

# LASEROVÉ ŘEZÁNÍ TENKÝCH KOVOVÝCH PLECHŮ

## LASER CUTTING OF THIN METAL SHEETS

Hana LAPŠANSKÁ, Hana CHMELÍČKOVÁ<sup>1</sup>

### Abstrakt

Zpracování tenkých kovových plechů o tloušťkách do 0,3 mm je vlivem jejich elasticity a dalších charakteristických vlastností velmi náročné. Optimálním způsobem jejich dělení je řezání s využitím laserového svazku. Cílem příspěvku je optimalizace velikosti pracovní rychlosti a tlaku ochranného plynu při řezání různých druhů materiálů pulzním Nd:YAG laserem s průměrným výkonem 20 W. Testovanými materiály byly nízkouhlíková ocel, nerezavějící ocel, mosaz a bronz o tloušťkách 0,1 až 0,3 mm. S použitím dvou typů rezonátorů byla provedena řada experimentů, směřující k zjištění reálné šířky řezu, ověření kruhové polarizace použitého laserového svazku a především k stanovení optimální velikosti rychlosti a tlaku ochranného plynu pro konkrétní tloušťku a druh opracovávaného materiálu. Z důvodů srovnatelnosti výstupů byly všechny experimenty provedeny při konstantních hodnotách většiny parametrů a jedinou proměnnou vždy byla sledovaná veličina, tedy buď tlak nebo pracovní rychlost.

**Klíčová slova:** Nd: YAG laser, laserové řezání, pracovní rychlost, ochranný plyn, tlak.

### Abstract

Metal foils with thickness up to 0.3 mm are difficult to machine due to their elasticity and other typical characteristics. Using laser is the best way how to cut prototypes. The aim of this contribution is to optimize the value of cutting speed and pressure of protective gas used in cutting of different kinds of materials with pulsed Nd:YAG laser with average power of 20 W. Low-carbon steel, stainless steel, brass and bronze with thickness of 0.1 to 0.3 mm were tested. Many experiments were realized using two different types of resonators. They led to finding of real kerf width, examination of circular polarization of used laser beam and most of all to finding of optimal value of cutting speed and pressure of protective gas used in particular application. By reason of comparison of results all experiments were realized with constant parameters. The only controlled variable was the value of cutting speed and pressure of protective gas respectively.

**Keywords:** Nd: YAG laser, laser cutting, cutting speed, protective gas, pressure.

## ÚVOD

Cílem tohoto příspěvku je optimalizace parametrů laserového systému KLS 246 - 102 pro řezání tenkých plechů z různých druhů materiálů. Součástí experimentů je i zjištění reálné šířky řezu v závislosti na použitém plynu a jeho tlaku a také na pracovní rychlosti.

Vztah mezi pracovní rychlostí  $v$  a procentem překrytí pulzů  $PP$  vyjadřuje rovnice (1)

$$v = fD(1 - PP), \quad (1)$$

kde  $f$  je frekvence pulzů a  $D$  je průměr laserového svazku, dopadajícího na opracovávaný materiál [1].

<sup>1</sup> Mgr. Hana LAPŠANSKÁ, RNDr. Hana CHMELÍČKOVÁ, Společná laboratoř optiky UP a FzÚ AV ČR, Olomouc, [lapsan@prfw.upol.cz](mailto:lapsan@prfw.upol.cz), [chmelickova@sloup.upol.cz](mailto:chmelickova@sloup.upol.cz)  
Lektoroval: prof. Ing. Emil SPIŠÁK, CSc., KTaM, SJF TU v Košiciach, [emil.spisak@tuke.sk](mailto:emil.spisak@tuke.sk)

Je zřejmé, že při konstantní frekvenci a průměru svazku, musíme pro vyšší překrytí, a tím nižší drsnost, volit nižší pracovní rychlost. Samotné vysoké procento překrytí při dané hodnotě energie laserového svazku ještě nezaručuje kvalitní řez. Kvalita řezu je ovlivněna mj. i velikostí tlaku a druhem použitého ochranného plynu. Snažíme se tedy stanovit optimální hodnoty použitých parametrů k dosažení kvalitních řezů s nízkou drsností. Drsnost řezu  $d$  lze teoreticky vypočítat ze vztahu (2).

$$d = \frac{D}{2} \left[ 1 - \sqrt{PP(2 - PP)} \right] \quad (2)$$

kde  $D$  je průměr dopadajícího laserového svazku a  $PP$  je procento překrytí pulzů vyjádřené desetinným číslem.

Tento vztah zahrnuje pouze geometrii pulzů, nikoliv charakteristiky opracovávaného materiálu. Skutečná drsnost je vyšší a lze ji určit ze snímků, pořízených např. rastrovacím elektronovým mikroskopem.

## LASEROVÝ SYSTÉM KLS 246 - 102

Laserový systém KLS 246 – 102 vyrobený švýcarskou společností LASAG AG disponuje řadou použití. Jedná se o pevnolátkový pulzní Nd: YAG laser s nastavitelným rezonátorem. Díky pohyblivosti zadního zrcátka rezonátoru lze měnit jeho vzdálenost od kavity v rozsahu 190 až 390 mm. Toto zrcátko je navíc vyměnitelné, což zvyšuje počet možných nastavení rezonátorů, a tím také možnosti použití tohoto systému pro různé způsoby opracování materiálů jako je řezání, vrtání nebo svařování [2].

K ochraně optických součástí pracovní hlavy a k odstranění materiálu, roztaveného během laserového zpracování, je nutné použít ochranný plyn. Pro konkrétní použití volíme kyslík, dusík, argon, helium nebo stlačený vzduch. Plyn, jehož tlak by obecně neměl převýšit hodnotu 2 MPa, je z láhvi veden do trysky na konci pracovní hlavy.

Další důležitou součástí laserového systému je stolek, poháněný servomotory propojenými s počítačem, který řídí celý pracovní proces. Stolek, pohyblivý ve třech osách, slouží k upevnění opracovávaného materiálu a k jeho pohybu a tím i zpracování, neboť pracovní hlava laseru je nepohyblivá. Rychlost pohybu stolku, tedy pracovní rychlost, významně ovlivňuje kvalitu provedené laserové aplikace. Různé druhy a tloušťky materiálů je nutné řezat při různých pracovních rychlostech [3].

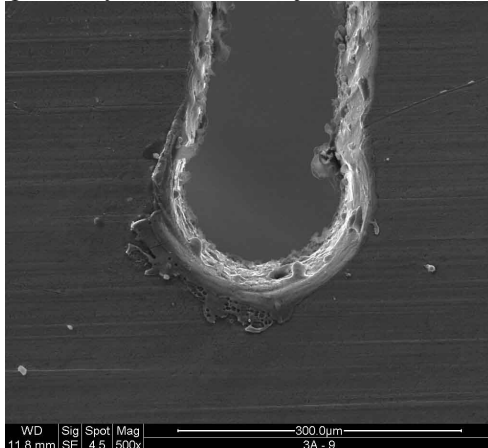
## EXPERIMENT

Pro řezání tenkých kovových plechů jsou určeny rezonátory s rovinným zadním zrcátkem v poloze 390 mm od čela krystalu nebo s kulovým zadním zrcátkem v poloze 300 mm. Všechny experimenty budou provedeny za použití obou typů rezonátorů, což umožní následné srovnání výsledků a stanovení optimálního nastavení laseru pro danou aplikaci.

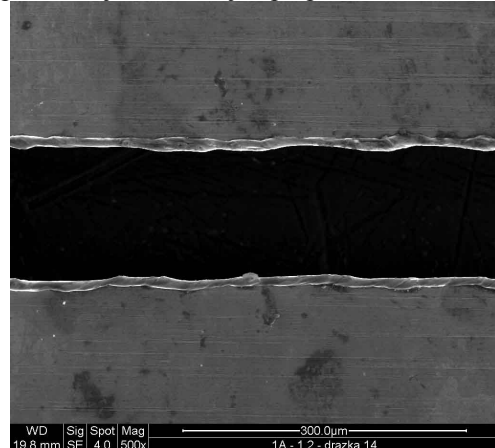
Pro každý materiál dané tloušťky jsme při konstantní hodnotě délky pulsu, energie a frekvence vyšetřovali optimální velikost pracovní rychlosti, a tím také procenta překrytí svazku, při kterém řez dosahuje nejvyšší kvality. Součástí experimentu je také stanovení reálné šířky řezu a její případné závislosti na velikosti pracovní rychlosti, tlaku a druhu použitého ochranného plynu a také průměru trysky, kterou je plyn veden k pracovnímu místu.

Průměrný výkon laseru při použití rezonátoru s rovinným zrcátkem nesmí překročit hodnotu 36 W, jinak by mohlo dojít k poškození zrcátka. Z bezpečnostních důvodů jsme tuto hodnotu ještě snížili a k našim experimentům použili svazek s průměrným výkonem do 25 W. Pro řezání tenkých kovových plechů o malých tloušťkách je tato hodnota dostatečná.

Prvním vyšetřovaným materiálem byla nízkouhlíková ocel třídy 11 o tloušťce 0,1 mm. Na základě dřívějších experimentů jsme zvolili délku pulzu 0,12 ms. K docílení požadovaného výkonu (přibližně 20 W) jsme při energii 60 mJ nastavili frekvenci pulzů 300 Hz. Jako ochranný plyn byl použit stlačený vzduch o tlaku 0,5 MPa s tryskou o průměru 1,2 mm. Při těchto parametrech hledáme optimální velikost pracovní rychlosti. Hlavním kritériem při optimalizaci je kvalita provedeného řezu, tedy jeho drsnost, přítomnost nečistot a podobně. Z opakovaného měření drsnosti vyplývají nejpříznivější hodnoty, a to přibližně  $6 \mu\text{m}$ , při použití pracovní rychlostech v rozmezí  $8 - 12 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ . Podle vztahu (1) odpovídá těmto rychlostem 74 - 84 % překrytí pulzů. Také vizuální kvalita řezů je při těchto rychlostech velmi dobrá. Přítomnost neodstraněné a následně ztuhlé taveniny je minimální. Na obr.1 je znázorněn snímek řezu, provedeného při rychlosti  $9 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$  ve svislém směru. Změřená šířka řezu je přibližně  $143 \mu\text{m}$ , což odpovídá výsledkům následujícího měření. Obr. 2 představuje 0,2 s trvající propal.



Obr.1 Řez pracovní rychlostí  $9 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$   
(ocel 0,1 mm)

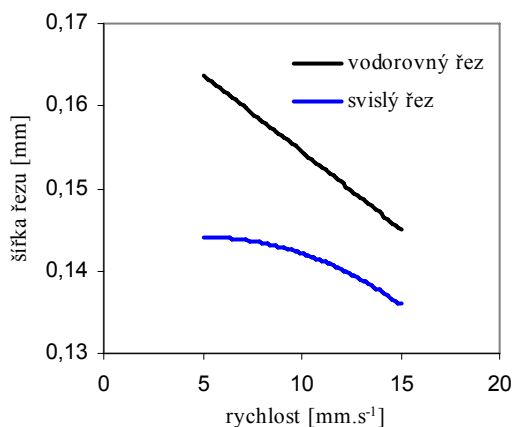


Obr.2 Propal 0,2 s  
(ocel 0,1 mm)

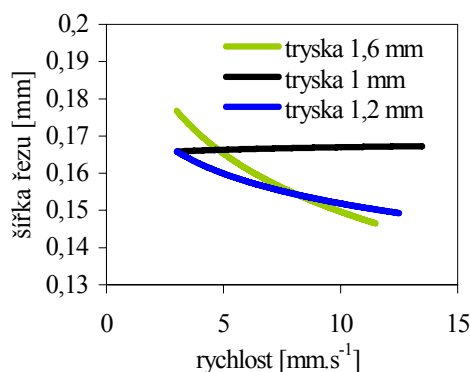
Dalším krokem bylo zjištění skutečné šířky řezu. Pro kontrolu kruhové polarizace byla provedena série řezů jak ve vodorovném, tak i ve svislém směru. Výsledky tohoto experimentu jsou uvedeny v obr.3. Je zřejmé, že šířky řezů, vedených ve vodorovném a svislém směru nejsou identické. Dopadající laserový svazek tedy není přesně kruhově polarizovaný. Příčinou může být rozladění laserového systému nebo skutečnost, že je laserový svazek nepatrně odkloněn od normály pracovní roviny. Diference se projevuje výrazněji při nižších pracovních rychlostech, kdy dosahuje maximální hodnoty přibližně 0,02 mm. Dále se projevila závislost šířky řezu na velikosti pracovní rychlosti. S rostoucí rychlostí šířka řezu při použití stlačeného vzduchu jako ochranného plynu klesá. K uvedeným výsledkům je nutné dodat, že šířky řezů byly naměřeny s přesností 0,005 mm.

Dalším materiálem, u něhož jsme zjišťovali optimální velikost pracovní rychlosti a dalších parametrů, ovlivňujících kvalitu řezu, byla nerezavějící ocel 1.4310 INOX o tloušťce 0,2 mm. Vzhledem k větší tloušťce a také odrazivosti materiálu je nutné použít svazek s vyšší energií. Všechny řезы byly provedeny při energii svazku 100 mJ, délce pulzů 0,15 ms a frekvenci 250 Hz, přičemž velikost průměrného výkonu byla 23 W. Jako ochranný plyn byl nejdříve použit vzduch stlačený na 5,5 MPa s tryskou o průměru 1 mm. Na základě výsledků měření drsnosti a vyhodnocené kvality řezu byla stanovena optimální velikost pracovní rychlosti  $5 - 6 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ , odpovídající 88 - 90 % překrytí pulzů. Při uvedených parametrech se u tohoto materiálu neprojevila jednoznačná závislost šířky řezu na pracovní rychlosti. Hodnoty šířky řezu oscilovaly v rozmezí 0,16 až 0,17 mm. Při použití trysek o vyšších průměrech byla závislost šířky řezu na velikosti pracovní rychlosti opět prokázána. Při konstantních parametrech, uvedených výše,

jsme zjišťovali tuto závislost při použití trysek o průměru 1,2 mm a 1,6 mm. Výsledky experimentů znázorňuje obr.4.



Obr.3 Závislost šířky řezu na velikosti pracovní rychlosti (ocel 0,1 mm)



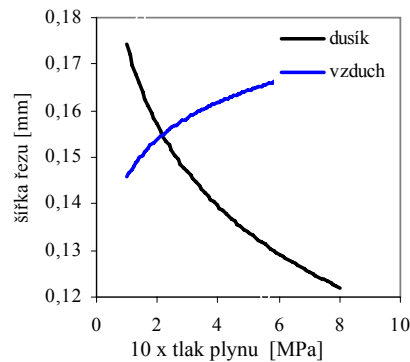
Obr.4 Závislost šířky řezu na velikosti pracovní rychlosti při různých průměrech trysky (nerezavějící ocel 0,2 mm)

Závislost šířky řezu na pracovní rychlosti je dána průměrem trysky, kterou je ochranný plyn přiváděn k materiálu. Závisí také na druhu opracovávaného materiálu. Nutno dodat, že opakováním řezů a následným měřením jsme nedospěli ke stejným hodnotám průměrné šířky řezu při dané rychlosti. Odchytky jsou zřejmě dány nehomogenitou struktury materiálu.

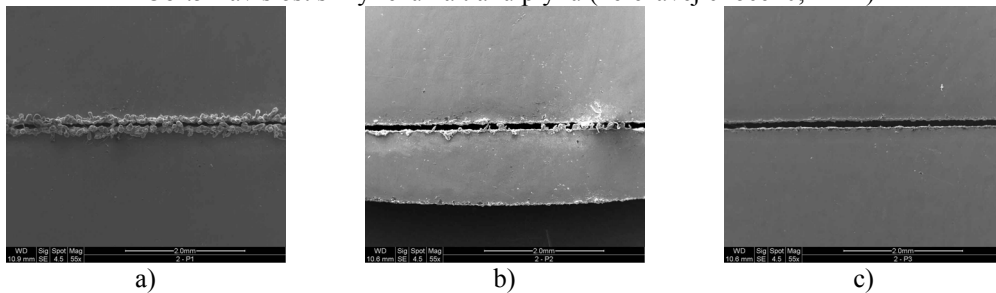
Dále jsme se zaměřili na určení závislosti šířky řezu na velikosti tlaku ochranného plynu. Při konstantní pracovní rychlosti 8 mm.s<sup>-1</sup> jsme provedli sérii řezů s použitím stlačeného vzduchu. Měření jsme při stejných parametrech zopakovali s dusíkem (obr.5). Šířka trysky v obou případech byla 1,2 mm.

Kvalita řezů při nízkém tlaku ochranného plynu je velmi špatná. V řezu zůstává část nataveného materiálu, který plyn nebyl schopen odfouknout. Drsnost řezu je nevyhovující. Šířka řezu navíc není po celé jeho délce konstantní. Při použití dusíku je při nízkých tlacích šířka řezu vyšší než při použití stlačeného vzduchu. V tomto případě je ale vyšší množství, a tím i objem, přítomných kapek neodstraněného materiálu. S rostoucím tlakem ochranného plynu se mění šířka řezu. Při použití dusíku klesá. Naopak, je-li ochranným plynem stlačený vzduch, šířka řezu roste s rostoucím tlakem plynu. Tuto skutečnost vysvětlujeme obsahem kyslíku ve vzduchu. Kyslík

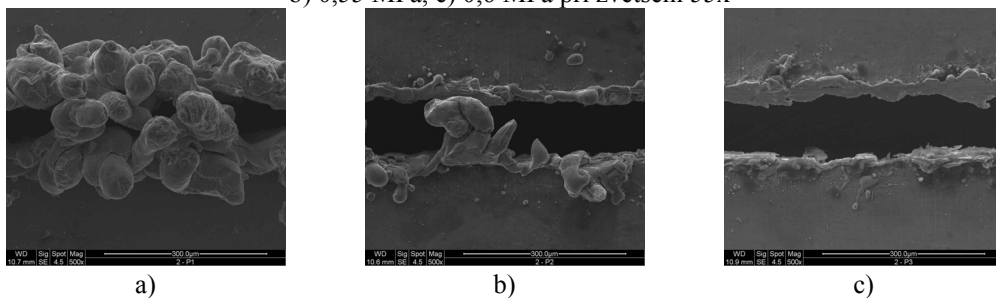
podporuje hoření a při vyšších tlacích je jej za časovou jednotku dodáno více. Proto je také šířka řezu větší a přítomnost nečistot a objem neodstraněné ztuhlé taveniny menší (obr.6,7).



Obr.5 Závislost šířky řezu na tlaku plynu (nerezavějící ocel 0,2 mm)



Obr.6 Spodní strana řezu při požití vzduchu jako ochranného plynu při tlaku a) 0,2 MPa, b) 0,55 MPa, c) 0,6 MPa při zvětšení 55x



Obr.7 Spodní strana řezu při požití vzduchu jako ochranného plynu při tlaku a) 0,2 MPa, b) 0,55 MPa, c) 0,6 MPa při zvětšení 500x

Pro tloušťku plechu 0,2 mm bylo nutné použít vyšší energii, a to 300 mJ. Pro zachování průměrného výkonu byla zvolena frekvence pulzů byla 80 Hz při stejné délce pulzu 0,2 ms. Optimální pracovní rychlost při větší tloušťce je přirozeně nižší, a to asi  $2 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ , což odpovídá 96 % překrytí pulzů. Je zajímavé, že i přes větší tloušťku materiálu byly řezy ve srovnání s plechem tloušťky 0,1 mm čistější a přítomnost okují nižší.

Mosazné plechy bylo také nutné začernit. Parametry pro jejich řezání jsou obdobné jako v případě bronzu. Mosazný plech o tloušťce 0,1 mm byl řezán s použitím stlačeného vzduchu, plech o tloušťce 0,3 mm také s dusíkem. Tlak obou plynů byl 0,6 MPa. Závislost šířky řezu na velikosti pracovní rychlosti se neprojevila. Šířka řezu se pohybovala v rozmezí 0,13 až 0,15 mm. Obecně lze říct, že řezy v mosazném plechu dosahovaly vyšších kvalit než v bronzovém. Drsnost i přítomnost okují byla nižší. Optimální pracovní rychlost byla stanovena na  $3 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ .

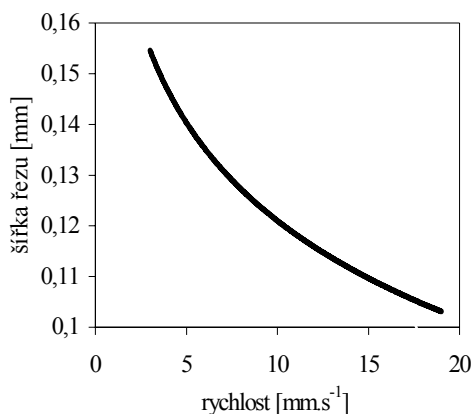
Maximální rychlost, při které byl plech ještě prořezán dosahovala  $15 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ . Kvalita takového řezu však již byla velmi špatná a při výrobě konkrétních součástí prakticky nepoužitelná.

Podobně jako u nerezavějící oceli jsme prověřovali také vliv šířky trysky a tlaku ochranného plynu na kvalitu a šířku řezu, tentokrát při použití dusíku. Vzhledem ke skutečnosti, že šířka řezu nebyla po celé jeho délce konstantní, nebylo možné stanovit konkrétní závislosti jako v případě nerezavějící oceli. Jediným závěrem je fakt, že při použití dusíku jako ochranného plynu dostáváme obecně užší řez než při použití stlačeného vzduchu.

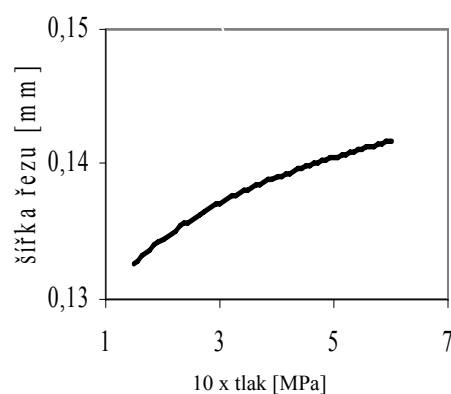
Všechna výše uvedená měření byla realizována také při použití rezonátoru s kulovým zrcátkem. Vystupující laserový svazek má o 30 % menší průměr v ohnisku než při použití rezonátoru s rovinným zrcátkem.

U nízkouhlíkové oceli o tloušťce 0,1 mm nebyla prokázána závislost šířky řezu na velikosti pracovní rychlosti ani na tlaku ochranného plynu. Průměrná šířka řezu ve vodorovném směru byla 0,13 mm, ve svislém 0,10 mm, přičemž kvalita svislého řezu byla podstatně horší. Drsnost po celé délce řezu nebyla konstantní a díky velkému množství okují ji nebylo možné přesně určit.

U nerezavějící oceli tloušťky 0,2 mm jsme prověřovali závislost šířky řezu na velikosti pracovní rychlosti při konstantním tlaku 0,55 MPa (obr.8) a závislost na tlaku ochranného plynu (stlačený vzduch) při konstantní rychlosti  $6 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$  (obr.9). Získali jsme obdobné výsledky jako při použití prvního typu rezonátoru. Řez je obecně užší, ale jeho kvalita je nedostačující.



Obr.8 Závislost šířky řezu na pracovní rychlosti, rezonátor s kulovým zrcátkem (nerezavějící ocel 0,2 mm)



Obr.9 Závislost šířky řezu na tlaku ochranného plynu, rezonátor s kulovým zrcátkem (nerezavějící ocel 0,2 mm)

Při řezání mosazi tloušťky 0,1 mm se opět projevil rozdíl mezi šířkou řezu ve vodorovném a svislém směru. Průměrná hodnota byla 0,12 mm ve vodorovném a 0,10 mm ve svislém směru. Kvalita řezů byla nižší než u oceli. Na rozdíl od oceli nebyla neprokázána závislost šířky řezu na velikosti pracovní rychlosti.

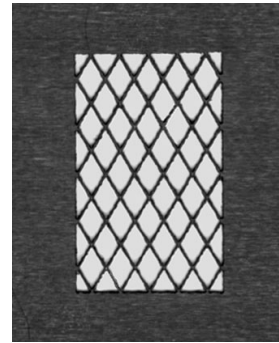
Řezy v bronzovém plechu tloušťky 0,1 mm dosahovaly ještě nižší kvality. Šířka řezu kolísala v rozmezí 0,05 až 0,09 mm, přitom rozdíl mezi průměrnou hodnotou šířky ve vodorovném a svislém směru byl 0,01 mm až 0,02 mm.

Barevné kovy o tloušťkách 0,2 a 0,3 mm nebylo možné s tímto rezonátorem uspokojivě řezat. Šířka řezu kolísala v rozmezí 0,02 až 0,06 mm po celé jeho délce nezávisle na tlaku ochranného plynu ani na pracovní rychlosti, což neumožňuje vytvořit při stejných parametrech opakovaně řez stejného charakteru.

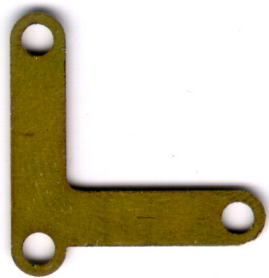
Na závěr jsme získané poznatky aplikovali při výrobě konkrétních prototypů. Jedním z nich byl stator motorku o průměru 12 mm (obr.10). Dospěli jsme k závěrům, že námi optimalizované rychlosti pro dané tloušťky a druhy materiálu je nutné upravit. Optimalizace se prováděla na 15 mm dlouhých přímých řezech. Při řezání členitých tvarů je nutné tuto rychlost výrazně snížit. V tomto případě až na  $2,5 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$  při použití nerezavějící oceli tloušťky 0,3 mm. obr.11 prezentuje další aplikaci. Jde o mřížku o rozměrech 8 x 12 mm z 0,1 mm tlusté nízkouhlíkové oceli, vyřezané při rychlosti  $6 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ . Příklady dalších aplikací jsou na obr.12 a obr.13 (mosazný kontakt o rozměru 8 x 8 mm a mřížka z nerezavějící oceli o průměru 40 mm). Pracovní rychlost je limitována možnostmi pracovního stolu, a to hlavně jeho schopností plynule a přitom rychle měnit směr svého pohybu.



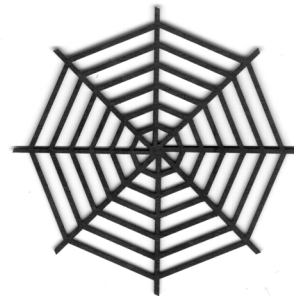
Obr.10 Stator o průměru 12 mm  
(nerezavějící ocel 0,3 mm)



Obr.11 Mřížka o rozměrech 8 x 12 mm  
(nízkouhlíková ocel 0,1 mm)



Obr.12 Kontakt 8 x 8 mm  
(mosaz 0,3 mm)



Obr.13 Mřížka o průměru 40 mm  
(nerezavějící ocel 0,2 mm)

## ZÁVĚR

Byla provedena řada experimentů, jejichž cílem byla optimalizace pracovních parametrů laserového systému KLS 246 – 102 pro řezání kovových plechů o tloušťkách 0,1 až 0,5 mm. Zkoumanými materiály byly nízkouhlíková ocel, ušlechtilá nerezavějící ocel, mosaz a bronz. Pro uvedené materiály byla stanovena optimální velikost pracovní rychlosti. Optimální tlak byl zpravidla 0,6 až 0,8 MPa.

Uvedené hodnoty pracovních rychlostí se týkají dlouhých přímých řezů. Při řezání členitých tvarů malých rozměrů, kde dochází k častým změnám směru řezu, musíme rychlost přizpůsobit náročnosti tvaru daného výrobku. Toto omezení souvisí s možnostmi pohybu pracovního stolu, obzvláště s jeho schopností rychlého rozjezdu a brždění. Podobně také velikost

tlaku ochranného plynu při řezání drobných tvarů musí být nižší, aby nedošlo k jejich destrukci. Při každém prototypovém řezání je tedy nutné optimalizovat pracovní rychlost i tlak plynu pro konkrétní aplikaci. Při použití svazku o vyšší energii je zřejmé, že i možné pracovní rychlosti budou nabývat vyšších hodnot. Vždy je nutné zvolit vhodný kompromis mezi kvalitou řezu, a tím i rychlostí celého procesu, a ekonomickými náklady.

Součástí experimentů byla i kontrola kruhové polarizace laserového svazku uvedeného laserového systému. K ní byl použit test, který spočívá ve srovnání šířek řezů ve vodorovném a svislém směru. Naměřené hodnoty nebyly identické. Šířka řezu ve svislém směru byla v průměru o 0,03 mm nižší než ve směru vodorovném. Laserový svazek tedy není přesně kruhově polarizovaný. Příčinou může být rozladění laserového systému nebo skutečnost, že je laserový svazek nepatrně odkloněn od normály pracovní roviny.

U některých materiálů se projevila závislost šířky řezu na velikosti pracovní rychlosti. Významně se také projevuje vliv velikosti tlaku a druhu ochranného plynu na šířku stopy. Při použití dusíku se s rostoucím tlakem plynu snižuje šířka řezu. Naopak při použití stlačeného vzduchu se s rostoucím tlakem šířka řezu zvyšuje, a to tím víc, čím užší trysku, která přivádí plyn k opracovávanému materiálu, použijeme. Tuto skutečnost lze vysvětlit vysokým podílem kyslíku ve vzduchu. Kyslík podporuje hoření, a proto se v místě řezu rozpustí a následně odstraní větší objem materiálu.

Provedli jsme srovnání svazků, získaných ze dvou různých rezonátorů. Rezonátor s kulovým zadním zrcátkem dává užší svazek na úkor hloubky ostrosti. Proto je vhodný pouze pro řezání materiálů o tloušťkách do 0,1 mm.

Při běžných aplikacích s tolerancemi rozměrů vyřezávaných součástí v řádu desetin milimetrů, můžeme závislost šířky řezu na tlaku nebo na rychlosti zanedbat. Pro přísnější tolerance bychom museli pro každý materiál dané tloušťky přesně určit šířku řezu při dané velikosti pracovní rychlosti a tlaku ochranného plynu. To by vyžadovalo provedení rozsáhlejších experimentů a jejich následné statistické vyhodnocení.

Hodnoty energie laserového svazku pro konkrétní aplikace byly stanoveny na základě předchozích experimentů. Jejich přesnější optimalizace bude předmětem dalších experimentů.

## LITERATURA

- [1] STEEN, W. M.: *Laser material processing*. 3rd ed. London: Springer, 2003. ISBN 1-85233-98-6.
- [2] LASAG AG: *Operating instructions for KLS 246 - 102*, Thun, Switzerland, 1999.
- [3] CHMELÍČKOVÁ, H., POLÁK, M. Nd: *YAG pulsed laser cutting of metals*. In Sborník 39. mezinárodní konference EAN'01. Praha : Česká společnost pro mechaniku, 2001, vol. 39, s. 115-120. ISBN 80-86246-09-4.