsou množství energie dodané laserem, doba trvání a tlak aplikovaný v svařovací oblasti. [20]



Obr. 13. Svařování na tupo se šikmým zrcadlem [20]

- b) bez šikmého zrcadla - svařované díly jsou spolu v kontaktu již na začátku, jelikož síla  $F$  působí po celou dobu svařování. Laser působí přímo na spojované části do místa sváru (Obr. 14.). [20]

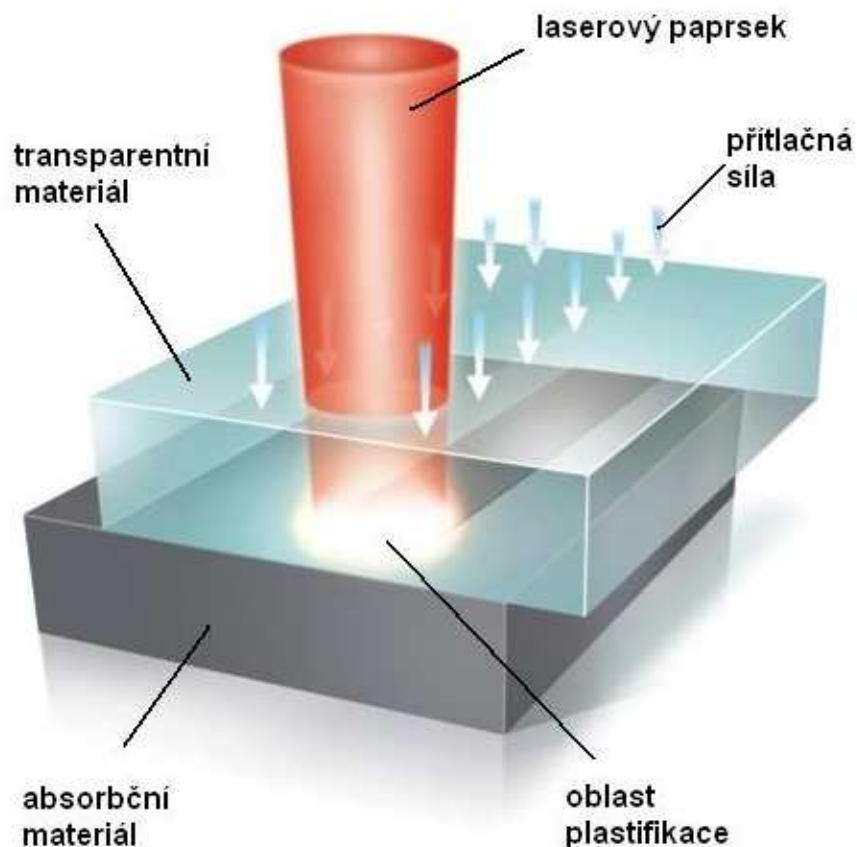


Obr. 14. Svařování na tupo bez šikmého zrcadla [20]

Metoda svařování na tupo za využití laseru není příliš používána, jelikož při procesu dochází k vytlačení velkého množství taveniny na povrch. [20]

### 2.2.2 Propustné svařování (Transmission Welding)

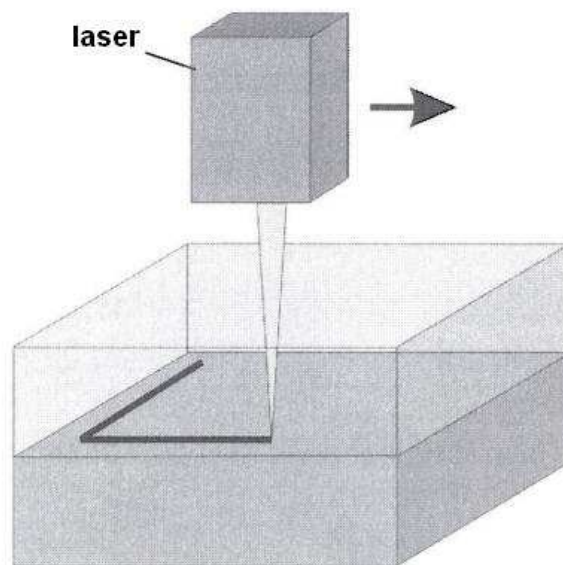
Transmisivním (propustným) svařováním mohou být spojovány termoplasty s rozdílnými absorpčními vlastnostmi. Obě spojované součásti jsou před svařením přivedeny do kontaktu, laserový paprsek pronikne pro něj transparentní spojovanou součástí a v absorpční součásti je přeměněn v teplo (Obr. 15.). Vedením tepla se transparentní součást rovněž ohřeje a plastifikuje se tak, že dojde ke spojení. [25] Teplo takhle vznikající bude tepelnou vodivostí transportováno, jak do hlubších vrstev absorpční spojované součásti, tak do součásti pro laserový paprsek transparentní. Podle druhu zařízení musí být použit buď na začátku nebo nejpozději ke konci svařování přítlačný tlak v celé spojované oblasti. Absorpce dojde ke zvýšení teploty ve spojované oblasti. Vznikající tavenina zlepšuje tepelný kontakt mezi spojovanými částmi a ovlivňuje objemovou roztažností vnitřní spojovací tlak. [26]



Obr. 15. Princip transmisivního svařování

### 2.2.2.1 Obrysové svařování (*Contour Welding*)

Princip obrysového (konturového) svařování je založen na kopírování svařovací kontury laserovým paprskem (Obr. 16.). Vedení paprsku se uskutečňuje prostřednictvím optického vlákna mezi laserovým generátorem a optikou laseru. Pracovní rychlost je u této technologie v závislosti na dostupném výkonu, protože oba parametry, výkon i rychlost skenování, podstatně určují množství dodané energie do spojované oblasti. Bezpodmínečně nutný předpoklad pro použití této metody je kontakt mezi oběma spojovanými díly během svařování, protože transparentní část je odtavována pouze vedením tepla. [25]



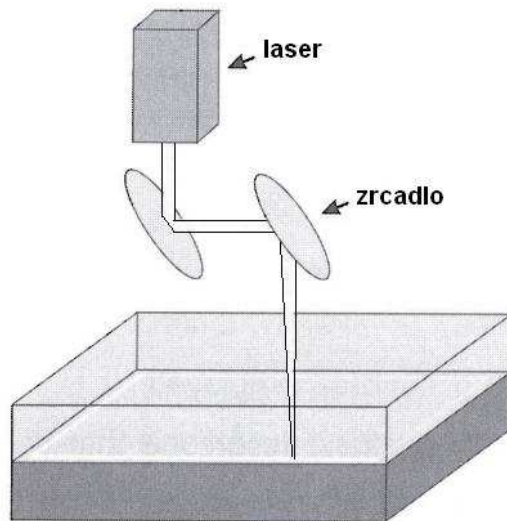
Obr. 16. Obrysové (konturové) svařování [20]

Výhoda obrysového svařování je v tom, že při použití 6-ti osého robota se sklápěcími rameny může být laserovým svazkem svařena téměř libovolná 3D kontura a i části na špatně dostupných místech. Principiálně může být obrysové svařování použito i k opravnému svařování nebo k sešívání před pozdějším svařováním. [26]

### 2.2.2.2 Kvazi-simultánní svařování (*Quasi-Simultaneous Welding*)

U kvazi-simultánního svařování je laserový svazek v optice veden pomocí skenovacích zrcadel vysokou pracovní rychlostí, např.  $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , podél svařované kontury (Obr. 17.). Díky vysoké pracovní rychlosti může být spojovaná plocha objeta např. 40x za sekundu, čímž celková spojovaná plocha může být bodovým zdrojem energie laserového svazku stejnoměrně ohřána a plastifikována. Jelikož i zde jsou obě spojované části během procesu svařování k sobě přitlačeny, mohou být přesahy součástí odtaveny a vtlačeny do

zesílení svaru. Díky využití (ve srovnání s cenově výhodnějším systémem robotů) skenovacích zrcadel mohou být svařeny geometrie do 200 x 200 mm s libovolnými rádiusy. Ke svařování větších rozměrů se používá více skenovacích systémů. Je také možné svařování 3D kontur, aniž by se upustilo od vysoké svařovací rychlosti  $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Odpovídající svařovací stroje mají využití v sériové výrobě. [26]



Obr. 17. Kvazi-simultánní svařování [20]

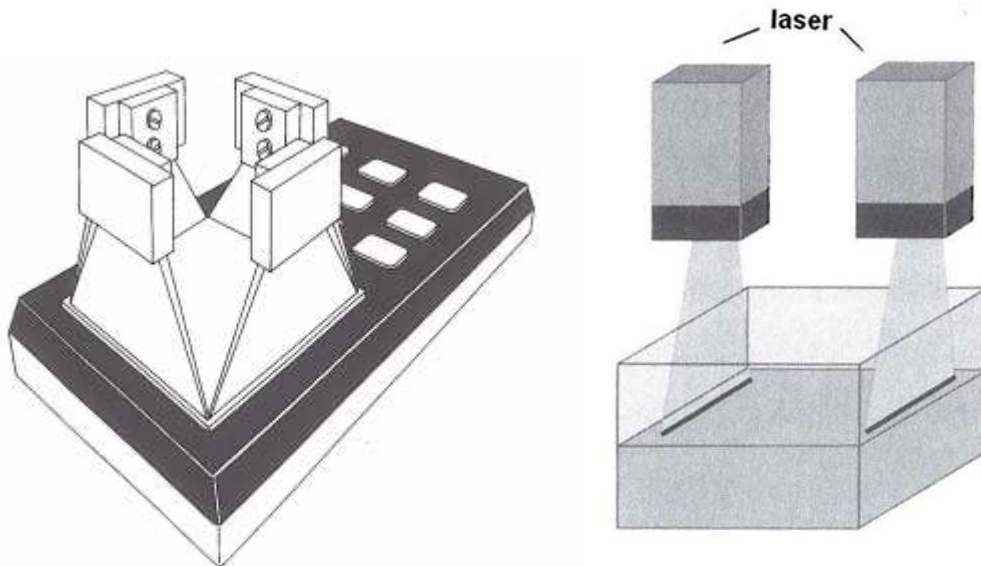
Kvazi-simultánní svařování nabízí další výhody v malém výskytu počtu možných chyb a vyšší flexibilitu, díky možnosti vytváření téměř jakýchkoliv i po sobě následujících rozdílných kontur. [26]

### 2.2.2.3 Simultánní svařování s více diodami (*Simultaneous Welding*)

U laserového simultánního svařování je, stejně jako u kvazi-simultánního svařování, celá svařovaná plocha stejnoměrně ohřívána. Na rozdíl od předešlého je u simultánního svařování ozářena celá plocha najednou (Obr. 18.). Aby byly spojované části přímkově ozářeny, používá se k dosažení kontury svaru vhodné uspořádání laserových diod. Není zapotřebí žádný relativní pohyb mezi laserem a spojovanými částmi.

S touto metodou je možné svařování s nebo bez spojovací cesty. Je-li cesta odtavování potřebná, např. pro vyrovnání tolerancí, musí být celá kontaktní plocha roztavena. Neroztavené oblasti jinak působí jako rozpěrky a zabraňují tak toku taveniny. U každého svařování je po stanovení dráhy odtavení možná kontrola. [26]

U laserového simultánního svařování je nutno vzít na vědomí, že (jako u kvazi-simultánního svařování) následkem roztavení vzniká více nebo méně velká natavenina, kterou lze správnou volbou geometrie skrýt. [20]

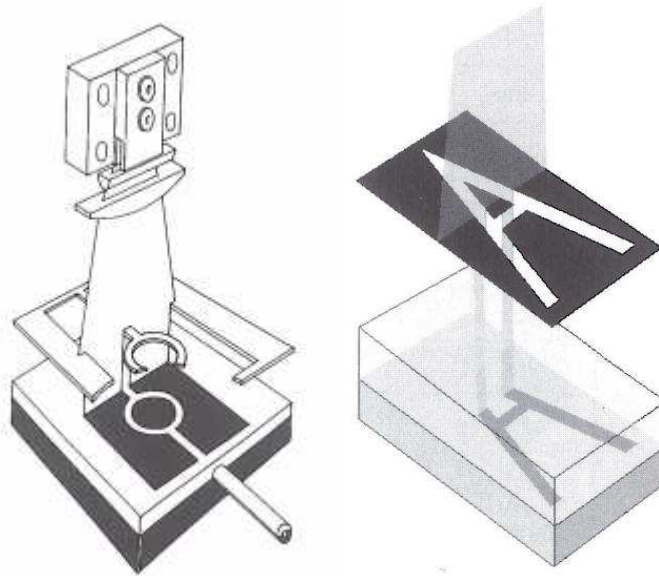


Obr. 18. Simultánní svařování [20, 26]

Svařovací čas se řídí jako u kvazi-simultánního svařování, podle dostupného výkonu laseru na jednotku délky svaru. S dostačujícím „traťovým“ výkonem umožňuje simultánní svařování, bez ohledu na délku svaru, svařovací časy okolo 1s. Je tedy velmi rychlý a hospodárný. Kvůli pevnému uspořádání diodového laseru je vhodný především v sériové výrobě. Průřez laserové diody je pravoúhlý s otvorem pro světelný výstup o cca 0,6 x 10 mm. Proto mohou být svařeny jen přímé kontury bez rádiusů. Tloušťku čáry lze ovlivnit mikrooptikou nálitku a vzdáleností mezi spojovanými částmi. [26]

#### 2.2.2.4 Svařování s maskou (*Mask Welding*)

Maskování je rovněž laserové svařování transmisivní, u kterého je přímkový laserový paprsek ke spojovaným částem přiváděn z vysokovýkonného diodového laseru. Oblasti, které nejsou určeny ke svaření, jsou odstíněny maskou (Obr. 19).



Obr. 19. Svařování s maskou [20, 26]

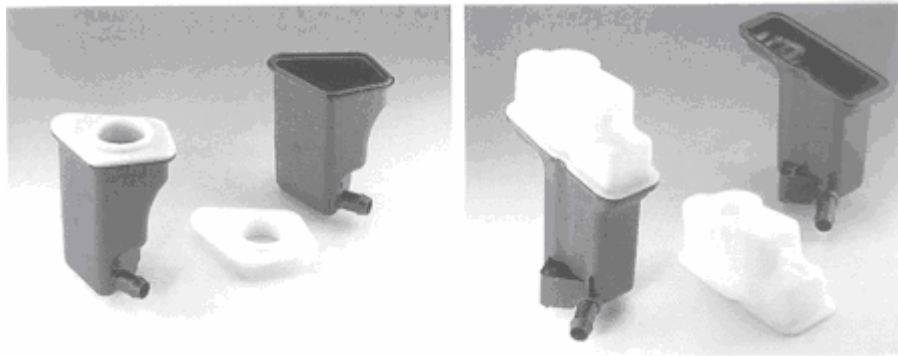
Na součásti lze v pracovní operaci vyrobít přímé i zakřivené čáry různých tlouštěk, jakož i svařovat plošné části. Lze docílit šířky svaru i menší než 100  $\mu\text{m}$ . Rychlosti svařování nelze přímo srovnávat s jinými laserovými svařovacími technologiemi, protože maskování se používá především pro plošné svařování. Pracovní časy jsou ale (cca 0,25 s na  $\text{cm}^2$  ozářené plochy) poměrně nízké. [26]

#### 2.2.2.5 Příklady použití transmisivního svařování

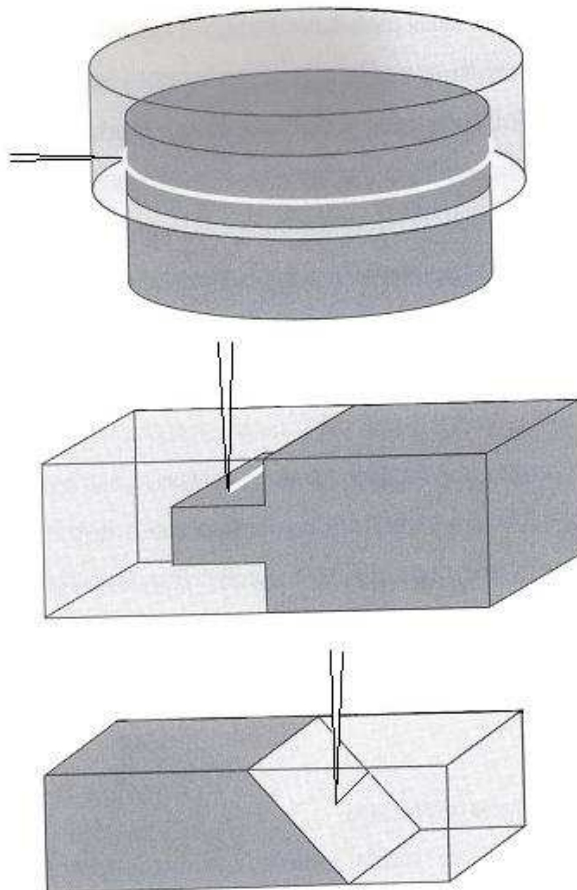
Metodou laserového transmisivního svařování mohou být svařeny kombinace z prostupných a absorpčních termoplastů, jako např. zadní vícebarevné světlometry automobilů z PMMA/ABS, automobilové armatury z PC/ABS, tělesa čerpadel, nárazníky nebo elektronické řídicí systémy. Kvůli energetickým vstupům bez chvění se používá přednostně pro tělesa elektroniky s vysoce citlivými komponenty.

Další typický příklad použití představují olejové nádržky automobilů. Tyto nádržky jsou vyráběny z PA66 s 30% skelných vláken. Dosud jedinou možností přivaření víčka k olejové nádržce představuje vibrační svařování. Přitom ale vždy vznikají ořepy, které po svařování zůstávají v nádržce a znečišťují řídicí olej. [26]





Obr. 20. Laserem svařené olejové nádržky automobilů [26]



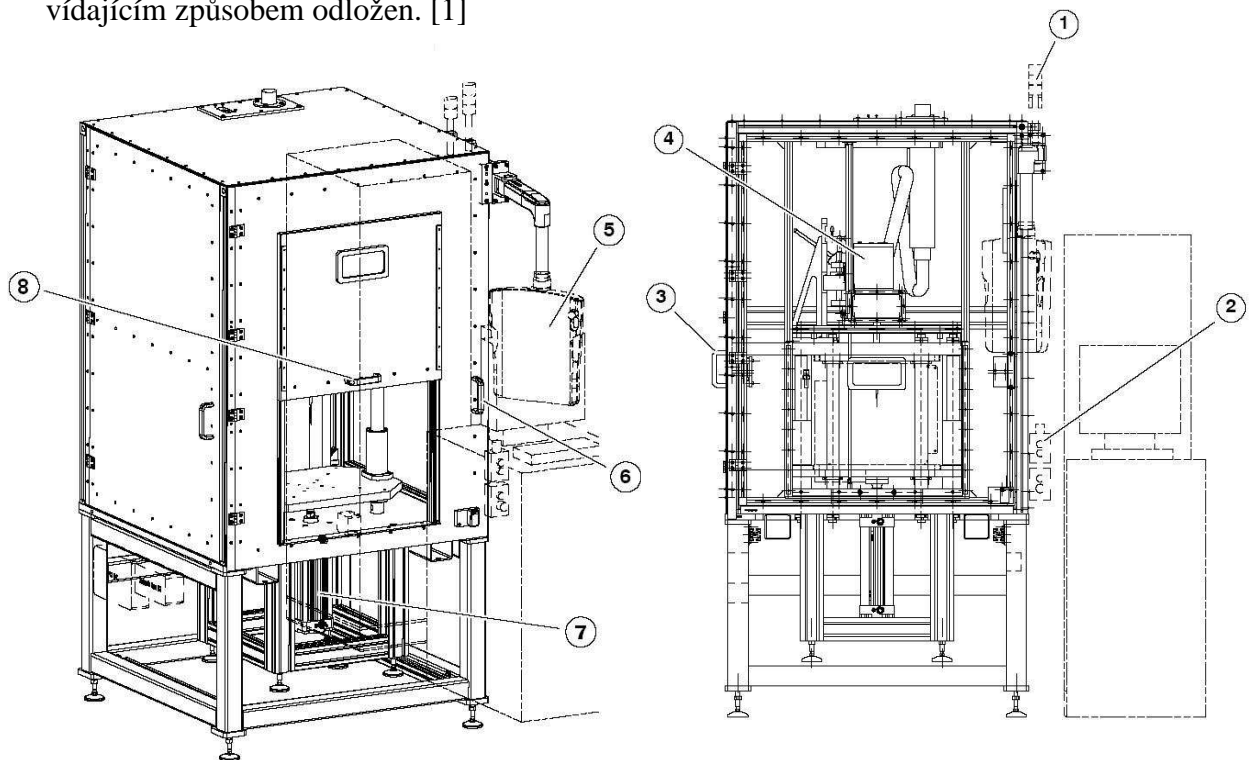
Obr. 21. Možné svařovací geometrie použité při transmisivním svařování [20]

### 3 POPIS LASEROVÉ SVÁŘEČKY

Vzorové svařovací zařízení LDS pracuje na principu diodového laseru a spadá do kategorie transmisivního (propustného) svařování, konkrétně metoda obrysového (konturového) svařování. Tato svařovací stanice se skládá z několika hlavních částí:

1. generátor Laserline LDM 400-400
2. svařovací komora se skenovací optikou a ovládacím panelem VPP 21
3. PC s ovládacím softwarem SAMLight (SCAPS)

Princip tohoto svařovacího stroje je takový, že se příslušný díl nasadí do přípravku, zavřou se ochranné dveře a po spuštění procesu se díl zvedne do svařovací polohy, kde je pomocí laseru svařen s příslušným víčkem. Poté je svařený díl vyjmut z přípravku a odpovídajícím způsobem odložen. [1]



Obr. 22. Schéma stroje pro laserové svařování [1]

Popis schématu (Obr. 22.):

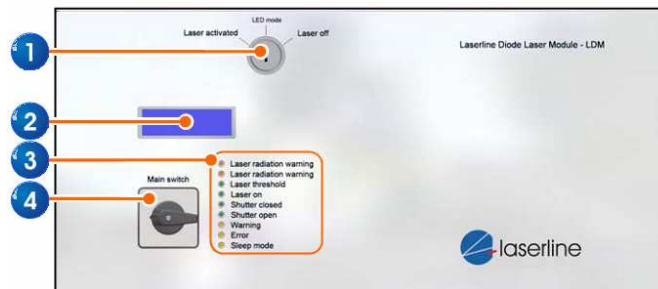
**1** - kontrolní světla stroje, **2** - kontrolky údajů OK a NOK, **3** - boční ochranné dveře laserové komory, **4** - optika skeneru laseru, **5** - ovládací panel VPP 21, **6** - ochranné dveře laserové komory na přední straně, **7** - pneumatický zvedací válec, **8** - menší ochranné dveře k nasazení a vyjmutí příslušného dílu (pro snadný přístup)



### 3.1 Generátor laserového paprsku LDM

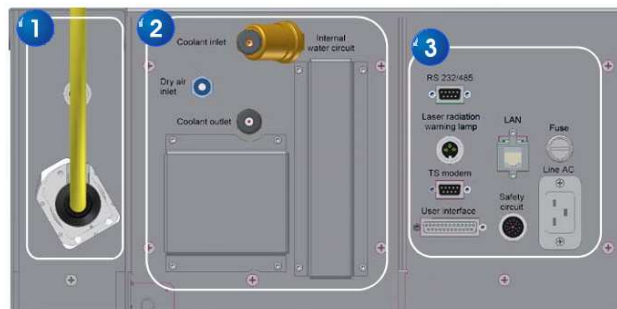
Jedná se o diodový generátor laserového paprsku s těmito parametry:

- výkon 400W
- vlnová délka  $940 \pm 10$  nm



Obr. 23. Přední strana generátoru [1]

Generátor se spouští hlavním vypínačem (4) na přední straně, která je zobrazena na obrázku (Obr. 23.). Samotný laser se aktivuje klíčem ovládaným vypínačem (1) se třemi různými polohami (Laser activated – LED mode – Laser off). Informace, varování a stav generátoru zajišťuje LC display (2) a LED panel (3).



Obr. 24. Zadní strana generátoru [1]

Na zadní straně generátoru (Obr. 24.) se nachází tři připojovací oblasti. V první (1) se nachází konektor na optický kabel, kterým je veden vygenerovaný laserový svazek do optiky stroje. V druhé oblasti (2) je místo pro doplnění demineralizované vody do chladicí jednotky a její odvětrání. Třetí část (3) je oblastí pro datové rozhraní generátoru.

### 3.2 Ovládací panel VPP 21

*Automatický režim* – v tomto druhu provozu se uskutečňuje cyklickým procesem řízený postup; může být spuštěn jen ze základního postavení stroje

*Manuální režim* – v tomto pracovním režimu mohou být spuštěny všechny pohyby a funkce stroje podstatné pro seřizování a údržbu jednotlivě nebo v dílčích chodech ovládání tlačítkem [1]



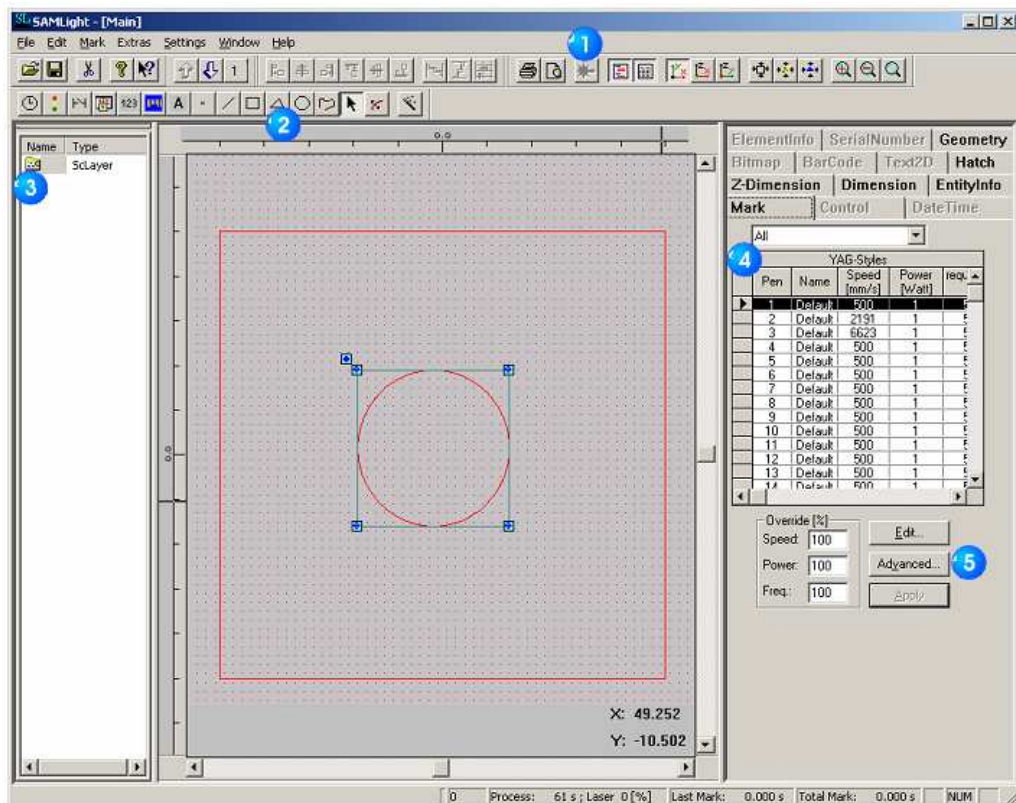
Obr. 25. Ovládací panel VPP 21 [1]

#### Popis panelu (Obr. 25.):

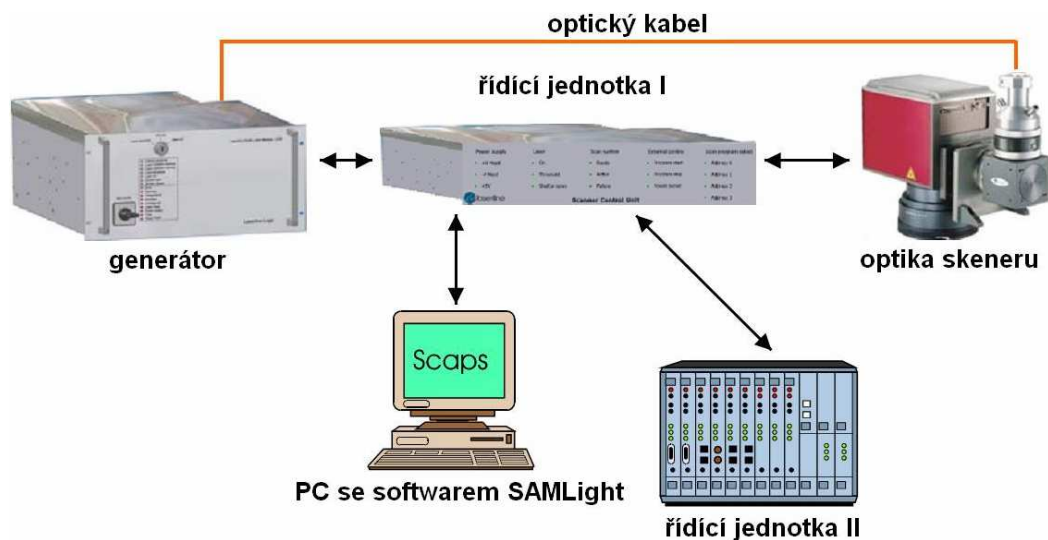
1 - central stop, 2 - zapnutí řízení, 3 - vypnutí řízení, 4 - kurzorové tlačítka, 5 - tlačítko výchozí polohy manuální funkce, 6 - tlačítko pracovní polohy manuální funkce, 7 - funkční tlačítka F1 až F8, 8 - aktivace laseru, 9 - deaktivace laseru, 10 - přepnutí okna, 11 ÷ 13 - volné tlačítka, 14 - manuální režim, 15 - zvláštní režim, 16 - automatický režim, 17 - režim krokování, 18 ÷ 23 - volné tlačítka, 24 - konec procesu (automatický režim), 25 - začátek procesu (automatický režim), 26 - potvrzení hlášení, 27 - tlačítko pro krok, 28 - klávesnice pro pohyb mezi stránkami, 29 - ovládání kurzorem (myší), 30 - číselná klávesnice

### 3.3 Ovládací software SAMLight (SCAPS)

Pomocí tohoto softwaru, který je nainstalován v přidruženém PC, lze vytvářet a editovat svařovací konturu. Z obrázku (Obr. 26.) je vidět, že software je založen na principu klasického 2D programu a je složen z obvyklých prvků: start menu (1), panel kreslení (2), projektové okno (3), nastavení hladin (4), editace rychlosti paprsku a jiných parametrů (5)



Obr. 26. Software pro tvorbu svařovací kontury [1]



Obr. 27. Diagram propojení laserové stanice LDS [1]

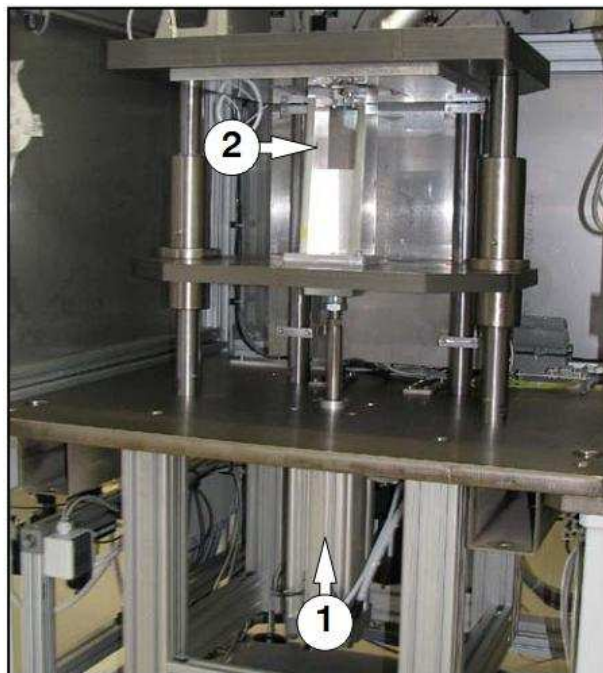
### 3.4 Popis postupu svařování

Po usazení svařovaného dílu do přípravku se uzavřou přední malé ochranné dveře, čímž dojde k sepnutí bezpečnostního spínače a tím je stroj připraven na samotné spuštění. Stroj je v automatickém režimu a všechny svařovací parametry má nastaveny. Automatický proces svařování se spouští spínačem (Obr. 28.). [1]



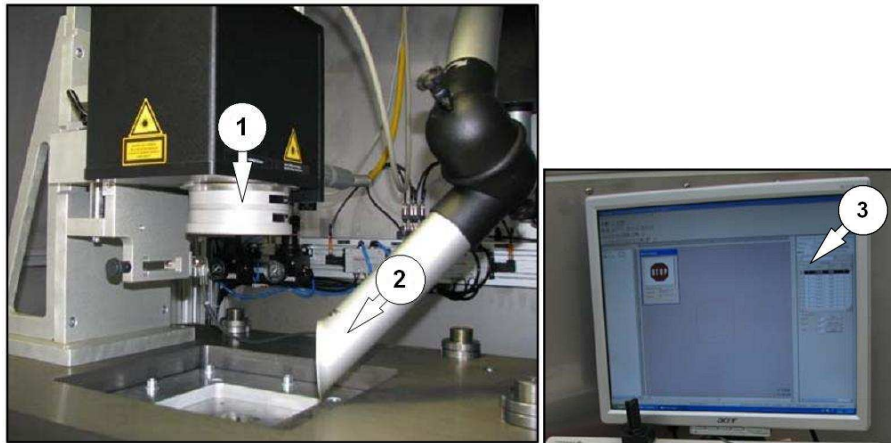
Obr. 28. Spínač automatického svařování

Poté se díl upnutý v přípravku (2) zvedne do svařovací polohy. Zdvih je zajištěn pneumatickým válcem (1), který je koncipován na max. 4 kN. (Obr. 29.)



Obr. 29. Zvedání přípravku do pracovní polohy pomocí pneumatického válce

Následuje samotný proces svařování. Generátor pošle přes optický kabel do skenovací optiky (1) laserový paprsek a ten objede předem určenou dráhu (okraj víčka). Tím se absorpční (spodní díl) materiál zahřeje, roztaví a spojí s materiálem transparentním (víčko). Pneumatický válec současně přitlačí spodní díl k víčku a zaručí tak pevné spojení (svaření). Odsávací zařízení (2) během celého procesu svařování odsává vzniklé výpary a nečistoty. Celý průběh je sledován a zaznamenáván v podobě grafu na PC (3) (Obr. 30.). [1]



Obr. 30. Skenovací optika a PC

Po uplynutí odpovídající doby klidu sjede pneumatický válec s přípravkem a svařeným dílem do základní (výchozí) pozice, otevřou se ochranné dveře a vyjme se hotový díl.



Obr. 31. Svařovací stanice LDS

Technické údaje laserové svářečky jsou v příloze P II a graf průběhu svařování v P XXIII.



## 4 BEZPEČNOST PRÁCE S LASEROVÝMI ZAŘÍZENÍMI

Při práci s laserovými zařízeními je důležité dodržovat předepsané normy a nařízení a to jak výrobců laserových zařízení, tak u všeobecně platných směrnic pro laserové svařování. Je nutné se vyvarovat přímého zásahu laserovým světlem, a to i při malém množství energie. U pracovníků pracujících s laserovým zařízením je nejvíce ohroženým lidským orgánem oko vystavené kumulované energii záření. Může dojít k poškození rohovky, sítnice a cévní soustavy oka, v důsledku čehož mohou vzniknout krevní podlitiny, příp. trombóza. Pokud laser pracuje na určitých vlnových délkách, na které je oko schopno se soustředit a které mohou být dobře soustředěny sítnicí a rohovkou oka, vysoká koherence a malý rozptyl laserového paprsku může u některých typů laserů způsobit, že je přijímaný paprsek soustředěn pouze do extrémně malého bodu na sítnici. To vede k bodovému přehřátí sítnice a k trvalému poškození zraku.

Dalším ohroženým místem je pokožka, zvláště rukou. Stupeň poškození závisí na faktorech jako délka světelného pulzu, vlnová délka záření, velikost energie, fokusace v místě dopadu paprsku, ale také na pigmentu v pokožce, případně uložení nervových vláken.. Na ochranu zraku se používají brýle (organické sklo), na kterých je nanášena odrazivá vrstva, maximálně nepropustná pro vlnovou délku použitého vlnového záření. Na ochranu rukou se používají ochranné rukavice, krémy, apod. Laserové zařízení musí být umístěno v samostatných prostorách a je nutné zamezit přístup nepovolaným osobám. Stěny mají mít drsný, tmavý povrch, aby maximálně pohlcovaly dopadající laserové záření. V dnešní době se však stále častěji využívají uzavřené pracovní boxy pro laserové zařízení, kdy nehrozí pro pracovníka kontakt se zářením. Pozorování svařovaného předmětu je umožněno přes ochranné sklo nebo vhodnou snímací kamerou. Zařízení musí být zabezpečeno proti samovolnému spuštění. Je nutné dodržovat příslušné bezpečnostní předpisy pro práci s elektrickým zařízením. Pracovníci mají pravidelně chodit na lékařskou prohlídku a to zejména na vyšetření očního pozadí. [27]

### 4.1 Rozdělení laserů o bezpečnostních tříd

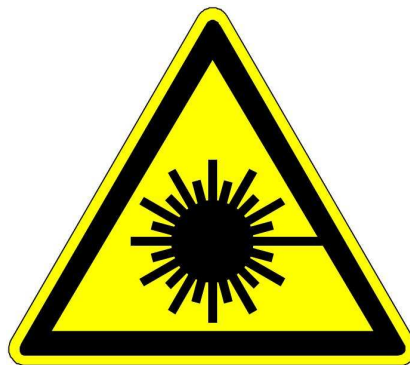
Třída 1: Laserové světlo nepředstavuje za normálního provozu žádné nebezpečí. Je možný trvalý pohled do svazku laserových paprsků. Pokud při pozorování optickými přístroji (např. dalekohled) může dojít k ohrožení, je příslušný laser zařazen do třídy 1M.

Třída 2: Kontinuální a viditelné záření v rozsahu délek (400-700 nm), možný přímý pohled do zdroje, kdy oko ochrání mrkací reflex. Pokud při pozorování optickými přístroji může dojít k ohrožení, je příslušný laser zařazen do třídy 2M.

Třída 3R: Laser vyzařuje v rozsahu vlnových délek  $302,5 \cdot 10^{-6}$  nm. Přímý pohled do paprsku může být nebezpečný. Poškození oka při pohledu do zdroje pomocí optické soustavy. Riziko je však menší než u laserů třídy 3B.

Třída 3B: Znamená, že přímý nebo zrcadlený paprsek je nebezpečný. Pozorování difúzních reflexí obvykle není nebezpečné. Je zde nebezpečí poškození oka, proto nutno používat ochranné pomůcky (i při pozorování odrazu).

Třída 4: Laserové záření je velice nebezpečné pro oči a pokožku. Schopné způsobit popáleniny, řezné nebo tržné rány, případně způsobit požár. Nezbytně nutným předpokladem provozu laserových strojů třídy 4 je přijetí vhodných bezpečnostních opatření, především pak zajištění dostatečné ochrany zraku speciálními ochrannými brýlemi proti laserovému paprsku. [27] Do této třídy patří také svařovací zařízení LDS.



Obr. 32. Symbol třídy laseru [1]

## 4.2 Ekologické hledisko laserového svařování

Moderní průmyslové zařízení musí splňovat mnoho bezpečnostních a ekologických kritérií. Lasery obecně přispívají ke zlepšení ekologických podmínek provozu, na druhou stranu je ale laserové záření v mnoha případech značně nebezpečné lidskému zdraví. Svařování laserem nepředstavuje nadměrnou ekologickou zátěž na životní prostředí. Je nutné dbát bezpečnosti při použití a skladování ochranných plynů, dodržení odsávání a dostatečnou filtraci zplodin při svařování. Dodržovat předepsané způsoby zacházení s oleji a mazivy stroje. [27]

## 5 PŘEHLED POUŽITÝCH MATERIÁLŮ

Termoplasty nalézají široké uplatnění při výrobě automobilů, a to díky svým materiálovým vlastnostem, které jednak dokážou splnit požadavky konstrukce, a navíc umožňují dosáhnout významných úspor jak při výrobě, tak i při použití výrobků. [3]

### 5.1 POM – polyoxymethylen

Polyoxymethylen (též nazývaný polyacetál, polyformaldehyd, polytrioxan) byl uveden na trh v USA roku 1958. Obecně se jako polyacetály označují homopolymery i kopolymery aldehydů. Z této skupiny jsou technicky důležité jen polymery a kopolymery formaldehydu zvané proto též polyoxymethyleny. [3]

#### Vlastnosti:

Lineární, vysoce krystalický, má nejvyšší odolnost vůči oděru (vedle PA), do 70 °C se nerozpouští v žádném rozpouštědle, nad 70 °C se rozpouští v chlorfenolech, ketonech a halogenuhlovodících. Dále má dobrou odolnost proti vytváření skvrn, dlouhodobé působení ultrafialového záření způsobuje zkřídovatění povrchu a zkřehnutí, je houževnatý s vysokým modulem a pevností v tahu i ohybu. Dobrá je i rozměrová stabilita. [2]

#### Zpracování a použití:

Převážně se zpracovává vstřikováním, vytlačováním, vyfukováním při 200 - 210 °C. Dá se i svařovat a lze jej, také pokovovat, lakovat a potiskovat. Jako konstrukční plast se užívá na výrobu ozubených kol, různých ložisek, tlakových nádob, čerpadel, součástí automobilů, trubek [7].

### 5.2 PA 66 – polyamid 66

Je to polyamid z hexamethyldiaminu a kyseliny adipové.

#### Vlastnosti:

Polyamid 66 má výhodu ve vysokém bodu tání a v poněkud vyšší pevnosti a o něco nižší navlhavosti než polyamid 6. Tím lze u něj docílit nižší tažnosti, což má význam především při výrobě pneumatikových kordů. Neobsahuje volný polymer, tudíž odpadá jeho odstraňování. [2]



Zpracování a použití:

Lze jej zpracovávat technologiemi, u kterých není na závalu nízká viskozita, jako je vstřikování, odstředivé lití, ale také třískovým obráběním bloků vyrobených odléváním. Důležité je věnovat zvýšenou pozornost chlazení, protože při krystalizaci probíhá značné smrštění a může tak vnikat značné pnutí. Při vytlačování vznikají určité obtíže a válcováním jej nelze zpracovávat vůbec. Ovšem zpracovává se především na vlákna, vytlačováním taveniny přes kruhovou trysku s daným počtem otvorů. Vytvořené vlákno se pak dluží a praním se zbavuje monomeru. Z kaprolaktamu se pak vyrábějí hedvábná vlákna, stříž, kordy pneumatik, kobercová vlákna, vlasce, síta.

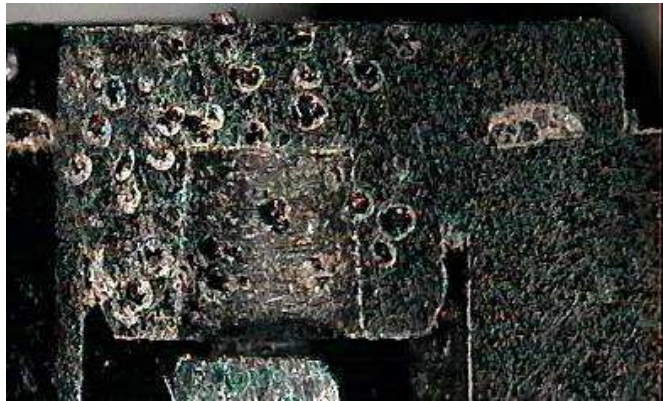
Polyamid 66 se používá především pro výrobu textilních vláken, vlasců, strun ale také fólií. Dále je používán jako konstrukční plast pro výrobu ložisek, ozubených kol, cívek, vaček a ovládacích elementů. [7]

## 6 POPIS ZKUŠEBNÍCH METOD

K posouzení kvality sváru z různých hledisek používáme několik typů zkoušek. Mezi základní zkoušky patří zkoušky těsnosti a destrukční tlaková zkouška – Berstdruck.

### 6.1 Zkoušky těsnosti

Zkoušky těsnosti odhalují těsnost nebo netěsnost daného vzorku. Všeobecně se jedná o vlastnost materiálu propouštět jiný materiál (médium) mikropórami, trhlinami, mikrotrhlinami nebo permeací. Z toho vyplývá, že absolutně těsný díl neexistuje, viz. obrázek (Obr. 33.) [1]



Obr. 33. Permeace mikropóra v materiálu [1]

Únik média přes daný díl je tedy možné pozorovat vždy a je proto nutné určit, zda tento únik ohrožuje nebo neohrožuje funkčnost nebo ekologičnost dílu. Požadavek na těsnost výrobku je závislý na provozních podmínkách vyráběného dílu. Zkušební metoda je stanovena na základě požadavků zákazníka v závislosti na velikosti zkušební tlaku a povolené netěsnosti.

Měření těsnosti je měřením množství média, které se dostane přes materiál za daný čas. Většina metod přímo neodhaluje místo netěsnosti ve vzorku, měří pouze míru netěsnosti. Metody dělíme dle použitého média:

- ✓ zkouška těsnosti heliem
- ✓ zkoušky těsnosti suchým vzduchem
  - bubble test (bublinková metoda)
  - metoda měření poklesu tlaku ve vzorku [1]

### 6.1.1 Zkouška těsnosti heliem

Zkouška těsnosti heliem se provádí na vzorku, který se nachází ve vakuové komoře (Obr. 34.). Vzorek i komora se současně evakuují. Při evakuaci se neustále kontroluje tlakový rozdíl  $\Delta p$  mezi komorou a vzorkem, aby nedošlo ke kolapsu vzorku. Po dosažení příslušného podtlaku ve vzorku i v komoře (tyto podtlaky se obvykle liší) se vzorek naplní heliem o definované koncentraci a tlaku. Unikající helium se detekuje spektrometrem, který vyhodnotí míru netěsnosti vzorku. [1]

Hélium se používá z těchto důvodů:

- nízká koncentrace v atmosférickém vzduchu ( $\approx 5\text{ppm}$ )
- má jednu z nejmenších molekul, což mu umožňuje odhalit velice malou vadu ve výrobku
- lehko detekovatelný spektrometrem
- rychle se šíří v atmosférickém tlaku a ještě lépe ve vakuu
- nepodléhá chemickým reakcím a nepřilíná k povrchům
- není jedovatý [1]

Metody detekce netěsnosti heliem

Héliový hledač netěsnosti detekuje netěsnosti měřením testovacího plynu, který buď prochází dovnitř anebo ven z testovacího objektu. Testovací plyn proniká netěsnostmi v případě, že je venku a uvnitř testovacího objektu rozdíl tlaků. Toho se dosáhne vytvořením podtlaku (vakua) anebo přetlaku uvnitř testovacího objektu. Systém může pracovat v dvou modech:

1. Vakuová metoda – ve vakuovém módu je testovaný objekt evakuovaný a napuštěný heliem. V komoře je vakuum. Testovací plyn proniká netěsnostmi dovnitř objektu a vlivem čerpání se dostane až do vlastního detektoru. Pro kvantifikaci míry netěsnosti je potřebné minimalizovat heliové pozadí v systému. Je potřeba dosáhnout ustáleného rovnovážného stavu.
2. Detekovací metoda – v ručním módu je detekovaný plyn, unikající z objektu přes netěsnosti do atmosféry. Testovací objekt musí vydržet natlakování na testovací tlak. Při práci s detekovací sondou je do sondy nasávaný konstantní proud plynu

z atmosféry. Přirozený obsah hélia ve vzduchu je cca 5ppm. Při detekci netěsnosti touto metodou je sonda použitá v místech, kde se očekává netěsnost testovaného objektu, který je natlakovaný héliem. Zvýšená hodnota signálu ukazuje vyšší koncentraci hélia a tudíž i místo netěsnosti. Detekční limit se zlepšuje při rostoucím tlaku a koncentraci hélia v objektu. Citlivost této metody a její kvantifikace je méně příznivá než při vakuové metodě. [1]



*Obr. 34. Zařízení pro testování zkoušky těsnosti heliem [1]*

Kromě automobilového průmyslu se testy těsnosti héliem využívají pro výrobu LCD obrazovek, elektroniky, medicínských produktů, v leteckém průmyslu aj.

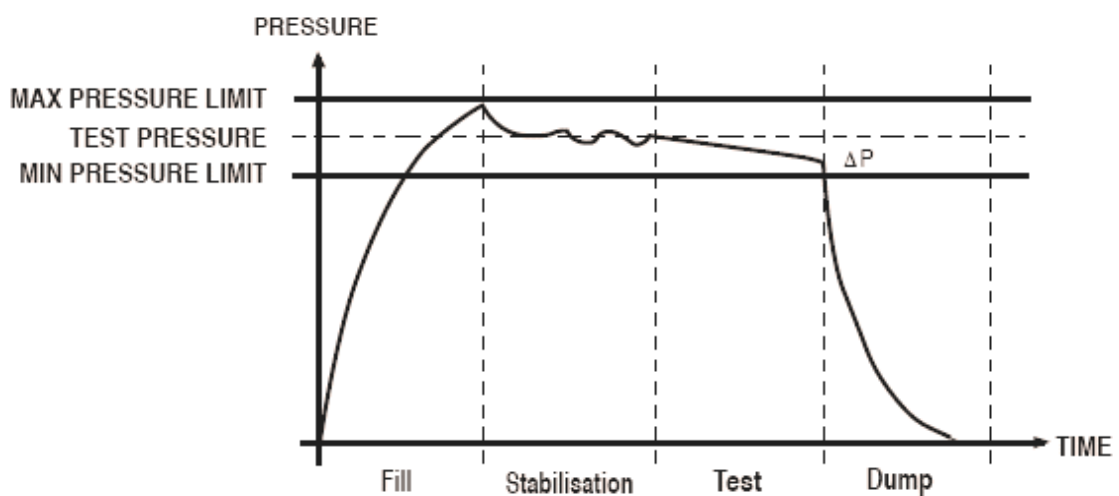
### **6.1.2 Zkoušky těsnosti suchým vzduchem**

- a) bubble test (bublínková metoda) - je jednou z mála metod, která odhalí přesné místo netěsnosti; vzorek umístí do vody, natlakuje se na příslušný tlak a vizuálně se pozoruje místo, ze kterého unikají bublinky; většinou se používá obyčejná pitná nebo destilovaná voda
- b) metoda měření poklesu tlaku ve vzorku - měří změna tlaku ve vzorku vzhledem ke změně tlaku v referenčním objemu; používají se snímače tlaku, schopné zachytit i velmi malou změnu tlaku [1]

Test se obvykle skládá z následujících kroků:

- 1) založení vzorku do přípravku
- 2) natlakování vzorku a referenčního objemu na příslušný tlak (čas plnění)
- 3) oddělení referenčního objemu od vzorku
- 4) stabilizace systému (čas stabilizace)
- 5) měření poklesu tlaku po dobu testu (čas testu)

Na tomto principu pracují například zařízení ATEQ (Obr. 36.). Přístroj obsahuje dva stejné objemy (T1 a T2), kde se mezi jednotlivými měřeními neustále udržuje měřicí tlak. Po spuštění cyklu se objemy T1 a T2 vypustí do objemu, který se má ověřit ( $V_T$ -testovaný objem) a do referenčního objemu ( $V_R$ -referenční objem). Po krátké době ustálení bude nové měření tlakového rozdílu úměrné rozdílu mezi objemy  $V_T$  a  $V_R$ . Průběh měření vysvětluje následující graf (Obr. 35.):



Obr. 35. Princip měření přístroje ATEQ [1]

V první části dochází k plnění (Fill time). Je to čas, za který se daný objem musí naplnit v celém objemu médiem (vzduchem) o definovaném tlaku. Při zvyšování tlaku uvnitř uzavřeného objemu přepouštěním plynu ze zásobníku s vyšším tlakem koná plyn ze zásobníku objemovou práci. Uvnitř objemu se tak zvyšuje míra vnitřní energie a to se projeví růstem teploty, neboť vykonaná práce je během plnění disipována. Oběma výše zmíněnými efekty dochází při první fázi plnění k určité teplotní změně a z tohoto důvodu je nezbytná následující fáze stabilizace systému, během níž se tlakové a teplotní rozdíly ustálí.

Po naplnění dochází ke stabilizaci (Stabilization time). Je to čas potřebný ke stabilizaci média ve vzorku a vzorku samotného (někdy dochází k jevu, že vzorek „pulzuje“). Čas stabilizace výrazně závisí na velikosti objemu vzorku a přípravku, tzn. čím větší objem, tím delší čas stabilizace. Po dobu stabilizace se vzorek ani přípravek vzduchem už neplní. Pokud je ve vzorku velká netěsnost, může po dobu stabilizace poklesnout tlak natolik, že klesne pod horní a dolní toleranci a test se nepovede.

Když je systém stabilizovaný, dochází k testu (Test time). Je to čas, během kterého proběhne samotný test.

Dumping time je čas vypuštění (zpravidla bývá co nejkratší). Tato funkce je důležitá hlavně při testování při vysokých tlacích. [1]



Obr. 36. Měřící zařízení ATEQ [1]

## 6.2 Tlaková destrukční zkouška - Berstdruck

Jednoučelové tlakovací zařízení k provádění statických tlakových zkoušek plastových výlisků s vnitřní dutinou. Zkouška je destrukční a probíhá až do roztržení součásti. Zkušební kapalina je voda. Hydrogenerátor je axiální pístové čerpadlo se třemi písty poháněné elektromotorem o výkonu 3,2kW regulovaným frekvenčním měničem. Za čerpadlem následuje pojistný ventil jistící obvod proti přetížení. Průběh tlaku vyrovnává akumulátor s pryžovým vakem o jmenovitém objemu 1l a maximálním provozním tlaku 350 bar plněný dusíkem na 20 bar. Za akumulátorem je připojen manometr pro sledování průběhu tlaku během zkoušky. Zkoušená součást umístěná v přípravku je připojena k tlakovým hadicím přes rychlospojky. Za součástí je solenoidový elektromagnetický ventil, který se uzavře po

odvzdušnění součásti ještě před začátkem tlakovací fáze. Za zkoušeným dílem použít elektromagnetický ventil tlak přes vřazenou trysku upravující průběh tlaku před náběhem funkce akumulátoru. Na paralelní větvi k součásti následuje uzavírací kohout pro nouzové upuštění tlaku z obvodu. Dále se obě větve spojují a obvod pokračuje do nádrže, ze které přes filtr hydrogenerátor odebírá kapalinu. Kapalina uniklá po destrukci dílu do pracovního prostoru teče do odkalovací nádrže a odtud přes síto a čisticí přepážku do druhé části nádrže. Výška hladiny kapaliny v nádrži se kontroluje na stavoznaku. Připojený PLC s mikroprocesorem ovládá funkci a časování jednotlivých viditelných prvků v obvodu. [18]

Na ovládacím panelu PLC lze nastavit:

- nárůst tlaku [bar/s]
- maximálně dosažitelný tlak [bar]
- čas plnění [s]
- čas prodlevy [s]
- defektní rozdíl tlaku, při kterém se zkouška přeručí [bar]
- minimální otáčky [%]
- konstantu citlivosti P

Tlačítka zapnutí zařízení, spuštění a ukončení zkoušky a tlačítko nouzového vypnutí jsou umístěna na přední části ovládací skříně. [18]

Hydraulické schéma je zobrazeno v příloze P III.

*Pozn.: Jednotka tlaku bar je v soustavě SI jednotkou odvozenou, ovšem v technické praxi se často používá, platí  $1\text{ bar} = 10^5\text{ Pa}$*

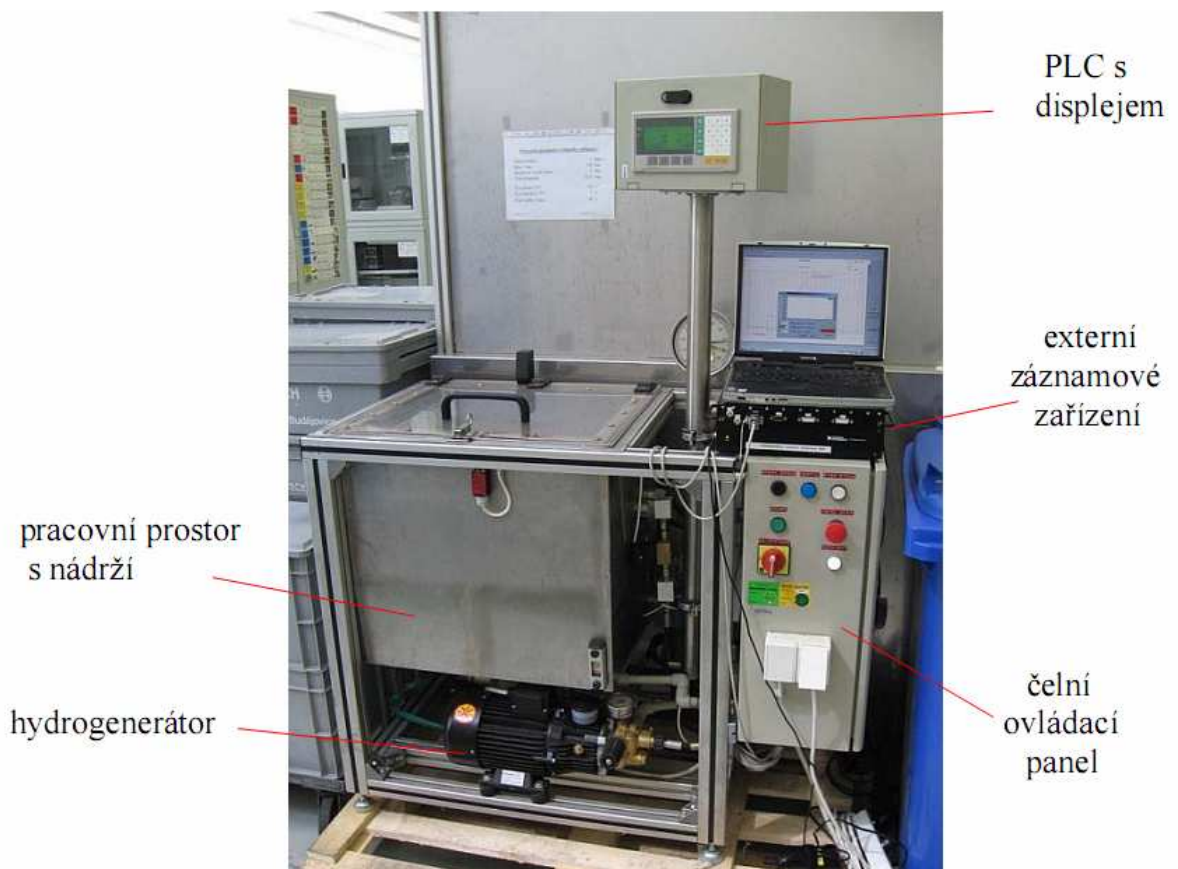
### Průběh zkoušky

Zkoušený díl se upne do přípravku, utěsní se všechny jeho vývody a připojí se na přívodní a odváděcí hadice rychlospojky. Pracovní prostor ve tvaru nerezové vany se zapojenou součástí je uzavřen víkem. Uzavřením víka se odjistí spínač a je možno spustit zařízení. Na ovládacím panelu PLC obsluha nastaví požadované parametry zkoušky. Je-li požadován grafický záznam průběhu zkoušky, je možno připojit univerzální modul pro



sběr dat, tzv. „Blackbox“, propojený s notebookem (Obr. 38.). V notebooku je nainstalován měřicí program a ovladače měřicí karty. V programu je možné grafické zobrazení snímaných dat i jejich uložení pro případné další zpracování (Obr. 39.). [18]

Vlastní zkouška sestává ze dvou částí. V plnicím cyklu při otevřeném elektromagnetickém ventilu nejprve dojde podle nastavených parametrů k naplnění součásti zkušební kapalinou a tím k odvzdušnění dílu. Během časové prodlevy dojde k poklesu tlaku a uzavření elektromagnetického ventilu. Následuje vlastní tlakovací fáze, při které dochází k nárůstu tlaku nastaveným gradientem. Při destrukci dílu dojde k rychlému poklesu tlaku. Jakmile tlak poklesne o nastavenou hodnotu, dojde k přerušení zkoušky. Maximální dosažený tlak se zobrazí na displeji ovládacího panelu, případně je možné jej odečíst ze zaznamenaného grafu v měřicím programu. Kryt se může otevřít a roztržená součást se vyjme z přípravku. [18]



Obr. 37. Zkušební zařízení v RBCB/TEF3 [18]





Obr. 38. Záznamové zařízení Blackbox [18]



Obr. 39. Záznam statické zkoušky až do destrukce včetně plnicí fáze [18]

## 7 METODY PLÁNOVÁNÍ, OVĚŘOVÁNÍ A VYHODNOCOVÁNÍ

### 7.1 Statistické plánování

Abychom mohli dobře poznat jakýkoliv zkoumaný proces, je důležité si jeho postup poznávání dobře naplánovat. K tomu nám slouží několik statistický metod a systematick, jako jsou:

- Plackett-Burmanův plán
- systematika Design of Experiment

#### 7.1.1 Plackett-Burman

Plackett a Burman v roce 1946 navrhli faktorový plán, kterým lze redukovat počet pokusů nutných pro určení významných proměnných v regresi ve srovnání s úplným faktorovým plánem.

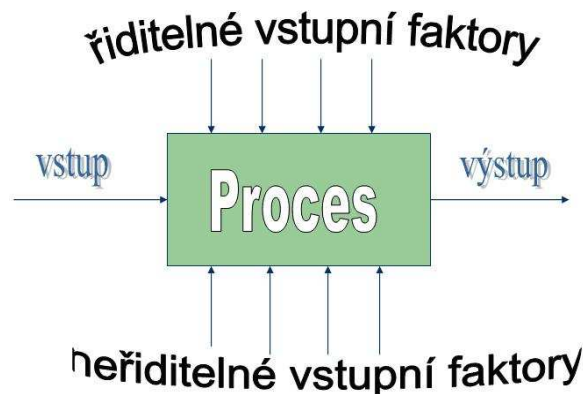
Návrh experimentu podle Plackett-Burmana se často označuje jako negeometrický návrh, protože nemůže být reprezentovaný krychlemi. Tento plán využívá předem určené matice. Tyto matice se vyznačují tím, že minimální počet měření, které je potřebné v experimentu uskutečnit, je rovný počtu faktorů zvýšených o jeden. Tento plán je možno využívat pro  $4N$  měření, kde  $N$  je celé číslo větší nebo rovné jako 2. Potom při 8-mi měřeních můžeme zkoumat až 7 faktorů, při 12-ti měřeních 11 faktorů atd.

**Replikace** - je to počet měření při plánování experimentů; jejím účelem je získat přesnější bodové kombinace hladin, to nám pomáhá při rozlišování mezi náhodnou a systematickou variabilitou

**Randomizace** (znáhodnění) - v experimentování se považuje za „zlatý standard“; princip je takový, že jednotlivé replikace kombinací hladin faktorů by se měly měřit při experimentování v náhodném pořadí; randomizace tak eliminuje systematickou variabilitu nekontrolovatelných faktorů, které by nebylo možné přiřadit do náhodné složky modelu; v praxi je randomizace problematická a před každým pokusem se musí přestavit nastavení stroje, což je časově náročné. [13]

### 7.1.2 Systematika Design of Experiment

Statisticky navržený experiment – tímto pojmem označujeme strategii řešení úloh pomocí vhodně navržených a vyhodnocených experimentů. V literatuře bývá takový experiment nejčastěji označován zkratkou DoE - Design of Experiments. DoE je účinným nástrojem optimalizace procesů a významnou měrou jej lze využít i při návrhu nových výrobků. Hlavními oblastmi využití DoE byl tradičně průmysl chemický, farmaceutický a zpracovatelský, v posledních letech se však metod DoE využívá stále častěji i ve strojním inženýrství a v elektronice. Velký potenciál poskytuje DoE v oblastech marketingu, prodeje nebo řízení služeb.



Obr. 40. Schéma procesu [14]

Na proces nebo produkt, který chceme optimalizovat, působí řada vlivů (Obr. 40.). Některé z nich dokážeme řídit. Těm budeme říkat faktory. Očekáváme, že na výstupu procesu dostaneme to, co jsme chtěli (nebo co požadoval náš zákazník). Takovým měřitelným výstupům říkáme odezvy. Úkolem DoE je najít takovou kombinaci faktorů, aby hodnota odezvy (nebo několika odezev) byla co nejpříznivější. K tomu účelu experimentátor zkoumá odezvu v několika bodech experimentálního prostoru. Uvědomuje si přitom, že pracuje s omezenými prostředky a prozkoumání každého bodu stojí čas a peníze. Proto je důležité umístit „sondy“ v experimentálním prostoru co nejúčelněji. [13]

Plánovaný experiment je zkouška nebo posloupnost zkoušek, ve kterých cílevědomě provádíme změnu vstupních faktorů procesu, abychom mohli pozorovat a identifikovat odpovídající změny výstupní proměnné – tzv. odezvy (response).

Vstupní proměnné – faktory:

- parametry stroje nebo přístroje
- různé technologie nebo metody výroby
- používaný vstupní materiál
- operátoři nebo směny
- vše, co transformuje vstupní materiál na výstupní produkt

Výstupní proměnná – odezva (response):

- odezva může obsahovat jednu nebo více jakostních charakteristik
- je to ta veličina nebo ty veličiny, jež sledujeme, abychom zlepšili proces či uspokojili zákazníka [14]

DoE je aktivní statistická metoda – provádí se promyšlené změny v procesu a pozorují příslušné odezvy, aby se získali informace vedoucí ke zlepšení procesu. Je-li proces pod statistickou kontrolou (je stabilní), ale stále ještě má nízkou způsobilost, pak je nutné zmenšit variabilitu procesu, DoE zde nabízí efektivní metody pro zvýšení způsobilosti. Jakmile regulační diagram ukazuje na nestabilitu, pak DoE pomůže identifikovat z mnoha možných příčin ty nevlivnější říditelné faktory, jež způsobují nestabilitu. Stanoví nejen jejich důležitost, ale i případné jejich interakce.

Využití DoE:

- ✓ zlepšit výtěžnost procesu
- ✓ zmenšit variabilitu procesu
- ✓ redukuje dobu vývoje nového produktu
- ✓ snižuje celkové náklady
- ✓ vyčíslí dopady různých konfigurací ve výrobě
- ✓ určí klíčové parametry ovlivňující proces [14]

### 7.1.2.1 *Postup pro Design of Experiment*

Doporučený postup při aplikaci plánovaného experimentu:

- 1) *definice nebo popis problému* - pomoc se žádá od všech zúčastněných – inženýrů, kvalitářů, obchodníků, vedení, operátorů
- 2) *stanovení sledované proměnné - response* - musí se vybrat taková proměnná (může být i více), která poskytuje užitečnou informaci o procesu
- 3) *výběr faktorů a úrovní* - musí se vybrat faktory, jež se budou v procesu měnit; nutná znalost procesu
- 4) *výběr plánu experimentu* - musí se zvážit počet opakovaných měření; určit pořadí jednotlivých měření; uvážit použití bloků; rozhodnout, zda se bude provádět znáhodnění (randomizace); zvážit výběr správného typu plánu
- 5) *provedení experimentu* - je důležité úzkostlivě sledovat dodržování plánu experimentu; chyby, jichž se dopustíme při experimentu, mohou zcela ohrozit přesvědčivost projektu
- 6) *analýza dat* – k analýze se používají statistické metody pomocí statistických softwarů; výstupy jsou možné ve formě tabulek či grafů v jednoduché podobě
- 7) *závěry a doporučení* - jakmile se provede analýza dat, experimentátor musí objasnit praktické závěry; pak je nutné doporučit postup další činnosti

V prvním experimentu se zjistí podle zkušenosti ne více než 25% dosažitelných informací. Ze začátku se lze jen domnívat, že známe dominantní faktory. Postupně se zjišťuje, které faktory se musí opravdu řídit, abychom ovládali proces. Zjišťuje se v jakém rozmezí musíme jednotlivé faktory udržovat, jak citlivé jsou jednotlivé faktory a kolik měření se musí provádět, abychom opravdu řídili proces.

Faktorem může být měřitelná veličina, např. teplota, tlak, napětí apod., ale také kategoriální veličina, jako dodavatel, operátor, stroj atd. U veličin obou typů se může hledat vliv jednotlivých faktorů na sledovanou veličinu. [14]

## 7.2 Ověřování způsobilosti strojů a procesů

Ke sledování procesů a případně pro měření procesů musí být aplikovány vhodné metody. Tyto metody musí dokládat, že procesy jsou schopny dosahovat plánovaných výsledků. Pokud nebude plánovaných výsledků dosaženo, je třeba za účelem zajištění konformity výrobku provést změny a učinit nápravná opatření, bude-li to zapotřebí.

Příklady parametrů pro posuzování procesního výkonu / procesní způsobilosti zahrnují:

- indexy způsobilosti
- reakční doba
- doba cyklu nebo výkonnost
- spolehlivost a bezpečnost
- výtěžnost
- účinnost a efektivnost
- užívání vhodných technologií
- zamezování a snižování vzniku odpadu
- náklady, ... [1]

### Analýza způsobilosti

U nového nebo změněného výrobního procesu (včetně montáže) se provádí analýza způsobilosti procesu, aby se ověřila způsobilost procesu / výkonnost procesu a získali se údaje k řízení procesu. Rozlišují se analýzy krátkodobé a dlouhodobé (short term, long term). U krátkodobé analýzy (např. analýza způsobilosti stroje) se evidují a hodnotí parametry výrobků, které byly vyrobeny v kontinuálním výrobním běhu. U dlouhodobých analýz pochází proměřované díly z delšího časového období reprezentujícího sériovou výrobu.

*Analýza způsobilosti strojů* je krátkodobá analýza, jejímž cílem je odkrývat vlivy na výrobní proces způsobené výhradně strojem.

*Analýza způsobilosti procesu* je analýzou prováděnou po delší dobu. Vedle vlivů poruch, které jsou způsobeny strojem, by měly být dodatečně podchyceny pokud možno všechny vlivy, které na výrobní proces působí zvenčí během delší provozní doby. [1]

### 7.2.1 Analýza způsobilosti stroje

Při analýze způsobilosti stroje se soustředíme na vlastnosti stroje, tzn. zkouší se vyloučit možné ovlivňující / poruchové veličiny resp. minimalizovat jejich ovlivňování (např. konstantní udržování).

Příklady toho jsou:

- ✓ člověk (obsluha, střídání směn, ...)
- ✓ stroj (otáčky, posuv, nástroj, ...)
- ✓ materiál (polotovary)
- ✓ metoda
- ✓ okolní prostředí (teplota, otřesy, stanoviště stroje, ...)

Očekává se, že na výrobek a jeho vlastnosti působí už jen neodstranitelné (náhodné) vlivy stroje, je-li to možné jsou tyto vlivy udržovány konstantní. Není-li toto v jednotlivých případech možné, budou dokumentovány změny příslušných ovlivňujících / poruchových veličin(y). Tato informace nabízí šanci pro optimalizační opatření, pokud nebude dosaženo specifikace pro způsobilost. [1]

#### Vyhodnocení údajů

Nejprve se na základě grafů jednotlivých hodnot kvalitativně posoudí, zda jsou naměřené hodnoty stabilní v čase nebo nikoliv. Pokud průběh není přijatelný, je třeba příčiny „chaotického“ chování vyšetřit a odstranit. Analýza způsobilosti musí být opakována.

K výpočtu indexů způsobilosti stroje se doporučuje tzv. kvantilová metoda. Způsobilost stroje je dána, pokud index způsobilosti  $C_{mk}$  je

$$C_{mk} \geq 1,67$$

### 7.2.2 Analýza způsobilosti procesu

Analýza způsobilosti procesu je analýzou probíhající po delší časové období a zahrnuje externí zdroje odchylek stroje.

#### Postup

Analýza způsobilosti procesu obsahuje následující kroky:

- odběr reprezentativního počtu nepřebraňých dílů; minimálně 25 namátkových vzorků
- měření parametru dílu resp. parametrů a dokumentace výsledků podle výrobního pořadí
- statistické vyhodnocení: posouzení stability v čase, statistická distribuce těchto hodnot a výpočet indexů způsobilosti procesu

$$C_{pk} = 1,33$$

### 7.3 Vyhodnocování fraktografie

Fraktografie je věda zabývající se zákonitostmi lomů a deformacemi pevných látek např. při únavě materiálu. Zabývá se rozbořem a popisem chování trhlin a ostrých vrubů v tělesech. Únavou materiálu je označena deformace, která je způsobena cyklickou provozní zátěží. Informace o procesu porušování se získávají pozorováním pouhým okem, užitím zvětšovacího skla i nejmodernějšími řádkovacími elektronovými mikroskopy. Analyzuje se morfologie lomových ploch a získané poznatky o procesech porušování se používají ke zlepšení konstrukce konkrétního výrobku. [12]

Fraktografická analýza pomáhá určit průběh porušování jednotlivých součástí i historii porušení celé konstrukce. Toho se využívá při únavové zkoušce, kdy jsou části (např. křídlo letadla) podrobeny nejrůznějšímu zatěžování, které simuluje provozní podmínky. Po zkoušce jsou jednotlivé součástky zkoumány kvůli výskytu únavových trhlin. Pomocí výsledků fraktografické analýzy a údajů zaznamenaných v průběhu zkoušky je možné zjistit i přesný čas vzniku a rozvoje jednotlivých poruch, čímž lépe určíme životnost součástek. [12]

V technické praxi nelze vyrobit materiál bez strukturních defektů a nepravidelností, které se za určitých podmínek mohou přetvářet v makroskopické trhliny. Nebezpečnost těchto trhlin z hlediska křehkého lomu spočívá v možnosti jejich nestability, tj. v možnosti náhlé a nekontrolovatelné separace částic materiálu lomem, rychlostí blízkou rychlosti zvuku v daném materiálu, aniž je nutné dodávat tomuto procesu energii zvenčí. S existencí trhlin, vrubů a defektů je třeba v reálných konstrukcích vždy počítat, ale je nutné je minimalizovat. [1]



Mezi základní druhy selhání patří:

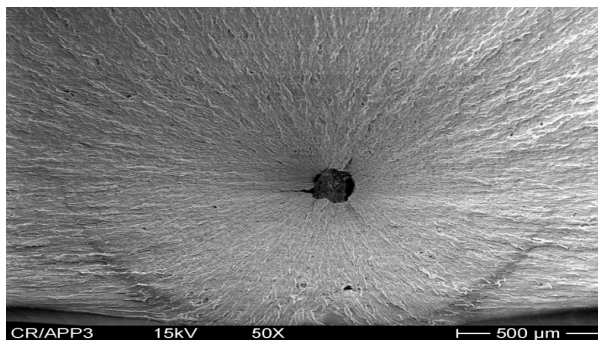
- a) Lom – křehký a houževnatý
- b) Únava – způsobená cyklickým namáháním
- c) Tečení (creep) – způsobené statickým namáháním
- d) Opatření – způsobené třením
- e) Koroze pod napětím (ESC) – způsobená chemicky aktivními látkami za spolupůsobení mechanického napětí. [1]

Pro účely této diplomové práce jsou důležitý zejména první tři druhy selhání.

### 7.3.1 Lomy

#### 1) Křehký lom

- nastane pokud namáhání lokálně překročí mez pevnosti materiálu a způsobí rozdělení dílu na dva či více úlomků
- lom není doprovázen velkými plastickými deformacemi
- materiálové defekty způsobí lokální koncentraci napětí a vedou k iniciaci křehkého lomu
- výskytu křehkých lomů je možné zabránit pouze důsledným odstraněním všech koncentrátorů napětí jako jsou: vrypy, vrásky, lunkry, ostré rádiusy, nečistoty (Obr. 41.), atd.



Obr. 41. Křehký lom v důsledku nečistoty [1]

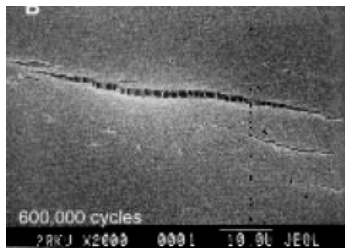
#### 2) Houževnatý lom

- nastane při velkých plastických deformacích a namáhání dílu nad mezí kluzu [1]

### 7.3.2 Únava

Velmi obvyklý mód selhání (až 90% selhání strojních součástí). Časově proměnné namáhání poškozuje součást a způsobí její selhání při napětích pod mezí kluzu materiálu a způsobí také iniciaci (většinou v místě nějakého defektu), růst trhliny a při překročení kritické velikosti trhliny dojde k rozlomení součásti. Nejlepší cesta k zabránění únavového selhání je zamezení iniciace trhliny a to lze pouze za předpokladu:

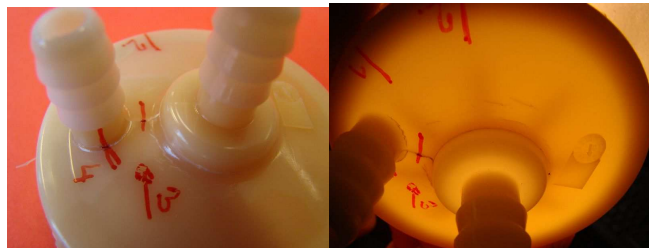
- odstranění iniciátorů trhliny (Obr. 42.)
- snížením aplikovaného napětí [1]



Obr. 42. Růst trhliny [1]

### 7.3.3 Tečení (creep)

Časově a teplotně závislý jev. Při konstantním mechanickém zatížení dochází ke změně rozměrů (deformaci) zatížené součásti. Rostoucí deformace součásti vede k jejímu selhání. [1]



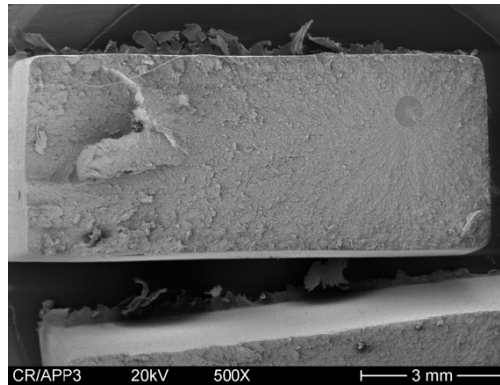
Obr. 43. Příklad creepu [1]

### 7.3.4 Analýza lomů

Lomová plocha (Obr. 44.) je kolmá k největšímu tahovému napětí. Stopy na lomové ploše nám ukazují na tyto základní poznatky:

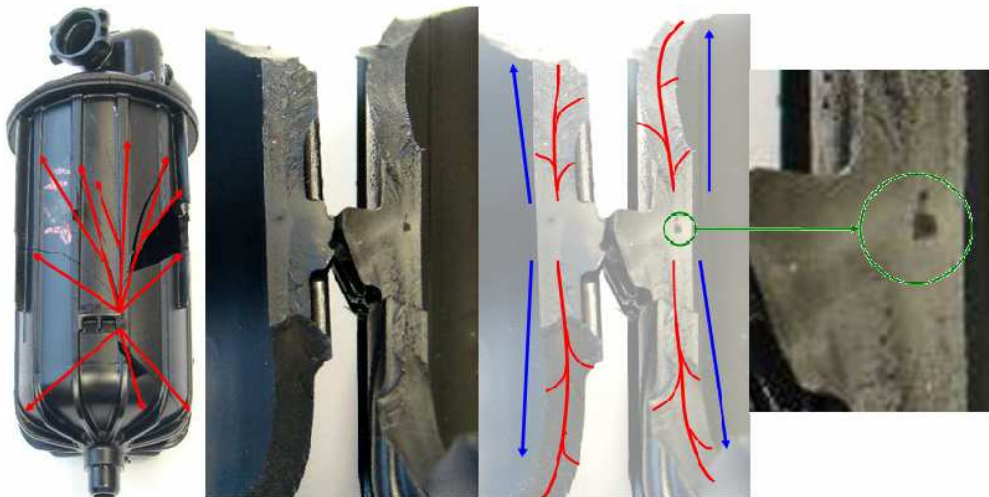
- rychlost šíření lomu – s rostoucí rychlostí roste hrubost lomové plochy
- směr šíření lomu – obrazce ve tvaru „V“ udávají směr šíření lomu

- typy působícího napětí (tahové, ohybové, jejich kombinace) [1]



Obr. 44. Lomová plocha [1]

Lomové plochy „bílých“ plastů (obvykle POM) jsou většinou nečitelné bez předchozí speciální úpravy povrchu. Proto existuje metoda, kdy se tuhou potře lomová plocha a tím se stává dobře čitelnou. [1]



Obr. 45. Analýza v oblasti iniciace lomu [1]

Z výsledků analýzy se určí místo defektu, tzn. příčina prasknutí (Obr. 45.), a navrhne se odstranění - většinou se jedná o zásah do vstřikovacího procesu, designu výrobku, nástroje nebo změnu materiálu.

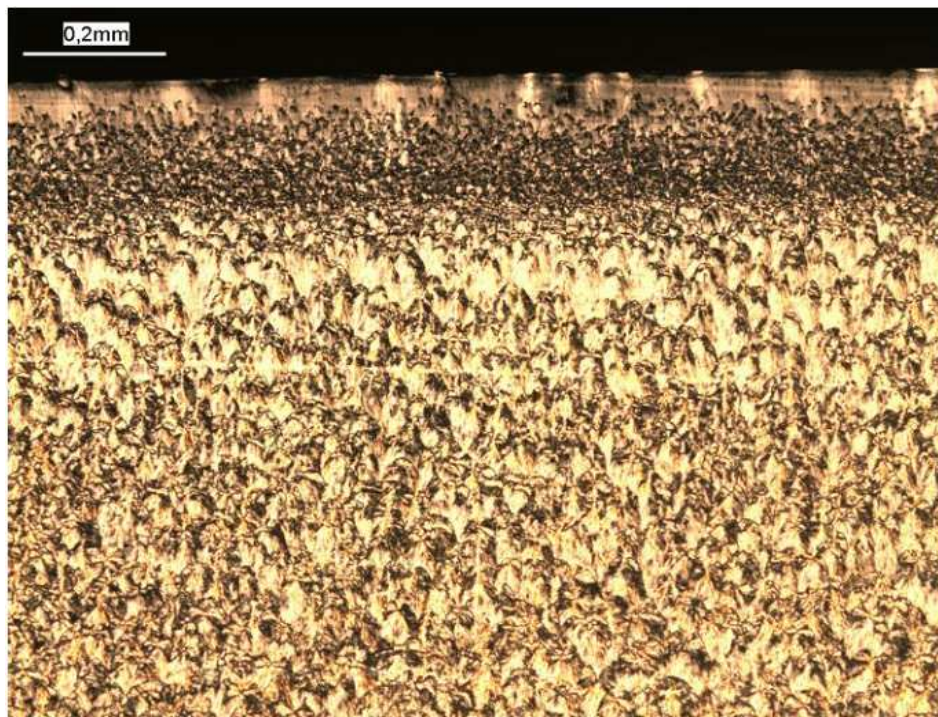
## 7.4 Vyhodnocování mikrotomie

Vysoký stupeň průchodnosti světla u plastů nám díky pozorování tenkých řezů v procházejícím světle dovoluje zkoumat morfológickou strukturu. Protože jednotlivé molekuly nejsou mikroskopicky rozpoznatelné, můžeme identifikovat a hodnotit jenom nadřa-

zené makroskopické struktury a interferenci většího rozsahu (Obr. 46.). Na základě struktury plastů jsou vícefázové systémy jako částečně krystalické termoplasty, plněné a vyztužené plasty všeho druhu víc přístupné mikroskopickému pozorování než amorfni, neplněné polymery. [19]

Efekty mohou být ještě výraznější díky polarizaci, fázovému kontrastu a interferenci. Zvláštní význam přitom připadá polarizaci, protože připouští ve fotoelasticimetricky aktivních polymerech odchylky od normálního stavu. Z tohoto hlediska umožňuje mikrotomie zkoumat:

- strukturu a odchylky od ideálního stavu u anomálií ve zpracování a u nepřiměřených parametrů zpracování
- příměsi a znečištění, neroztavené částice materiálu
- distribuci výplňových materiálů a pigmentů
- sraženiny, poruchy (neobsazené místa v krystalické mřížce), spojovací místa
- zesilovací materiál
- stavy napětí způsobené vnějšími a vnitřními silami (taktéž deformace)
- tloušťky vrstev při upravování povrchu
- trhlinky, struktury sférolitu [19]



Obr. 46. Mikrotomový řez jemné struktury POM – 100x zvětšení [1]



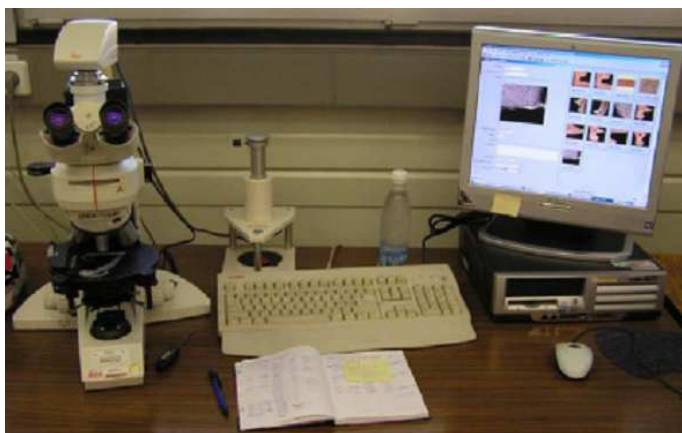
### 7.4.1 Podmínky řezání

Předpokladem pro čisté a výrazné řezy jsou vedle šikovnosti a zkušenosti také dodržení určitých podmínek řezání.

1. Tloušťka řezu - určuje přesnost rozlišení struktur; ostré a jasné kontury sférolitické struktury vidíme na řezech o tloušťce 10  $\mu\text{m}$  a 15  $\mu\text{m}$ ; tlustší řezy s 30  $\mu\text{m}$  a 50  $\mu\text{m}$  jsou už zastřené a neostře
2. Přesnost rozměrů a rovnoměrnost řezů - během řezání dochází ke stlačení materiálu, které se při měření projevuje změnou délky a někdy je viditelné pod mikroskopem jako zvlnění; intenzita stlačení závisí od úhlu břitu mikrotomového nože [19]

### 7.4.2 Mikroskopie v odraženém světle

Mikroskopické snímky v odraženém světle nám řeknou všeobecně méně v porovnání s polarizační mikroskopií v procházejícím světle, jelikož jsou plasty polarizačně-opticky aktivní jenom v procházejícím světle. [19]



Obr. 47. Světelný mikroskop Leica DFC 280

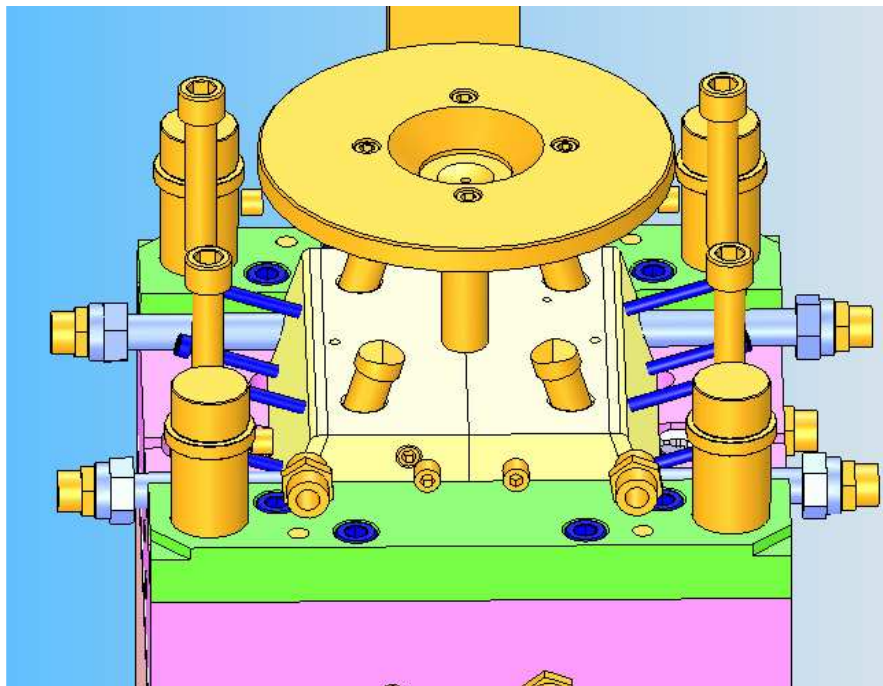
Mikrotomie a světelná mikroskopie s nebo bez polarizačního světla představují důležité pomůcky ke zkoumání polymerových struktur, vakuol (dutinek), sraženin, trhlinek, výplňových materiálů a zesilujících látek (druhy a rozložení), tloušťky vrstev atd. při analýze škod. Na mikrotomy a nože se kladou vysoké mechanické požadavky. Preparace zahrnuje pracovní procesy jako zalévání, upínání, řezání, snímání a konzervování vzorků. Výborné vlastnosti mikroskopického zobrazení dosáhneme dostatečně tenkými řezy a mikrotomovými noži s ostrými úhly břitu. [19]

## 8 POPIS FORMY NA VÝROBU ZKUŠEBNÍCH TĚLÍSEK

Speciální zkušební tělísko pro metodu svařování laserem bylo konstruováno jako extrémně tlustostěnné a tudíž do praxe ne příliš vhodné pro použití. Avšak pro zkoušky, které následují po svařování je ideální - dochází k praskání přímo ve svaru a tudíž se posuzuje kvalita svaru. 3D model a výkresy zkušebního tělíska jsou příloze P IV až P VI.

### Zaformování

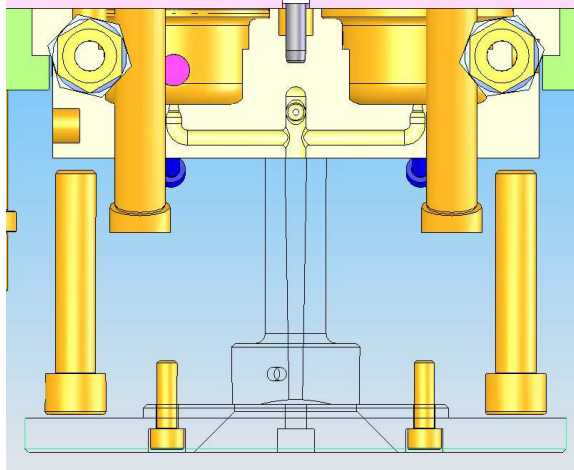
Vstřikovací forma na tato tlustostěnná tělíska byla konstruována jako dvojnásobná s možností výměny tvarových vložek pro jednotlivé typy svařovacích geometrií. Výměnné tvarové vložky a jádra (tvárníky) jsou pevně ukotveny v desce a formují vnitřek tělíska. Vnější tvar je zaformován pomocí dvou čelistí, které jsou usazeny ve vodících lištách a jejich pohyb je zajištěn pomocí šikmých čepů, jedná se o tzv. princip dvoučelist'ové formy (Obr. 48.).



Obr. 48. Způsob zaformování výrobku – 2 čelisti

### Vtoková soustava

Pro plnění dutin formy byl zvolen studený vtokový systém, kdy tavenina je přiváděna vtokovou vložkou do dělící roviny, kterou tvoří stranové čelisti. Rozvodné kanály jsou v obou čelistech a ústí přímého vtoku směřuje na vrchol výrobku (Obr. 49.).



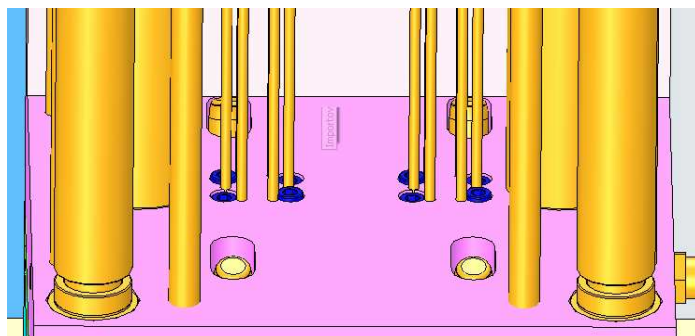
Obr. 49. Studený vtokový systém

#### Temperanční systém

Temperace formy je řešena pomocí kruhových kanálů, které jsou vrtány jak v každé tvarové desce, tak v každé z čelistí. Temperace je zde velmi důležitá, jelikož se jedná o výrobek, který je extrémně tlustostěnný a potřebuje dobré chlazení. Dále se počítalo při konstrukci formy s tím, že budou vstříkovány materiály PPA a PPS, u nichž je nutná teplota formy při začátku vstřikovacího cyklu až 160°C. Temperačním médiem je voda, přetlak 9 bar. Z důvodu bezpečnosti nebylo možno použít rychlospojek, ale bylo nutné využít šroubení a pancéřových hadic.

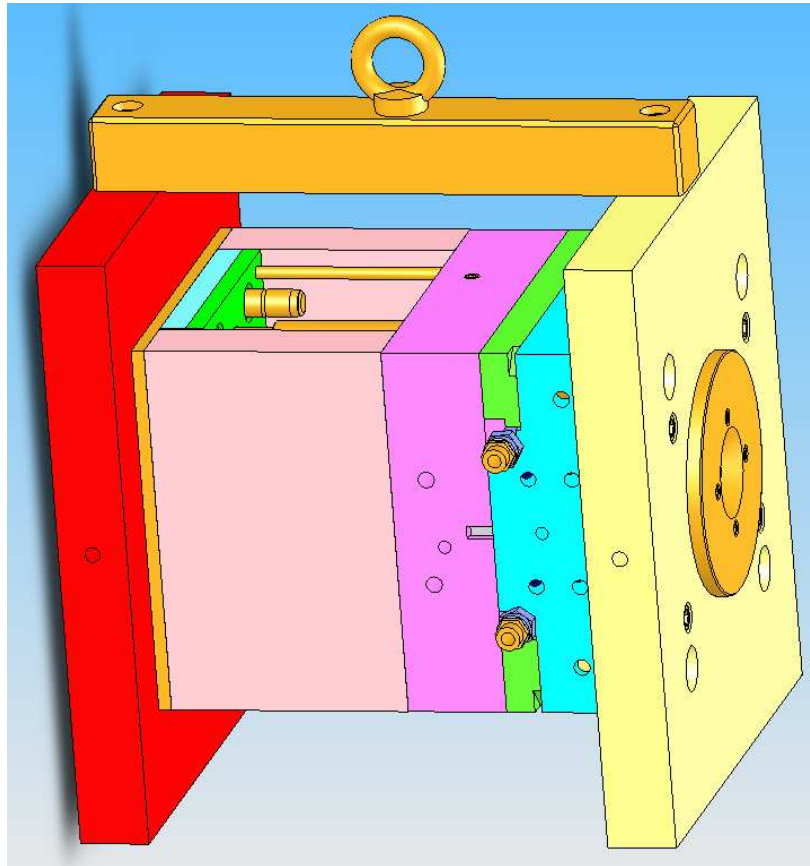
#### Vyhazovací systém

Vyhození výrobku je řešeno pomocí válcových vyhazovačů (Obr. 50.). Je jich celkem 12ks a působí přes tvarové vložky až na dno výrobku. Zde dojde ke stažení a vyhození výrobku na pás. Vyhazovače jsou ukotveny ve vyhazovací desce, která je ovládána hydraulikou stroje pomocí táhla. Díky požadavku na vysokou temperaci formy mají hlavy vyhazovačů dostatečně velkou radiální vůli.



Obr. 50. Vyhazovací systém

Vstřikovací forma je střední velikosti, kdy hlavní upínací deska má rozměry 396 x 346 mm a tvarové desky jsou 246 x 246 mm (Obr. 51.). Je určena pro vstřikovací stroj Engel 180 Victory, který je vybaven elektromagnetickým upínáním (proto je forma zbytečně nadrozměrná – min. parametry lisu).



Obr. 51. Sestava vstřikovací formy

### Cíle praktické části diplomové práce

V teoretické části diplomové práce byla zpracována rešerše z předem stanovených témat a oblastí. Z tohoto teoretického základu se bude čerpat a vycházet v praktické části této práce, jejíž cíle jsou následující:

- 1) Naleznout optimální svařovací parametry pro daný produkt za důsledného dodržování systematiky Design of Experiment (DoE).
- 2) Pro materiály ze skupiny termoplastů provést sérii experimentů vedoucí k nalezení optimálních svařovacích parametrů a to s ohledem na krátkodobé a dlouhodobé zkoušky.



## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 9 OPTIMALIZACE PARAMETRŮ SVAŘOVACÍHO PROCESU

Cílem diplomové práce je optimalizace svařovacích parametrů pro technologii svařování laserem u vybraných termoplastů. Systematika plánování a optimalizace procesu byla provedena dle zavedených postupů v závodě ROBERT BOSCH spol. s r.o., České Budějovice na oddělení vývoje nových procesů TEF3/RBCB.

### 9.1 Příprava a požadavky

Optimalizace svařovacích parametrů technologie laserového svařování plastů je součástí nového projektu ve společnosti RBCB. Pro tuto technologii bylo firmou ATMO stavěno laboratorní zařízení LDS, které je podrobně popsáno v teoretické části této diplomové práce a které splňuje požadavky metody transmisivního svařování plastů.

Hlavní částí přípravy se stal návrh svařovacího tělíska, které splňuje požadavky technologie a tudíž umožňuje dokonale posoudit kvalitu sváru. Jak už bylo napsáno v kap. 8, bylo tělísko navrženo jako extrémně tlustostěnné, aby při následných zkouškách byl hodnocen svár a ne tělísko jako celek, tzn. při destrukční zkoušce byl poškozen svár a ne díl.

Cílem tohoto projektu je porovnat laserové svařování s ostatními technologiemi spojování plastů, jako jsou:

- ✓ svařování ultrazvukem
- ✓ svařování horkým elementem
- ✓ rotační svařování

Je snaha naleznout optimální parametry pro co nejvíce plastů, které se používají v automobilovém průmyslu a hlavně posoudit, zda je tato metoda svařování pro daný materiál vhodná a jestli splňuje náročné požadavky zákazníka.

Dle dostupných kapacit a zkušeností bylo určeno, že hlavní výstupní měřené odezvy budou:

- a) těsnost spoje (leakage air) [ $\text{cm}^3/\text{min}$ ] – hodnota propustnosti suchého vzduchu zjištěná metodou měření poklesu tlaku ve vzorku (kap. 6.1.2.)
- b) pevnost spoje (burst pressure) [bar] – hodnota maximálního vnitřního tlaku, při kterém dojde k prasknutí svařovaného dílu (kap. 6.2.)

## 9.2 Materiál

Pro optimalizaci svařovacích parametrů pro technologii svařování laserem byly vybrány materiály ze skupiny POM a PA66 (Tab. 3.) od společnosti BASF. Rozhodujícím faktorem pro volbu dvou materiálů byla hlavně jejich okamžitá dostupnost k provedení experimentu.

Tab. 3. Zvolené materiály

Materiál	Varianta	Trans./Absorp.	Obchodní název
POM	neplněný	barví se až dodatečně	Ultraform S2320 003
PA66	plněný (30% GF)	transparentní	Ultramid A3WG6 natur
		absorpční	Ultramid A3WG6 BK00564

Podrobné vlastnosti (modul pružnosti, smrštění, teplota tání, atd.) obou materiálů jsou uvedeny v tabulce v příloze P I.

## 9.3 Variované parametry stroje

Jsou to parametry stroje, které přímo ovlivňují svařovací proces. Úkolem optimalizace je stanovit jejich ideální hodnoty pro vybraný materiál. Jedná se o tyto parametry:

- 1) výkon (Laser power) [W] – hodnota, kterou lze nastavit s ohledem na celkový rozsah generátoru (max. 400 W)
- 2) svařovací dráha (Welding way) [mm] – relativní hloubka protavení
- 3) rychlost (Speed) [m/s] – rychlost oběhu paprsku po kontuře
- 4) síla F1 (Force F1) [N] – spouštěcí síla, tzv. Trigger
- 5) doba přepnutí (Switch time F1 to F2) [s] – doba, při které dochází k přepnutí ze síly F1 na sílu F2
- 6) síla F2 (Force F2) [N] – síla působící při svařování
- 7) přídržná síla P (Force P) [N] – síla působící po vypnutí laseru
- 8) doba chlazení (Cooling time) [s] – doba, po kterou působí přídržná síla P

## 9.4 Svařovací přípravek

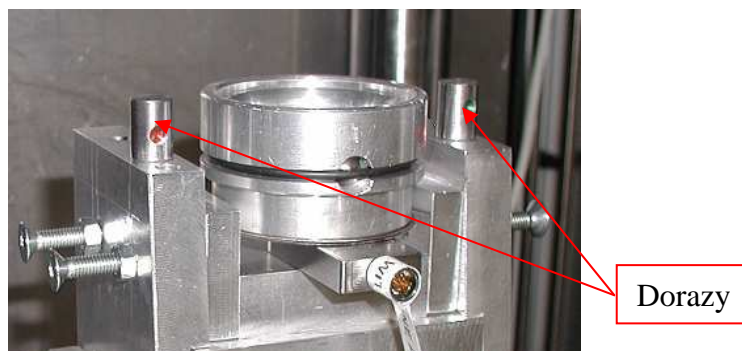
Pro požadované založení svařovaných dílů do stroje byl navržen svařovací přípravek. Absorpční část svařovacího tělíska se zakládá do spodního dílu přípravku (Obr. 52.A), kde je poloha tělíska zajištěna kuličkou, která je přitlačena k dílu pryžovým kroužkem. Je tak zaručeno rychlé a dostatečně přesné založení dílů do přípravku. Poté dochází k volnému přiložení transparentní části svařovacího tělíska na část absorpční.

Po spuštění samotného svařovacího procesu dochází pomocí pneumatického válce stroje k přitlačení spodního dílu přípravku se založenými tělísky k hornímu dílu přípravku (Obr. 52.B). Osazení, které je vysoustruženo v horním dílu přípravku, zajistí přesnou polohu transparentní části svařovacího tělíska a zároveň tuhost celé přípravkové soustavy.



Obr. 52. Spodní (A) a horní (B) část svařovacího přípravku

Proti zničení snímače ism4, který kontroluje relativní hloubku sváru, jsou na přípravkové soustavě instalovány dorazy (Obr. 53.). Rozměrově jsou nastaveny tak, aby bylo možno svařovat i na maximální požadované hloubky sváru.



Obr. 53. Přípravková soustava s dorazy

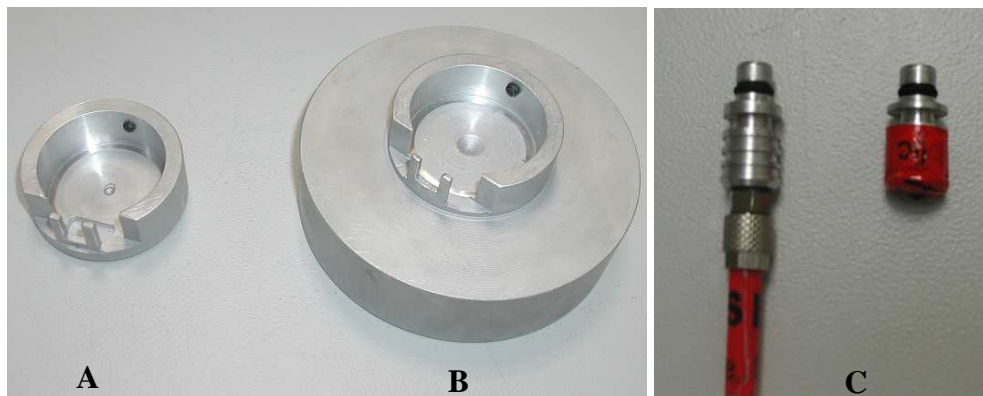
pozn.: Další fotografie svařovací přípravkové soustavy jsou v příloze P VII.

## 9.5 Měřicí přípravky

K tomu aby bylo možno provést zkoušky těsnosti a pevnosti spoje, musí být k dispozici nejen samotný měřicí přístroj, ale také vhodný přípravek. Někdy se jedná o přípravky univerzální, ale v případě zkušebního svařovacího tělíska byly pro obě měřicí metody vyrobeny vlastní. Fotografie měřících přípravků jsou v příloze P VIII.

### 9.5.1 Přípravek pro měření těsnosti

Otvory ve svařeném zkušebním tělísku se utěsní ucpávkami (Obr. 54.C), kdy jedna je pouze těsní a druhá přivádí suchý vzduch do tělíska. Poté se celý díl osadí do spodní části přípravku (Obr. 54.B) a přiklopí se víčkem – horní část přípravku (Obr. 54.A).



Obr. 54. Přípravek - těsnost

### 9.5.2 Přípravek pro měření pevnosti spoje

Pro zkoušku pevnosti spoje bylo zkušební tělísko zasunuto mezi dva přípravky, kdy jeden z nich je uveden na obrázku (Obr. 55.) Poté pomocí páky byl otvor utěsněn a přes rychlospojku přivedena hadice s vodou.



Obr. 55. Přípravek - pevnost spoje

## 10 PROVEDENÍ EXPERIMENTU

Samotné provedení optimalizace svařovacích parametrů pro technologii laserového svařování plastů mělo předem stanovený a dohodnutý postup. Abychom získali kvalitní výsledky, byl experiment rozdělen do třech stěžejních částí:

- Plackett-Burman test
- Design of Experiment (DoE)
- ověření způsobilosti stroje  $C_{mk}$

### 10.1 Plackett-Burman test

Vzhledem k velkému počtu vstupujících faktorů a tudíž následné nutnosti svaření velkého množství dílů pro dostatečně vypovídající analýzu byl nejdříve proveden Plackett-Burman test, který měl za úkol stanovit počet skutečně významných vstupujících faktorů.

#### 10.1.1 Naplánování Plackett-Burmanova testu

Naplánování tohoto testu bylo provedeno ve statistickém softwaru MiniTab 15 a bylo nutné znát faktory (parametry), které nám budou u obou materiálů do svařovacího procesu vstupovat. Na základě dosavadních zkušeností s laserovým svařováním termoplastů byla každému parametru (vstupujícímu faktoru) přiřazena maximální a minimální hodnota s ohledem na daný typ materiálu (Tab. 4. a Tab. 5.)

*Tab. 4. Zvolené hodnoty parametrů pro materiál PA66-plněný*

Parametr	Minimum	Maximum	Jednotka
Výkon (Laser power)	150	400	[W]
Svařovací dráha (Welding way)	0,2	0,7	[mm]
Rychlost (Speed)	1,5	10	[m/s]
Síla F1 (Force F1)	125	375	[N]
Doba přepnutí (Switch time F1 to F2)	0,1	1	[s]
Síla F2 (Force F2)	125	375	[N]
Přídržná síla P (Force P)	125	375	[N]
Doba chlazení (Cooling time)	0,5	3	[s]

Tab. 5. Zvolené hodnoty parametrů pro materiál POM-neplněný

Parametr	Minimum	Maximum	Jednotka
Výkon (Laser power)	100	160	[W]
Svařovací dráha (Welding way)	0,2	0,7	[mm]
Rychlost (Speed)	1,5	10	[m/s]
Síla F1 (Force F1)	125	375	[N]
Doba přepnutí (Switch time F1 to F2)	0,1	1	[s]
Síla F2 (Force F2)	125	375	[N]
Přídržná síla P (Force P)	125	375	[N]
Doba chlazení (Cooling time)	0,5	3	[s]

Ostatní podmínky, které požaduje software MiniTab, byly zvoleny takto:

- bloky – 2 (v jednom bloku musí být obsaženy pokusy prováděné za stejných podmínek [27])
- center point – 1 (důležité pro zachycení křivky průběhu odezvy v závislosti na některém faktoru [27])
- opakování – 1 (opakují se pro všechny kombinace stanovených faktorů, účelem je zvýšit přesnost výsledků [27])

V příloze P IX a P X jsou uvedeny vygenerované tabulky Plackett-Burmanova testu pro oba materiály. Každá obsahuje 25 svařovacích kombinací vytvořených z okrajových hodnot parametrů a center pointů.

### 10.1.2 Měření výstupních veličin

Jak už bylo řečeno v kapitole 9.1, hlavními měřeními výstupními odezvami jsou těsnost (Leakage air) a pevnost spoje (Burst pressure). Pro přesnější výsledky Plackett-Burmanova testu se ještě zavedlo subjektivní hodnocení sváru (Subjective result), které následovalo po zkoušce pevnosti spoje. Jednalo se tak o další skupinu výsledků, které mohly odhalit významnost nebo nevýznamnost jakéhokoli vstupujícího faktoru. V tomto hodnocení se vzorky rozdělily do celkově 5-ti skupin, kdy ty nejhorší byly ve skupině č.5 a ty nejlepší ve skupině č.1. Hodnotilo se hlavně množství materiálu z absorpční části zkušebního tělíška zanechané na části transparentní.

Výsledky měření všech tří výstupních odezev pro oba materiály jsou uvedeny v tabulce (Tab. 6.)

Tab. 6. Výsledky měření (Plackett-Burman test)

Pořadí	PA66 - plněný			POM - neplněný		
	Leakage air [cm <sup>3</sup> /min]	Burst pressure [bar]	Subjective result [1]	Leakage air [cm <sup>3</sup> /min]	Burst pressure [bar]	Subjective result [1]
1	0,20	25,2	2	0,03	21,6	2
2	0,13	23,0	1	0,04	24,6	3
3	0,12	15,5	4	0,05	6,9	2
4	0,09	30,9	3	0,03	17,0	4
5	0,13	16,1	4	0,03	7,6	4
6	0,15	15,5	1	0,03	18,3	1
7	0,12	22,5	2	0,04	22,6	3
8	0,13	20,5	1	0,08	16,6	3
9	0,11	24,1	5	0,03	19,6	3
10	0,11	23,5	1	0,03	24,7	3
11	0,09	30,2	1	0,07	20,8	2
12	0,06	17,2	1	0,05	17,9	2
13	0,12	24,2	1	0,05	18,9	1
14	0,08	26,1	5	0,05	20,1	3
15	0,09	30,4	3	0,07	19,0	5
16	0,07	15,9	4	0,07	19,9	4
17	0,09	31,4	5	0,10	19,4	3
18	0,08	29,0	5	0,03	21,2	4
19	0,08	27,3	1	0,06	19,0	2
20	0,09	30,0	3	0,13	16,1	5
21	0,06	26,3	2	0,10	18,9	3
22	0,07	24,7	3	0,08	19,0	2
23	0,07	25,9	1	0,05	8,9	1
24	0,13	27,7	3	0,03	17,4	4
25	0,29	28,6	2	0,09	20,8	3

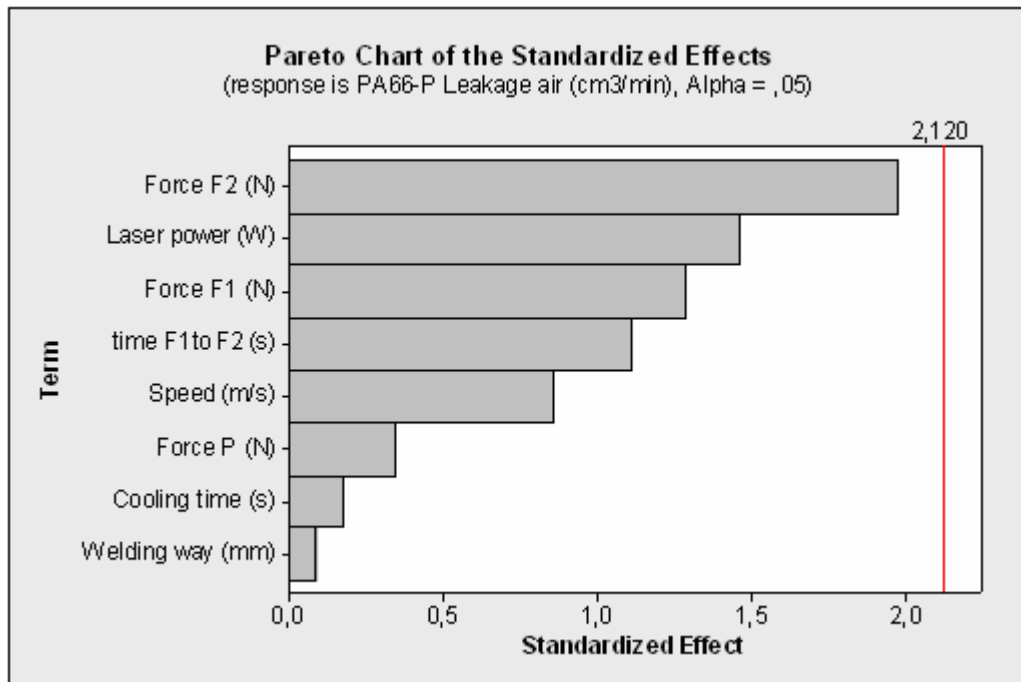
### 10.1.3 Vyhodnocení

Vyhodnocení naměřených hodnot Plackett-Burmanova testu bylo provedeno v softwaru MiniTab 15. Tento program vynesl pro každý materiál do grafu Paretovu analýzu významnosti jednotlivých výstupních odezev v závislosti na vstupních parametrech (faktorech). Dále byly získány grafy normálního rozdělení a histogram reziduí ukazující míru správnosti postupu provedeného testu.

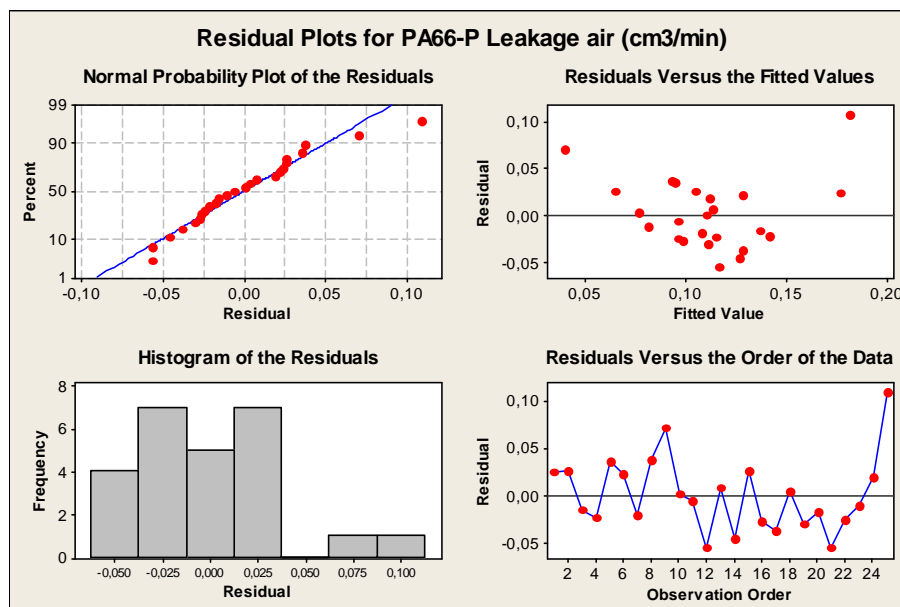


## I. PA66 – plněný

## a) Závislost významnosti vstupujících faktorů na těsnosti spoje



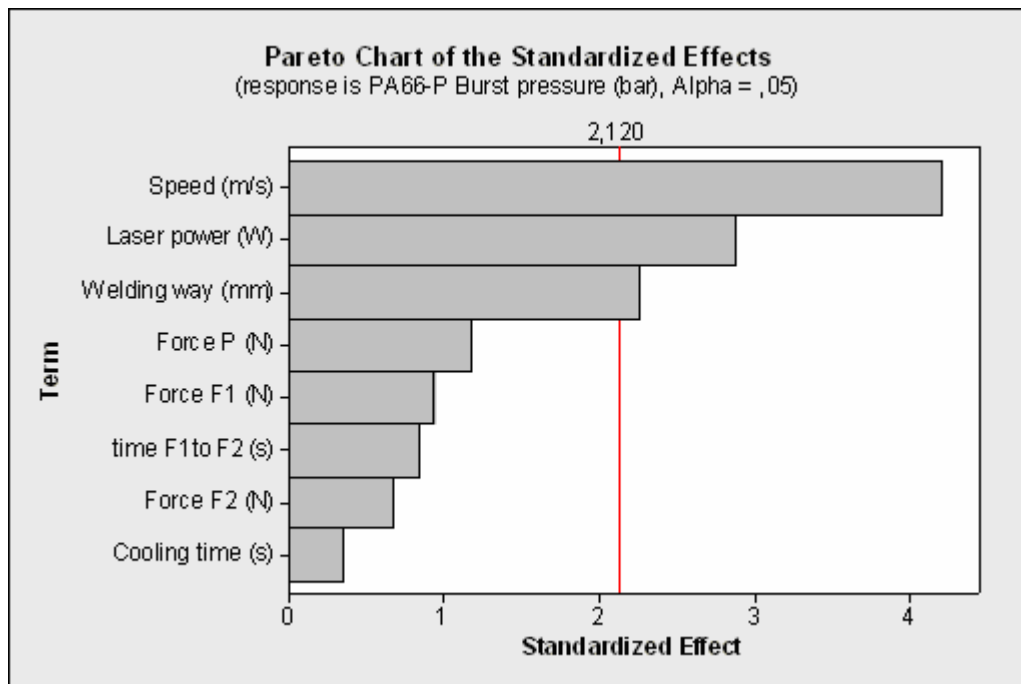
Obr. 56. Paretův diagram důležitosti vstupních faktorů na těsnosti - PA66



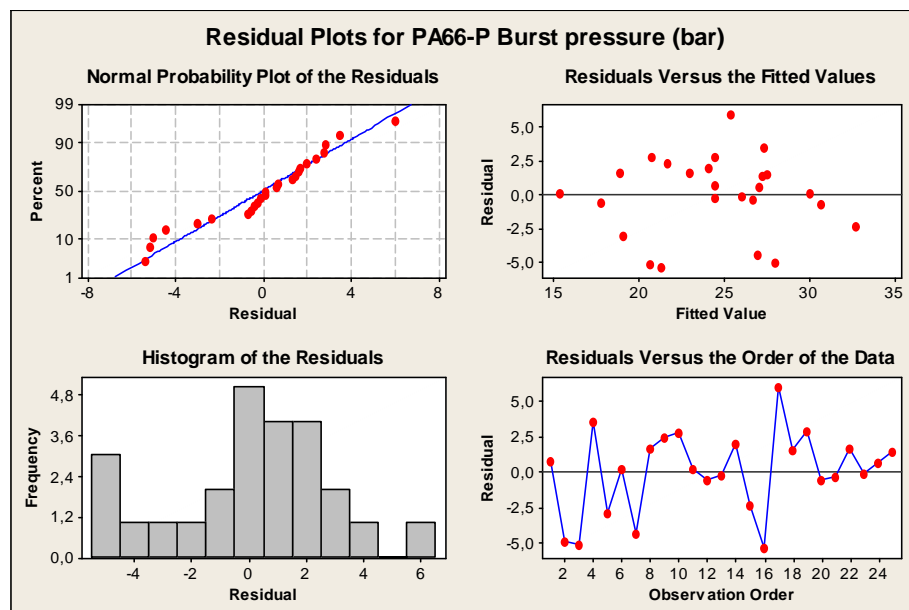
Obr. 57. Rozdělení a histogram reziduí v hodnocení těsnosti - PA66

Z Paretova grafu (Obr. 56.) lze vidět, že na těsnost spoje u materiálu PA66-plněný má vliv síla F2 a výkon laseru. Jelikož ale ani jedna z hodnot nepřesahuje hranici významnosti, která je vyznačena červenou čarou, tak nemůžeme výsledek brát jako objektivní.

b) Závislost významnosti vstupujících faktorů na pevnosti spoje



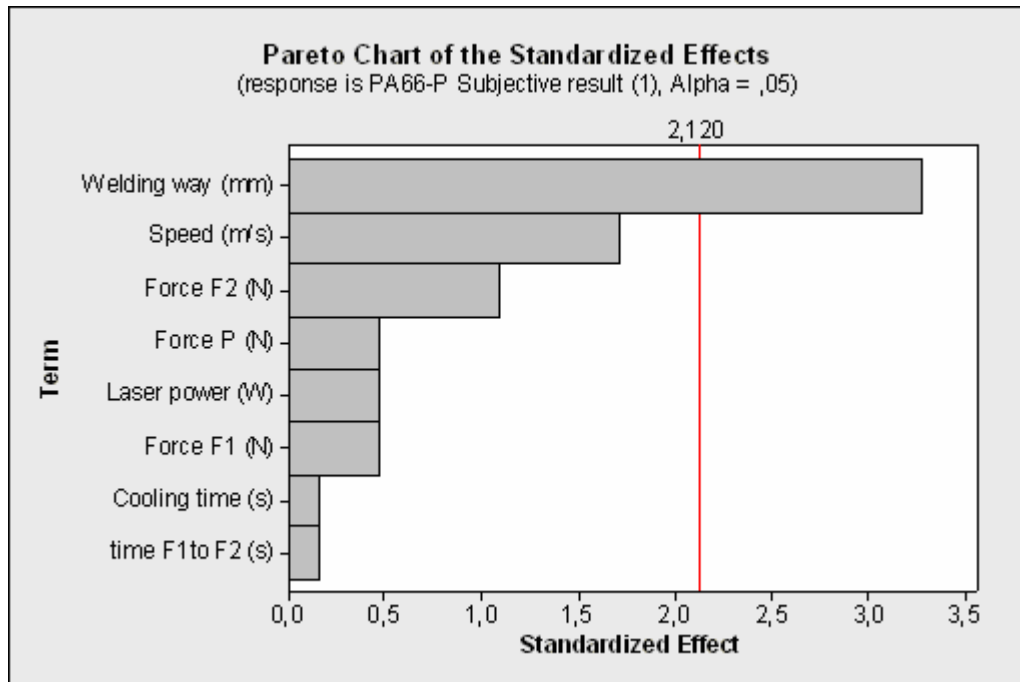
Obr. 58. Paretův diagram důležitosti vstupních faktorů na pevnosti - PA66



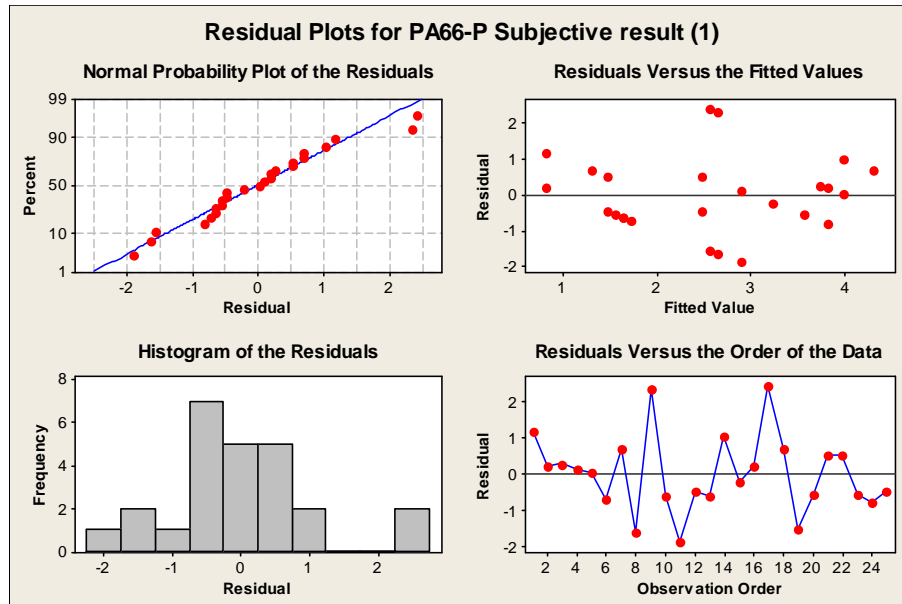
Obr. 59. Rozdělení a histogram reziduí v hodnocení pevnosti - PA66

U závislosti vstupních parametrů na pevnosti spoje je z Paretova grafu (Obr. 58) patrné, že signifikantní vliv mají rychlost oběhu paprsku, výkon laseru a svařovací dráha. Vliv výkonu laseru a svařovací dráhy se dal předpokládat, ale zajímavým zjištěním je velký vliv rychlosti paprsku. Velkým překvapením byl naopak velmi slabý vliv svařovací síly F2.

c) Závislost významnosti vstupujících faktorů na subjektivním hodnocení



Obr. 60. Paretův diagram důležitosti vstupních faktorů na subjekt. hodn. - PA66



Obr. 61. Rozdělení a histogram reziduí v hodnocení subjekt. - PA66

Méně přesné subjektivní hodnocení ukazuje (Obr. 60), že největší a jediný vliv na něj má svařovací dráha. Tento jev se dal dle způsobu hodnotící stupnice očekávat.

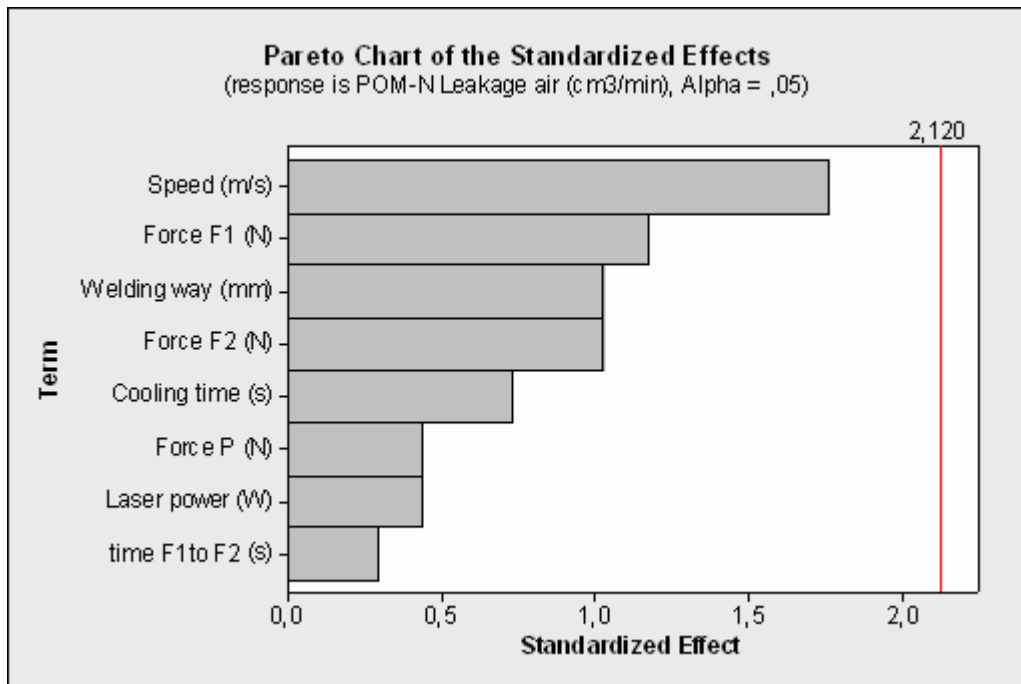
Ze získaných grafů pro materiál PA66-plněný je zřejmé, že bude velmi těžké vybrat parametry (faktory), které nejvíce ovlivňují proces svařování. Paretova analýza u těsnosti spoje neukázala prakticky žádný signifikantní parametr, který by proces ovlivňoval. Proto lze brát v úvahu pouze grafy ze závislosti na pevnosti spoje a na subjektivním hodnocení.

Z těchto dvou grafů jednoznačně vyplývá, že hlavní vliv na proces má svařovací dráha (Welding way), dále pak výkon laseru (Laser power) a rychlost paprsku (Speed).

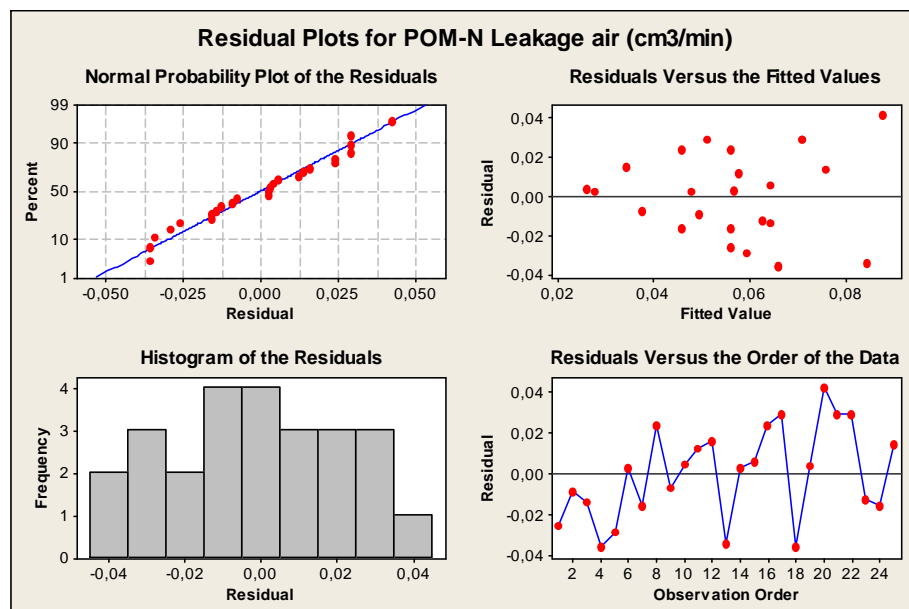
Do další fáze experimentu byly ještě jako signifikantní parametry zvoleny síly F2 a P. Jedná se o sílu, která působí při oběhu laserového paprsku po kontuře (Force F2) a sílu účinkující při chlazení (Force P). I když ani jedna ze sil nepřesáhala hladinu významnosti u žádné ze závislostí, jsou dle zkušeností s technologií laserového svařování obě zahrnuty pro další variování.

II. POM – neplněný

a) Závislost významnosti vstupujících faktorů na těsnosti spoje



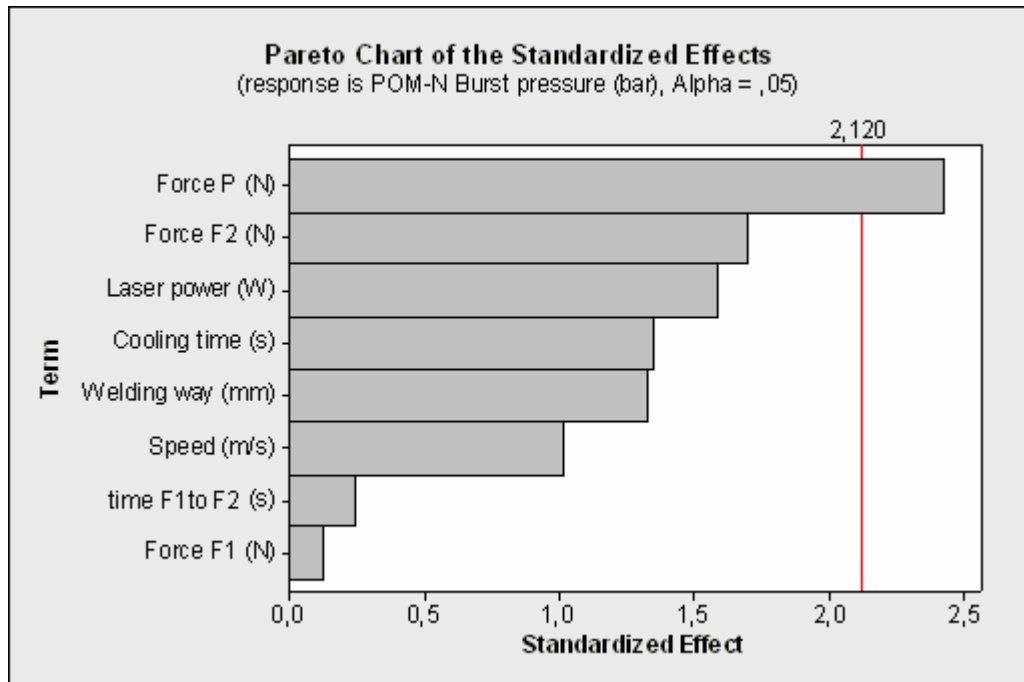
Obr. 62. Paretův diagram důležitosti vstupních faktorů na těsnosti - POM



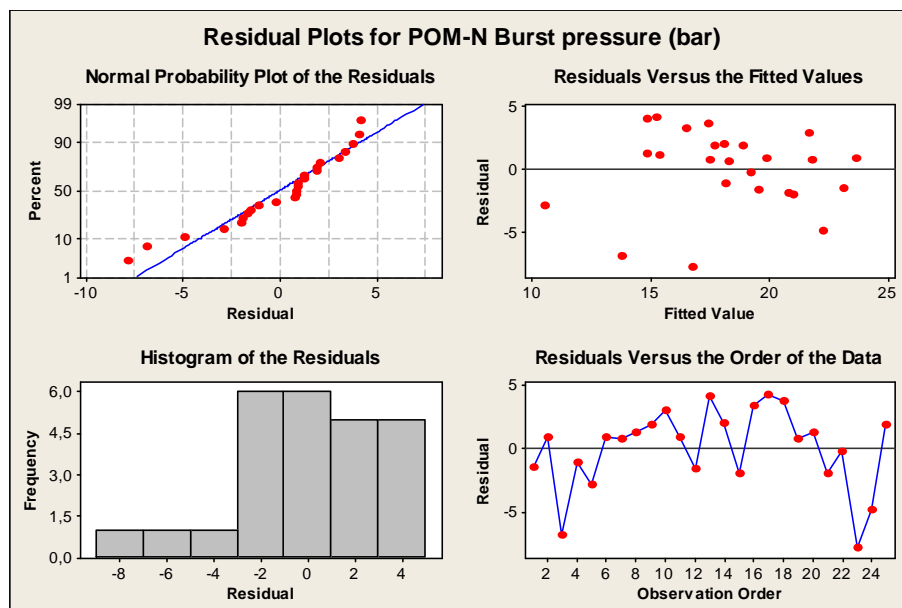
Obr. 63. Rozdělení a histogram reziduí v hodnocení těsnosti - POM

Tak jako u materiálu PA66-plněný i zde (Obr. 62.) je hned na první pohled vidět, že Paretův diagram pro těsnost neukazuje žádný faktor, který by překonal hranici významnosti.

b) Závislost významnosti vstupujících faktorů na pevnosti spoje



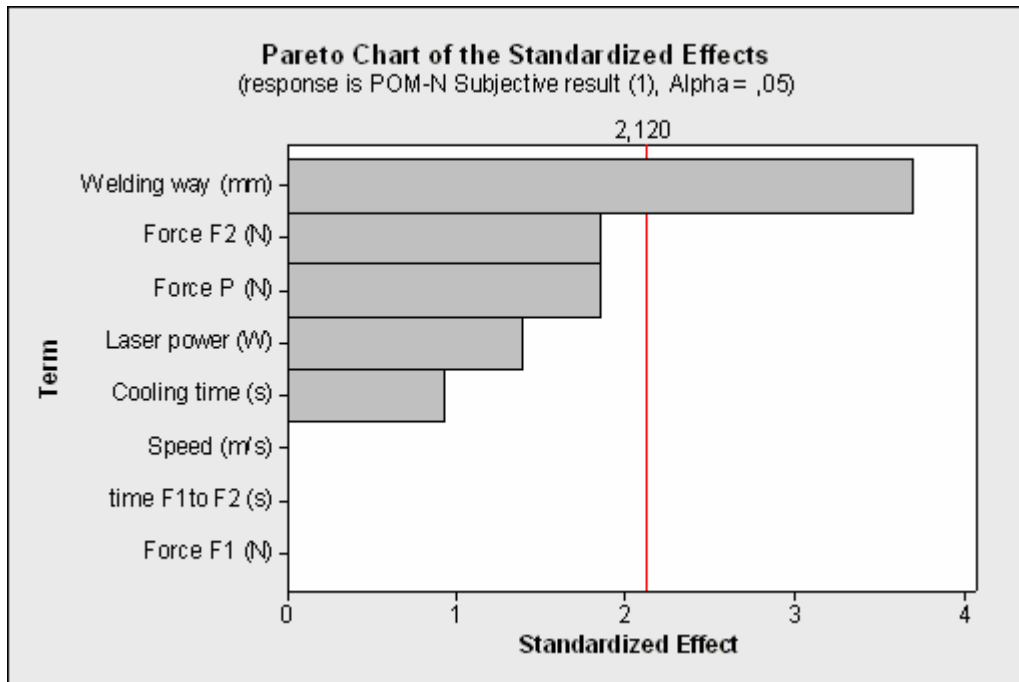
Obr. 64. Paretův diagram důležitosti vstupních faktorů na pevnosti - POM



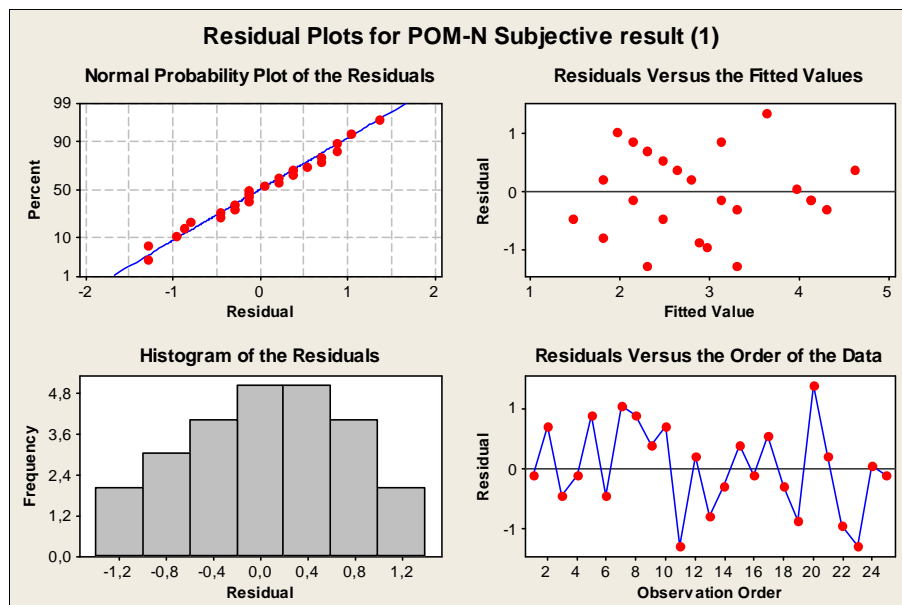
Obr. 65. Rozdělení a histogram reziduů v hodnocení pevnosti - POM

Ani u závislosti na pevnosti spoje (Obr. 64.) nelze jednoznačně určit více faktorů, které by nám svařovací proces pro materiál POM-neplněný přímo ovlivňovali. Přídržná síla P (Force P) jako jediná překonala mez významnosti a dá se říct, že má vliv na kvalitu svařového spoje.

c) Závislost významnosti vstupujících faktorů na subjektivním hodnocení



Obr. 66. Paretův diagram důležitosti vstupních faktorů na subjekt. hodn. - POM



Obr. 67. Rozdělení a histogram reziduí v hodnocení subjekt. - POM

U subjektivního hodnocení (Obr. 66.) se tak, jako u předchozího materiálu dostala přes hranici významnosti pouze svařovací dráha (Welding way). Těsně pod její hranicí zůstaly obě síly (F2 a P) a výkon laseru (Laser power). Opět tak nelze s jistotou určit více jak jeden signifikantní faktor.

Jednoznačnost významnosti jednotlivých parametrů (faktorů) je u materiálu POM snad ještě hůře čitelná než u PA66. Paterův diagram pro těsnost opět neukázal žádný jasný výsledek, a proto lze brát tento výstup pouze jako orientační.

Mezi faktory, které ovlivňují svařovací proces, byly s jistotou zařazeny přídržná síla (Force P) a svařovací dráha (Welding way), jelikož obě překonaly stanovenou hranici významnosti, i když každá v jiné závislosti. Stejně jako u materiálu PA66 k nim byla přiřazena síla F2 (Force F2), rychlost paprsku (Speed) a výkon laseru (Laser power). Zkušenost s technologií laserového svařování určila, že tyto parametry, i když nebyly Plackett-Burmanovým testem určeny jako signifikantní, mají výrazný vliv na celý proces svařování, což bylo ověřeno v další části experimentu.

Provedením Plackett-Burmanova testu byl splněn požadavek na stanovení významnosti jednotlivých parametrů (faktorů) ovlivňujících proces. Pro oba materiály byl celkový počet faktorů zredukován z 8 na 5.

Tímto postupem v další části experimentu snáze získáme optimální nastavení parametrů při menším počtu vzorků. Jako zásadní faktory ovlivňující těsnost, pevnost i subjektivní hodnocení spoje budeme u obou materiálů dále variovat tyto parametry:

- 1 - výkon laseru
- 2 - svařovací dráhu
- 3 - rychlost paprsku
- 4 - sílu F2
- 5 - přídržnou sílu P



## 10.2 Design of Experiment

Tento experiment zjistí hlavní trendy závislosti odezvy na vstupujících faktorech a to včetně jejich kombinace. Počet pokusů je generován vztahem  $2^k$ , kde  $k$  je počet vstupujících faktorů, dále pak center pointy a opakováním. Maximální počet faktorů může být 7, ale vzhledem k následnému velkému počtu pokusů je optimální počet 3 až 4. Právě proto byla provedena redukce vstupujících parametrů Plackett-Burmanovým testem. [27]

### 10.2.1 Naplánování DoE

Naplánování tohoto experimentu bylo provedeno taktéž ve statistickém softwaru MiniTab 15 a z výsledků Plackett-Burmanova testu bylo pro oba materiály určeno k variování 5 vstupujících faktorů, tzn. počet svařovací variant se odvíjel od vztahu  $2^5 = 32$ . Z důvodu požadavku na snížení počtu svařovaných dílů bylo určeno, že se bude tvořit neúplný dvouúrovňový faktorový design, ale poloviční. Tento poloviční design je schopen i s menším počtem svařovacích variant vyhodnotit odpovídající výsledky.

Každému parametru (vstupujícímu faktoru) byla přiřazena maximální a minimální hodnota s ohledem na daný typ materiálu (Tab. 7. a Tab. 8.). Ze zkušeností se svařováním dílů pro Plackett-Burmanův test byly některé meze upraveny, aby se rozšířil rozsah zkoumané oblasti. Jednalo se hlavně o maximální rychlost paprsku, které byla u obou materiálů zvýšena z 10 m/s na 12 m/s a minimální rychlost z 1,5 m/s na 2 m/s. Dále se měnil rozsah výkonu laseru u POM, kdy minimální hranice byla snížena ze 100 W na 80 W a maximální zvýšena ze 160 W na 250W. Upraven byl také rozsah síly F2, kdy u POM byla upravena minimální hodnota ze 125 N na 100 N a u PA66 byla zvýšena naopak maximální hodnota z 375 N na 400 N.

Tab. 7. Hranice parametrů pro materiál PA66-plněný (DoE)

Parametr	Minimum	Maximum	Jednotka
Výkon (Laser power)	150	400	[W]
Svařovací dráha (Welding way)	0,2	0,7	[mm]
Rychlost (Speed)	2	12	[m/s]
Síla F2 (Force F2)	125	400	[N]
Přídržná síla P (Force P)	125	375	[N]

Tab. 8. Hranice parametrů pro materiál POM-neplněný (DoE)

Parametr	Minimum	Maximum	Jednotka
Výkon (Laser power)	80	250	[W]
Svařovací dráha (Welding way)	0,2	0,7	[mm]
Rychlost (Speed)	2	12	[m/s]
Síla F2 (Force F2)	100	375	[N]
Přídržná síla P (Force P)	125	375	[N]

Plackett-Burmanovým testem vyloučené parametry a jejich pevné hodnoty jsou uvedeny v tabulce (Tab. 9.)

Tab. 9. Pevné hodnoty parametrů pro oba materiály (DoE)

Parametr	Pevná hodnota	Jednotka
Síla F1 (Force F1)	125	[N]
Doba přepnutí (Switch time F1 to F2)	0,1	[s]
Doba chlazení (Cooling time)	1	[s]

V prvotním naplánování DoE byla u obou materiálů upravena ještě maximální hodnota parametru svařovací dráhy z 0,7 mm na 0,8 mm. Avšak po prvních svařovacích pokusech nebylo dosaženo požadované dráhy a tudíž nebyl proces dokončen. Důvodem byla kombinace malého výkonu, velké dráhy a nízké síly F2. Následovalo tak přeplánování DoE.

Ostatní podmínky, které požaduje software MiniTab, byly zvoleny takto:

- bloky – 2 (v jednom boku musí být obsaženy pokusy prováděné za stejných podmínek [27])
- center point – 2 (důležité pro zachycení křivky průběhu odezvy v závislosti na některém faktoru [27])
- opakování – 2 (opakují se pro všechny kombinace stanovených faktorů, účelem je zvýšit přesnost výsledků [27])

V příloze P XI a P XII jsou uvedeny vygenerované tabulky DoE pro oba materiály. Každá obsahuje 34 svařovacích kombinací vytvořených z okrajových hodnot parametrů a center pointů.

### 10.2.2 Měření výstupních veličin

Pro tuto fázi experimentu byly opět určeny jako hlavní měřené výstupní odezvy hodnoty těsnosti (Leakage air) a pevnosti spoje (Burst pressure). Taktéž bylo zavedeno subjektivní hodnocení (Subjective result) dle stejné hodnotící stupnice jako u Plackett-Burmanova testu. Jelikož se ale očekávalo, že hodnoty těsnosti opět neukážou žádný jasný výsledek, byla ještě zařazena odezva času svařování (Time welding). Hodnota této výstupní odezvy může v pozdějším zařazení technologie do sériové výroby určovat takt linky.

Výsledky měření všech tří výstupních sledovaných veličin pro oba materiály jsou uvedeny v tabulce (Tab. 10.)

Tab. 10. Výsledky měření (DoE)

Pořadí	PA66 - plněný			POM - neplněný		
	Leakage air [cm <sup>3</sup> /min]	Burst pressure [bar]	Subjective result [1]	Leakage air [cm <sup>3</sup> /min]	Burst pressure [bar]	Subjective result [1]
1	0,15	30,3	4	0,02	14,4	3
2	0,13	27,7	4	0,00	21,1	2
3	0,16	20,2	4	0,03	22,2	3
4	0,27	27,2	5	0,02	21,5	2
5	0,07	27,9	5	0,01	28,8	3
6	0,07	32,5	1	0,03	17,7	2
7	0,06	24,3	4	0,06	21,7	5
8	0,01	27,4	2	0,00	22,2	1
9	0,16	21,9	4	0,00	16,2	2
10	0,06	25,6	3	0,00	20,8	2
11	0,07	25,5	5	0,03	20,3	1
12	0,03	20,9	4	0,02	19,2	2
13	0,07	28,7	1	0,01	17,5	4
14	0,08	29,4	4	10,00	0,0	4
15	0,10	25,8	5	10,00	0,0	5
16	0,14	26,6	2	0,00	9,0	1
17	0,11	26,3	4	0,00	24,8	4
18	0,14	30,7	2	0,02	15,7	2
19	0,28	23,5	4	0,00	23,1	3
20	0,29	28,4	4	10,00	0,0	5
21	0,11	21,9	4	0,05	26,7	2
22	0,10	29,5	4	0,05	19,2	4
23	0,13	21,3	3	0,04	15,8	4
24	0,12	27,2	3	0,00	26,1	4
25	0,09	24,4	4	0,02	9,9	4
26	0,10	25,4	3	0,02	24,2	3
27	0,10	29,8	4	0,03	24,4	3
28	0,24	27,8	2	0,02	18,2	3

29	0,08	27,9	1	0,02	19,9	4
30	0,28	29,6	3	0,04	21,2	3
31	0,08	29,5	5	0,00	17,9	4
32	0,08	20,7	4	0,06	18,5	3
33	0,18	27,6	5	10,00	0,0	5
34	0,23	21,8	4	0,14	18,6	4

Hodnoty svařovacích časů (Time welding) jsou pro oba materiály uvedeny v příloze P XIII.

### 10.2.3 Vyhodnocení

Vyhodnocení DoE a následná optimalizace svařovacích parametrů byla opět provedena v softwaru MiniTab 15.

Program vynesl pro každý materiál do grafů Paretovu analýzu významnosti jednotlivých výstupních odezev v závislosti na vstupních parametrech (faktorech) a jejich vzájemné kombinace. Taktéž byly tak jako u Plackett-Burmanova testu zobrazeny křivky normálního rozdělení a histogram reziduí ukazující míru správnosti postupu provedeného testu.

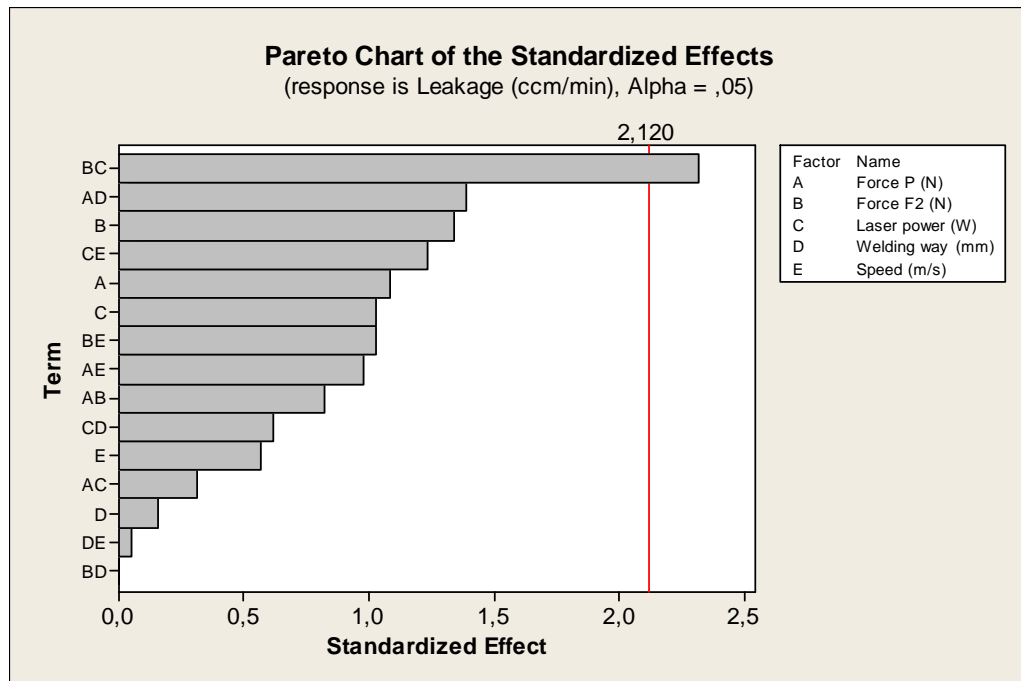
Ze získaných grafů lze tvrdit, že z měřených výstupních veličin můžeme brát v úvahu pouze závislosti na pevnosti spoje a na svařovacím času. Ostatní, tak jako u Plackett-Burmanova testu, neprokázaly dostatečně kvalitní výsledky, což je patrné i z jejich normálního rozložení a histogramů. Je proto zbytečné pro tyto dva výstupy optimalizovat vstupní parametry.

U těsnosti se naměřené hodnoty pohybovaly v tolerancích měřicího zařízení a např. u PA66 neodhalily žádný netěsný díl. Lze tak tvrdit, že pro plněný PA66 technologie laserového svařování vyrábí za téměř jakýchkoliv podmínek těsné kusy. U materiálu POM-neplněný zařízení zaregistrovalo velkou netěsnost ve čtyřech případech. Jednalo se většinou o kombinaci malé svařovací dráhy a nízkého výkonu.

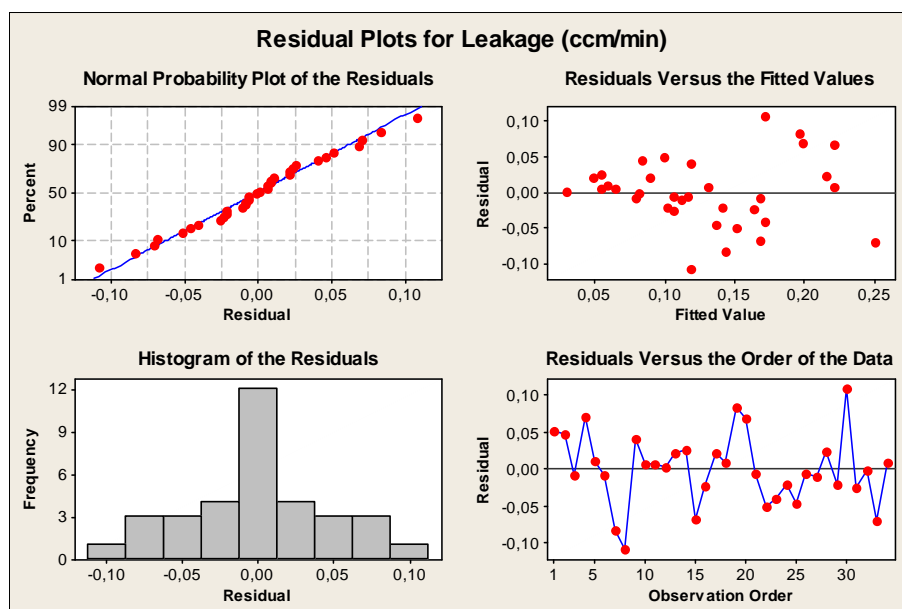
Samotná optimalizace vstupních parametrů byla provedena v softwaru MiniTab 15 pomocí nástroje Response Optimizer. Faktory byly optimalizovány vůči dvěma odezvám, na které mají vstupní parametry dle následujících grafů největší vliv.

## I. PA66 – plněný

## a) Závislost významnosti vstupujících faktorů na těsnosti spoje



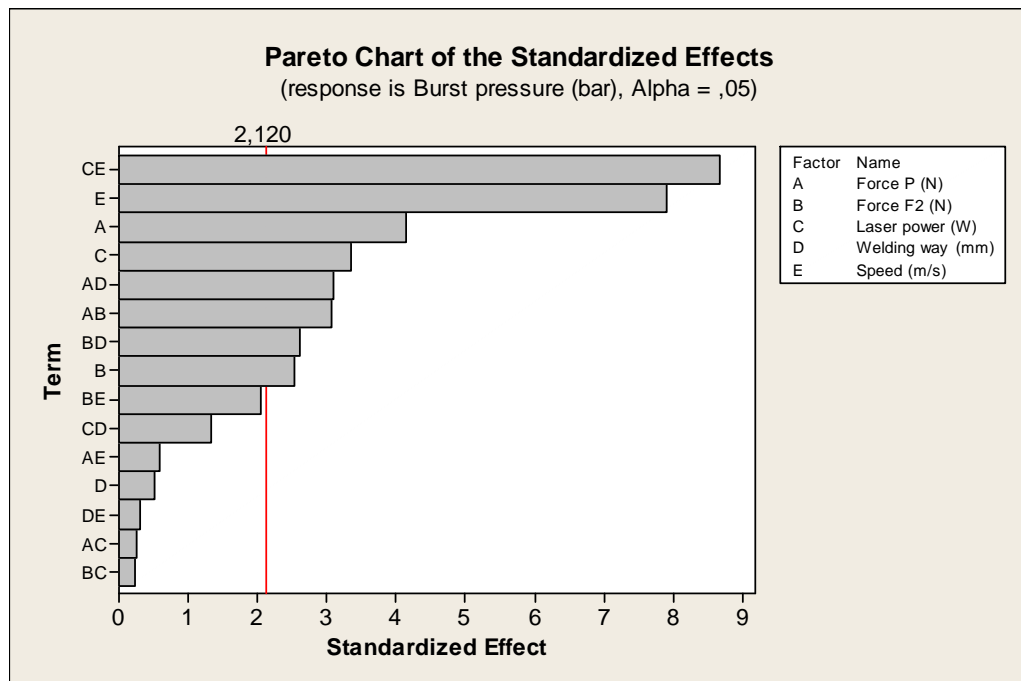
Obr. 68. Paretův diagram důležitosti vstupních faktorů na těsnosti - PA66



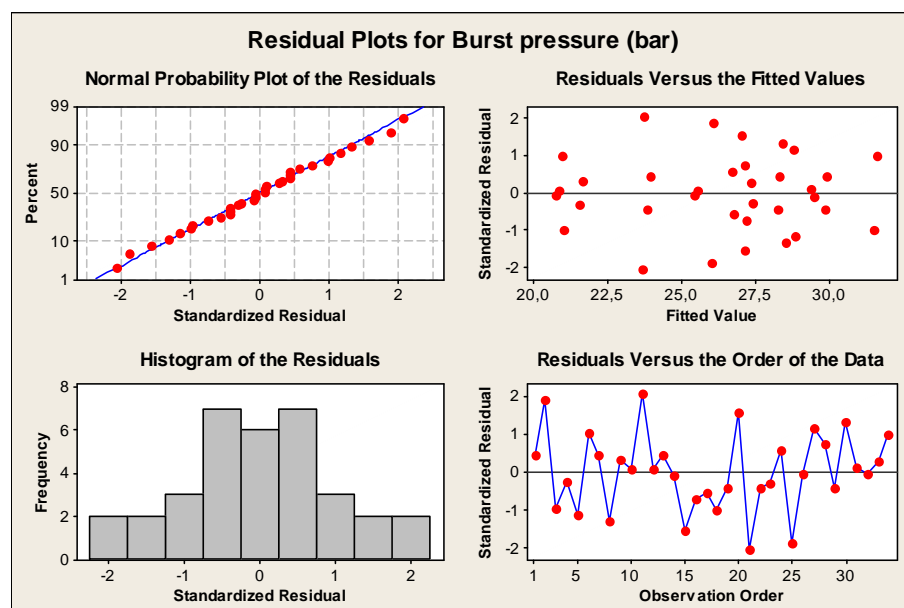
Obr. 69. Rozdělení a histogram reziduí v hodnocení těsnosti - PA66

Z prvního grafu Paretovy analýzy (Obr. 68.) pro těsnost u PA66 je podle očekávání vidět, že žádný ze vstupních faktorů nemá samotný vliv na svařovací proces. Za povšimnutí stojí pouze kombinace vlivu výkonu laseru a síly F2.

b) Závislost významnosti vstupujících faktorů na pevnosti spoje



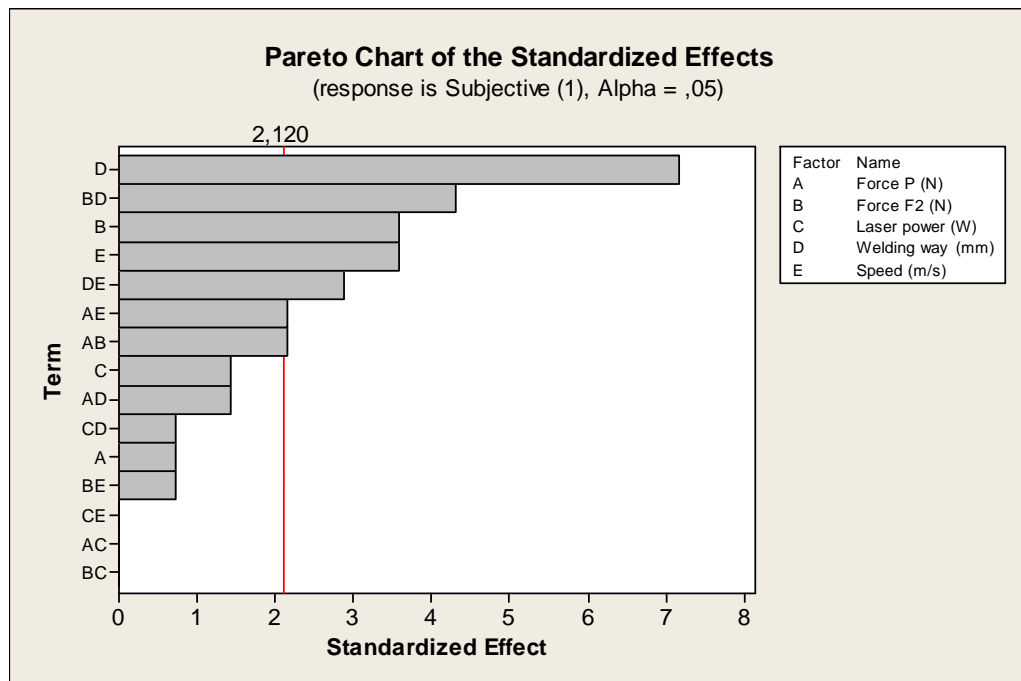
Obr. 70. Paretův diagram důležitosti vstupních faktorů na pevnosti - PA66



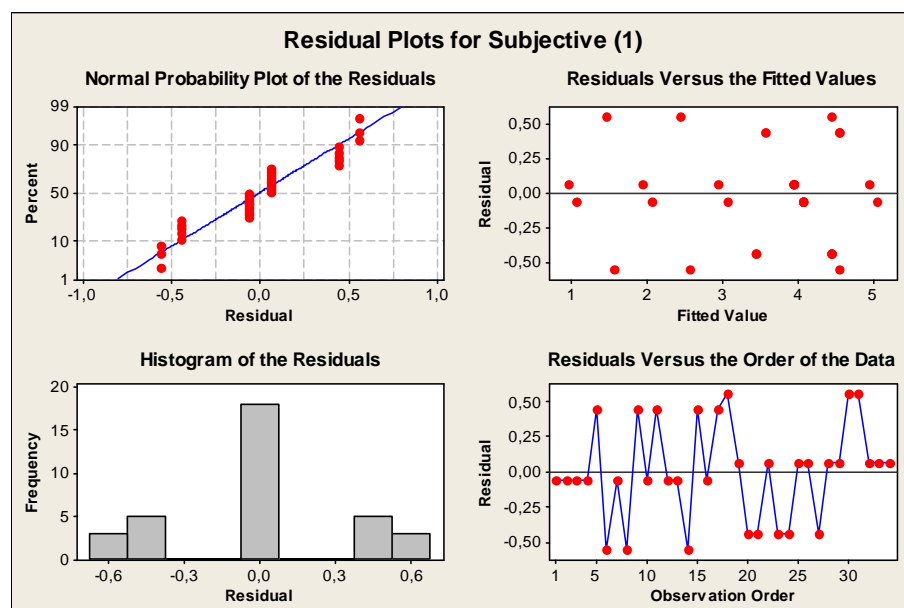
Obr. 71. Rozdělení a histogram reziduí v hodnocení pevnosti - PA66

Závislost na pevnosti spoje (Obr. 70.) ukazuje markantní vliv čtyř z pěti vstupních faktorů. Nejvíce však ovlivňuje pevnost spoje kombinace výkonu laseru a rychlosti paprsku. Překvapivé je, že parametr svařovací dráhy i její kombinace s výkonem laseru není vůči pevnosti spoje absolutně signifikantní.

c) Závislost významnosti vstupujících faktorů na subjektivním hodnocení



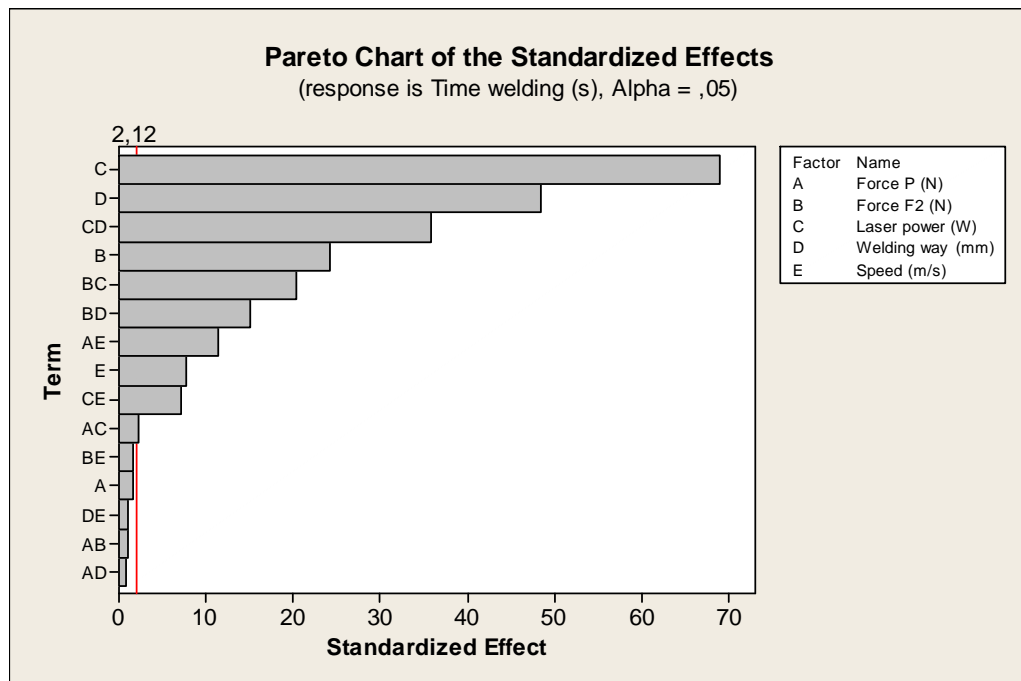
Obr. 72. Paretův diagram důležitosti vstupních faktorů na subjekt. hodn. - PA66



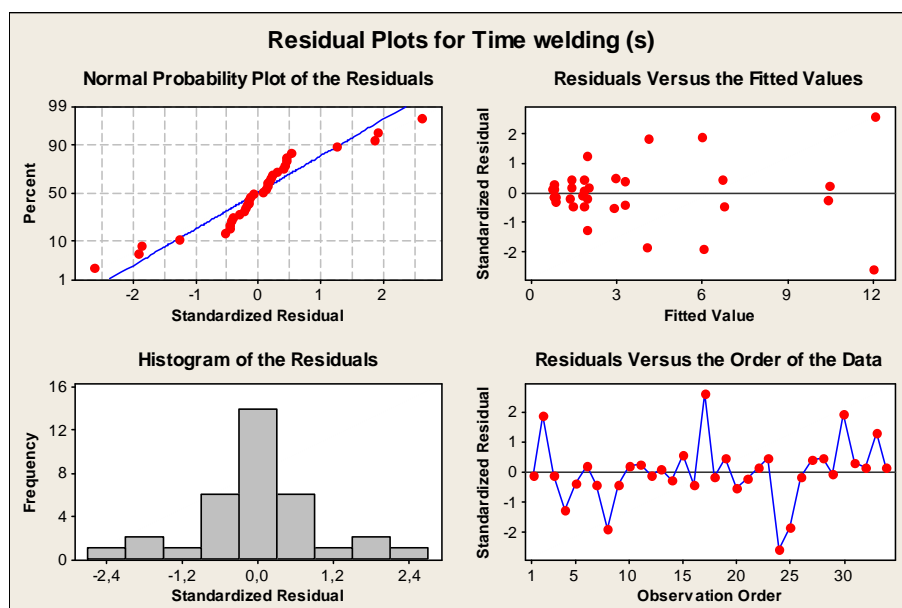
Obr. 73. Rozdělení a histogram reziduí v hodnocení subjektiv. - PA66

Zde je vidět jasná významnost faktoru svařovací dráhy samotné a její kombinace se silou F2. Zanedbatelný není ani vliv samotné síly F2 nebo rychlosti oběhu paprsku a její následná kombinace se svařovací dráhou. Ostatní faktory jsou pro zdánlivě nepřesné subjektivní hodnocení bezvýznamné.

d) Závislost významnosti vstupujících faktorů na svařovacím času



Obr. 74. Paretův diagram důležitosti vstupních faktorů na svař. času. - PA66



Obr. 75. Rozdělení a histogram reziduí v hodnocení svař. času - PA66

U nově zobrazeného grafu Paretovy analýzy pro svařovací čas (Obr. 74.) je vidět závislost téměř všech vstupujících faktorů. Pouze u přídržné síly P a většiny jejich kombinací je významnost nízká. Tento jev se dal očekávat, protože síla působí pouze po dobu chlazení (1s), a proto na výsledný svařovací čas nemá vliv. Velká významnost výkonu je logická.



Celkově lze říci, že prvotní rozhodnutí optimalizovat parametry pouze na pevnost spoje a svařovací čas grafy potvrdily. Pro hodnocení pevnosti spoje (Burst pressure) jsou tak opět nejdůležitější faktory nastavení výkonu laseru (Laser power), rychlosti oběhu paprsku (Speed) a obou sil (Force F2 a Force P). Méně významná se zdá být svařovací dráha (Welding way), která má vliv pouze v kombinaci s jednou ze sil. Vůči svařovacímu času (Time welding) jsou signifikantní téměř všechny vstupní parametry (faktorů).

Jelikož se jedná o optimalizaci parametrů prováděných na zkušebních tělískách, které nemají přesně definovány meze jednotlivých výstupních veličin, byly dle zkušeností určeny okrajové podmínky pro obě odezvy. U pevnosti spoje je požadována hodnota tlaku minimálně 28 až 30 bar a svařovací čas, který ovlivňuje takt linky, je stanoven na 3 až 5 s.

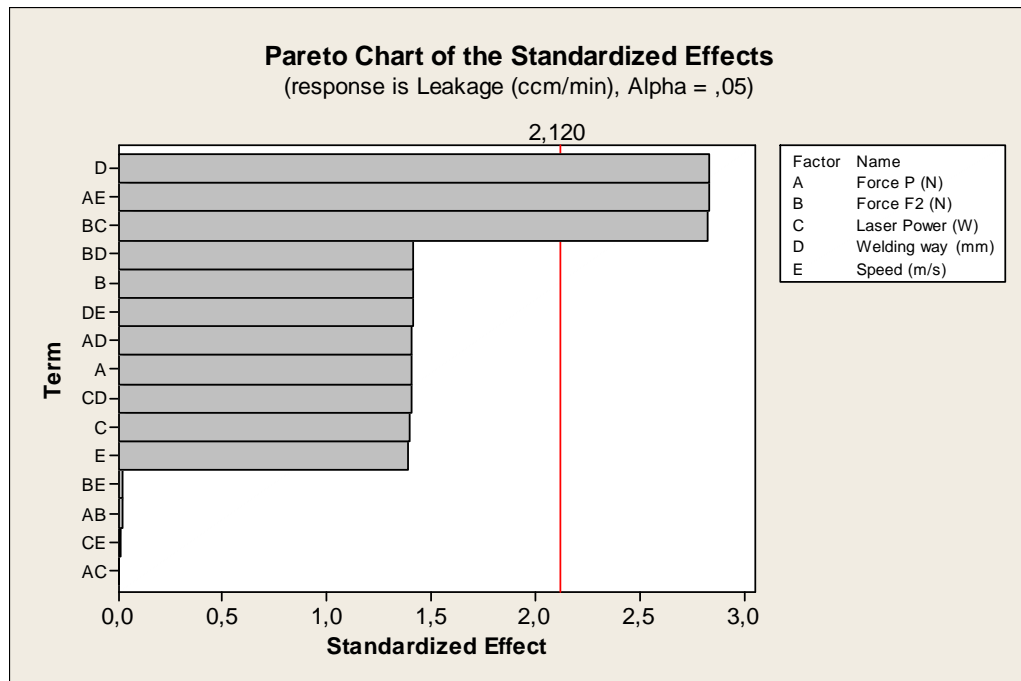
S těmito požadavky byly pomocí nástroje Response Optimizer v softwaru MiniTab 15 optimalizovány vstupní parametry (faktory). Na obrázku (Obr. 76.) můžeme vidět hodnoty ideálních parametrů, které splňují předem daná kritéria. Na levé straně můžeme vidět veličinu  $y$ , která představuje aktuální hodnotu požadované výstupní odezvy. Koeficient  $d$  charakterizuje úspěšnost splnění požadavku ( $1 = 100\%$ ) jednotlivé odezvy, hodnota  $D$  pak určuje celkové splnění optimalizace. Z křivek je patrné, že pro tento materiál existuje více kombinací parametrů, které vedou k nalezení optima. Záleží pouze na okrajových podmínkách, které si budoucí výroba zadá. Zajímavostí je velký vliv výkonu laseru jak na pevnost tak i na svařovací čas. Z toho plyne, že materiál PA66 je nutné svařovat při nízkých výkonech laseru. Ostatní parametry jsou nastaveny na téměř střední hodnotu a s přehledem splňují dané okrajové podmínky.

Optimal		Force P	Force F2	Laser po	Welding	Speed (m
D	Hi	375,0	400,0	400,0	0,70	12,0
0,95243	Cur	[260,0]	[300,0]	[150,0]	[0,40]	[2,60]
	Lo	125,0	125,0	150,0	0,20	2,0
Burst pr Maximum $y = 29,3198$ $d = 0,86397$						
Time wel Minimum $y = 2,7698$ $d = 1,0000$						

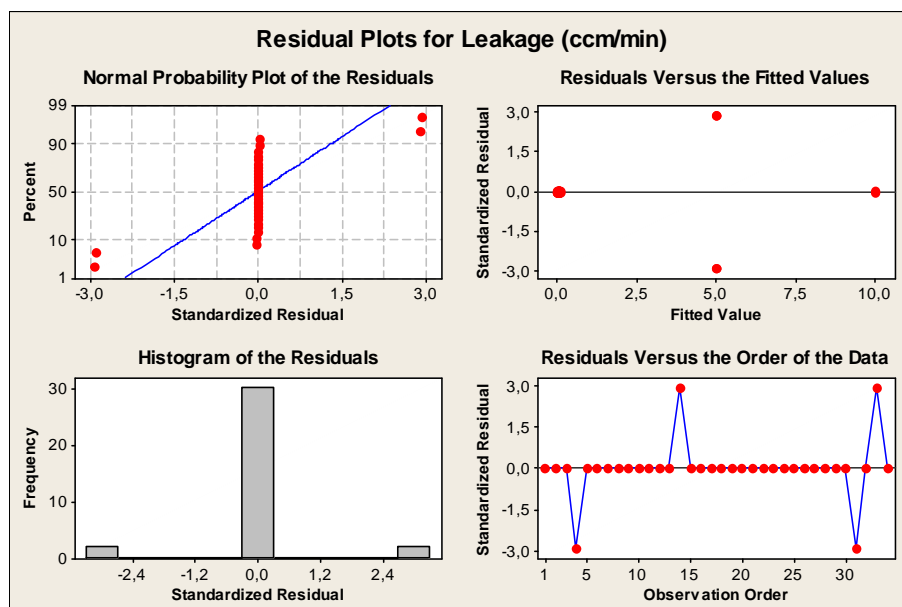
Obr. 76. Optimalizace parametrů pro PA66-plněný

## II. POM – neplněný

## a) Závislost významnosti vstupujících faktorů na těsnosti spoje



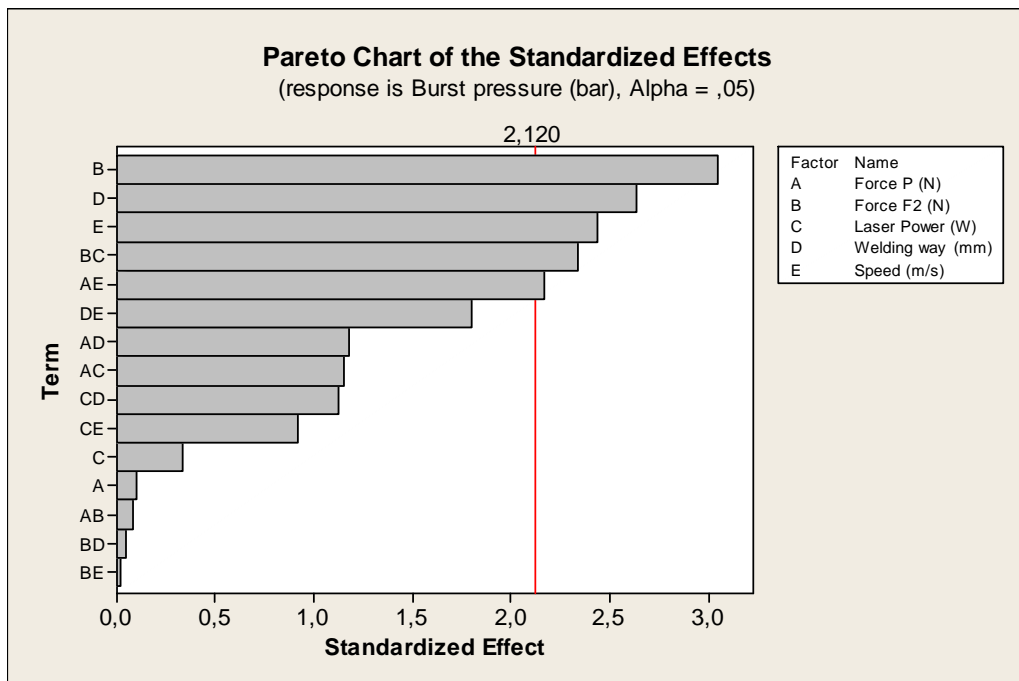
Obr. 77. Paretův diagram důležitosti vstupních faktorů na těsnosti - POM



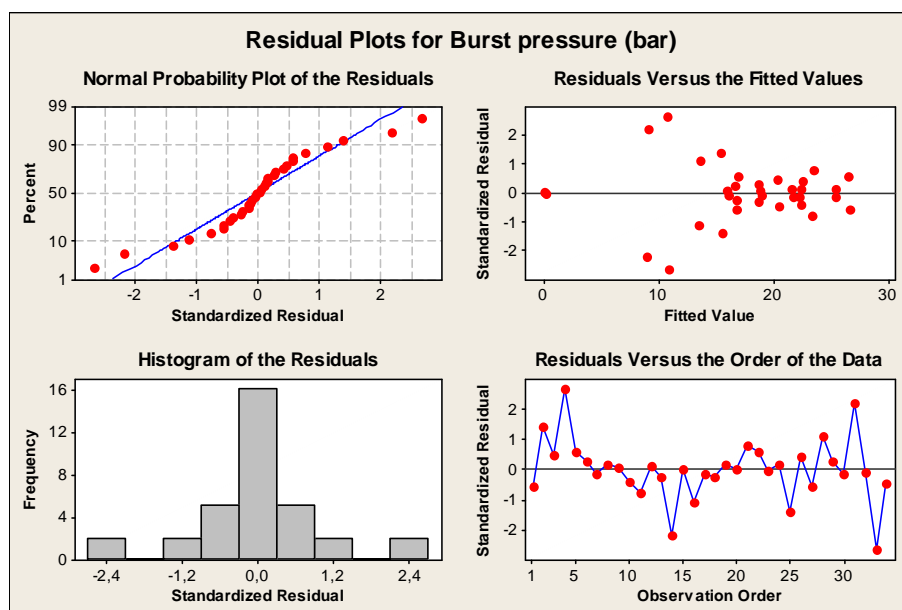
Obr. 78. Rozdělení a histogram reziduí v hodnocení těsnosti - POM

Graf Paretovy analýzy u závislosti na těsnosti spoje (Obr. 77.) ukazuje jednoznačnou významnost faktoru svařovací dráhy a některých kombinací. Z histogramu a normálního rozložení (Obr. 78.) je vidět, že výsledky těsnosti nemůžeme brát jako objektivní.

b) Závislost významnosti vstupujících faktorů na pevnosti spoje



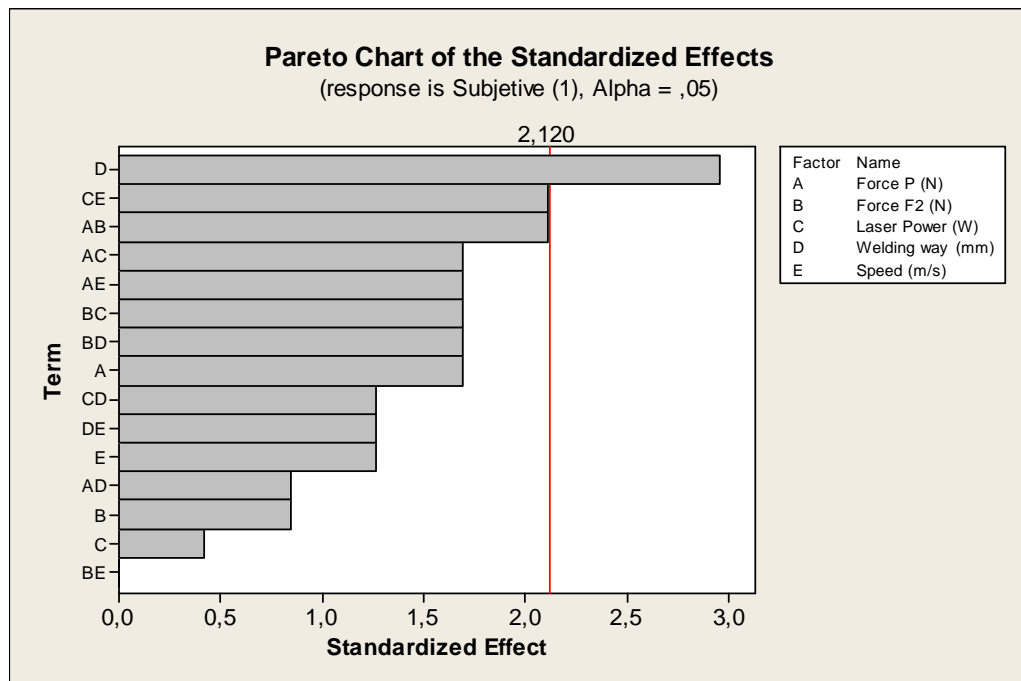
Obr. 79. Paretův diagram důležitosti vstupních faktorů na pevnosti - POM



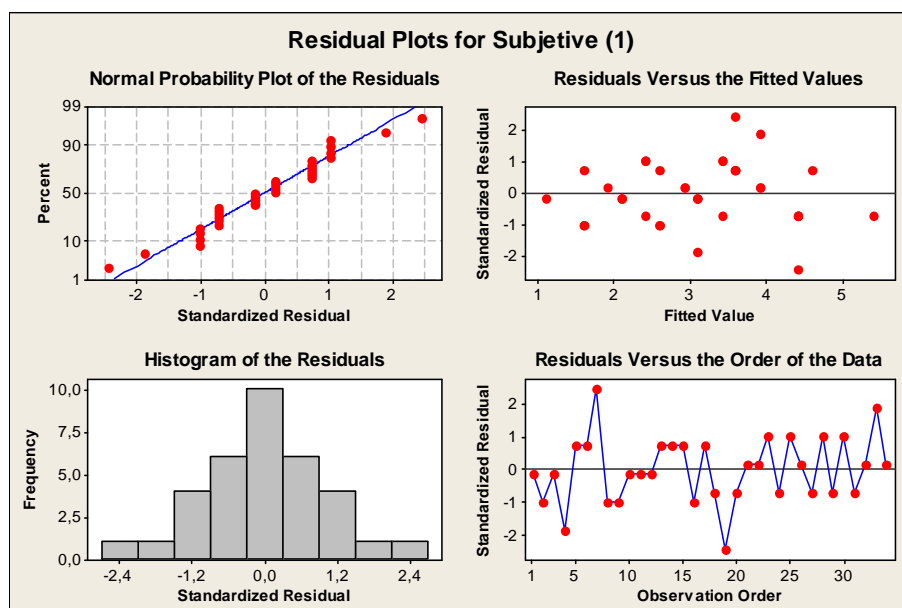
Obr. 80. Rozdělení a histogram reziduí v hodnocení pevnosti - POM

Z grafu (Obr. 79.) je u tří vstupních faktorů vidět jasné překročení hranice významnosti. Jedná se o sílu F2, svařovací dráhu a rychlost oběhu paprsku. Zajímavý je téměř nulový vliv výkonu laseru a přídržné síly P. Při srovnání s materiálem PA66 právě tyto dva parametry pevnost spoje nejvíce ovlivňovaly.

c) Závislost významnosti vstupujících faktorů na subjektivním hodnocení



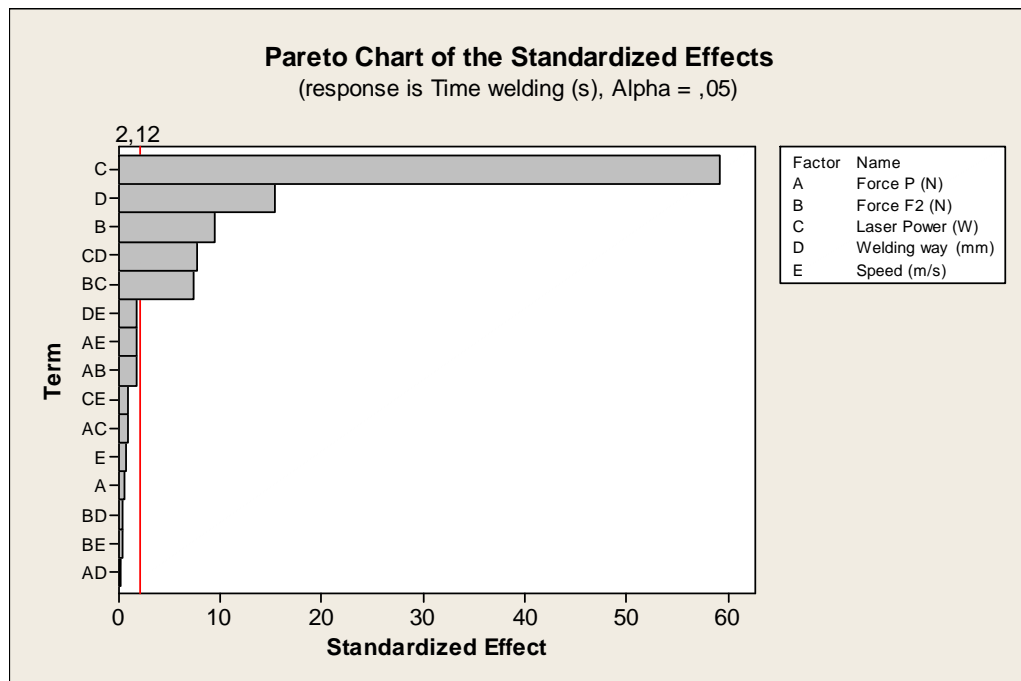
Obr. 81. Paretův diagram důležitosti vstupních faktorů na subjekt. hodn. - POM



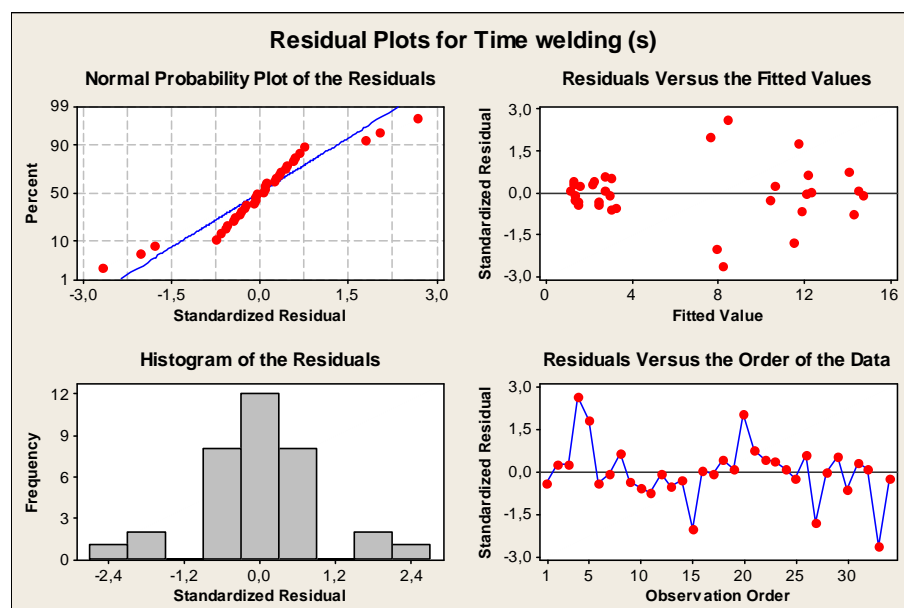
Obr. 82. Rozdělení a histogram reziduí v hodnocení subjektiv. - POM

Paretova analýza vstupních faktorů v závislosti na méně přesném subjektivním hodnocení ukazuje pouze významnost svařovací dráhy a možný vliv kombinace některých parametrů, které jsou těsně na hranici významnosti. Avšak už dříve bylo rozhodnuto o tom, že tato závislost bude pouze orientační.

d) Závislost významnosti vstupujících faktorů na svařovacím času



Obr. 83. Paretův diagram důležitosti vstupních faktorů na svař. času - POM



Obr. 84. Rozdělení a histogram reziduí v hodnocení svař. času - POM

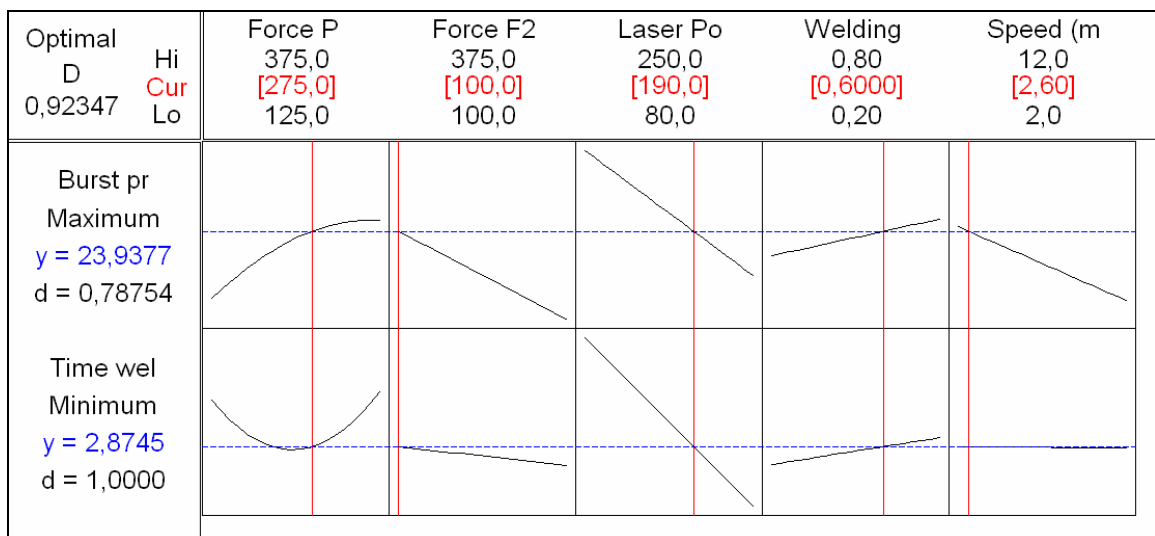
Tak jako u materiálu PA66 tak i zde má většina vstupních faktorů, v čele s výkonem laseru, velký vliv na svařovací čas. Pouze rychlost oběhu paprsku, přítlačná síla a jejich kombinace jsou těsně pod hranicí významnosti.

Opět lze tvrdit, že grafy potvrdily rozhodnutí optimalizovat parametry pouze v závislosti na pevnost spoje a svařovací čas.

Tak jako u materiálu PA66 ani zde u POM nebyly přesně definovány meze jednotlivých výstupních veličin. Jelikož se jedná o zcela odlišný materiál, který nedosahuje takové pevnosti spoje jako PA66, musela být hranice snížena na 18 až 25 bar. Svařovací čas, který ovlivňuje takt linky, je stanoven opět na 3 až 5 s.

Pomocí nástroje Response Optimizer v softwaru MiniTab 15 byly optimalizovány vstupní parametry (faktory) vůči pevnosti spoje a svařovacímu času. Na obrázku (Obr. 85.) lze vidět hodnoty ideálních parametrů, které splňují předem daná kritéria. Na levé straně můžeme vidět veličinu  $y$ , která představuje aktuální hodnotu požadované výstupní odezvy. Koeficient  $d$  charakterizuje úspěšnost splnění požadavku ( $1,0 = 100\%$ ) jednotlivé odezvy, hodnota  $D$  pak určuje celkové splnění optimalizace.

Pro tento materiál taktéž existuje více kombinací parametrů, které vedou k nalezení optima. Záleží pouze na okrajových podmínkách, které si budoucí výroba zadá. Pokud budou extrémně odlišné, stačí jen v softwaru pohybem po křivkách nalézt další optimální parametry a stroj přednastavit. Lze zde pozorovat velký vliv síly F2 (Force F2), tak jak tomu prozrazovaly grafy Paretovy analýzy.



Obr. 85. Optimalizace parametrů pro POM-neplněný

### 10.3 Ověření způsobilosti stroje

K ověření námi stanovených optimálních parametrů byla využita krátkodobá analýza způsobilosti stroje. Cílem je odkrýt vlivy na výrobní proces způsobené výhradně strojem.

#### 10.3.1 Parametry a postup

U analýzy způsobilost stroje bylo nutné svařit 50 vzorků na parametrech, které byly v předchozí kapitole optimalizovány:

Tab. 11. Optimalizované parametry pro oba materiály

Parametr	PA66	POM	Jednotka
Výkon (Laser power)	150	190	[W]
Svařovací dráha (Welding way)	0,4	0,6	[mm]
Rychlost (Speed)	2,6	2,6	[m/s]
Síla F2 (Force F2)	300	100	[N]
Přídržná síla P (Force P)	260	275	[N]
Síla F1 (Force F1)	125		[N]
Doba přepnutí (Switch time F1 to F2)	0,1		[s]
Doba chlazení (Cooling time)	1		[s]

#### Postup

Z kapacitních důvodů se provádí tzv. zkrácená zkouška, kdy z 50 svařených dílů jsou vyhodnoceny pouze sudé díly. Proces je způsobilý tehdy, pokud je u těchto 25ks vypočítaný index způsobilosti  $C_{mk} \geq 2,0$ . Při nesplnění této podmínky a zároveň je-li  $C_{mk}$  v rozsahu 1,67 až 2,0 je vyhodnoceno zbylých 25ks a index způsobilosti pak vypočítán ze všech 50-ti dílů. V tomto případě je proces způsobilý, pokud je  $C_{mk} \geq 1,67$ .

#### 10.3.2 Měření výstupních veličin

Jako měřené výstupní veličiny byly opět vybrány výsledky z měření těsnosti (Leakage air) a pevnosti spoje (Burst pressure). Tentokrát se již nehodnotilo subjektivně a v potaz nebyl také brán svařovací čas.

Výsledky měření obou výstupních veličin pro oba materiály jsou uvedeny v tabulce (Tab. 12.).

Tab. 12. Výsledky měření ( $C_{mk}$ )

Pořadí	PA66 - plněný		POM - neplněný	
	Leakage air [cm <sup>3</sup> /min]	Burst pressure [bar]	Leakage air [cm <sup>3</sup> /min]	Burst pressure [bar]
1	0,08	28,4	0,15	21,5
3	0,09	30,5	0,16	18,7
5	0,07	29,7	0,14	19,1
7	0,06	29,0	0,10	22,5
9	0,00	29,7	0,12	20,7
11	0,06	29,1	0,09	19,1
13	0,05	30,1	0,10	20,2
15	0,09	30,0	0,12	19,9
17	0,06	29,6	0,12	23,5
19	0,02	28,9	0,10	21,8
21	0,03	29,5	0,09	22,9
23	0,05	28,7	0,16	21,4
25	0,08	29,0	0,13	20,8
27	0,05	30,0	0,10	19,2
29	0,07	30,3	0,09	22,7
31	0,07	29,8	0,08	23,1
33	0,05	30,5	0,13	20,4
35	0,05	28,0	0,12	19,9
37	0,02	30,6	0,16	20,4
39	0,03	29,5	0,07	22,6
41	0,05	29,6	0,11	22,2
43	0,04	30,2	0,13	22,2
45	0,00	30,7	0,15	21,6
47	0,06	31,1	0,12	22,5
49	0,04	30,8	0,10	18,5

### 10.3.3 Vyhodnocení

Naměřená data byla vyhodnocena v softwaru QS STAT ME 5. Způsobilost u obou materiálů se ověřovala v závislosti na těsnosti a pevnosti spoje.



## I. PA66 - plněný

## a) Způsobilost stroje vůči těsnosti

Při požadavku maximálního povoleného úniku  $0,50 \text{ cm}^3/\text{min}$  vyhodnotil software index způsobilosti  $C_{mk} = 6,12$ , což splňuje podmínku  $C_{mk} \geq 2,0$  a dokazuje, že stroj je při této horní hranici těsnosti plně způsobilý.

Pokud bychom chtěli znát přesnou hranici, kdy je stroj stále ještě způsobilý, musíme snížit hodnotu maximálního povoleného úniku na  $0,20 \text{ cm}^3/\text{min}$ . Poté program QS STAT ME 5 vyhodnotí index způsobilosti  $C_{mk} = 2,03$ .

U obou případů lze pozorovat normální rozdělení, které je spolu s dalšími grafy uvedeno v přílohách P XIV a P XV.

## b) Způsobilost stroje vůči pevnosti

Zde byl požadavek minimální pevnosti spoje v tlaku stanoven nejprve na 15 bar. Index způsobilosti byl vypočítán na hodnotu  $C_{mk} = 6,24$  a opět splňuje podmínku a dokazuje způsobilost stroje s velkým odstupem.

Pro úplnost byla hranice minimální pevnosti spoje upravena tak, aby stroj byl stále způsobilý a zjistila se tak hranice, kdy je stroj schopen vyrábět v požadovaných tolerancích. Hodnota 25 bar tvoří index způsobilosti  $C_{mk} = 2,00$  a je tak maximální možnou hodnotou tlaku, kdy je možno laserovým svařováním plnit požadavek na pevnost.

Opět se v obou případech jedná o normální rozdělení, které je spolu s dalšími grafy uvedeno v přílohách P XVI a P XVII.

## II. POM - neplněný

## a) Způsobilost stroje vůči těsnosti

U tohoto materiálu se obecně očekávají horší hranice požadavků, než je tomu u PA66. U těsnosti se stanovila pro začátek stejná hodnota jako u předchozího materiálu, tzn. maximální možný únik  $0,50 \text{ cm}^3/\text{min}$ . Software vypočítal index způsobilosti stroje  $C_{mk} = 4,93$ , což je sice nižší než u PA66, ale stále velmi dobře plní podmínku způsobilosti  $C_{mk} \geq 2,0$ .

Abychom získali hraniční hodnotu maximálního úniku, musela být mez upravena na  $0,30 \text{ cm}^3/\text{min}$ . Poté index způsobilosti vyšel  $C_{mk} = 2,35$ , což plně uspokojuje hlavní podmínky této analýzy.

V obou případech nastává normální rozdělení, které je spolu s dalšími grafy uvedeno v přílohách P XVIII a P XIX.

#### b) Způsobilost stroje vůči pevnosti

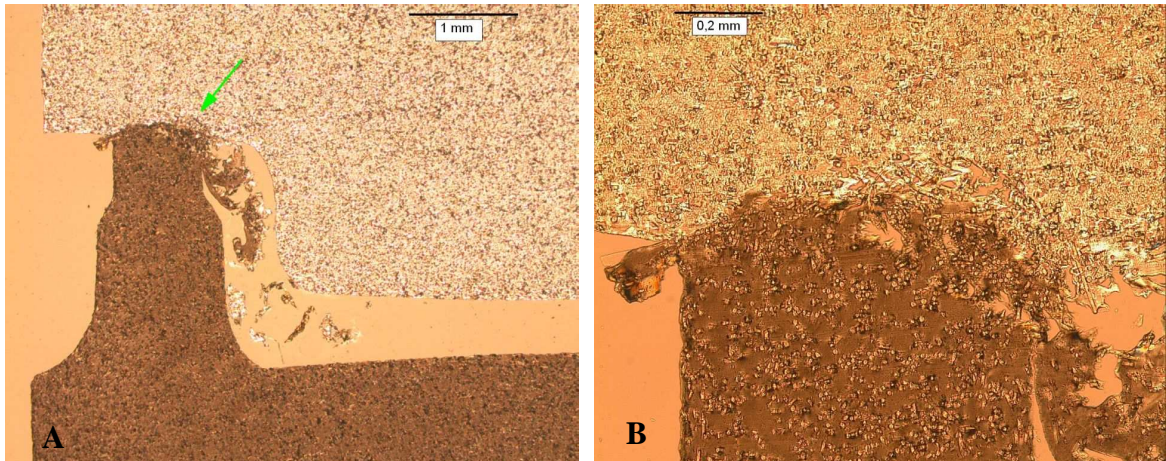
I v tomto případě byla minimální pevnost spoje stanovena nejprve na 15 bar. A dalo se očekávat, že to bude u POM taky hranice nejvyšší. Index způsobilosti byl programem stanoven jako  $C_{mk} = 2,09$  a tudíž byla splněna hlavní podmínka a stroj byl i pro tuto mez pevnosti způsobilý.

V příloze P XX je uveden protokol analýzy způsobilosti vůči pevnosti, kde je kromě všech potřebných grafů i patrná Johnsonova transformace místo normálního rozložení.

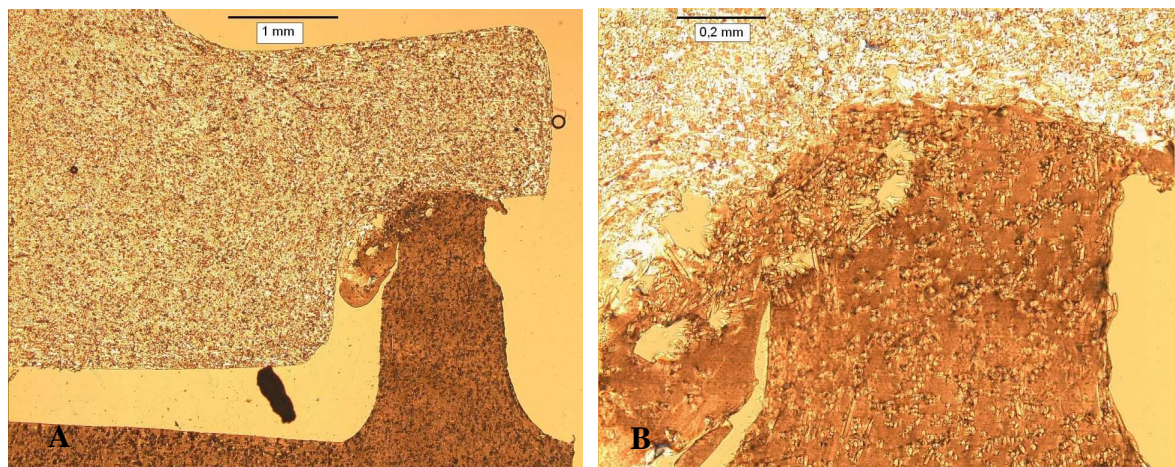
U všech analýz způsobilosti vyšlo  $C_{mk} \geq 2,0$  a tudíž nebyla nutnost vyhodnotit zbývajících 25 dílů s následným přepočtem indexu způsobilosti  $C_{mk}$ .

## 11 HODNOCENÍ MIKROTOMOVÝCH ŘEZŮ

Byla provedena kontrola vnitřní struktury pro výsledný svarový spoj svařený dle optimálních parametrů pro daný proces. K posouzení byla zvolena metoda mikrotomových řezů.



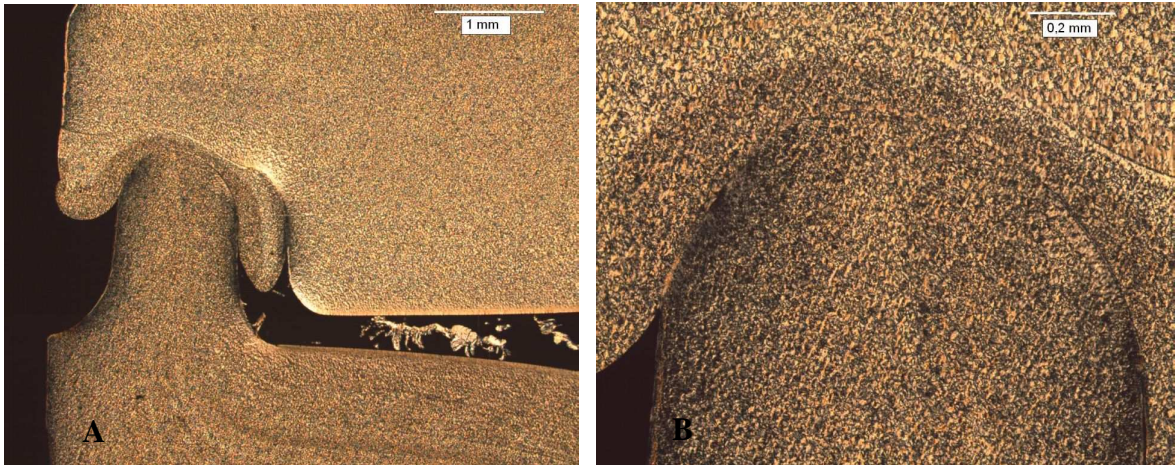
Obr. 86. Mikrotomový řez pravé strany PA66-plněný (A - 25x zvětšený, B - 100x zvětšený)



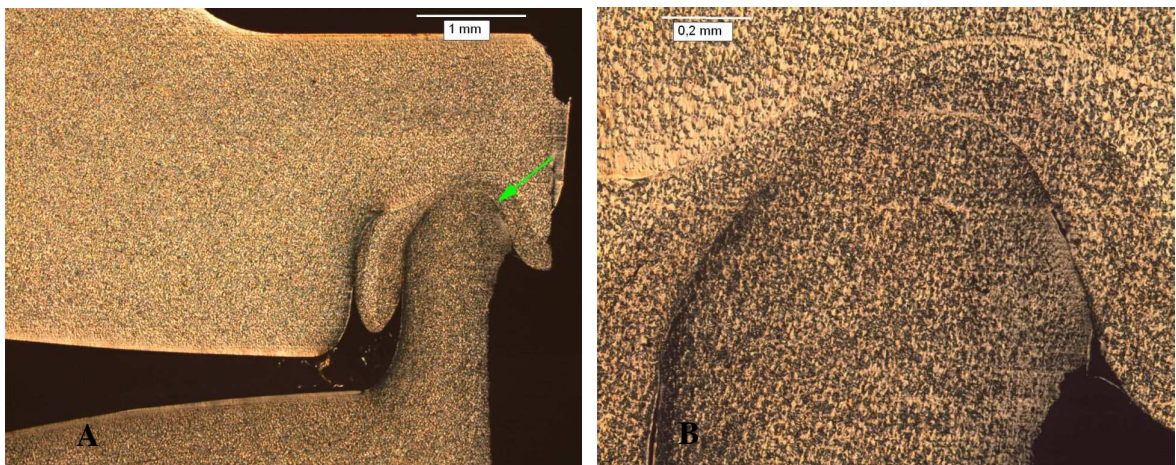
Obr. 87. Mikrotomový řez levé strany PA66-plněný (A - 25x zvětšený, B - 100x zvětšený)

Výsledné obrázky odhalily u plněného materiálu PA66 větší množství lunkrů (Obr. 86., 87.), které mohly být způsobeny samotným svařovacím procesem. Z důvodu velké nasákavosti tohoto materiálu vznikly lunkry (spíše vyvřelinky) působením plynů, které se během prudkého zvyšování teploty při natavování v PA66 vyvíjely a poškodily tak strukturu materiálu. Tato vada způsobuje při následném svařování neúplné protavení celé svařovací kontury a svár tak drží jen na části. Jelikož se ale jedná o plněný materiál s vysokým modulem pevnosti, jsou výsledky pevnosti sváru na velmi dobré úrovni.





Obr. 88. Mikrotomový řez levé strany POM-neplněný (A - 25x zvětšený, B - 100x zvětšený)



Obr. 89. Mikrotomový řez pravé strany POM-neplněný (A - 25x zvětšený, B - 100x zvětšený)

U materiálu POM-neplněný je z obrázků (Obr. 88., 89.) je patrné, že došlo k téměř dokonalému protavení svařovací kontury obou částí (transparentní i absorpční). Oproti materiálu PA66 je zde vidět výrazný přetok na obou stranách od sváru.

Když bychom porovnali oba materiály, tak v dokonalosti protavení určitě vítězí POM. Pokud se ale vezme v potaz pevnost a stabilita výsledného spoje, materiál PA66 je určitě na vyšší úrovni než materiál POM. Tento jev se však dal očekávat, jelikož se jedná o srovnání dvou materiálů, kdy jeden je plněný a druhý ne. Více obrázků mikrotomových řezů je uvedeno v přílohách P XXI a P XXII.

## ZÁVĚR

Tato diplomová práce se snaží shrnout základní poznatky o technologii laserového svařování plastů a následně provést optimalizaci svařovacích parametrů dostupného svařovacího zařízení pro materiály ze skupiny termoplastů.

V teoretické části je obsažena fyzikální podstata laseru, jeho vlastnosti, konstrukce a dělení dle aktivního prostředí. Dále je popsán proces laserového svařování plastů a samotné svařovací zařízení. Zvláštní kapitola je věnována bezpečnosti práce s laserovými zařízeními, jelikož laserový paprsek svými unikátními vlastnostmi představuje i specifické nebezpečí pro lidské zdraví. V dalších kapitolách jsou podrobně popsány metody statistického plánování, ověřování, vyhodnocování a není zde zapomenuto ani na popis zkušebních metod a zvolených materiálů. Většina těchto metod je následně aplikována v praktické části této diplomové práce. Pro praktickou část bylo hlavním cílem stanovit optimální svařovací parametry technologie laserového svařování u materiálů ze skupiny termoplastů. Plněný PA66 a neplněný POM byly zvoleny z kapacitních důvodů společnosti ROBERT BOSCH spol. s r.o., České Budějovice. Dle zavedených postupů v této společnosti a pomocí systematiky Design of Experiment byl naplánován a následně proveden experiment. Meze parametrů byly nastaveny na maximální hranice svařovacího zařízení a tudíž byl procesem zkoumán jeho celkový rozsah. Ve výsledku byly úspěšně optimalizovány svařovací parametry pro oba materiály (viz. Tab. 11.). Provedená krátkodobá analýza způsobilosti stroje potvrdila schopnost zařízení vyrábět svarový spoj u obou materiálů dle stanovených požadavků. Následné srovnání dílů svařených za optimálních podmínek se provedlo metodou mikrotomových řezů. Výsledné obrázky ukázaly u materiálu POM dobré protavení obou částí, transparentní i absorpční. Naopak u PA66 byly objeveny nedostatky ve struktuře, kdy během svařovacího procesu vznikly kolem sváru lunkry. Ze srovnání plněného a neplněného materiálu vyplývá, že lépe protavený materiál není vždy zárukou lepší pevnosti a těsnosti daného svarového spoje - záleží na vlastnostech materiálu (modul pružnosti, apod.). Přestože svár PA66 nebyl strukturně tak dobře spojen jako POM, měl výsledky pevnosti lepší.

Závěrem lze konstatovat, že pro oba materiály je technologie laserového svařování vhodná a její použití závisí pouze na možnostech výrobního závodu a požadavcích zákazníka. Do budoucna je snahou optimalizovat parametry pro ostatní běžně používané termoplasty a pokusit se spolu laserově svařit odlišné materiály (viz. příloha P XXIV).

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] Firemní materiály Robert Bosch, spol. s r. o.
- [2] MLEZIVA, J. *Polymery – výroba, struktura, vlastnosti a použití*. 1st ed. Praha : Sobotáles, 1993.
- [3] SOVA, M., KREBS, J., et al. *Termoplasty v praxi*. Praha : Verlag Dashofer, 2001. Základní dílo včetně VI. aktualizace.
- [4] VESELÝ, K. *Polymery*. Brno : ČSPCH - Česká společnost průmyslové chemie - pobočka , UNIPLAST Brno, 1992.
- [5] ZÁMORSKÝ, Z. *Nauka o polymerech*. Brno : VUT, 1980.
- [6] MAŇKOVÁ,, I. *Progresivní technologie*. Košice : Vienala, 2000.
- [7] BRIMUS, J. *Vliv koncentrované energie laserového paprsku na různé polymerní materiály : diplomová práce*. Zlín : FT UTB, 2007. 180 p.
- [8] ZACHOVALOVÁ, J. *Nadmolekulární struktura POM se zaměřením na fraktografii snímků získaných metodami světelné a elektronové mikroskopie, včetně RTG - prozařování : diplomová práce*. Zlín : FT UTB, 2006. 142 p.
- [9] *Plasty pro strojaře* [online]. [cit. 2009-01-03]. Available from www: <[http://www.fp.tul.cz/kch/texty/Fakulta\\_strojni/Prednasky\\_SF/Plasty\\_pro\\_strojare.doc](http://www.fp.tul.cz/kch/texty/Fakulta_strojni/Prednasky_SF/Plasty_pro_strojare.doc)>
- [10] *HIGH-TECH MATERIÁLY pro nejnáročnější použití* [online]. [cit. 2009-01-03]. Available from www: <<http://www.eppplasty.cz/hitech1.htm>>
- [11] PŘIBÁŇ, T. *Fraktografický rozbor lomových ploch v TOO svarových spojů* [online]. KAT: FPE ZČU v Plzni, 28.6.2008 [cit. 2008-12-15]. Available from www: <<http://www.cws-anb.cz/t.py?t=2&i=250>>
- [12] JANOVSÁ, R.; JEŽKOVÁ, T.; HOUFEK, Z. *Únavové poruchy letadel - řádkovací elektronová mikroskopie* [online]. [cit. 2008-12-15]. Available from www: <<http://fyztyd.fjfi.cvut.cz/2006/cd/prispevky/sbpdf/letadla.pdf>>
- [13] *DOE - Několik otázek a odpovědí o statisticky navrženém experimentu* [online]. [cit. 2008-12-15]. Available from www:

- <<http://www.interquality.cz/INTERN%C3%8DKURZY/DOEInterquality/tabid/79/Default.aspx>>
- [14] *Plánovaný experiment - prezentace* [online]. [cit. 2008-12-17]. Available from www: <[www2.humusoft.cz/www/akce/witkonf06/prispevky/ppt/maros.ppt](http://www2.humusoft.cz/www/akce/witkonf06/prispevky/ppt/maros.ppt)>
- [15] *Polyphthalamide* [online]. Wikipedia, [cit. 2009-01-04]. Available from www: <<http://en.wikipedia.org/wiki/Polyphthalamide>>
- [16] *AMODEL polyphthalamide* [online]. [cit. 2009-01-04]. Available from www: <<http://www.solvayadvancedpolymers.com/products/bybrand/bybrandamodel/0,,391-2-0,00.htm>>
- [17] *Polyamide* [online]. Wikipedia, [cit. 2009-01-04]. Available from www: <<http://en.wikipedia.org/wiki/Polyamide>>
- [18] MUK, K. *Zkušební zařízení pro destrukční zkoušky plastových dílů vnitřním přetlakem : diplomová práce*. FS ČVUT : Praha, 2008. 84 p.
- [19] EHRENSTEIN, G. W. *Kunststoff – Schadensanalyse (Methoden und Verfahren)*. Wien : Carl Hanser Verlag, München, 1992.
- [20] FRICK, T.; HOPFNER, M. *Laser Welding of Thermoplastics : user handbook*. 1st ed. Erlangen : BLZ, 2007. 73 p. ISBN -10:3-9809601-3-7.
- [21] *Laser* [online]. [cit. 2009-02-14]. Available from www: <<http://referaty.atlas.sk/prirodne-vedy/fyzika-a-astronomia/2521/?print=1>>
- [22] LAMBOROVÁ, R. *Technologie laserového paprsku : seminární práce*. Zlín : FT UTB, 2008. 22 p.
- [23] KREČMEROVÁ, Z. *LBM - technologie laserového paprsku : seminární práce*. Zlín : FT UTB, 2008. 25 p.
- [24] *Hmotnostní spektrometrie* [online]. [cit. 2009-03-20]. Available from www: <[http://tomcat.prf.jcu.cz/sima/analyticka\\_chemie/vybranemet.htm](http://tomcat.prf.jcu.cz/sima/analyticka_chemie/vybranemet.htm)>
- [25] POTENTE, H. *Fügen von Kunststoffen Grundlagen, Verfahren, Anwendung*. 1st ed. Wien : Carl Hanser Verlag, München, 2004. 348 p. ISBN 3-446-22755-6.
- [26] EHRENSTEIN, G. W. *Handbuch Kunststoff - Verbindungstechnik*. 1st ed. München : Carl Hanser Verlag, 2004. 710 p. ISBN 3-446-22340-1.

- 
- [27] AMBROŽ, P. *Laserové svařování v nových projektech RBCB : diplomová práce*. Praha : FS ČVUT, 2008. 133 p.
- [28] *Laser* [online]. Wikipedie, [cit. 2009-03-10]. Available from www: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/laser>>



**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

3D	trojdimenzionální, trojrozměrné
ABS	Akrylonitril-butadien-styren
AlGaInP	aluminium galium indium fosfid
CCD	Charge-Coupled Device
CdS	kadmium-sulfid
CdSe	kadmium-selemid
$C_{mk}$	index způsobilosti stroje
CO <sub>2</sub>	oxid uhličitý
$C_{pk}$	index způsobilosti procesu
DoE	Design of Experiment
Er:YAG	erbium yttrium aluminium granát
GaAlAs	galium aluminium arsenid
GaAs	galium-arsenid
HDL	High-power Diode Laser
Ho:YAG	holmium yttrium aluminium granát
$I$	intenzita záření
$I_0$	intenzita záření ve středu paprsku
IR	infrared = infračervené
LED	Light-Emitting Diode
Nd:YAG	yttrium aluminium granát s ionty Nd <sup>3+</sup>
PA66	Polyamid 66
PC	osobní počítač
PC	Polykarbonát
PMMA	Polymethylmethakrylát

---

POM	Polyoxymethylen
PPA	Polyftalamid
PPS	Polyphenylensulfid
$r$	poloměr paprsku
RBCB	Robert Bosch spol. s r.o. v Českých Budějovicích
$r_o$	poloměr redukce intenzity
TEF	Technical Function
TEM	Transverse Elektromagnetic Mode
USA	United States of America
UV	ultraviolet = ultrafialové
$V_r$	referenční objem
$V_T$	testovaný objem
$\Delta p$	tlakový rozdíl

**SEZNAM OBRÁZKŮ**

<i>Obr. 1. Srovnání světla vyzářovaného laserem se světlem žárovky [23]</i> .....	11
<i>Obr. 2. Model atomu [22]</i> .....	11
<i>Obr. 3. Přejchod elektronu [22]</i> .....	12
<i>Obr. 4. Excitace atomu a vyzáření fotonu [22]</i> .....	12
<i>Obr. 5. Vlnové délky pro různé typy laserů [23]</i> .....	13
<i>Obr. 6. Srovnání laserového světla (a) a fokusovaného neparalelního světla (b) [23]</i> .....	14
<i>Obr. 7. Vybrané módy s jejich označením a vhodností použití [7]</i> .....	15
<i>Obr. 8. Příklady osově symetrických módů [7]</i> .....	16
<i>Obr. 9. Příklady středově symetrických módů [7]</i> .....	16
<i>Obr. 10. Tvary paprsku laseru [7]</i> .....	17
<i>Obr. 11. Schéma struktury laseru [27]</i> .....	17
<i>Obr. 12. Princip diodového laseru [28]</i> .....	22
<i>Obr. 13. Svařování na tupo se šikmým zrcadlem [20]</i> .....	25
<i>Obr. 14. Svařování na tupo bez šikmého zrcadla [20]</i> .....	25
<i>Obr. 15. Princip transmisivního svařování</i> .....	26
<i>Obr. 16. Obrysové (konturové) svařování [20]</i> .....	27
<i>Obr. 17. Kvazi-simultánní svařování [20]</i> .....	28
<i>Obr. 18. Simultánní svařování [20, 26]</i> .....	29
<i>Obr. 19. Svařování s maskou [20, 26]</i> .....	30
<i>Obr. 20. Laserem svařené olejové nádrčky automobilů [26]</i> .....	31
<i>Obr. 21. Možné svařovací geometrie použité při transmisivním svařování [20]</i> .....	31
<i>Obr. 22. Schéma stroje pro laserové svařování [1]</i> .....	32
<i>Obr. 23. Přední strana generátoru [1]</i> .....	33
<i>Obr. 24. Zadní strana generátoru [1]</i> .....	33
<i>Obr. 25. Ovládací panel VPP 21 [1]</i> .....	34
<i>Obr. 26. Software pro tvorbu svařovací kontury [1]</i> .....	35
<i>Obr. 27. Diagram propojení laserové stanice LDS [1]</i> .....	35
<i>Obr. 28. Spínač automatického svařování</i> .....	36
<i>Obr. 29. Zvedání přípravku do pracovní polohy pomocí pneumatického válce</i> .....	36
<i>Obr. 30. Skenovací optika a PC</i> .....	37
<i>Obr. 31. Svařovací stanice LDS</i> .....	37

<i>Obr. 32. Symbol třídy laseru [1]</i> .....	39
<i>Obr. 33. Permeace mikropóra v materiálu [1]</i> .....	42
<i>Obr. 34. Zařízení pro testování zkoušky těsnosti heliem [1]</i> .....	44
<i>Obr. 35. Princip měření přístroje ATEQ [1]</i> .....	45
<i>Obr. 36. Měřicí zařízení ATEQ [1]</i> .....	46
<i>Obr. 37. Zkušební zařízení v RBCB/TEF3 [18]</i> .....	48
<i>Obr. 38. Záznamové zařízení Blackbox [18]</i> .....	49
<i>Obr. 39. Záznam statické zkoušky až do destrukce včetně plnicí fáze [18]</i> .....	49
<i>Obr. 40. Schéma procesu [14]</i> .....	51
<i>Obr. 41. Křehký lom v důsledku nečistoty [1]</i> .....	57
<i>Obr. 42. Růst trhliny [1]</i> .....	58
<i>Obr. 43. Příklad creepu [1]</i> .....	58
<i>Obr. 44. Lomová plocha [1]</i> .....	59
<i>Obr. 45. Analýza v oblasti iniciace lomu [1]</i> .....	59
<i>Obr. 46. Mikrotomový řez jemné struktury POM – 100x zvětšení [1]</i> .....	60
<i>Obr. 47. Světelný mikroskop Leica DFC 280</i> .....	61
<i>Obr. 48. Způsob zaformování výrobku – 2 čelisti</i> .....	62
<i>Obr. 49. Studený vtokový systém</i> .....	63
<i>Obr. 50. Vyhazovací systém</i> .....	63
<i>Obr. 51. Sestava vstřikovací formy</i> .....	64
<i>Obr. 52. Spodní (A) a horní (B) část svařovacího přípravku</i> .....	68
<i>Obr. 53. Přípravková soustava s dorazy</i> .....	68
<i>Obr. 54. Přípravek - těsnost</i> .....	69
<i>Obr. 55. Přípravek - pevnost spoje</i> .....	69
<i>Obr. 56. Paretův diagram důležitosti vstupních faktorů na těsnosti - PA66</i> .....	73
<i>Obr. 57. Rozdělení a histogram reziduí v hodnocení těsnosti - PA66</i> .....	73
<i>Obr. 58. Paretův diagram důležitosti vstupních faktorů na pevnosti - PA66</i> .....	74
<i>Obr. 59. Rozdělení a histogram reziduí v hodnocení pevnosti - PA66</i> .....	74
<i>Obr. 60. Paretův diagram důležitosti vstupních faktorů na subjekt. hodn. - PA66</i> .....	75
<i>Obr. 61. Rozdělení a histogram reziduí v hodnocení subjekt. - PA66</i> .....	75
<i>Obr. 62. Paretův diagram důležitosti vstupních faktorů na těsnosti - POM</i> .....	77
<i>Obr. 63. Rozdělení a histogram reziduí v hodnocení těsnosti - POM</i> .....	77
<i>Obr. 64. Paretův diagram důležitosti vstupních faktorů na pevnosti - POM</i> .....	78

<i>Obr. 65. Rozdělení a histogram reziduí v hodnocení pevnosti - POM</i> .....	78
<i>Obr. 66. Paretův diagram důležitosti vstupních faktorů na subjekt. hodn. - POM</i> .....	79
<i>Obr. 67. Rozdělení a histogram reziduí v hodnocení subjekt. - POM</i> .....	79
<i>Obr. 68. Paretův diagram důležitosti vstupních faktorů na těsnosti - PA66</i> .....	85
<i>Obr. 69. Rozdělení a histogram reziduí v hodnocení těsnosti - PA66</i> .....	85
<i>Obr. 70. Paretův diagram důležitosti vstupních faktorů na pevnosti - PA66</i> .....	86
<i>Obr. 71. Rozdělení a histogram reziduí v hodnocení pevnosti - PA66</i> .....	86
<i>Obr. 72. Paretův diagram důležitosti vstupních faktorů na subjekt. hodn. - PA66</i> .....	87
<i>Obr. 73. Rozdělení a histogram reziduí v hodnocení subjektiv. - PA66</i> .....	87
<i>Obr. 74. Paretův diagram důležitosti vstupních faktorů na svař. času. - PA66</i> .....	88
<i>Obr. 75. Rozdělení a histogram reziduí v hodnocení svař. času - PA66</i> .....	88
<i>Obr. 76. Optimalizace parametrů pro PA66-plněný</i> .....	89
<i>Obr. 77. Paretův diagram důležitosti vstupních faktorů na těsnosti - POM</i> .....	90
<i>Obr. 78. Rozdělení a histogram reziduí v hodnocení těsnosti - POM</i> .....	90
<i>Obr. 79. Paretův diagram důležitosti vstupních faktorů na pevnosti - POM</i> .....	91
<i>Obr. 80. Rozdělení a histogram reziduí v hodnocení pevnosti - POM</i> .....	91
<i>Obr. 81. Paretův diagram důležitosti vstupních faktorů na subjekt. hodn. - POM</i> .....	92
<i>Obr. 82. Rozdělení a histogram reziduí v hodnocení subjektiv. - POM</i> .....	92
<i>Obr. 83. Paretův diagram důležitosti vstupních faktorů na svař. času - POM</i> .....	93
<i>Obr. 84. Rozdělení a histogram reziduí v hodnocení svař. času - POM</i> .....	93
<i>Obr. 85. Optimalizace parametrů pro POM-neplněný</i> .....	94
<i>Obr. 86. Mikrotomový řez pravé strany PA66-plněný (A - 25x zvětšený, B - 100x zvětšený)</i> .....	99
<i>Obr. 87. Mikrotomový řez levé strany PA66-plněný (A - 25x zvětšený, B - 100x zvětšený)</i> .....	99
<i>Obr. 88. Mikrotomový řez levé strany POM-neplněný (A - 25x zvětšený, B - 100x zvětšený)</i> .....	100
<i>Obr. 89. Mikrotomový řez pravé strany POM-neplněný (A - 25x zvětšený, B - 100x zvětšený)</i> .....	100

**SEZNAM TABULEK**

<i>Tab. 1. Rozdělení laserů podle aktivního prostředí [28] .....</i>	19
<i>Tab. 2. Srovnávací tabulka laserů na svařování plastů [26] .....</i>	23
<i>Tab. 3. Zvolené materiály .....</i>	67
<i>Tab. 4. Zvolené hodnoty parametrů pro materiál PA66-plněný .....</i>	70
<i>Tab. 5. Zvolené hodnoty parametrů pro materiál POM-neplněný .....</i>	71
<i>Tab. 6. Výsledky měření (Plackett-Burman test).....</i>	72
<i>Tab. 7. Hranice parametrů pro materiál PA66-plněný (DoE) .....</i>	81
<i>Tab. 8. Hranice parametrů pro materiál POM-neplněný (DoE).....</i>	82
<i>Tab. 9. Pevné hodnoty parametrů pro oba materiály (DoE) .....</i>	82
<i>Tab. 10. Výsledky měření (DoE) .....</i>	83
<i>Tab. 11. Optimalizované parametry pro oba materiály .....</i>	95
<i>Tab. 12. Výsledky měření (<math>C_{mk}</math>).....</i>	96

## SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha P I: Srovnávací tabulka použitých materiálů
- Příloha P II: Technické údaje laserové svářečky
- Příloha P III: Hydraulické schéma tlakového destrukčního zařízení Berstdruck
- Příloha P IV: 3D model a foto zkušebního tělíska
- Příloha P V: Výkres zkušebního tělíska (horní díl)
- Příloha P VI: Výkres zkušebního tělíska (dolní díl)
- Příloha P VII: Svařovací přípravek
- Příloha P VIII: Měřicí přípravky
- Příloha P IX: Tabulka naplánovaného Plackett-Burmanova testu pro materiál PA66
- Příloha P X: Tabulka naplánovaného Plackett-Burmanova testu pro materiál POM
- Příloha P XI: Tabulka naplánovaného DoE pro materiál PA66
- Příloha P XII: Tabulka naplánovaného DoE pro materiál POM
- Příloha P XIII: Tabulka svařovacích časů pro DoE
- Příloha P XIV: Protokol analýzy způsobilosti stroje - PA66 - těsnost - 1.verze
- Příloha P XV: Protokol analýzy způsobilosti stroje - PA66 - těsnost - 2.verze
- Příloha P XVI: Protokol analýzy způsobilosti stroje - PA66 - pevnost - 1.verze
- Příloha P XVII: Protokol analýzy způsobilosti stroje - PA66 - pevnost - 2.verze
- Příloha P XVIII: Protokol analýzy způsobilosti stroje - POM - těsnost - 1.verze
- Příloha P XIX: Protokol analýzy způsobilosti stroje - POM - těsnost - 2.verze
- Příloha P XX: Protokol analýzy způsobilosti stroje - POM - pevnost
- Příloha P XXI: Mikrotomové řezy svárů - PA66
- Příloha P XXII: Mikrotomové řezy svárů - POM
- Příloha P XXIII: Grafický záznam průběhu svařování
- Příloha P XXIV: Tabulka svažitelnosti plastů


## PŘÍLOHA PI: SROVNÁVACÍ TABULKA POUŽITÝCH MATERIÁLŮ

Materiál	Varianta	Trans./Absorb.	Trade name	E [Mpa]	Hustota $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Smrštění [%]	T <sub>m</sub> [°C]	MVR [cm <sup>3</sup> /10min]	Mold Temperature [°C]
POM	neplněný	barví se až	Ultraform S232003	2700	1,4	2,1	167	11(190°C/2,16kg)	60 - 100
	plněný	dodatečně	Ultraform N2200G43	7300	1,54	1, 1,6	170	4,3 (190/2,16)	60 - 120
PA 66	neplněný	transparentní	Ultramid A3K natur	3000	1,13	1	260	115 (275/5)	40 - 80
		absorpční	Ultramid A3K BK00464	3600	1,13	1	260	115 (275/5)	40 - 80
	plněný	transparentní	Ultramid A3W66 natur	7200-10000	1,36	0,3	260	40 (275/5)	80 - 90
		absorpční	Ultramid A3W66 BK00564	7200	1,36	0,3	260	40 (275/5)	80 - 90

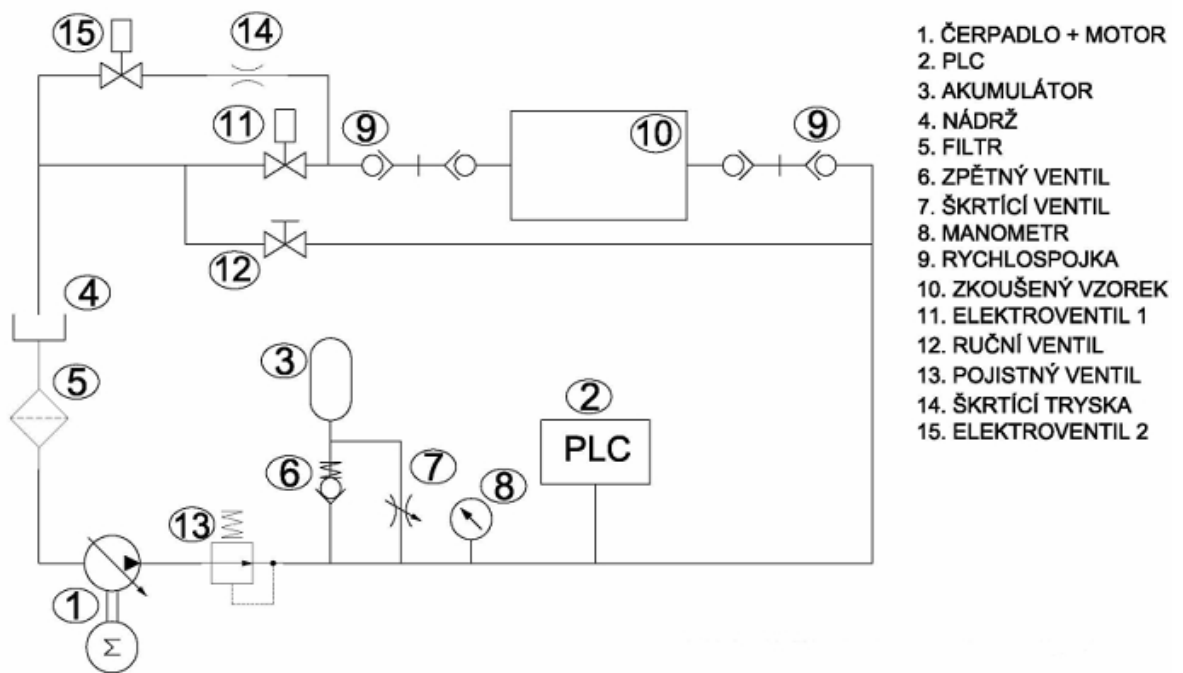


## PŘÍLOHA P II: TECHNICKÉ ÚDAJE LASEROVÉ SVÁŘEČKY

### Technické údaje

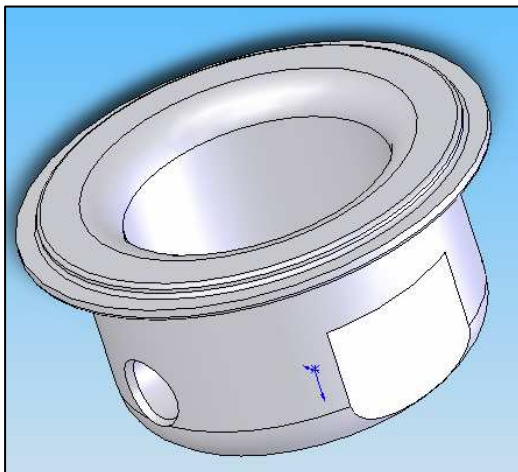
<b>Přípoje</b>		
Pneumatika	Stanice	6 bar
	Připojení	1/2 palce
	Průtok	6 l/min
Elektrika	Provozní napětí	3 x 400 V
	Frekvence	50 Hz
	Tolerance napětí	+5% / -5%
	Řídicí napětí	24 VDC
	Norma	podle DIN 57 113 / EN 60204
	Max. předběžné zajištění	20 A / 5 x 4 mm <sup>2</sup>
		 Viz i typový štítek na skříňovém rozvaděči nebo schéma zapojení ve skříňovém rozvaděči
<b>Hmotnost</b>		cca 1350 kg
<b>Emise</b>	Akustický tlak	≤ 70 dB(A)
	Odpadní vzduch	filtrovaný, neolejovaný stlačený vzduch
<b>Prostorové podmínky</b>	Teplota	20 – 35 °C
<b>Potřeba místa</b>	Potřeba místa pro provoz a údržbu, včetně únikových cest	viz schéma zařízení
<b>Třída ochrany</b>	Kryty, montážní prostory	podle DIN 57 113 / EN 60204 IP 54 DIN EN 60529

## PŘÍLOHA P III: HYDRAULICKÉ SCHÉMA TLAKOVÉHO DESTRUKČNÍHO ZAŘÍZENÍ BERSTDRUCK

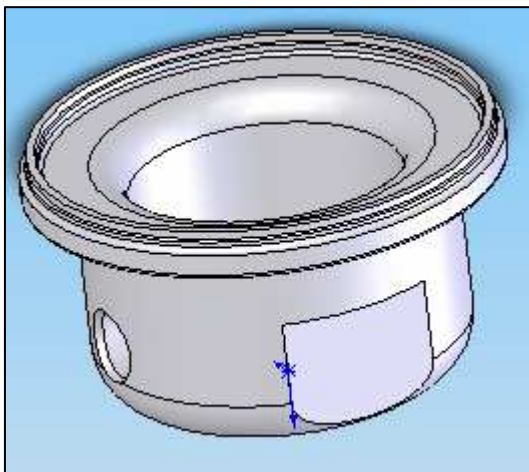


## PŘÍLOHA P IV: 3D MODEL A FOTO ZKUŠEBNÍHO TĚLÍSKA

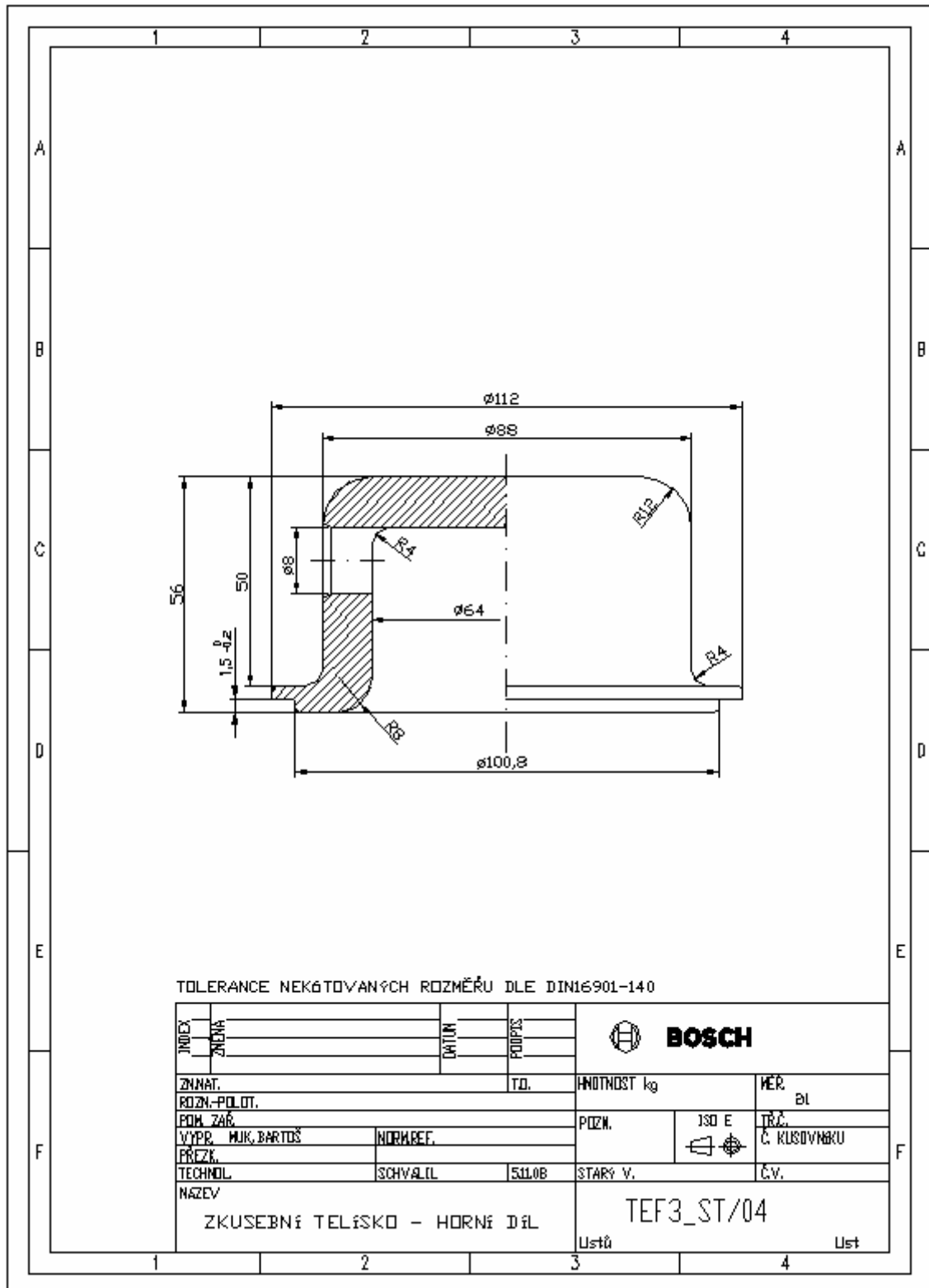
Horní díl



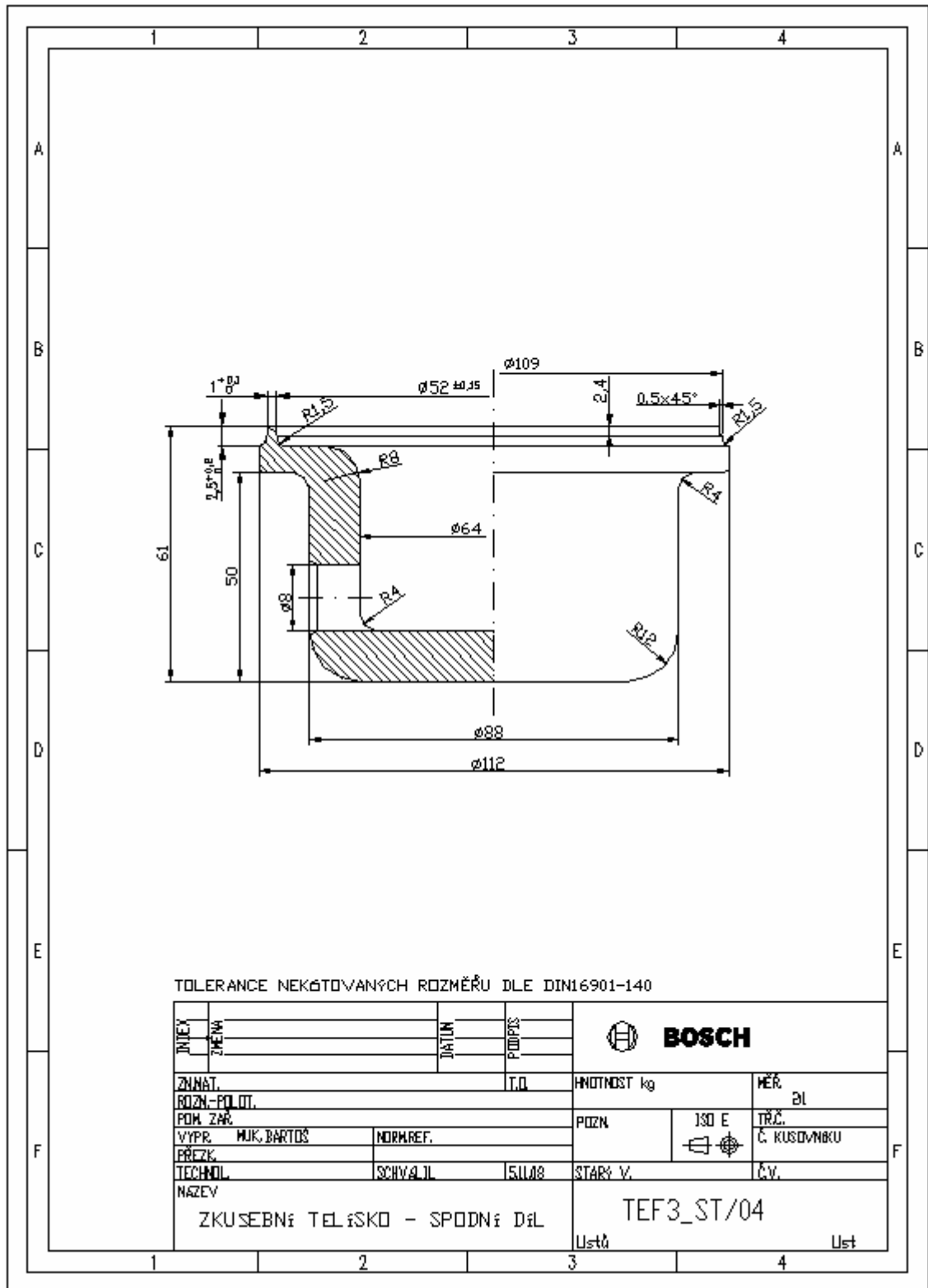
Dolní díl



# PŘÍLOHA P V: VÝKRES ZKUŠEBNÍHO TĚLÍSKA (HORNÍ DÍL)



# PŘÍLOHA P VI: VÝKRES ZKUŠEBNÍHO TĚLÍSKA (DOLNÍ DÍL)



## PŘÍLOHA P VII: SVAŘOVACÍ PŘÍPRAVEK



## PŘÍLOHA P VIII: MĚŘÍCÍ PŘÍPRAVKY



**PŘÍLOHA P IX: TABULKA NAPLÁNOVANÉHO PLACKETT-BURMANOVA TESTU PRO MATERIÁL PA66**

Pořadí	Výkon [W]	Svařovací dráha [mm]	Doba chlazení [s]	Síla F1 [N]	F1 to F2 [s]	Síla F2 [N]	Přídružná síla P [N]	Rychlost [m/s]
1	400	0,7	0,5	125	0,1	125	375	10
2	150	0,7	3	375	1	125	375	10
3	400	0,2	3	125	1	125	125	1,5
4	400	0,2	0,5	375	0,1	375	375	10
5	400	0,2	3	375	0,1	375	125	1,5
6	400	0,7	0,5	375	0,1	125	125	1,5
7	150	0,7	0,5	125	0,1	125	125	10
8	400	0,7	0,5	125	1	375	125	1,5
9	150	0,7	0,5	375	1	375	125	1,5
10	150	0,7	3	375	0,1	125	375	1,5
11	150	0,2	0,5	375	1	125	125	10
12	400	0,7	3	375	1	125	375	1,5
13	400	0,7	3	125	1	375	125	10
14	150	0,2	0,5	125	0,1	125	125	1,5
15	150	0,2	0,5	375	1	375	10	10
16	400	0,2	0,5	375	0,1	375	375	1,5
17	400	0,2	3	375	1	125	125	10
18	150	0,2	3	125	1	375	375	1,5
19	275	0,45	1,75	250	0,55	250	250	5,75
20	150	0,2	3	125	0,1	375	125	10
21	400	0,7	0,5	125	1	375	375	10
22	150	0,7	3	125	0,1	375	375	1,5
23	150	0,7	3	375	0,1	375	125	10
24	150	0,2	0,5	125	1	125	375	1,5
25	400	0,2	3	125	0,1	125	375	10



**PŘÍLOHA P X: TABULKA NAPLÁNOVANÉHO PLACKETT-BURMANOVA TESTU PRO MATERIÁL POM**

Pořadí	Výkon [W]	Svařovací dráha [mm]	Doba chlazení [s]	Síla F1 [N]	F1 to F2 [s]	Síla F2 [N]	Přídružná síla P [N]	Rychlost [m/s]
1	160	0,7	0,5	125	0,1	125	375	10
2	100	0,7	3	375	1	125	375	10
3	160	0,2	3	125	1	125	125	1,5
4	160	0,2	0,5	375	0,1	375	375	10
5	160	0,2	3	375	0,1	125	125	1,5
6	160	0,7	0,5	375	0,1	125	125	1,5
7	100	0,7	0,5	125	0,1	125	125	10
8	160	0,7	0,5	125	1	375	125	1,5
9	100	0,7	0,5	375	1	375	125	1,5
10	100	0,7	3	375	0,1	125	375	1,5
11	100	0,2	0,5	375	1	125	125	10
12	160	0,7	3	375	1	125	375	1,5
13	160	0,7	3	125	1	375	10	1,5
14	100	0,2	0,5	125	0,1	125	125	1,5
15	100	0,2	0,5	375	1	375	375	10
16	160	0,2	0,5	375	0,1	375	375	1,5
17	160	0,2	3	375	1	125	125	10
18	100	0,2	3	125	1	375	375	1,5
19	130	0,45	1,75	250	0,55	250	250	5,75
20	100	0,2	3	125	0,1	375	125	10
21	160	0,7	0,5	125	1	375	375	10
22	100	0,7	3	125	0,1	375	375	1,5
23	100	0,7	3	375	0,1	375	125	10
24	100	0,2	0,5	125	1	125	375	1,5
25	160	0,2	3	125	0,1	125	375	10

# PŘÍLOHA P XI: TABULKA NAPLÁNOVANÉHO DOE PRO MATERIÁL PA66

Doba chlazení	1 s
F1 to F2	0,1 s
Síla F1	125 N

Pořadí	Výkon [W]	Svařovací dráha [mm]	Síla F2 [N]	Přídružná síla P [N]	Rychlost [m/s]
1	400	0,2	400	125	12
2	150	0,2	125	125	12
3	400	0,2	125	125	2
4	150	0,2	400	125	2
5	150	0,2	125	375	2
6	400	0,7	400	375	12
7	400	0,7	125	375	2
8	150	0,7	400	375	2
9	400	0,7	400	125	2
10	400	0,7	125	125	12
11	150	0,7	125	125	2
12	400	0,2	400	375	2
13	275	0,45	262,5	250	7
14	400	0,2	125	375	12
15	150	0,2	400	375	12
16	150	0,7	400	125	12
17	150	0,7	125	375	12
18	400	0,7	400	375	12
19	400	0,7	125	375	2
20	150	0,2	400	375	12
21	150	0,7	125	125	2
22	400	0,2	400	125	12
23	400	0,7	400	125	2
24	150	0,7	125	375	12
25	150	0,2	125	125	12
26	400	0,7	125	125	12
27	150	0,2	125	375	2
28	150	0,7	400	125	12
29	275	0,45	262,5	250	7
30	150	0,7	400	375	2
31	400	0,2	125	375	12
32	400	0,2	400	375	2
33	150	0,2	400	125	2
34	400	0,2	125	125	2

## PŘÍLOHA P XII: TABULKA NAPLÁNOVANÉHO DOE PRO MATERIÁL POM


Doba chlazení	1 s
F1 to F2	0,1 s
Síla F1	125 N

Pořadí	Výkon [W]	Svařovací dráha [mm]	Síla F2 [N]	Přídržná síla P [N]	Rychlost [m/s]
1	250	0,2	375	125	12
2	80	0,2	100	125	12
3	250	0,2	100	125	2
4	80	0,2	375	125	2
5	80	0,2	100	375	2
6	250	0,8	375	375	12
7	250	0,8	100	375	2
8	80	0,8	375	375	2
9	250	0,8	375	125	2
10	250	0,8	100	125	12
11	80	0,8	100	125	2
12	250	0,2	375	375	2
13	165	0,5	237,5	250	7
14	250	0,2	100	375	12
15	80	0,2	375	375	12
16	80	0,8	375	125	12
17	80	0,8	100	375	12
18	250	0,8	375	375	12
19	250	0,8	100	375	2
20	80	0,2	375	375	12
21	80	0,8	100	125	2
22	250	0,2	375	125	12
23	250	0,8	375	125	2
24	80	0,8	100	375	12
25	80	0,2	100	125	12
26	250	0,8	100	125	12
27	80	0,2	100	375	2
28	80	0,8	375	125	12
29	165	0,5	237,5	250	7
30	80	0,8	375	375	2
31	250	0,2	100	375	12
32	250	0,2	375	375	2
33	80	0,2	375	125	2
34	250	0,2	100	125	2

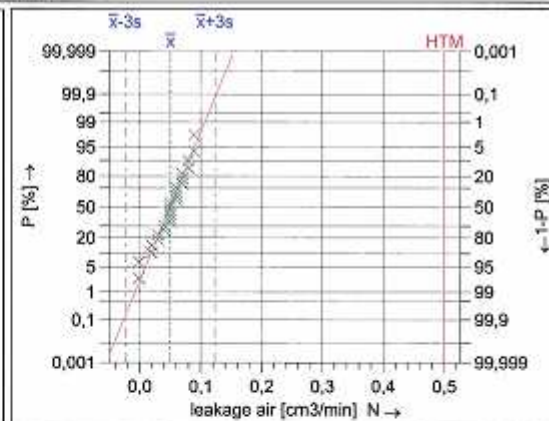
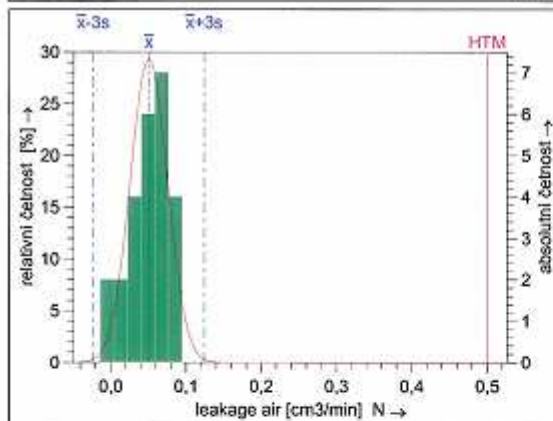
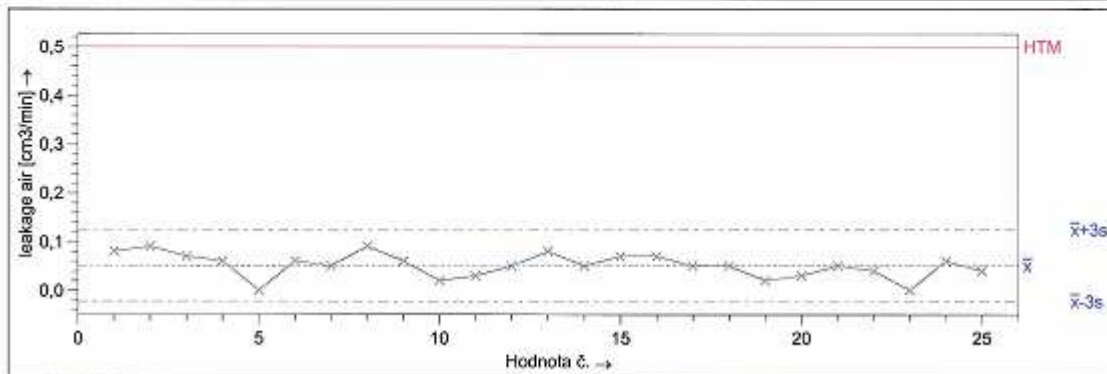
## PŘÍLOHA P XIII: TABULKA SVAŘOVACÍCH ČASŮ PRO DOE

Pořadí	PA66 - plněný	POM - neplněný
	Time welding [s]	Time welding [s]
1	0,789	1,336
2	4,333	10,693
3	0,751	1,639
4	1,787	9,279
5	3,233	12,321
6	1,408	2,293
7	1,791	2,928
8	5,789	12,348
9	1,367	2,296
10	2,019	2,801
11	10,514	14,089
12	0,762	1,325
13	1,843	3,071
14	0,782	1,398
15	3,002	7,264
16	6,696	12,314
17	12,42	14,728
18	1,316	2,338
19	1,867	2,75
20	2,814	8,297
21	10,41	14,319
22	0,775	1,369
23	1,445	2,276
24	11,679	14,544
25	3,791	10,311
26	1,917	2,944
27	3,294	10,974
28	6,766	12,059
29	1,777	3,184
30	6,256	11,704
31	0,817	1,368
32	0,756	1,157
33	2,079	7,389
34	0,743	1,237

# PŘÍLOHA P XIV: PROTOKOL ANALÝZY ZPŮSOBILOSTI STROJE - PA66 - TĚSNOST - 1.VERZE

 <b>BOSCH</b>	<b>Způsobilost strojů</b>	stránka: 1 / 1
--	---------------------------	----------------

Oblast :	Operace :	Znak ozn. :leakage air
Skupina/oddělení : TEF3	Str.ozn. : laser ATMO 10	Znak č. : 1
Provoz/oblast :	Stroj č. : 909905	Jmen. hodnota :
Výrobek :	Měřicí místo :	Odchyl. dolu :
Díl : zkušební tělisko PA66-č	Zk.pr.ozn. : 50-8094	Odchyl. nahoru :
TDČis :	Zk.pr.čís. : JMQ4/CBNr.16	Tolerance :---
Změnový stav :	Zk.pr.výr. : ATEQ F	Jednotka : cm3/min
Komentář : Těsnost zkušebního těliska.		



Údaje z výkresu		Naměřené hodnoty		Statistické hodnoty	
$T_m$	---	$\bar{x} - T_m$		$\bar{x}$	0,0508
DTM	---	$x_{min}$	0,00	$\bar{x}-3s$	-0,0226
HTM	0,50	$x_{max}$	0,09	$\bar{x}+3s$	0,1242
T	---	R	0,09	$6s$	0,1469
		$n_{<T}$	25	$p_{<T}$	100,00000 %
		$n_{>HTM}$	0	$p_{>HTM}$	0,00000%
		$n_{<DTM}$	---	$p_{<DTM}$	---
		$n(cek)$	25	$n(cek)_{ef}$	25
Modelové rozdělení			Normální rozdělení		
Typ výpočtu		M4 <sub>2</sub> Percentil. (kvant.) metoda (0.135%-50%-99.865%) (0.135%-50%)			
způsobilost (potenciál procesu) (A)		= $C_m$ --- 915			
využití způsobilosti (A)		= $C_{mk}$ 4,38 ≤ 6,12 ≤ 7,85			
Výpočetní metoda			Požadavky splněny ( $C_m, C_{mk}$ )		
			BOSCH 2005		

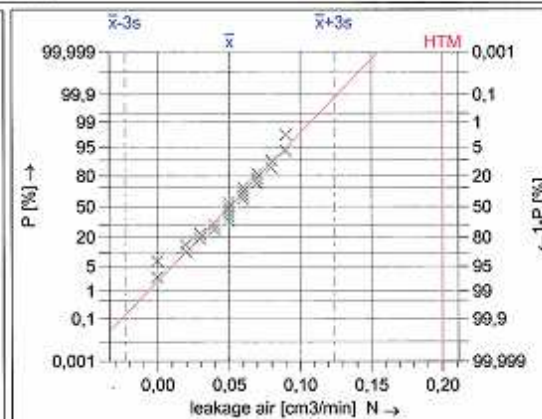
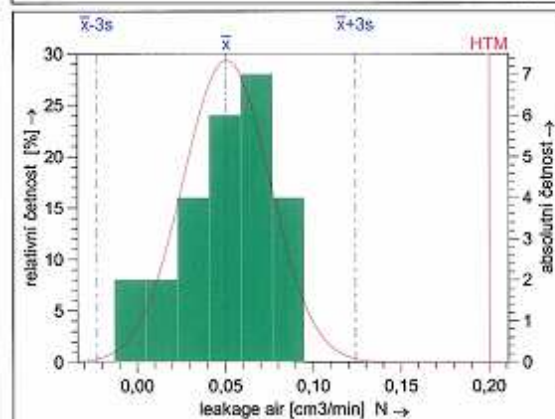
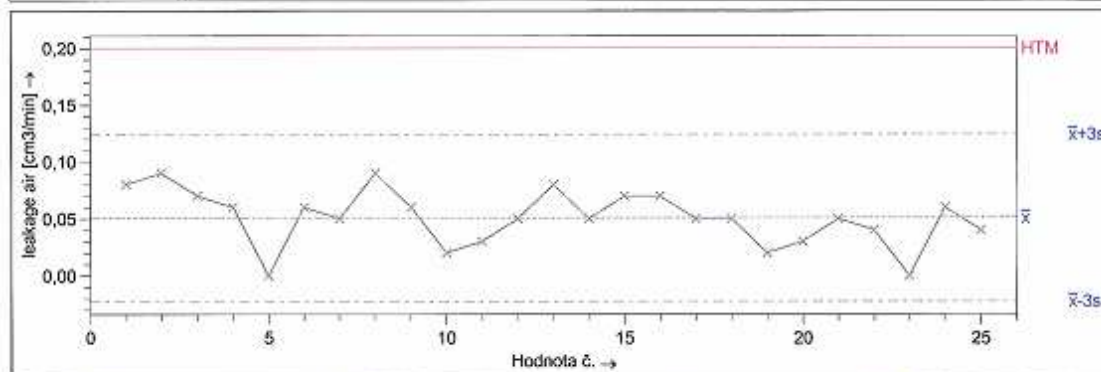
Kontrolní plán: datum 22.04.2009 Autor kom. plánů Bartoš Začátek-zk. 22.04.2009 Jméno prac. Bartoš

Oddělení Jméno Datum Podpis  
 8.70 / 71026 AS\_01\_B\_DEF Robert Bosch spol. s.r.o. K:\TEF31\_Zpravy\105\_LAS\VB\_07113\Zkoušky\_TEF3\Zkusebni\_telisko\PA66 - Cmk\Plněný\Cmk\_leakage\_zkus\_telisko\_PA66.DFG

# PŘÍLOHA P XV: PROTOKOL ANALÝZY ZPŮSOBILOSTI STROJE - PA66 - TĚSNOST - 2.VERZE


 <b>BOSCH</b>	<b>Způsobilost strojů</b>	stránka: 1 / 1
--	---------------------------	----------------

Oblast	:	Operace	:	Znak ozn.	:	leakage air
Skupina/oddělení	:	Str.ozn.	:	Znak č.	:	1
Provoz/oblast	:	Stroj č.	:	Jmen. hodnota	:	
Výrobek	:	Měřicí místo	:	Odchyl. dolů	:	
Díl	:	Zk.pr.ozn.	:	Odchyl. nahoru	:	
TDčís	:	Zk.pr.čís.	:	Tolerance	:	---
Změnový stav	:	Zk.pr.výr.	:	Jednotka	:	cm3/min
Komentář	:	Těsnost zkušebního tělíska.				

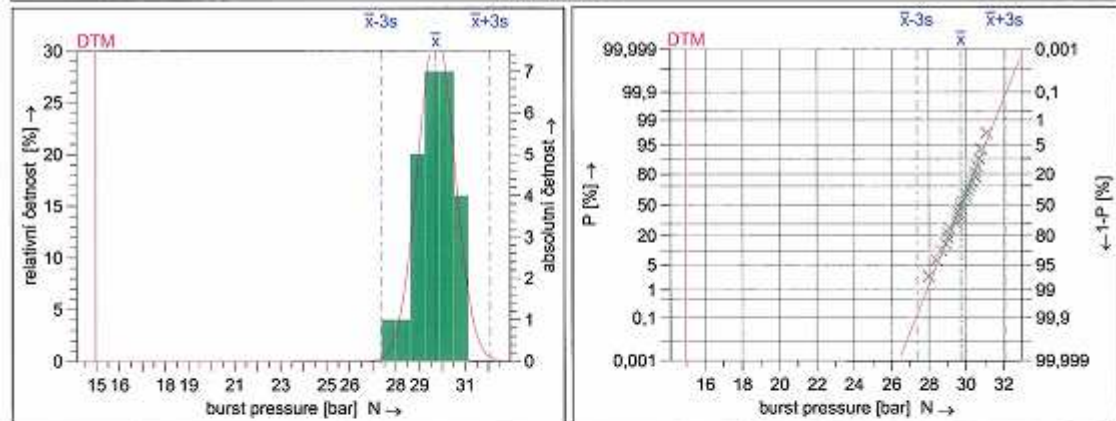
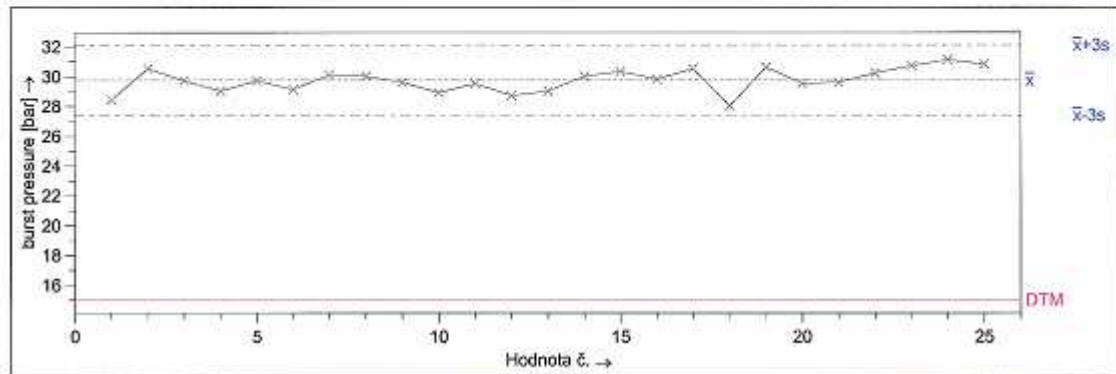


Údaje z výkresu		Naměřené hodnoty		Statistické hodnoty	
T <sub>m</sub>	---	$\bar{x} - T_m$		$\bar{x}$	0,0508
DTM	---	x <sub>min</sub>	0,00	$\bar{x} - 3s$	-0,0226
HTM	0,20	x <sub>max</sub>	0,09	$\bar{x} + 3s$	0,1242
T	---	R	0,09	6s	0,1469
		n <T>	25	p <T>	100,00000 %
		n >HTM	0	p >HTM	0,00000%
		n <DTM	---	p <DTM	---
		n(CEL) <sub>cek</sub>	25	n(CEL) <sub>eff</sub>	25
Modelové rozdělení			Normální rozdělení		
Typ výpočtu		M4 <sub>z</sub> Percentil. (kvant.) metoda (0.135%-50%-99.865%) (0.135%-50%)			
způsobilost (potenciál procesu) (A)		=	C <sub>m</sub>	---	
využití způsobilosti (A)		=	C <sub>mk</sub>	1,44 < 2,03 < 2,62	
Výpočetní metoda		Požadavky splněny (C <sub>m</sub> , C <sub>mk</sub> )		BOSCH 2005	

# PŘÍLOHA P XVI: PROTOKOL ANALÝZY ZPŮSOBILOSTI STROJE - PA66 - PEVNOST - 1.VERZE

 <b>BOSCH</b>	<b>Způsobilost strojů</b>	stránka: 1 / 1
--	---------------------------	----------------

Oblast : Skupina/oddělení : TEF3 Provoz/oblast : Výrobek : Díl : zkušební tělisko PA66- TDčís : Změnový stav :	Operace : Str.ozn. : laser ATMO 10 Stroj č. : 909905 Měřicí místo : Zk.pr.ozn. : 907684 Zk.pr.čís. : JMM200/16CBNr.1 Zk.pr.vyr. : HANEX	Znak ozn. : burst pressure Znak č. : 1 Jmen. hodnota : Odchyl dolů : Odchyl nahoru : Tolerance : --- Jednotka : bar
Komentář : Pevnost zkušebního těliska. :		



Údaje z výkresu		Naměřené hodnoty		Statistické hodnoty	
$T_m$	---	$\bar{x} - T_m$	28,0	$\bar{x}$	29,732
DTM	15,0	$x_{min}$	28,0	$\bar{x}-3s$	27,372
HTM	---	$x_{max}$	31,1	$\bar{x}+3s$	32,092
T	---	R	3,1	6s	4,720
		$n < T$	25	$p < T$	100,0000 %
		$n > HTM$	---	$p > HTM$	---
		$n < DTM$	0	$p < DTM$	0,00000 %
		$n(cel)_{cek}$	25	$n(cel)_{ef}$	25
Modelové rozdělení			Normální rozdělení		
Typ výpočtu		M4 <sub>2</sub> Percentil. (kvant.) metoda (0,135%-50%-99,865%) (0,135%-50%			
způsobilost (potenciál procesu) (A)		= $C_m$ --- 915			
využití způsobilosti (A)		= $C_{mk}$ 4,47 ≤ 6,24 ≤ 8,01			
Výpočetní metoda			Požadavky splněny ( $C_m, C_{mk}$ )		
			BOSCH 2005		

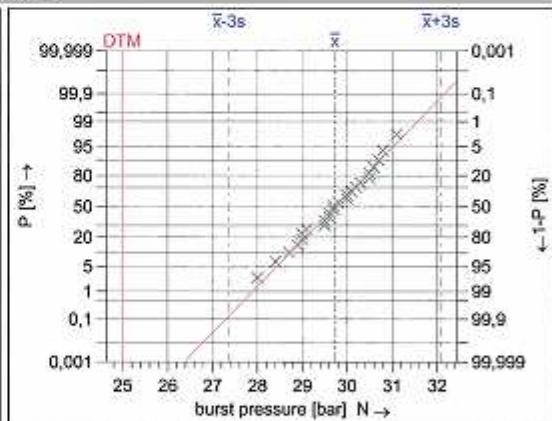
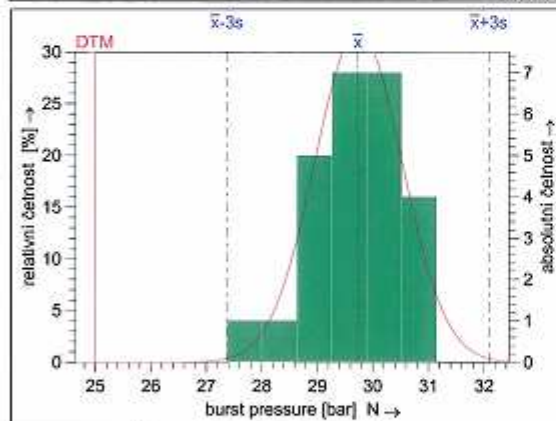
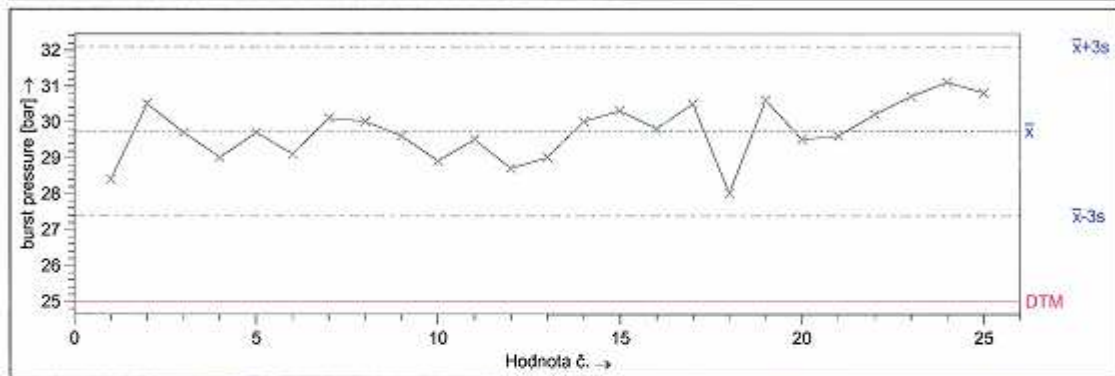


# PŘÍLOHA P XVII: PROTOKOL ANALÝZY ZPŮSOBILOSTI STROJE

## - PA66 - PEVNOST - 2.VERZE

<b>BOSCH</b>	<b>Způsobilost strojů</b>	stránka: 1 / 1
--------------	---------------------------	----------------

Oblast : Skupina/oddělení : TEF3 Provoz/oblast : Výrobek : Díl : zkušební tělisko PA66- TDčís : Změnový stav :	Operace : Str.ozn. : laser ATMO 10 Stroj č. : 909905 Měřicí místo : Zk.pr.ozn. : 907664 Zk.pr.čís. : JMM200/16CBNr.1 Zk.pr.výr. : HANEX	Znak ozn. : burst pressure Znak č. : 1 Jmen. hodnota : Odchyl dolů : Odchyl nahoru : Tolerance : --- Jednotka : bar
Komentář : Pevnost zkušebního těliska.		



Údaje z výkresu		Naměřené hodnoty		Statistické hodnoty	
$T_m$	---	$\bar{x} - T_m$	28,0	$\bar{x}$	29,732
DTM	25,0	$x_{min}$	28,0	$\bar{x} - 3s$	27,372
HTM	---	$x_{max}$	31,1	$\bar{x} + 3s$	32,092
T	---	R	3,1	$\hat{\sigma}_s$	4,720
		$n < T$	25	$p < T$	100,00000 %
		$n > HTM$	---	$p > HTM$	---
		$n < DTM$	0	$p < DTM$	0,000000 %
		$n(cel)_{sek}$	25	$n(cel)_{eff}$	25
Modelové rozdělení			Normální rozdělení		
Typ výpočtu		M4 <sub>2</sub> Percentil. (kvant.) metoda (0,135%-50%-99,865%) (0,135%-50%			
způsobilost (potenciál procesu) (A)		= $C_m$ --- 915			
využití způsobilosti (A)		= $C_{nk}$ 1,42 ≤ 2,00 ≤ 2,59			
Výpočetní metoda			BOSCH 2005		

Kontrolní plán: datum 22.04.2009 Autor kontr. plánu Bartoš Začátek-zk. 22.04.2009 Jméno prac. Bartoš

Oddělení Jméno Datum Podpis  
 8.70 / 71028 AS\_01\_B.DEF Robert Bosch spol. s r.o. K:TEF31\_Zpravy105\_LASIVB\_07113Zkoušky\_TEF3Zkusebni\_telisko/PA66 - CmkPříněnýCmk\_beršdruck\_zkua\_telisko\_PA66.DFG

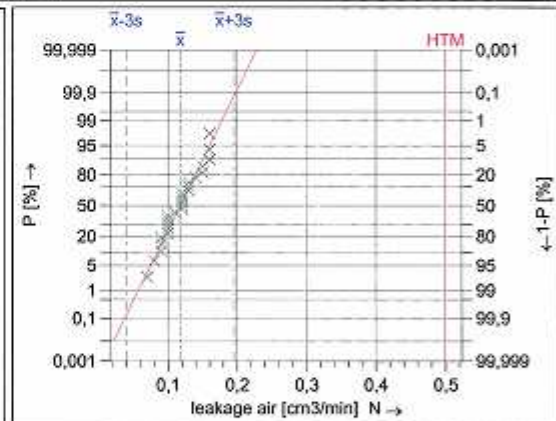
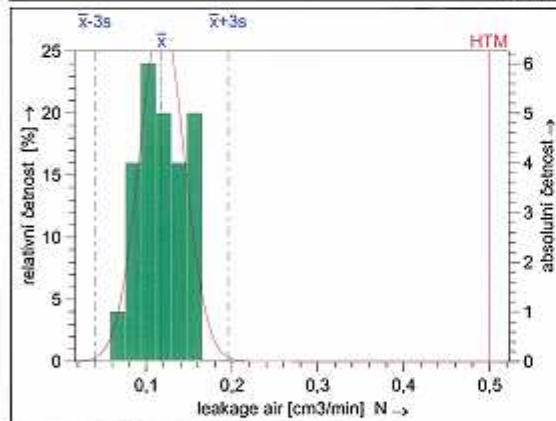
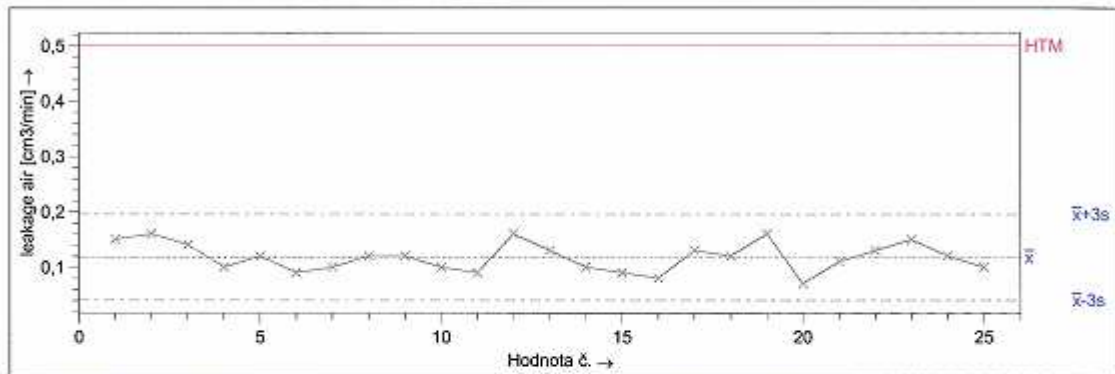


# PŘÍLOHA P XVIII: PROTOKOL ANALÝZY ZPŮSOBILOSTI

## STROJE - POM - TĚSNOST - 1.VERZE

	<b>Způsobilost strojů</b>	stránka: 1 / 1
--	---------------------------	----------------

Oblast	:	Operace	:	Znak ozn.	:	leakage air
Skupina/oddělení	:	Str.ozn.	:	Znak č.	:	1
Provoz/oblast	:	Stroj č.	:	Jmen. hodnota	:	
Výrobek	:	Měřicí místo	:	Odchyl dolů	:	
Díl	:	Zk.pr.ozn.	:	Odchyl nahoru	:	
TDčís	:	Zk.pr.čís.	:	Tolerance	:	---
Změnový stav	:	Zk.pr.výr.	:	Jednotka	:	cm3/min
Komentář	:	Těsnost zkušebního tělíska.				




Údaje z výkresu		Naměřené hodnoty		Statistické hodnoty	
$T_m$	---	$\bar{x} - T_m$	---	$\bar{x}$	0,1176
DTM	---	$x_{min}$	0,07	$\bar{x} - 3s$	0,0400
HTM	0,50	$x_{max}$	0,16	$\bar{x} + 3s$	0,1952
T	---	R	0,09	$B_s$	0,1552
		$n < T >$	25	$p < T >$	100,00000 %
		$n > HTM$	0	$p > HTM$	0,00000 %
		$n < DTM$	---	$p < DTM$	---
		$n(ce)_{zok}$	25	$n(ce)_{off}$	25
Modelové rozdělení			Normální rozdělení		
Typ výpočtu		M4 <sub>z</sub> Percentil. (kvant.) metoda (0.135%-50%-99.865%) (0.135%-50%)			
způsobilost (potenciál procesu) (A)		= $C_m$ --- 915			
využití způsobilosti (A)		= $C_{mk}$ 3,53 ≤ 4,93 ≤ 6,33			
Výpočetní metoda			BOSCH 2005		

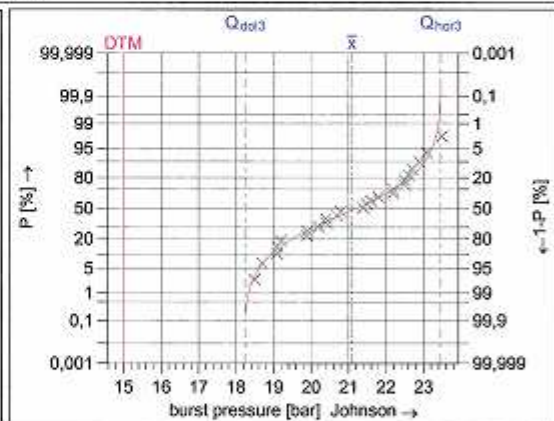
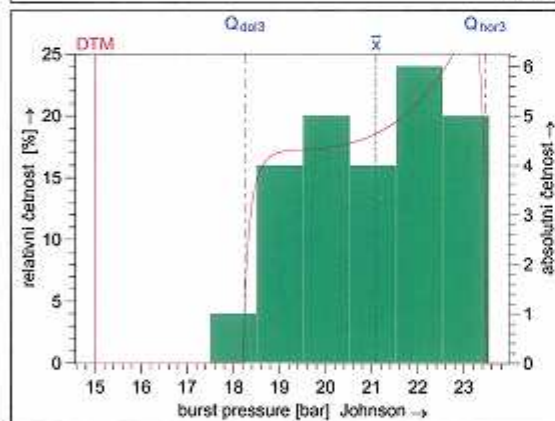
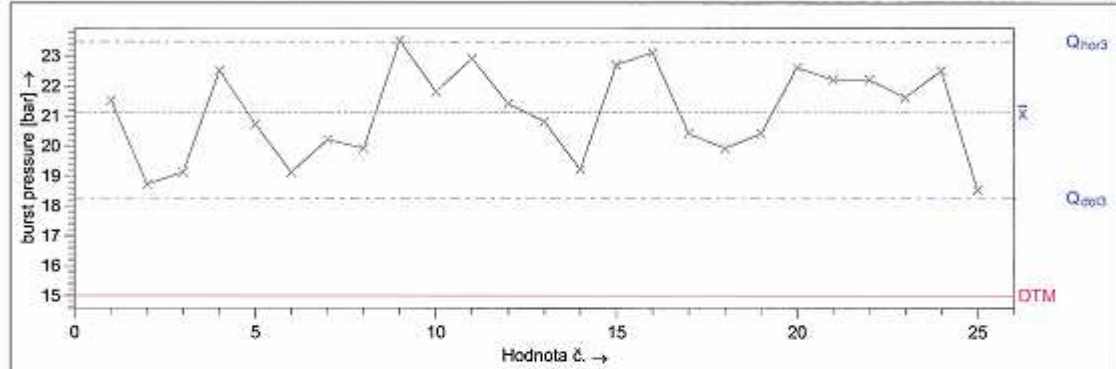
Kontrolní plán: datum vytvoření	22.04.2009	Autor kontr. plánu	Bartoš	Začátek-zk.	22.04.2009	Jméno prac.	Bartoš
Oddělení	Jméno	Datum	Podpis				
8.70 / 71026 AS_01_B_DEF	Robert Bosch spol. s r.o.			K:\TEF3\1_Zpravy\101_US5\VB_06045\linka_GPA_S_BMW\uvolnění linky\GPA_S_pull_off_capsul_magnet.DFG			



# PŘÍLOHA P XX: PROTOKOL ANALÝZY ZPŮSOBILOSTI STROJE - POM - PEVNOST

 <b>BOSCH</b>	<b>Způsobilost strojů</b>	stránka: 1 / 1
--	---------------------------	----------------

Oblast :	Operace :	Znak ozn. :burst pressure
Skupina/oddělení :TEF3	Str.ozn. : laser ATMO 10	Znak č. :1
Provoz/oblast :	Stroj č. : 909905	Jmen. hodnota :
Výrobek :	Měřicí místo :	Odchyl. dolů :
Díl :zkušební tělisko POM-n	Zk.pr.ozn. : 907864	Odchyl. nahoru :
TDčís :	Zk.pr.čís. : JMM200/18CBNr.1	Tolerance :---
Změnový stav :	Zk.pr.výr. : HANEX	Jednotka : bar
Komentář :Pevnost zkušebního těliska.		



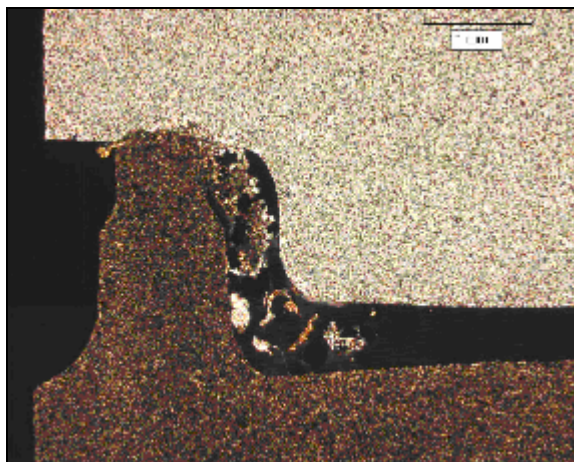
Údaje z výkresu		Naměřené hodnoty		Statistické hodnoty	
$T_m$	---	$\bar{x} - T_m$	---	$\bar{x}$	21,096
DTM	15,0	$X_{min}$	18,5	$Q_{dol3}$	18,239
HTM	---	$X_{max}$	23,5	$Q_{hor3}$	23,465
T	---	R	5,0	$Q_{hor3} - Q_{dol3}$	5,225
		$n < T$	25	$p < T$	100,0000 %
		$n > HTM$	---	$p > HTM$	---
		$n < DTM$	0	$p < DTM$	0,00000 %
		$n(cel)_{celk}$	25	$n(cel)_{eff}$	25
Modelové rozdělení			Johnsonova transformace		
Typ výpočtu		$M_2$ Percentil. (kvant.) metoda (0.135%-50%-99.865%) (0.135%-50%)			
způsobilost (potenciál procesu) (A)		= $C_m$ --- 915			
využití způsobilosti (A)		= $C_{mk}$ 1,48 ≤ 2,09 ≤ 2,69			
Výpočetní metoda			Požadavky splněny ( $C_m, C_{mk}$ )		
BOSCH 2005					

Kontrolní plán: datum vytvoření	22.04.2009	Autor kontr. plánu	Bartoš	Zažitek-čk.	22.04.2009	Jméno prac.	Bartoš
Oddělení	Jméno	Datum	Podpis				
8.70 / 71026 AS_01_B_DEF	Robert Bosch spol. s r.o.	K:\TEF3\1_Zpravy\105_LAS\VB_07113\Zkoušky_TEF3\Zkušební_tělisko_POM - Cmk\Neplněný\Cmk_berstdruck_zkus_tělisko_POM_n.DFG					

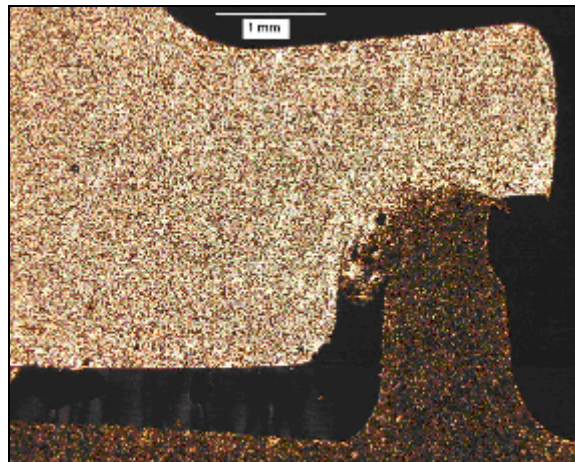


## PŘÍLOHA P XXI: MIKROTOMOVÉ ŘEZY SVÁRŮ - PA66

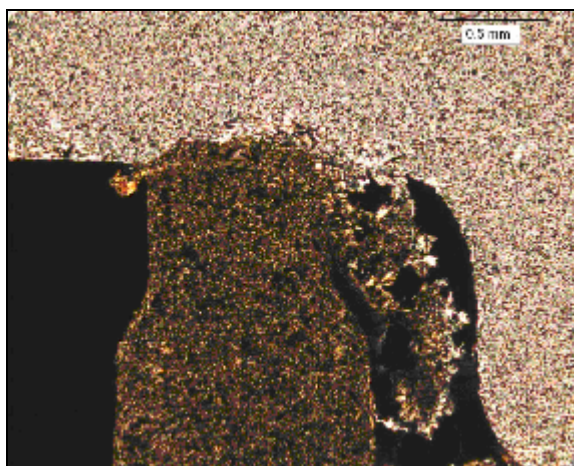
*Levá strana – 25x zvětšený*



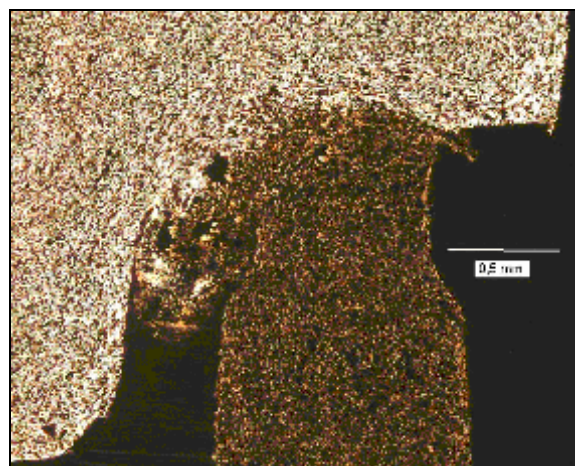
*Pravá strana – 25x zvětšený*



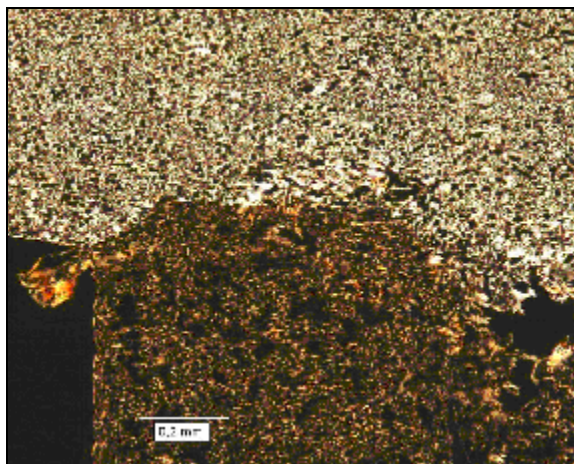
*Levá strana – 50x zvětšený*



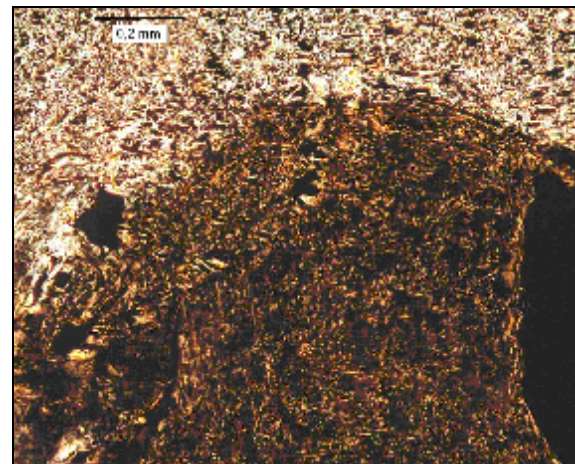
*Pravá strana – 50x zvětšený*



*Levá strana – 100x zvětšený*



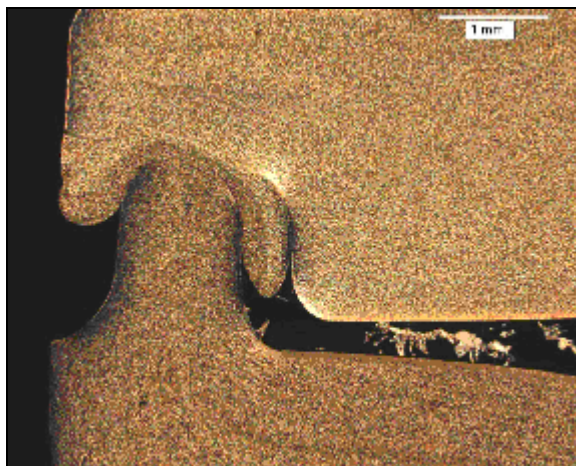
*Pravá strana – 100x zvětšený*



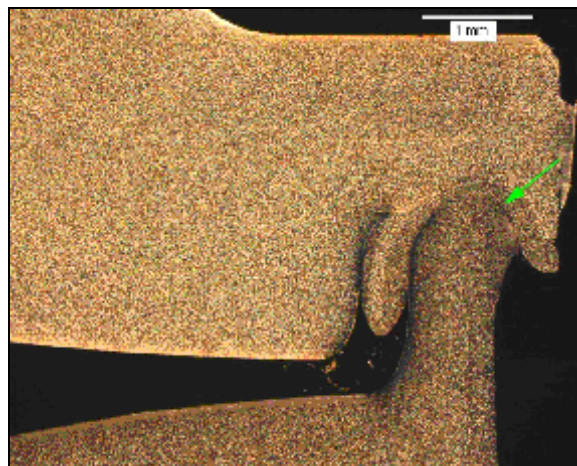


## PŘÍLOHA P XXII: MIKROTOMOVÉ ŘEZY SVÁRŮ - POM

*Levá strana – 25x zvětšený*



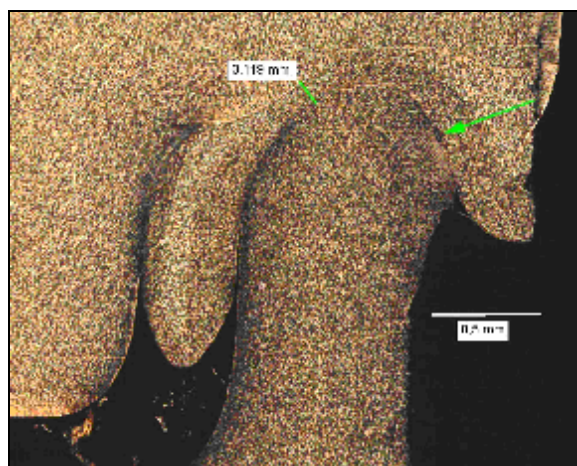
*Pravá strana – 25x zvětšený*



*Levá strana – 50x zvětšený*



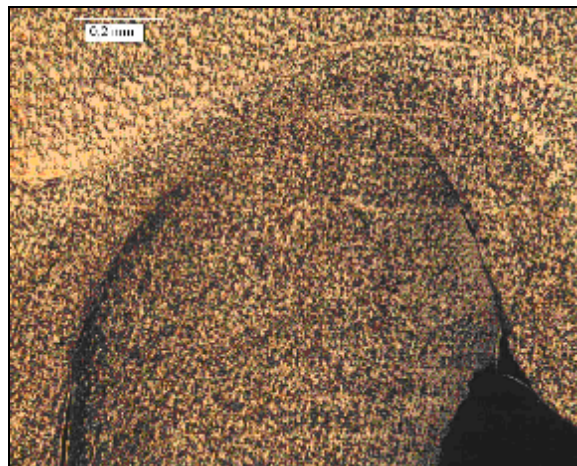
*Pravá strana – 50x zvětšený*



*Levá strana – 100x zvětšený*



*Pravá strana – 100x zvětšený*



# PŘÍLOHA P XXIII: GRAFICKÝ ZÁZNAM PRŮBĚHU SVAŘOVÁNÍ

