



# Minimalizace deformace výrobků z plechu při řezání laserem

## Diplomová práce

*Studijní program:* N2301 – Strojní inženýrství  
*Studijní obor:* 2301T048 – Strojírenská technologie a materiály  
*Autor práce:* **Bc. Miroslav Eichler**  
*Vedoucí práce:* doc. Ing. Pavel Solfronk, Ph.D.



Technická univerzita v Liberci  
Fakulta strojní  
Akademický rok: 2016/2017

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Miroslav Eichler**  
Osobní číslo: **S15000346**  
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**  
Studijní obor: **Strojírenská technologie a materiály**  
Název tématu: **Minimalizace deformace výrobků z plechu při řezání laserem**  
Zadávací katedra: **Katedra strojírenské technologie**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Technologie výroby hutních polotovarů (válcování plechů, možnosti eliminace vnitřního pnutí). Povrchové vady plechů.
2. Metody tepelného dělení ocelových plechů (výhody a nevýhody jednotlivých technologií ve vztahu k následným operacím tváření). Tepelně ovlivněná oblast v okolí řezu.
3. Optimalizace technologického procesu dělení materiálu pomocí laseru s cílem minimalizace deformace materiálu. Experimentální ověření navržených technologických operací.
4. Vyhodnocení výsledků měření a doporučení pro další výzkum.
5. Závěr.

Rozsah grafických prací: **tabulky, grafy**  
Rozsah pracovní zprávy: **cca 50 stran**  
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

- [1] **HERTZBERG, R.W.** *Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials*. 4th ed. New York: John Wiley & Sons, 1996. s. 786. ISBN 0-471-01214-9.  
[2] **ASM HANDBOOK**. *Volume 14 - Forming and Forging*. 6th ed. Materials Park: ASM International, 2004. s. 978. ISBN 0-87170-020-4.  
[3] **ASM HANDBOOK**. *Volume 14B - Metalworking: Sheet Forming*. 2nd ed. Materials Park: ASM International, 2006. s. 924. ISBN-10: 0-87170-710-1.  
[4] **MICHNA, Š., NOVÁ, I.** *Technologie a zpracování kovových materiálů*. Prešov: Adin, 2008. s. 326. ISBN 978-80-89244-38-6.  
[5] **TSCHAETSCH, H.** *Metal Forming Practise (Processes Machines Tools)*. Berlin: Springer-Verlag, 2006. s. 405. ISBN-10: 3-540-33216-2.

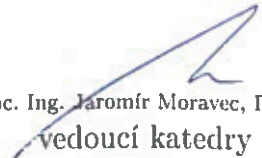
Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Pavel Solfronk, Ph.D.**  
Katedra strojírenské technologie  
Konzultant diplomové práce: **Ing. Jiří Sobotka, Ph.D.**  
Katedra strojírenské technologie

Datum zadání diplomové práce: **1. listopadu 2016**

Termín odevzdání diplomové práce: **1. dubna 2018**

  
prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld  
děkan



  
doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Liberci dne 1. listopadu 2016

## Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum: 23. 5. 2017

Podpis:



## **Název diplomové práce:**

Minimalizace deformace výrobků z plechu při řezání laserem.

## **The title of thesis:**

Minimize deformation of sheet metal products during laser cutting

## **Anotace**

Tato diplomová práce se zabývá technologií tepelného dělení materiálu laserem. Cílem diplomové práce je minimalizace deformace plechových dílů s využitím nové technologie dělení. V rámci řešení diplomové práce byl tento nový technologický proces dělení laserem navržen a prakticky ověřen z pozice technologa ve společnosti TRUMPF. Tento technologický postup dělení může výrazně snížit deformace součástí, a tím dosáhnout požadované rozměrové přesnosti při výrobě.

Navrhovaný technologický postup má však obecnou aplikovatelnost a může být použit i v jiných výrobních společnostech. Pro experimentální ověření navrhovaného postupu byl vybrán typický zástupce nejproblematictější skupiny vyráběných dílů, který svým charakterem připomíná ocelovou pásovinu.

Autor této diplomové práce vynalezl tento nový technologický postup dělení materiálu, který vede ke zvýšení rozměrové přesnosti výrobků a zkrácení výrobního času.

## **Klíčová slova**

Dělení materiálu, laser, CO<sub>2</sub> laser, teplo, rozložení tepla, válcování plechu, napětí, průhyb, torze.

## **Annotation**

This diploma thesis deals with the technology of thermal separation of material by means of laser. The aim of the thesis is minimizing the deformation of sheet metal parts with the use of a new separation technology. In the framework of the diploma thesis, this new technological process of laser cutting was designed and practically verified during the author's employment at the company TRUMPF. This solution can significantly reduce the deformation of the part and thus achieve the required dimensional quality in the production of TRUMPF parts.

However, the proposed technological approach has general applicability and can be used in other manufacturing companies as well. For the experimental verification of the proposed procedure, a typical representative of the most problematic group of manufactured parts, which in their character resembles sheet metal, was selected.

The author of this diploma thesis has invented this new technological process which leads to an increase in the dimensional accuracy of the products and to a reduction in production time.

## **Key words**

Cutting, laser, CO<sub>2</sub> laser, heat, distribution of heat, sheet rolling, tension, bending, torsion.

## **Poděkování:**

Na tomto místě bych chtěl vyjádřit poděkování za odborné připomínky mému vedoucímu práce doc. Ing. Pavlu Solfronkovi, Ph.D. a dále pak poděkování za pomoc při praktické realizaci experimentů kolegům a technologům z firmy TRUPMPF – Praha a Liberec, jmenovitě pak panu Bronislavu Matoušů.

*Diplomová práce vznikla na základě finanční podpory projektu studentské grantové soutěže /SGS 21122/ ze strany Technické univerzity v Liberci v rámci podpory specifického vysokoškolského výzkumu.*

## Obsah

1	Úvod.....	10
2	Technologie výroby hutních polotovarů .....	11
2.1	Lití do kokil .....	11
2.1.1	Druhy ingotů.....	12
2.2	Kontinuální lití.....	13
2.2.1	Funkce jednotlivých částí.....	14
2.2.2	Princip .....	14
2.2.3	Mezipánev .....	15
2.2.4	Krystalizátor .....	15
2.2.5	Sekundární chlazení .....	15
2.3	Technologie tváření .....	16
2.3.1	Stroje pro válcování hutních polotovarů .....	16
2.3.2	Válcované polotovary.....	17
2.3.3	Vliv válcování na strukturu materiálu a vnitřní pnutí .....	17
2.3.4	Možnosti minimalizace vnitřního pnutí.....	18
3	Povrchové vady plechů a stav povrchu ovlivňující tepelné dělení .....	20
4	Metody dělení materiálu .....	21
4.1	Kvalita řezu ve vztahu k povrchu plechu.....	22
4.2	Metody tepelného dělení ocelových plechů.....	23
4.2.1	Kyslíko-acetylenové dělení .....	24
4.2.2	Plasma .....	25
4.2.3	Laser .....	26
5	Tepelně ovlivněná oblast v okolí řezu (TOO).....	32



5.1	Fyzikální a chemické jevy procesu .....	34
5.2	Rozdělení TOO dle teploty, chemického složení a stavu povrchu .....	35
5.3	Výhody a nevýhody jednotlivých technologií ve vztahu k následným operacím tváření .....	36
6	Experimentální část – minimalizace deformace (torze) dílů.....	39
6.1	Definice problému .....	40
7	Metodika řešení.....	41
7.1	Postup řešení minimalizace deformace.....	41
7.2	Optimalizace technologického procesu na stroji .....	44
7.3	Optimalizace technologického procesu v software .....	49
7.3.1	Modul CAD .....	49
7.3.2	Modul NEST .....	50
7.3.3	Modul LASER.....	51
8	Experimentální ověření .....	53
8.1	Průběh experimentu .....	55
8.2	Kontrola měřidel .....	56
8.3	Měření deformací.....	57
9	Vyhodnocení .....	60
	Závěr.....	61
	Citovaná literatura .....	62

## Seznam symbolů a zkratek

CO <sub>2</sub> laser	typ laseru využívající k dělení materiálu plyn	[-]
YAG laser	typ pevnolátkového laser - Ytrium aluminium granát dopovaný atomy ytterbia.	[-]
SO <sub>2</sub>	chemická sloučenina - Oxid siřičitý	[-]
O <sub>2</sub>	chemický prvek – Kyslík	[-]
Zn	chemický prvek – Zinek	[-]
CO <sub>2</sub>	chemická sloučenina - Oxid uhličitý	[-]
Cu	chemický prvek - Měď	[-]
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	Ethyn, triviální název acetylén	[-]
N <sub>2</sub>	chemický prvek – Dusík	[-]
°C	teplotní stupeň Celsia	[-]
W	jednotka výkonu	[-]
tl.	tloušťka plechu	[mm]
$\sigma$	napětí	[Pa]
$R$	poloměr kružnice	[mm]

# 1 Úvod

Firmy zabývající se výrobou strojních součástí, kde jednou z výrobních operací je použití *laserového dělení plechových dílů*, jsou postaveny před problémem, jak vyřešit *deformace* vzniklé během této operace.

Firma TRUMPF Liberec, která se zabývá výrobou strojních částí a celků automatizace k laserovým a jiným strojům, řešila kvalitativní neshody způsobené deformacemi, u určité skupiny dílů z plechu, při dělení laserem. V pozici technologa-programátora laserového dělení jsem našel způsob, *jak je možné* předejít těmto *deformacím*, a tím zlepšit tento výrobní proces.

Cílem této práce je ověření a popis nové metody, jak *minimalizovat deformace* při dělení plechových dílů laserem. Pro toto ověření byla vybrána skupina plechových dílů z reálné výroby, svým charakterem připomínající pásovinu, u kterých byl tento problém řešen.

## 2 Technologie výroby hutních polotovarů

Do výsledné jakosti strojních dílů je promítnut celý předchozí proces výroby. Rozhodující úlohu hraje způsob zpracování hutních polotovarů *odléváním, kováním a válcováním*. Volba technologie výroby hutních polotovarů závisí na tvarové složitosti výsledného polotovaru. Jako metody výroby hutních polotovarů pro plechové díly rozeznáváme *odlévání do kokil* a v současné době častěji užívané *kontinuální lití*. [1]

### 2.1 Lití do kokil

Výchozím polotovarem v životním cyklu výrobku je konečný produkt oceláren – *ingot*, nebo *odlitek*, který je odléván do *kokily*. Ingoty (obr. 2.1.1), stejně jako odlitky, jsou dále zpracovávány v kovárnách, válcovnách, kde jsou mechanicky zpracovávány – *tvářeny*, na hotové výrobky, jakými jsou *kolejnice, dráty, tyče, plechy* apod. [2]



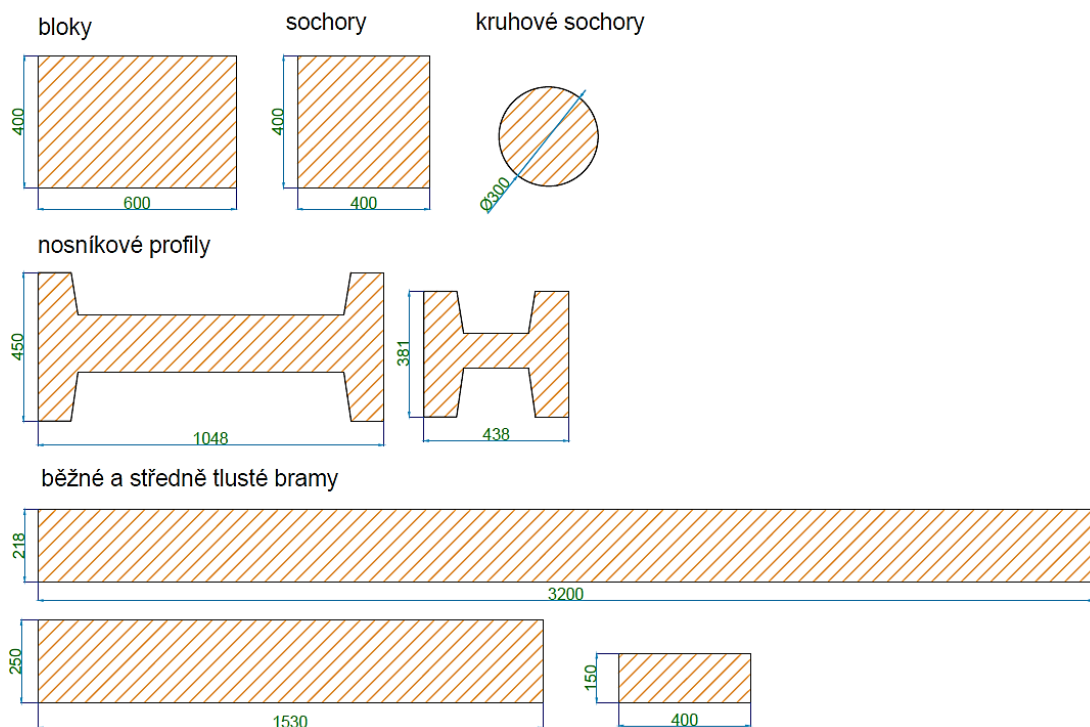
Obr. 2.1.1 Ocelové ingoty [3]

Abychom mohli materiál odlévat, je třeba dosáhnout lící teploty, která je závislá na druhu materiálu a jeho chemickém složení.

### 2.1.1 Druhy ingotů

Ocel se do kolil lije buď *horem*, nebo *spodem*. Mezi výhody lití horem patří malá spotřeba materiálu a možnosti lití i oceli s nižší teplotou. Jako nevýhodu lze zmínit nutnost čistit povrch. U lití spodem bývá povrch naopak čistý. Nevýhodou je vyšší lící teplota.

Během tuhnutí dochází v materiálu k jevům, které mají vliv na konečné vlastnosti oceli, a to ke krystalizaci, segregaci, a uvolňování plynů. Po stažení kokil z ingotů se ingoty buď nechají chladnout, nebo se dopravují rovnou do válcoven a kováren. Pro válcovny se nejčastěji používají ingoty čtvercové se zaoblenými hranami a konvexními nebo konkávními stěnami, případně se stěnami zvlněnými, které nepomáhají k minimalizaci tvorby trhlin ingotů. Důležitý je svislý průřez, který je ve tvaru komolého jehlanu, případně kužele (s kuželovitostí 0,7–1,2 % dle druhu oceli). Příklady odlévaných profilů jsou uvedeny na obr. 2.1.1.1. Celý proces tavení, odlévání a válcování reflektuje tvar výsledného produktu. Základní rozdělení je na *nosíkové profily* a na *ploché polotovary*. Celý proces mezi tekutým kovem a výsledným válcovaným výrobkem by neměl přesáhnout dobu dvou hodin. [4]



Obr. 2.1.1.1 Přehled polotovarů [4]

V dnešní době je však z ekonomického (dlouhá doba tuhnutí v kokilách) i kvalitativního hlediska používanější lití kontinuální. [5]

## 2.2 Kontinuální lití

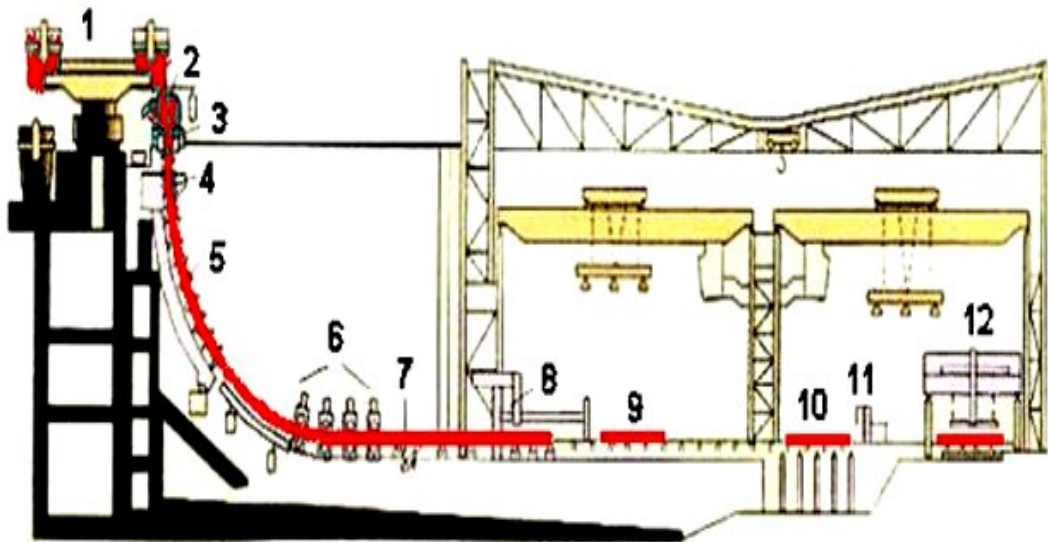
Plynulé odlévání je dávkový systém odlévání ocelí. Jeho vývoj je kombinací strojního konstruování, mechaniky, přenosu tepla a metalurgie. Cílem je dosáhnout přesného tvaru polotovarů s vysokou kvalitou. Plynulé odlévání přináší zvýšení kvality, produktivity, efektivnosti a v poslední době představuje hlavní technologii výroby oceli. V současné době je používáno pro výrobu více než 750 miliónu tun oceli, 20 miliónů tun hliníku a dalších slitin. Obr. 2.2.1. ukazuje seminekonečné zpracovávání oceli na tuhé polotovary. Dle požadovaného tvaru finálního výrobku rozeznáváme polotovary *bramové*, *sochorové* a *blokové*. Takto připravené polotovary jsou určeny pro další zpracování na *plechy*, *dráty*, *profily*, *kolejnice* atp. [6]



Obr. 2.2.1 Pohled na pánev, mezipánev krystalizátor [7]

### 2.2.1 Funkce jednotlivých částí

Principem kontinuálního lití je, na rozdíl od odlévání do jednotlivých kokil, nepřetržitý proces vyobrazený na obr. 2.2.1.1. Litá ocel je odlévána z pánve (1) do mezipánve (2) a vodou chlazeného krystalizátoru (3). Ocel začíná tuhnout ve formě a pokračuje v sekundární zóně (4) a prochází tažnými válci (5). V některých konfiguracích následuje rovnací prvek (6), dále následuje dělicí zařízení (8), dopravní zařízení (12) dopravuje polotovary do skladu, nebo horké pro konečné válcování.



Obr. 2.2.1.1 Schéma provozu na plynulé odlévání sochorů 1) pánvová hlavice; 2) mezipánev; 3) krystalizátor; 4) sekundární chlazení (primární sekce); 5) tažné zařízení + sekundární chlazení; 6) rovnací zařízení; 7) odpojení zaváděcí zátky; 8) dělicí zařízení; 9) dopravní zařízení; 10) příčný dopravník; 11) značkovací zařízení; 12) skladovací zařízení [4]

### 2.2.2 Princip

V průběhu kontinuálního lití se licí pánev plná ocele vyzvedne jeřábem na úroveň lití, kde je licí pánev otočena na vidlici do odlévací polohy. Pro vylévání materiálu je v pánvi umístěno šoupátko, kudy po otevření proudí tekutá ocel do mezipánve, což je řízeno zátkami. Krystalizace taveniny začíná ve chvíli, kdy se začne ochlazovat o měděné stěny krystalizátoru a dále při průchodu sekundární chladicí zónou, kde dochází k ochlazení stlačeným vzduchem. Jednotlivé desky jsou oddělovány na

požadovanou délku plynovými hořáky. Následně deska přechází na dopravník, kde jsou přidány identifikační znaky. Nutností je udržovat konstantní teplotu až do následného procesu válcování. Bramy jsou převezeny dopravníkem do ohřívací pece a dále za tepla válcovány. Kontinuální lití je plně automatizováno, kdy proud oceli je rovněž chráněn před oxidací. [7]

### 2.2.3 Mezipánev

Mezipánev je obvykle obdélníkového tvaru. Trysky jsou umístěny ve spodní části a dopravují tekutou ocel do krystalizátoru. Velikost mezipánve činí obvykle 8 – 10 % velikosti licí pánve. Mezi funkce mezipánve řadíme:

- segregaci oxidů
- proniknutí strusky do krystalizátoru
- zabezpečení plynulého toku oceli
- udržování neměnné výšky kovu nad tryskami do krystalizátoru, aby se zachoval plynulý tok a rychlost lití
- rozdělování oceli do jednotlivých licích kolon
- zásobuje krystalizátor

### 2.2.4 Krystalizátor

Je otevřeným objektem obsahujícím chladicí kanály vyrobené z čisté měděné slitiny, jehož funkcí je udržet ztuhlou skořepinu tak, aby byla schopná udržet tekutý obsah i při vstupu proudu do sekundární zóny chlazení. Rozhodujícími vlastnostmi jsou tvar, tloušťka skořepiny a teplota skořepiny, absence povrchových a podpovrchových vad, s minimem pórovitosti a nekovových vměstků.

### 2.2.5 Sekundární chlazení

Předlitek, který má ještě stále tekuté jádro, vstupuje do zóny sekundárního chlazení, kde je dochlazován ostříkovaním vodou. I když se primární příčiny vad připisují procesu chlazení v krystalizátoru, má na vznik povrchových a podpovrchových trhlin podstatný vliv *rovnoměrnost sekundárního chlazení*. Jako chladicí médium je používána voda i v kombinaci se vzduchem. V této oblasti jsou uplatňovány tři způsoby přenosu tepla: vedení, konvekce a záření.



## 2.3 Technologie tváření

Technologií tváření myslíme další výrobní etapu životního cyklu strojního dílu, tedy zpracování – odlitku. Podstatou tváření je dosažení plastických deformací, ke kterým dojde v okamžiku dosažení napětí na mezi kluzu pro daný materiál. V tomto okamžiku se mění fyzikální, mechanické a strukturní vlastnosti materiálu. [8]

Pro tváření obvykle používáme ingoty tvaru:

- **Bloků** – čtvercového průřezu, které jsou používány buď k dalšímu válcování, nebo ke kování.
- **Sochorů** – obvykle kruhového, čtvercového nebo obdélníkového průřezu.

Při tváření hutních polotovarů je užívána široká paleta strojů a dle kritérií je třeba volit takový, aby měl dostatečnou *přetvárnou sílu* (aby bylo dosaženo trvalé deformace), kterou je potřeba překonat *přetvárnou pevnost materiálu* (tj. tvářecí napětí, kterým se dosáhne plastické deformace).

### 2.3.1 Stroje pro válcování hutních polotovarů

Primárně je možné stroje rozdělit dle typu hnací jednotky a rychlosti na mechanické lisy (elektrické, hydraulické, pneumatické, hydromechanické, pneumechanické) a buchary (s horním nebo dolním kovádkem – pérové, pneumatické). Dle rychlosti, tj. buď působením klidných sil (válcování, lisování, apod.), nebo rázy (kování, nýtování apod.). [9]

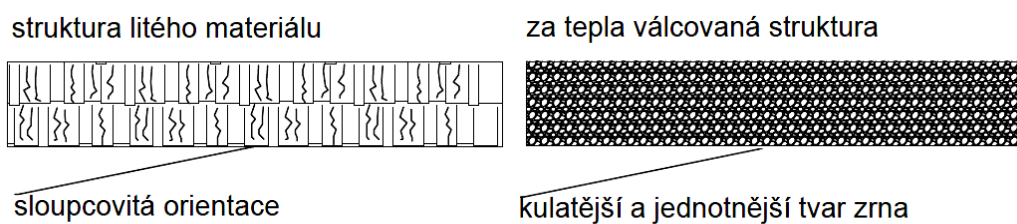
*Kování* je nejstarší zpracovatelskou technologií kovových materiálů. Obvykle se používá buchar nebo ruční náradí. *Protlačováním* se míní objemové tváření, které je uskutečňováno dopředným, zpětným, případně stranovým protlačováním. *Válcování* je objemové tváření, kterým je zpracovávána většina tvářených polotovarů. *Plošné tváření* je možné dělit na vystřihování, vysekávání, lemování, zkručování, rovnání, ohýbání atp.

### 2.3.2 Válcované polotovary

Válcování řadíme mezi vysoce produktivní způsob výroby, plechů, pásů a fólií. *Válcované plechy* lze klasifikovat dle tloušťky na tenké a tlusté. Principem metody válcování je prohřívání ingotů v hlubinných pecích na teplotu tváření kolem 1 100 °C a válcování na předvalky. Válcovací operace jsou si podobné v tom, že dochází tlakovými silami k plastické deformaci mezi dvěma otáčejícími se válci. Válcováním se materiál prodlužuje a zmenšuje se jeho průřez. Základním předpokladem válcování plechů je tření, nicméně příliš velké tření může mít negativní vliv a způsobovat celou řadu problémů. Obecně platí, že proces válcování je závislý na kvalitě povrchu válců, tedy na stykových plochách a na prokluzu. [8]

### 2.3.3 Vliv válcování na strukturu materiálu a vnitřní pnutí

Válcováním *za tepla* se mění struktura zrna. Litý materiál má anizotropní strukturu, kdy sloupcovitá zrna zpravidla rostou ve směru tuhnutí (od kraje ke středu). Struktura je zpravidla křehká se slabými obálkami zrn. Litá struktura obsahuje mnoho vad, jako je pórovitost, plynatost vlivem smršťování kavity, a vměstky cizorodého materiálu, který uvízne v kovu. Při válcování kovu nad teplotou rekrystalizace se rozpadá stará struktura zrn, dle obrázku 2.3.3.1, a vzniká nová jemnější a jednodušší struktura. Během tohoto procesu zanikají staré hranice zrn a kavity. [10]



**Obr. 2.3.3.1** Struktura zrna

Vnesená energie tlakem v podobě lisování nebo válcování způsobuje nestabilitu materiálu. Zrna se prodlužují ve směru deformace, náhodná orientace mřížky se mění na usměrněnou texturu. Materiál začíná být v *nestabilním* stavu, jelikož tímto

procesem stoupá hustota dislokací. Snižování hustoty dislokací pomocí tepelné energie se projeví na změně mechanických vlastností materiálu, tj. návratu k původním mechanickým i fyzikálním vlastnostem.

#### **2.3.4 Možnosti minimalizace vnitřního pnutí**

Přítomnost zbytkových pnutí je způsobena předchozí technologií výroby, tedy způsobem tváření, množstvím vnesené energie, anizotropií- materiálu. Pnutí má vliv na pevnost součásti a velikost odpružení. Pro odstranění vnitřního pnutí existují metody:

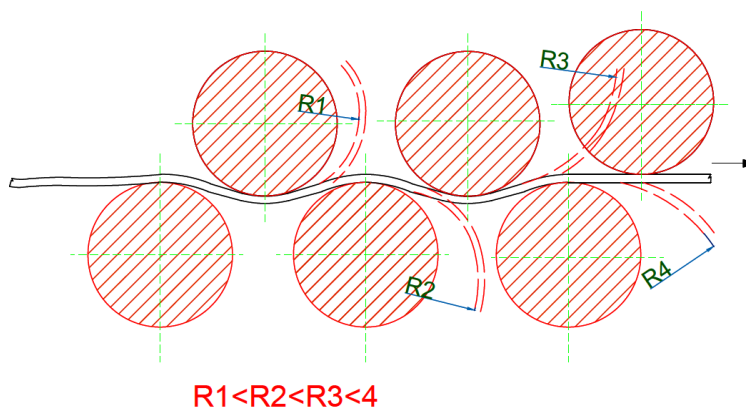
- mechanické
  - rovnání plechů na válcích
  - rovnání plechů na válcovacích stolicích
- tepelné
  - žhání rekrystalizační – obnova krystalů
  - žhání ke snížení pnutí

*Mechanický princip* spočívá v rovnání plechů (za tepla, nebo za studena) pomocí válců (obr. 2.3.4.1). Během procesu dochází střídavě k ohybu (obr. 2.3.4.2), kdy v krajních vrstvách (obr. 2.3.4.3) vzniká kladná a záporná plastická deformace a kolem těžiště dochází pouze k elastické.

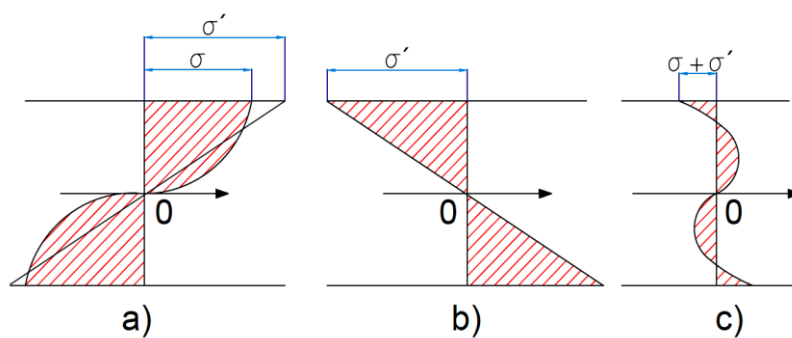
Válce se směrem k výstupu od sebe otevírají a pro intenzivnější rovnání mají válce menší průměr. U dlouhých válců existuje systém podpěrných válců větších průměrů pro minimalizaci průhybu.



Obr. 2.3.4.1 Rovnací stolice [11]



Obr. 2.3.4.2 Schéma rovnací stolice [8]



Obr. 2.3.4.3 Zbytková napětí v materiálu po rovnání a – ohyb, b – rovnání, c – zbytková napětí

Tepelná metoda *žihání k odstranění vnitřního pnutí* se používá, jestliže jsou výrobky svařovány, obráběny, nerovnoměrně rychle ochlazovány nebo *tvářeny za tepla*. Provádí se ohřevem a výdrží na teplotách 500 °C až 650 °C. Teplota a výdrž se volí dle velikosti a složitosti tvaru. Následuje pomalé ochlazování v peci k teplotám 250 °C až 300 °C a dochlazení na vzduchu.

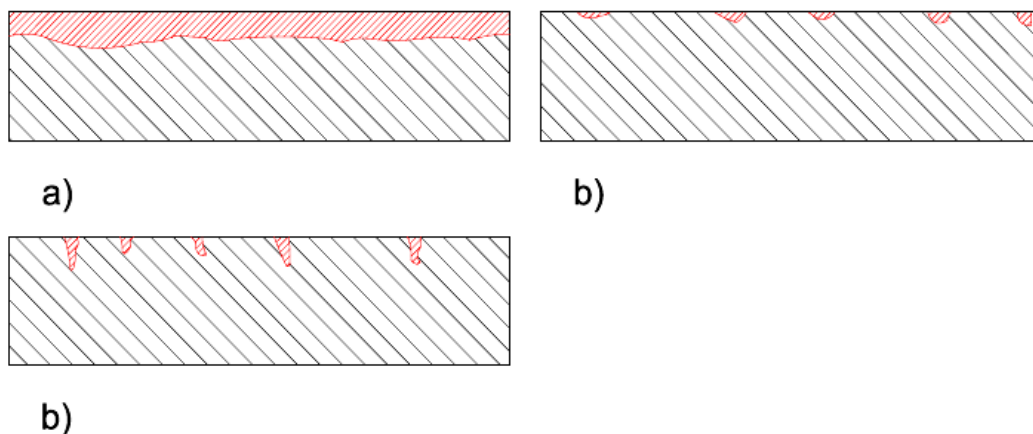
U plechů, kde došlo ke zpevnění – resp. usměrnění textury vlivem *válcování za studena*, lze metodou *rekrytalizačního žihání* dosáhnout minimalizace deformovaných zrn při současném vzniku nových bez známek předchozí deformace. Dále dochází k obnovení schopnosti plastické deformace. Při tomto procesu se nemění krystalická mřížka, jelikož se žihací teplota pohybuje od 550 °C do 700 °C, tj. pod teplotou 727 °C. Teplotu volíme s ohledem na stupeň předchozí deformace a původní velikosti zrna. Čím vyšší je deformace, tím nižší je rekrytalizační teplota.

### **3 Povrchové vady plechů a stav povrchu ovlivňující tepelné dělení**

Průmyslové výrobky je nutné před okolními podmínkami chránit povrchovou úpravou, jinak dochází ke *korozi*. Koroze výrazně komplikuje další zpracování výrobku i jeho celkovou životnost. Nejčastěji začíná koroze na povrchu a postupně se rozšiřuje do materiálu. Povrchové vrstvy jsou postupně přeměňovány na chemické sloučeniny a povrch se stává drsnější. U některých materiálů (cínu, hliníku, olova, zinku, mědi atp.) je naopak oxidická povrchová vrstva žádoucí. V praxi neexistují kovy, které by korozi nepodléhaly. Na průběh koroze má vliv stav okolního prostředí, jako je teplota, vlhkost, tlak, salinita atp. Dle charakteru je možné rozdělit korozi na:

- rovnoměrnou
- nerovnoměrnou

Obrázek 3.1 zobrazuje, vzhledem k tématu práce, tedy zpracování plechových dílů, jen představitele koroze, které mohou zásadním způsobem ovlivnit kvalitu řezu při dělení laserem. [2]



**Obr. 3.1 Koroze a) celková, b) místní, c) důlková [2]**

Dle podstaty vzniku je možné korozi rozdělit na:

- chemickou
- elektrochemickou

Korozi *chemickou* myslíme proces chemického působení okolního prostředí na kov. Proces probíhá pod vlivem suchých plynů nebo kapalin nevodících elektrický proud. Jedná o chemickou reakci mezi  $O_2$  a jinými plyny ( $CO_2$ ,  $SO_2$  a další) a nevodícími kapalinami.

Koroze *elektrochemická* vzniká při styku materiálu s vodivým vodným roztokem (elektrolytem). Typickým příkladem je koroze Zn v přítomnosti Cu. Vodítkem, který kov bude obětován, je ušlechtilost, resp. postavení kovu v periodické tabulce. [2]

## 4 Metody dělení materiálu

Pro další zpracovatelské operace je mnohdy důležité materiál dělit na požadované díly. Dělení materiálu lze dle podstaty klasifikovat na:

- fyzikální
  - bez použití tepelné energie
    - třískové – např. upichováním, řezání (ruční, strojní), rozbrušování

- beztržiskové – bez vzniku třísek (je šetrnější na spotřebu materiálu, ne vždy lze použít) lámání, sekání, stříhání, vodní paprsek,
    - s použitím tepelné energie - *laser*, plasma, kyslíko-acetylenové hořáky,
- chemické – leptání,

V dalším textu je vzhledem k cíli práce podrobněji rozebírána pouze metoda tepelného dělení.

#### 4.1 Kvalita řezu ve vztahu k povrchu plechu

Kvalitu řezu ovlivňuje, ať *pozitivně* či *negativně*, stav povrchu a struktura. Činitele, které ovlivňují *kvalitu řezu negativně*, je možné rozdělit na:

- fyzikální – špatně válcovaný materiál, vrypy, překlady
- chemické – koroze, okuje
- nevhodné technologické operace – tryskání, okuje, DMX-code (maticové kódy), polepy, popisy, nátěry

Z povrchu materiálu je vhodné před řezáním odstranit veškeré výše uvedené kvalitativní neshody. Nejčastější je povrchová koroze, kterou je možné do jisté míry odstranit:

- mechanicky – očištění drátěnými kartáči, nikdy ne tryskáním, protože tryskaný povrch má negativní vliv na kvalitu řezu, jelikož na povrchu dochází k odrazům dopadajícího paprsku a špatnému přenosu energie (případný další výzkum)!
- chemicky – pokud se jedná o lehkou korozi lze povrch před řezáním neolejovat, což přispívá i k lepší kvalitě řezu, jelikož olej odebírá teplo z povrchu při řezání.
- fyzikální – zinkování, cínování a další povrchové úpravy jsou de facto nevhodné (pomineme-li negativní dopad na životní prostředí) pro laserové řezání, protože snižují účinnost přenosu energie laseru do základního

materiálu, rovněž je rozdíl v tepelné vodivosti. U zinkovaného plechu je možné dosáhnout lepší kvality řezu použitím řezného plynu N<sub>2</sub>. [12]

Mezi činitele, které ovlivňují *kvalitu řezu pozitivně*, tedy napomáhají dobré kvalitě řezu, je možné zařadit:

- naolejované povrchy (speciálně dodávaná média výrobcem stroje)
- mořené povrchy

#### 4.2 Metody tepelného dělení ocelových plechů

Jednotlivé metody tepelného dělení pro materiály vhodné pro řezání kyslíkovým plamenem, plazmové řezání a řezání laserem řeší norma ČSN EN ISO 9013. Platí pro řezy plamenem od 3 mm do 300 mm, řezy plazmou od 1 do 150 mm a řezy laserem od 0,5 do 40 mm (obr. 4.2.1 výjimka ). [13]

Podmínkami řezatelnosti materiálů uvádí příloha B ČSN EN ISO 9013, které vymezují použití této technologie na nelegované a nízkolegované oceli, případně na vybrané legované oceli s použitím předehřevu. Při hodnocení kvality řezu řezání kyslíkem je nutné se soustředit zejména na: [13]

- přesnost vedení strojem
- kvalitu řezaného plechu
- tlak a množství kyslíku a hořlavého plynu
- parametry řezací trysky [14]



**Obr. 4.2.1 Řez 50 mm AISI304, Trumpf – Ditzingen [20]**

Základní předností tepelného dělení je možnost opracování bez fyzického kontaktu nástroje s materiálem, možnost opracování obtížně přístupných částí



materiálu a zpracování materiálů, které jsou mnohdy těžko opracovatelné klasickými metodami. [15]

Každý proces tepelného dělení nebo svařování mění materiálové vlastnosti. Při tomto procesu vzniká tepelně ovlivněná oblast (dále jen TOO), která může komplikovat následné zpracování materiálu. Většina procesů tepelného dělení (kyslíko-acetylenový hořák, plazma, laser) je založena na lokálním tavení materiálu. Oblast mezi roztavenou a tepelně neovlivněnou oblastí základního kovu podléhá chemické a strukturální změně. [16]

Základní podmínky, které musejí být splněny, aby bylo možné tepelné dělení oceli, je možné shrnout následovně:

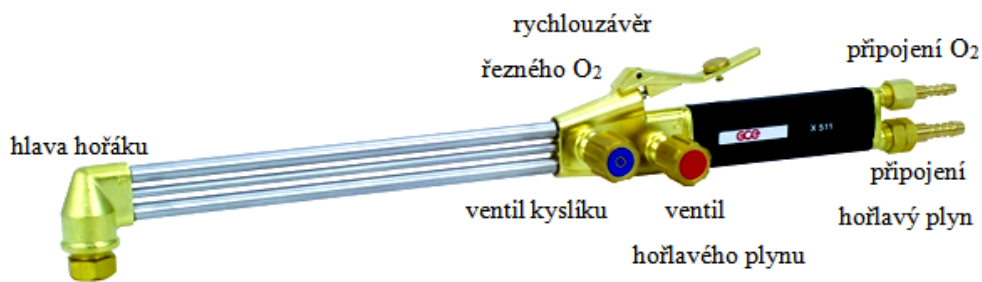
- materiál musí být oxidovatelný
- teplota vznícení materiálu musí být nižší, než je jeho teplota tání
- spalné teplo musí být vysoké
- nízká tepelná vodivost [17]

Společným činitelem je tepelná energie a použitý oxidant  $O_2$ , pomocí kterého je možné děj uskutečnit. Odlišnosti jednotlivých metod, strojního vybavení a kombinace plynů jsou shrnuty na konci kapitoly v tabulce 5.3.1.

#### **4.2.1 Kyslíko-acetylenové dělení**

Jedná se o nejstarší a nejrozšířenější metodou tepelného dělení. Nejvíce je využívána při řezání nelegovaných a nízkolegovaných ocelí s tloušťkou od 3 do 300 mm. Celý proces dělení probíhá spalováním v paprsku řezného kyslíku, kde dochází k vývinu tepla, které urychluje další proces spalování za vzniku nataveného materiálu, jenž je z místa řezu vyfukován. Řezná spára vzniká, aniž by došlo k roztavení kovu. Řezací zařízení obr. 4.2.1.1), stejně jako hořáky, je možné rozdělit podle pohonu na ruční a strojní. Celý proces lze rozdělit na:

- ohřev kovu na zápalnou teplotu
- oxidaci kovu
- vyfukování roztaveného kovu z řezné spáry



**Obr. 4.2.1.1 Řezací hořák [18]**

Princip je založen na tepelné a řezací trysce. Uspořádání trysek je většinou prstencové. *Ruční řezací hořák* je tvořen řezacím nástavcem a rukojetí, přívod řezacího kyslíku a kyslíku pro nahřívací plamen je společně veden jednou z hadic. *Strojní řezací hořák* je obvykle delší a stroje jsou buď přenosné, nebo stabilní. Použité technické plyny jsou:

- kyslík – s minimální čistotou 98,5 %
- propan / butan, s teplotou plamene při hoření s kyslíkem 2 500 °C
- acetylen (ethyn – C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>) – používaný pro všechny plamenové technologie. Teplota plamene při hoření s kyslíkem až 3 140 °C
- vodík, zemní plyn, etylen – využíváme pro montážní práce a řezání velkých tloušťek

Pokud chceme dosáhnout vysoké teploty, výkonu plamene a rychlosti hoření je nejčastěji využíváno právě kyslíko-acetylenového dělení. Je jím možné dělit *silnější materiály*, tj. velké tloušťky plechů s menší náchylností kvality řezu na stav povrchu. [19]

#### **4.2.2 Plasma**

Proces je založený na koncentrovaném oblouku, kterým je taven materiál pomocí vysokoteplotního plazmového svazku. Řezat lze všechny neželezné kovy (i nevodivé materiály). Řezací systém využívá řezací jednotky, která využívá proud od 20–1 000 A, a lze řezat plechy tloušťky až 160 mm. Jako plazmový plyn je použit stlačený vzduch, dusík, kyslík nebo argon, případně vodík. Díky dynamickému

účinku proudícího plazmatu na tavití se materiál, vzniká úzký a přesný řez bez okují. Pro plechy větších tloušťek je vhodnější použít kyslíko-acetylénový plamen, kde je však třeba počítat s nižší kvalitou řezu a možným přídavkem na obrábění. Mezi výhody této metody je možné počítat následující:

- silný koncentrovaný plazmový oblouk způsobuje *malé teplotní deformace materiálu*
- vysoká rychlost řezání (5–7x rychlejší než při kyslíkovém řezání), minimální ztrátový čas
- možnost řezání materiálů tloušťky od 0,5–160 mm a proudem do 1 000 A
- možnost řezání ocelí o tloušťce do 30 mm i pod úhlem.

Volba směsi plazmového plynu je volena podle druhu řezaného materiálu. Nejčastěji je možné se setkat s těmito kombinacemi:

- konstrukční ocel – kyslík, vzduch
- vysokolegovaná ocel – argon/vodík, argon/vodík/dusík, argon/dusík, vzduch, dusík
- lehké kovy – argon/vodík, vzduch
- barevné kovy – argon/vodík
- kompozitní materiály – argon/vodík, argon/vodík/dusík, vzduch, kyslík

### **4.2.3 Laser**

Laser (Light amplification by stimulated emission of radiation) je zesílení světla stimulovaným zářením. Laser je zdroj, který vyzařuje charakteristické elektromagnetické záření ve vlnovém rozsahu mezi ultrafialovým a infračerveným zářením. To znamená, že ne každé záření vycházející z laserů je viditelné lidským okem (viditelný rozsah: cca 400–750 nm). Přesto je laserové záření většinou označováno jako světlo. [20]

#### **4.2.3.1 Laserová technologie**

Laserovou technologii je možné definovat jako opracování materiálu založené na využití schopnosti laseru koncentrovat optickou energii v prostoru, čase a

spektrálním intervalu a na interakci optického záření s dělenou látkou. Lasery mohou být klasifikovány dle různých hledisek např. podle:

- aktivního prostředí
  - pevnolátkové lasery YAG ( $Y_3Al_5O_{12}:Nd^{3+}$ )
  - plynové lasery (He, He-Ne, He-Cd, CO<sub>2</sub>)
  - kapalinové lasery
  - plazmatické lasery
  
- vlnových délek optického záření
  - infračervené lasery
  - lasery viditelného pásma
  - ultrafialové lasery
  - rentgenové lasery
  
- časového režimu provozu laseru
  - pulzní
  - kontinuální
  
- podle generovaného impulzu
  - dlouhé impulzy (kontinuální)
  - krátké impulzy
  - velmi krátké impulzy [15]

Pro metody tepelného dělení materiálu existuje mnoho možností. Z hlediska trendu postupně dochází k nahrazování CO<sub>2</sub> laserů vláknovými. [21] V dalším textu se však vzhledem k experimentu zaměříme pouze na lasery plynové, a to konkrétně CO<sub>2</sub>.

#### **4.2.3.2 Princip laserového dělení**

Elektromagnetické vlnění (paprsek) při dopadu na povrch látky reaguje za vzniku elektrického proudu. Elektrická vodivost kovových materiálů je však omezená. Přísunem energie jsou vychylovány atomy z uzlových poloh krystalické mřížky. Čím

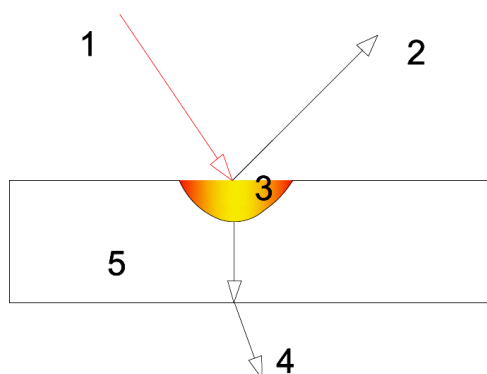
více jsou vychylovány, tím vyšší je odpor – nižší vodivost, a tím více se materiál zahřívá a opačně, čím více je materiál ohřátý, tím méně je vodivý.

Vlastnosti materiálu jsou proto prioritními faktory při určování jejich řezatelnosti laserem. Hodnotí se: □

- tepelná vodivost □
- struktura povrchu a chemické složení □
- hustota, bod tání

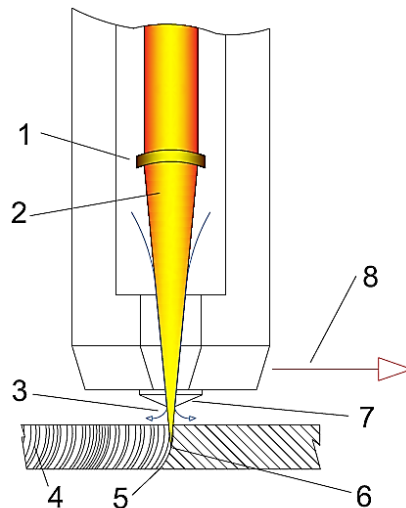
Při dopadu záření na povrch materiálu dochází ke třem procesům (obr. 4.2.3.2.1):

- (absorpce) funkční pohlcená část záření
- (reflexe), odražená část
- (transmise) propustnost látky (nebereme v úvahu)

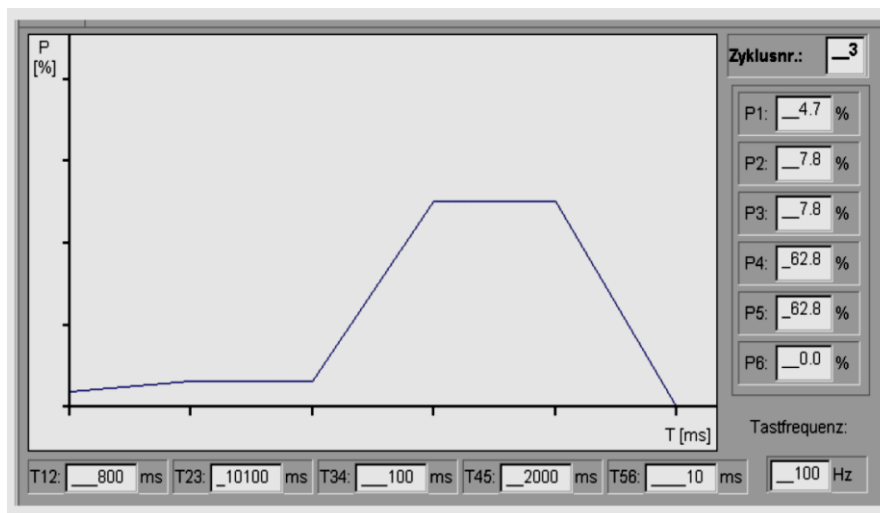


**Obr. 4.2.3.2.1 Interakce paprsku s materiálem: 1) dopadající paprsek, 2) odraz, 3) absorpce, 4) transmise, 5) obrobek [22]**

Po dopadu laserového paprsku se materiál tak silně zahřeje, že dojde k tavení nebo odpařování. Jakmile paprsek obrobkem zcela pronikne (propal), začne proces řezání. Laserový paprsek se pohybuje po dané trajektorii a průběžně natavuje materiál (obr. 4.2.3.2). Materiál je následně pomocí plynu vyfukován z řezné spáry. Před samotným řezáním je třeba materiál propálit. Toto lze provádět s plným výkonem laseru, nebo se výkon laseru pozvolna zvyšuje a následně pak opět snižuje na konstantní výkon pro samotné řezání. Tento cyklus určuje charakteristiku výkonu při zápichu, důlkování a mikrosvarech. V rámci jednoho cyklu lze až pětkrát měnit výkon v závislosti na čase. Příklad cyklu je možné vidět na obr. 4.2.3.3. [12]



**Obr. 4.2.3.2. Princip laserového řezání: 1) fokusační optika, 2) laserový paprsek, 3) paprsek prac. plynu, 4) řezné drážky, 5) tavenina nebo struska, 6) čelo řezu, 7) tryska, 8) směr řezání [22]**



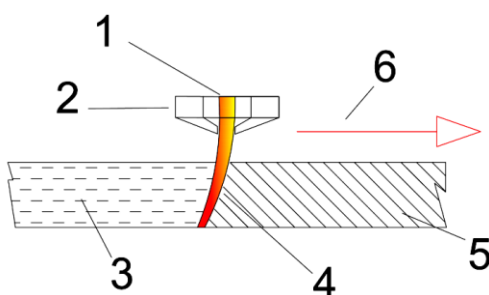
**Obr. 4.2.3.3 Závislost výkonu na čase [22]**

Pro řezání oceli je přidáván reaktivní plyn a jedná se o exotermní reakci, kdy plyn zajišťuje rychlejší proces řezání. Reaktivní plyn volíme dle druhu materiálu. [23]  
Například pro:

- nerezové a slitiny Al – N<sub>2</sub>
- konstrukční s obsahem C do 0,03 % – O<sub>2</sub>, (pro lepší kvalitu řezu N<sub>2</sub>)
- pro Ti–Ag [praxe]

### 4.2.3.3 Laserové metody

Laserové metody je možné rozdělit dle použitého řezného plynu a rychlosti. Při *kyslíkovém řezání* (obr. 4.2.3.3.1) laserový paprsek taví povrch materiálu a k řezání využívá oxidační reakce nataveného materiálu s řezným plynem. Laserový paprsek zahřeje materiál na zápalnou teplotu kyslíku. Tím dojde k exotermické reakci kyslíku s nataveným materiálem a částečně plynný kov následně 4x zvýší energii v oblasti působení laserového paprsku. Celková energie odpovídá součtu laserové a reakční energie. Proces je však citlivý na složení materiálu a kvalitu povrchu. Teplotu materiálu je nutné během pálení udržet co nejnižší a je možné použít pouze materiály, pro které je kyslík oxidantem (konstrukční ocel).



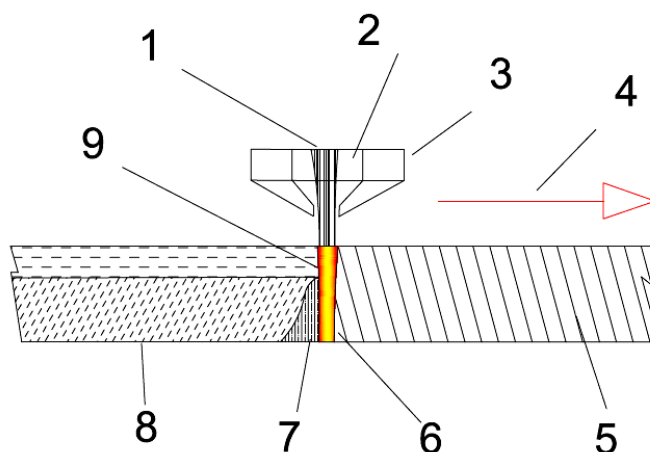
**Obr. 4.2.3.3.1 Kyslíkové řezání: 1) laserový paprsek, 2) tryska, 3) řezná spára, 4) čelo řezu, 5) materiál, 6) směr řezu [22]**

*Vysokotlaké řezání* (tavné řezání dusíkem) je metoda, při kterém laserový paprsek taví materiál v celé tloušťce a řezný plyn pouze vyfukuje taveninu pryč z řezné spáry (obr. 4.2.3.3.2). Energetický proces tavby je řízen výkonem paprsku a jako řezný plyn je použit dusík nebo argon. Vzhledem k tomu, že je dusík inertní plyn, nevzniká žádná reakce mezi řezným plynem a taveným materiálem, a kromě titanu se v řezné spáře netvoří oxidační vrstva. Titan se obrábí pouze argonem. Rychlost posuvu je regulovaná téměř lineárně s výkonem laseru. Ke kvalitnímu řezu je potřeba:

- vysoká čistota řezného plynu N<sub>2</sub> – 99,999 %; Ar – 99,996 %
- vysoký tlak řezného plynu (až 22 bar)

U *tavného řezání s podporou plasmy* se jedná o modifikaci tavného řezání probíhající skrz kapiláru podobně jako u laserového svařování. Nerezovou ocel a hliník zpracováváme s vyšší polohou ohniska než u vysokotlakého řezání. Tím dojde

k tvorbě plasmy ve štěrbině řezu, což zlepšuje přenos energie laseru do materiálu a umožňuje vyšší řeznou rychlost. Nárůst výkonu způsobují odrazy paprsku v kapiláře a pro podporu vzniku plasmy je poloha fokusu umístěna blíže k povrchu materiálu. Touto metodou je s vyšší rychlostí, ale horší kvalitou řezu oproti tavnému řezání, možné řezat silné nerezové (15–20 mm) a hliníkové (8–12 mm) plechy.



**Obr. 4.2.3.3.2 Tavné řezání: 1) laserový paprsek, 2) řezný plyn, 3) tryska, 4) směr řezání, 5) materiál, 6) čelo řezu, 7) tavenina, 8) řezná spára, 9) kapilára [22]**

Další laserová technologie, která se běžně užívá pro dělení tenkých plechů, je *řezání stlačeným vzduchem*. K vyfukování taveniny z řezné spáry postačí vzduch pod tlakem 5 až 6 bar. Protože vzduch obsahuje z 80 % dusík, je řezání stlačeným vzduchem převážně *tavným řezáním*. Používaný tlakový vzduch je předem nutné dokonale vysoušet a zbavovat mastnot. Volba tloušťky plechu závisí na tlaku stlačeného vzduchu a laserovém výkonu. S laserovým výkonem 5 kW a tlakem 6 bar lze bez otřepů řezat plech o tloušťce 2 mm. Nejlepších výsledků řezání je možné dosáhnout u slitin hliníku a pozinkovaných plechů.

Tenké plechy je možné dělit *vysokorychlostním řezáním*. Při tloušťce plechu 1 mm lze dosáhnout rychlosti 40 metrů i více za minutu. Je však dosahováno horší kvality v řezu. Maximální tloušťka plechu závisí opět na výkonu laseru. S laserovým výkonem 6 kW lze snadno řezat např. až 4 mm tlusté hliníkové tabule. Jednotlivé metody můžeme porovnat v tabulce 4.2.3.3.1. [22]



Tab. 4.2.3.3.1. Porovnání rychlostí jednotlivých metod [22]

Standardní ocel 1 mm	kyslíkové řezání	tavné řezání N <sub>2</sub>	řezání vzduchem	vysokorychlostní řezání
Řezná rychlost (m/min)	8,2	10	20	26

## 5 Tepelně ovlivněná oblast v okolí řezu (TOO)

Nejdůležitějším faktorem, který ovlivňuje tvorbu TOO, je teplotní vodivost materiálu. Materiály, které vykazují vysokou tepelnou vodivost, jsou schopny rychle přenášet teplotní změny spíše než teplo kumulovat. Jinými slovy v případě, že materiál vykazuje vysokou tepelnou vodivost a *chladne rychleji*, je TOO tím větší. Nižší koeficient znamená, že tepelná energie zůstává v materiálu déle a TOO bude užší. Rozsah a velikost změny vlastností závisí v první řadě na základním materiálu a na koncentraci tepla. Z hlediska výrobního procesu závisí šířka TOO na třech faktorech:

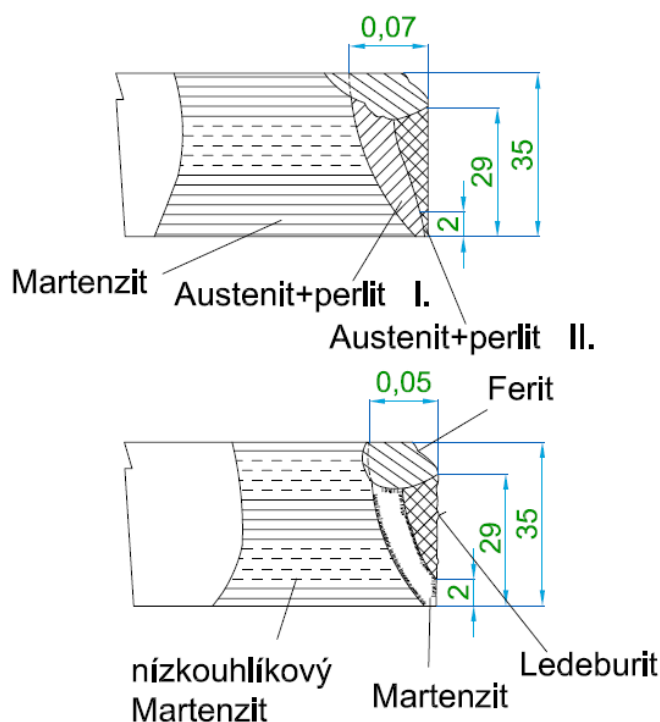
- množství tepelné energie
- doba expozice
- šíře plochy

Dle velikosti TOO bychom mohli *teplené dělení* rozdělit na:

- *Laserové* dělení: má nejmenší TOO ze všech technik tepelného dělení, protože je tepelná energie zaměřena na velmi malou „plochu“.
- *Plazmové* dělení: vytváří zhruba střední TOO, protože plazmový paprsek je širší než laserový. Vyšší proudy však umožňují vyšší řezné rychlosti, což snižuje dobu trvání expozice, a tím i TOO.
- *Kyslíko-acetylenové* dělení: generuje nejširší TOO ze všech tepelných dělení. [16]

Je nesporné, že tepelně dělený povrch materiálu není tak hladký jako strojně broušený. Pro konstrukční součásti z oceli, které jsou vystaveny únavovému namáhání, je doporučeno, aby drsnost povrchu řezu nepřekročila 150  $\mu\text{m}$ . Což platí

pouze pro ocele, které jsou svařitelné bez přehřevu s mezí kluzu do  $420 \text{ N/mm}^2$  a tloušťkou do 40 mm. Na snížení proměnných má vliv tlak kyslíku, řezná rychlost typ trysky a další. Řezání materiálu vyžaduje dostatečné ohřátí materiálu, ale jen malá část z dílu má teplotu cca  $1350 \text{ }^\circ\text{C}$ . Proto během chlazení prochází materiál změnami, které mohou vést k vytvrzení v blízkosti řezné hrany (obr. 5.1). Obecně platí, že TOO se skládá z jedné ze dvou struktur znázorněných na obrázku.



**Obr. 5.1** Struktura řezu [17]

V závislosti na tom, zda se operace řezání provádí s přehřevem, nebo bez přehřevu, byly Piraprezem E. pozorovány v únavové pevnostní studii výpalků oceli S355 následující charakteristiky hran *kyslíkového řezu*. Koncentrace uhlíku se zvyšuje podél řezné hrany do hloubky 0,1 mm. Tento zvýšený obsah uhlíku nepochází z použitého řezného plynu, ani z difuze uhlíku podél řezné hrany, ale z taveniny, která vzniká během řezání. Obvykle je to jen do hloubky 1,5 mm. Dále tvrdost směrem od povrchu klesá.

Rozložení tepla v důsledku řezání kyslíkem vytváří v řezaných dílech *pole zbytkových napětí*. Nicméně distribuce těchto napětí podél okraje dosud nebyla definována a názory autorů se liší. Zatímco jedni tvrdí, že je přítomno tlakové napětí,

jiní mluví o napětích tahových. Ve směru řezání vznikají kolmé drážky na napěťové pole, které má vliv na:

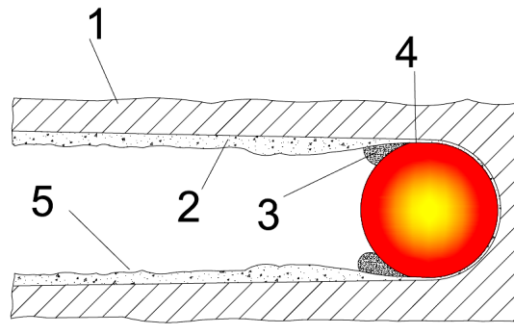
- odolnost proti únavě
- odolnost proti křehkému lomu (závisí především na hloubce a ostroti drážek)

Při řezání konstrukčních ocelí s mezí kluzu do  $420 \text{ N/mm}^2$  a tloušťce do 40 mm s předeřevem je tvrdost tenké vrstvy s vysokým obsahem uhlíku a martenzitu redukována. Jestliže se jedná o kvalitní materiál, je únavová pevnost snížena o cca 10 %. [17]

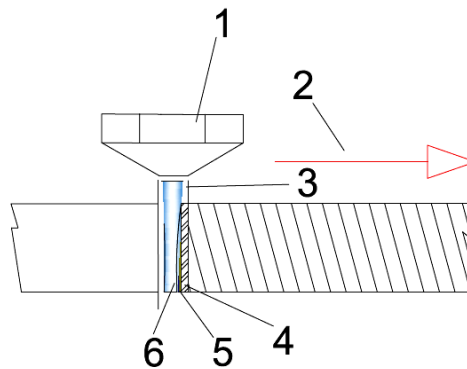
### 5.1 Fyzikální a chemické jevy procesu

Řezný kyslík není během řezání v bezprostředním kontaktu s kovem, ale je obalen pláštěm kapalného oxidu železitého (obr. 5.1.1). Mezi touto struskou a základním kovem je vrstva částečně roztaveného kovu. Atomy železa difundující strusky jsou do značné míry spalovány řezným kyslíkem za vzniku FeO. Proto paprsek kyslíku plní dvojí funkci. Na jedné straně tvoří chemickou reakci tím, že tvoří sloučeniny s atomy železa. Na druhé straně má za úkol vyfukovat strusku, která se v řezné spáře vytváří během procesu řezání. Spalování železa za vzniku FeO je exotermní reakcí a spolu s plamenem vytváří teplo potřebné k udržení procesu tavení základního kovu při kontinuálním řezu.

Nedávný výzkum ukázal, že základní materiál není zcela spalován a v oxidech je přítomen i nespálený kov. To ukazuje, že vrstva oxidů v řezné spáře je z důvodu turbulence ředěna roztaveným kovem. Množství odstraněného kapalného oxidu železa se zvyšuje směrem ke spodní hraně řezu. To znamená, že vrstva oxidu železa je u spodní strany řezu silnější (obr. 5.1.2). Dochází ke snížení rychlosti difúze atomů železa uvolněných z roztavené vrstvy, přičemž rychlost difúze je určujícím faktorem s ohledem na řeznou rychlost. Proto čím silnější deska, tím nižší řezná rychlost. Obrázek 5.3 ukazuje, že vliv tepelné energie plamene je pouze u povrchu. To je proto, že tepelná energie plamene nemůže primárně proniknout ke spodnímu okraji i v případě silnějších materiálů. Na spodní straně tak dojde k ohřevu základního kovu a roztavení horké strusky. [17]



**Obr. 5.1.1. Proces řezání plamenem: 1) základní kov, 2) roztavená krystalizovaná vrstva, 3) film oxidů ze spalování, 4) kužel plamene, 5) film oxidů ze spal. sekundárního železa [17]**



**Obr. 5.1.2 Příčný řez řezání plamenem: 1) tryska, 2) směr řezu, 3) plamen, 4) roztavený zákl. materiál, 5) struskový obal, 6) řezný kyslík [17]**

Při studiu vlastností plazmy u konstrukční oceli tl. 25 mm bylo zjištěno, že max. tvrdost 450 HV je v hloubce 0,1 až 0,3 mm pod povrchem řezu. Tvrdost okraje plazmy řezaného materiálu je pak mnohem nižší, než je tvrdost při použití kyslíko-acetylenové metody. Povrch obsahoval nižší vrstvu uhlíku a martenzitu s tloušťkou asi 50  $\mu\text{m}$ . Tato vrstva následně přecházela do bainitu a velmi jemného feritového perlitu. Vrstva uhlíku a martenzitu při styku s plamenem nebyla prokázána. [17]

## 5.2 Rozdělení TOO dle teploty, chemického složení a stavu povrchu

TOO můžeme často rozeznat pouhým okem, a to v celé škále barev. Barvy, které jsou způsobeny povrchovou oxidací, přibližně ukazují teploty kovu v daném místě. Například v tabulce 5.2.1 jsou znázorněny oxidační barvy, které vznikají v kyslíkatém prostředí v materiálu nerezové oceli 1.4301 (AISI 304).

**Tab. 5.2.1 Barevné odstíny TOO u AISI304 [16]**

barva	teplota
světle žlutá	290 °C
slámově žlutá	340 °C
žlutá	370 °C
hnědá	390 °C
fialovo hnědá	420 °C
tmavě fialová	450 °C
modrá	540 °C
tmavě modrá	600 °C

Barevnost je způsobena čtyřmi faktory:

- Obsah chrómu: zvyšuje materiálovou odolnost proti oxidaci, barvy jsou méně intenzivní nebo je jejich vznik pomalejší.
- Hladina kyslíku: v bezkyslíkaté atmosféře, čili jestliže chybí oxidant, ať vlivem obalu elektrody, nebo vlivem použití inertního plynu, jsou bravy méně patrné.
- Drsnost povrchu: drsnější povrch oxiduje rychleji a barvy jsou tím tmavší.
- Nečistoty na povrchu: jako jsou oleje, barvy, rez, otisky prstů, mohou rovněž ovlivnit tepelné odstíny, ale nemají vliv na prodloužení TOO.
- Stav povrchu: v případě, že povrch je drsný, oxiduje rychleji, což způsobuje tmavší barvy.

Nečistoty na povrchu, jako jsou barvy, oleje, rzi a dokonce i otisky prstů mohou ovlivnit tepelný odstín, ale nemají vliv na rozšíření TOO. [16]

### **5.3 Výhody a nevýhody jednotlivých technologií ve vztahu k následným operacím tváření**

Technologie by měla být volena podle vlivu na další výrobní operace. Je na technologovi, aby vytvořil celý technologický postup, resp. vhodný sled výrobních operací, s ohledem na vyrobiteľnost a ekonomičnosť procesu.

TOO je do značné míry ovlivněna chemickým složením materiálu. Během tváření může TOO velmi ztížit tváření ohybem, kdy je těžko předvídatelné, jak se bude materiál chovat díky TOO v okolí řezu. Při operaci ohýbáním je obecně problém předvídat, jaké bude odpružení materiálu. Záleží to na stavu materiálu (tloušťce, chemickém složení, předchozím tváření), nastavení stroje, u kterého je možné použít *senzoriku* pro přesné ohýbání (mechanická, nebo laserová). Chceme-li v závislosti na úhlu dojít k elastickému zotavení, je dobré použít *senzoriku*. Laserová *senzorika* má však problémy se světelnými podmínkami a stavem povrchu (hrubý, lesklý atp.). Naopak kontaktní senzory jsou přesnější, ale mají menší rozpětí měření a často je nutné je seřizovat a měnit kontaktní vložky (každá sada vložek má omezené rozpětí měřeného úhlu a tloušťky materiálu. Po přívodu tepelné energie svařováním nebo řezáním může následné rychlé ochlazení vést jak k chemickým, tak i metalurgickým změnám. Prvotní změnou je *oxidace*, která je odpovědná za zbarvení. Dále může dojít k *nitridaci* povrchu, což má za následek zvýšenou tvrdost a snížení svařitelnosti kovu. Dalším společným účinkem je *korozie* odvozená od citlivé povahy nerezové oceli. Intenzivní teplo totiž způsobuje precipitaci karbidů chromu na hranicích zrn. V TOO klesá obsah chromu pod 10,5 %. Výsledkem je tzv. *mezikrystalická korozie*, čímž ocel ztrácí svou schopnost korozivzdornosti. V extrémních případech ocel zčerná. Vysoká teplota může rovněž vyvolat vodíkovou křehkost. Molekuly difundujícího plynu jsou velmi slučivé a vytvářejí v krystalické mřížce silný tlak, čímž se snižuje pevnost v tahu a houževnatost. Jestliže tedy nedojde k odstranění vodíku, může zahřátí materiálu způsobit i po 24 hod. spontánní praskání. Z metalurgického hlediska přivedené teplo generuje *lokalizované tvrdnutí* materiálu. V některých případech se austenitické oceli mohou změnit v martenzitické s vyšší tvrdostí a křehkostí. V jiných případech může dojít ke ztenčení. [16]

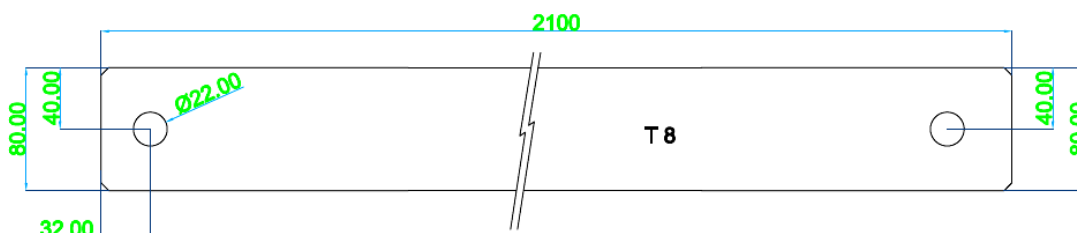
Z výše uvedených poznatků plyne, že teplota a teplem ovlivněná oblast má zásadní vliv na strukturní změny materiálu v okolí řezu. Ohříváním materiálu při dělení do jisté míry usměrněné textury dochází v okolí řezu k uvolňování vnitřního pnutí, které je v materiálu zanecháno z procesu tváření, kdy se krystalická struktura materiálu snaží zaujmout opět stav s nejmenší vnitřní energií, a tím dochází k deformacím – *torzi a distorzi*. V tabulce 5.3.1 je uvedeno porovnání jednotlivých metod:

Tab. 5.3.1 Porovnání metod – výhody a nevýhody druhé dělení

Řezná technologie	Výhody	Nevýhody
kyslíko-acetylenová	<ul style="list-style-type: none"> <li>• velké tl. 3–300 mm</li> <li>• přenosné i stabilní zařízení</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>velká šíře TOO</b></li> <li>• vysoká teplota plamene 3 140°mm</li> <li>• velké okuje</li> <li>• <b>vyšší drsnost řezu</b></li> </ul>
plazma	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>užší TOO</b></li> <li>• nenahraditelné při řezání slitin s vysokým obsahem hliníku</li> <li>• střední a velké tl. až 160 mm</li> <li>• vysoké rychlosti řezu</li> <li>• snadná automatizace</li> <li>• nižší náklady v porovnání s laserem</li> <li>• přenosné i stabilní zařízení</li> <li>• řez bez okují</li> <li>• u oceli do tl. 30 mm řez i pod úhlem</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• tvorba otřepů na spodní ohraně</li> <li>• <b>nutná čistota řezaného povrchu</b></li> </ul>
laser	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>úzká TOO,</b></li> <li>• široké spektrum materiálů,</li> <li>• řez s minimální plastickou deformací</li> <li>• šířka řezné spáry 0,1-0,4</li> <li>• nízká hodnota vneseného tepla</li> <li>• řez i pod úhlem</li> <li>• řez bez okují</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• tl. materiálu max. 25 mm Fe oceli, slitiny Al do 12 mm, legované oceli do 20 mm.</li> <li>• velké náklady na zařízení a provoz</li> <li>• čistota plynů</li> <li>• čistota řezaného povrchu</li> <li>• u CO<sub>2</sub> čistota provozu</li> <li>• u Fibre přehřívání</li> <li>• <b>nutná čistota řezaného povrchu</b></li> </ul>

## 6 Experimentální část – minimalizace deformace (torze) dílů

V rámci pracovního procesu jsou řezány úzké a dlouhé díly (výztuhy) mající charakter pásoviny, které plní funkci stabilizace strojního vybavení. U těchto dílů, viz obr. 6.1, dochází během dělení na laseru k nechtěné torzi, která je kvalitativně nepřijatelná. V práci je popsán vynalezený technologický postup, jakým je možné torzi eliminovat, a dosáhnout uspokojivého výsledku. Postup je aplikovatelný i na podobnou skupinu dílů.



Obr. 6.1. Náčrt dílu

Experiment byl prováděn v rámci pracovní náplně technologa-programátora laserových strojů ve společnosti TRUMPF. Experimentem měla být dosažena minimalizace torze těchto dílů s dosažením požadované kvality, a tím snížení víceprací.

V rámci experimentu byly zkoušeny dostupné technologické postupy dělení laserem, které jsou podrobněji popsány v experimentální části. Ověřen byl zejména *technologický postup*, který jsem za dobu své praxe vynalezl a *který nenabízí uživatelský software* TruToPs, dodávaný společností TRUMPF. Jednotlivé díly byly děleny laserem při *konstantních řezných podmínkách*, ale se změněným technologickým postupem dělení, a následně byl měřen průhyb, resp. zjišťována přítomnost torze.

Díly byly po vypálení měřeny na broušené kamenné desce pomocí hloubkoměru a libely.

Účelem experimentu bylo tedy ověřit novou metodu k dosažení minimalizace torze těchto dlouhých a úzkých dílů při pálení laserem, která by se dala využít také u podobně problematické skupiny výrobků.



## 6.1 Definice problému

Primárně bylo třeba vyřešit dlouhotrvající problémy nejen s *torzí*, ale i *jakostí řezu* dílů větších tloušťek (tj. 6–20 mm). Pozorované problémy u laserem dělené konstrukční oceli byly následující:

- díly s tloušťkou 6 mm S355MC – torze (dle interní normy Trumpf-standard max. průhyb 10 mm/m).
- díly s tloušťkou 8 mm, S355MC – torze a zhoršená kvalita řezu
- díly s tloušťkou 10 mm S235 JRG2 – torze a zhoršená kvalita řezu
- díly s tloušťkou > 15 mm S355MC – zhoršená kvalita řezu, kolmost

**Konkrétně řešený díl** má tloušťku 8 mm S355MC (obr. 6.1 výše). Jedná se o **výztuhu** pro stroje TRUMPF. Výztuhy mají stabilizační funkci u strojního vybavení, které zabezpečuje automatizaci zásobování laserových i jiných strojů uskladněným plechem. Díl patří do skupiny dílů – výztuha pro stroj TruStore (obr. 6.1.1), kde bylo třeba následkem torze provést další výrobní operace rovnání, viz obr. 6.1.2. Tato operace, bez dalších mezioperačních manipulací, reálně prodlužovala výrobní proces o 60 s/ks. Torze nastane ve chvíli, kdy díl opustí zbytkový rastr tabule.



Obr. 6.1.1 Výztuhy – stroj TruStore



**Obr. 6.1.2 Rovnění dílů**

## **7 Metodika řešení**

Prvním krokem bylo prostudování dostupné literatury, seznámení s problematikou výroby hutních polotovarů a dělení materiálu. Dále byl prověřován technologický postup dělení materiálu v samotné výrobě, dodávaný software a postup programování stroje. Jednotlivé vstupy byly rozebrány v diagramu 7.1.1 a 7.2.1. Pro experimentální část byl využit stroj Trulaser 3040, použita běžná měřidla, fotoaparát, resp. využito veškeré zázemí společnosti TRUMPF. Pro vyhodnocení byla využita výpočetní technika.

### **7.1 Postup řešení minimalizace deformace**

Na řešený problém, který způsobuje jakostní neshodu, bylo třeba se zaměřit komplexně, resp. projít celý proces dělení materiálu laserem *s cílem prověřit jednotlivé možnosti* řešení, které se nabízely, a byly shrnuty pomocí diagram 7.1.1. Pro rozdělení vstupů (návrhů) byly brány v úvahu strojní a ostatní možnosti. *Stojní vstupy*, resp. kvalitní nastavení stroje, musely být během experimentu jednoznačně *konstantní*, abychom eliminovali jejich vliv na experiment (kvalitu řezu).

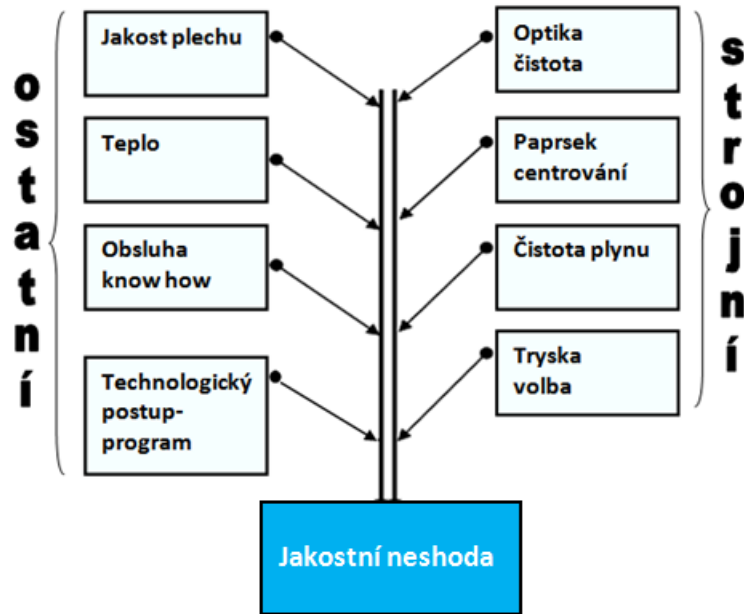


Diagram 7.1.1 Jednotlivé vstupy řešeného problému

Ke vstupům, které byly zahrnuty do skupiny *strojní*, patří parametry ovlivňující zejména kvalitu řezu s projevy špatného povrchu řezu. Jednotlivé vstupy byly vždy kontrolovány a nastaveny, aby byly parametry, při řezání dílů vždy konstantní. Stroj byl pokaždé znovu seřízen a kvalita řezu kontrolována dle interních předpisů.

**Čistota optiky:** Jestliže se ve vedení paprsku nacházejí nečistoty, obvykle končí na čočce v řezací hlavě, způsobují vyhrátí čočky, širší řeznou spáru a nekvalitní řez. V uživatelském prostředí je možné toto kontrolovat, protože čočka má implementovaný čip, kterým je možné sledovat stáří a čistotu.

**Nevycentrovaný paprsek:** Způsobí nekvalitní řez, například v jednom směru pohybu (x, y). Vždy bylo provedeno centrování, které stroj Trulaser 3040 nabízí již automaticky (u předchozích verzí seřizováno ručně).

**Čistota plynu:** Důležitý parametr stejně jako jeho tlak. Často se při špatné jakosti řezu stává, že obsluha začne měnit parametry, aniž by překontrolovala čistotu a tlak plynu. Správná čistota je deklarována dodavatelem Linde, nicméně se může stát, že obsluha použije nesprávné tlakové láhve.

**Správná volba trysky:** Je možné volit o stupeň větší průměr. V opačném případě však hrozí vyhrátí trysky (jelikož je průřez paprsku větší než výstupní otvor), tepelná deformace kruhového otvoru na výstupu a špatná jakost řezu v některém směru, případně nelze materiál propálit vůbec.

Mezi ostatní vstupy byla zahrnuta jakost plechu.

**Jakost plechu:** Je dána způsobem výroby. S dodavatelem plechu je možné se dohodnout na zlepšení kvalitativních nedostatků. Těžko tedy ovlivnit kvalitativní rozdíly v dodávkách plechů (okujení, výmoly, místní koroze, polepy atp.). Jednotlivé šarže se pohybují v rozměrových tolerancích (tab. 7.1.1), i když mnohdy na hranici. Často je třeba při nové dodávce materiálu stroj seřizovat a měnit parametry.

**Tab. 7.1.1 Rozměrové rozdíly dodávaných plechů**

Délka	Šířka	Tloušťka
až + 7 [mm]	až + 15 [mm]	- 0,1 až - 0,4 [mm]

Jednotlivé tabule byly brány ze stejné tavby s cílem minimalizace výše uvedeného vstupu.

Vstup **obsluha** je velmi problematický. Záleží na tom, jak je stroj obsluhován, respektive na zkušenostech a citu každého pracovníka. Z tohoto důvodu byl celý experiment prováděn pouze s jedním pracovníkem.

**Teplota:** Nerovnoměrné šíření tepla u procesu dělení materiálu je v analogii ke svařovacímu procesu nežádoucí, kde rovněž způsobuje zbytková pnutí a torze. Teplem dochází k uvolňování vnitřního pnutí, které je v materiálu zanecháno z procesu tváření. Přes fakt, že výrobce plechů deklaroval odstranění takového pnutí, docházelo k *torzi*. Vliv oduhličení nebyl brán v potaz, protože u konstrukční oceli nemá při obsahu C cca 0,1 % vliv na funkčnost výrobku.

**Oxidace povrchové vrstvy řezu** v místě dělení má pouze nežádoucí vliv na další zpracovatelské operace, např. lakování.

Následoval podrobnější návrh řešení, kterým by bylo možné vliv TOO eliminovat, resp. dosáhnout požadované jakosti. Navrhovaná řešení byla opět shrnuta do diagramu 7.1.2 a postupně prověřována:

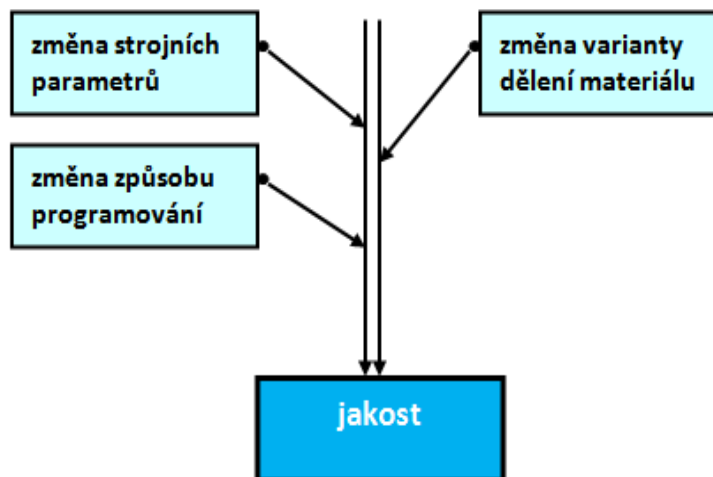


Diagram 7.1.2 Diagram možností minimalizace TOO

## 7.2 Optimalizace technologického procesu na stroji

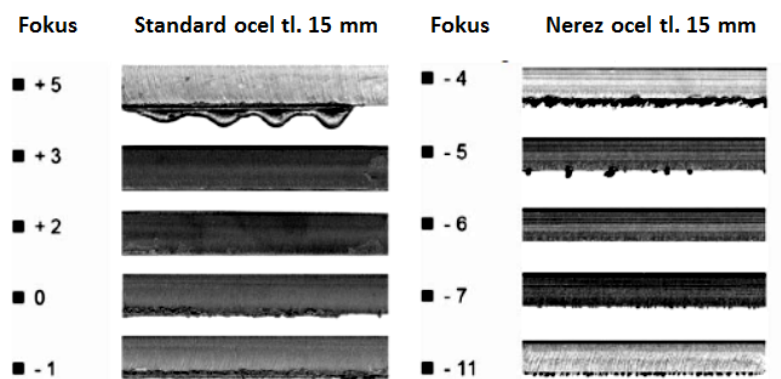
*Změna strojních parametrů:* Ve stroji lze volit výrobcem přednastavené různé možnosti (v textu dle názvů), které automaticky upravují procesní parametry, jako jsou:

- tlak plynu
- rychlost
- frekvence
- poloha ohniska

*AdjustLine:* Slouží ke kompenzaci horší kvality plechu. Operátor stroje může během procesu aktivně měnit tento parametr, jestliže je kvalita řezu náhle horší. Stejně je možné měnit polohu ohniska, které je důležité pro kvalitu řezu (obr. 7.2.1). Touto možností nebylo dosaženo uspokojivého výsledku.

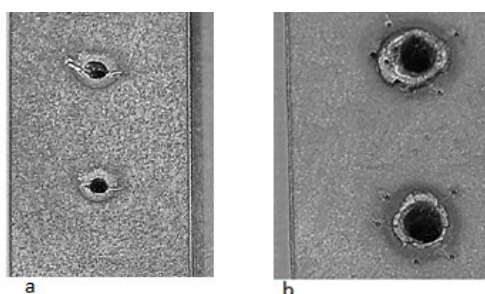
*FocusLine:* Jedná se o zařízení, kterým je možné pomocí servo-pohonu měnit divergenci paprsku pohybujícím se ohniskem nahoru a dolů. Ohnisko se automaticky přizpůsobuje tloušťce a druhu materiálu. Poloha ohniska se tak nemusí nastavovat

ručně. Lze ji měnit během operace. Ke každé změně však dojde až při následném propalu resp. proniknutí materiálem (startovní otvor).



**Obr. 7.2.1** Vliv polohy ohniska na tvorbu ořepu [22]

Pro kontrolu procesu zapichování, nezávisle na druhu a tloušťce plechu, je možné použít funkci *PierceLine*. Slouží k rozpoznání konce propalu, kdy musí dojít ke změně parametrů paprsku (výkonu). *PierceLine* je optický senzorický systém, který kontroluje a řídí proces zapichování. Přes odražený paprsek dokáže vyhodnotit zda, paprsek již propíchl materiál skrz, nebo nikoli, poté ihned ukončí zápich a začne řezat. Hlavní výhoda zapichovací sensoriky je, při stejném času, výrazné zmenšení startovacího otvoru (obr. 7.2.2) proti normálnímu zápichu. [22]



**Obr. 7.2.2** Vliv kontroly propalu: a) s kontrolou propalu, b) bez kontroly propalu [22]

Pro kontrolu vzdálenosti hrotu trysky od plechu (kapacitní regulaci odstupu) slouží funkce *ControlLine*. Volbou této funkce je možné se vyhnout poškrábání povrchu plechu stejně jako kolizím. Pomocí funkce *ContourLine* je možné řezat v pulzním režimu (vypichování) otvory menšími, než je tloušťka plechu. Závislost

možnosti dělení na průměru otvoru a rovněž složitosti tvaru na tloušťce plechu je v tabulkách 7.2.1 až 7.2.3 níže. Je možné volit mezi třemi *velikostmi obrysu*.

**Tab. 7.2.1 Maximální velikost otvoru, velký obrys**

Tloušťka materiálu [mm]	1	2	3	4	5	6	8	10	12	15	20	25
Min. průměr otvoru	2	3	3,5	5	6	7	11	13	15	25	30	32

**Tab. 7.2.2 Maximální velikost otvoru, střední obrys**

Tloušťka materiálu [mm]	1	2	3	4	5	6	8	10	12	15	20	25
Max. průměr otvoru [mm]						7	11	13	15	25	30	
Min. průměr otvoru [mm]						4,5	8	9	10	13	20	

**Tab. 7.2.3 Maximální velikost otvoru, malý obrys [22]**

Tloušťka materiálu [mm]	1	2	3	4	5	6	8	10	12	15	20	25
Max. průměr otvoru [mm]	2	3	3,5	5	6	6,5	8	9	10	13	30	32
Min. průměr otvoru [mm]	1	1	1,5	2	2,5	2,5	3,2	4	4,8	8	12	20

Rozdíl mezi jednotlivými metodami je v použití režimu dělení. *Pulzním režimem*, který je charakteristický špičkovým výkonem v malém bodě, je možné dělit menší otvory, než je tloušťka plechu. Kontinuální režim je používán častěji, protože neprodlužuje strojní čas dělení.

Změně *způsobu programování* je nutné se vzhledem k experimentu zabývat podrobněji, jelikož se jedná o nejsložitější proces. Praxí bylo ověřeno a experimentem prokázáno, že je možné se deformacím z TOO do jisté míry vyhnout jiným způsobem programování, tedy celkovou změnou postupu řezání (postupným vnášením tepla). Bylo tedy třeba najít takový postup, při kterém bychom při dělení

materiálu vnášeli teplo do tabule plechu postupně – *rovnoměrně*. Firma TRUMPF dodává ke stroji vlastní software *TruTops*, ve kterém bylo nutné nalézt vhodný způsob a provést potřebné změny.

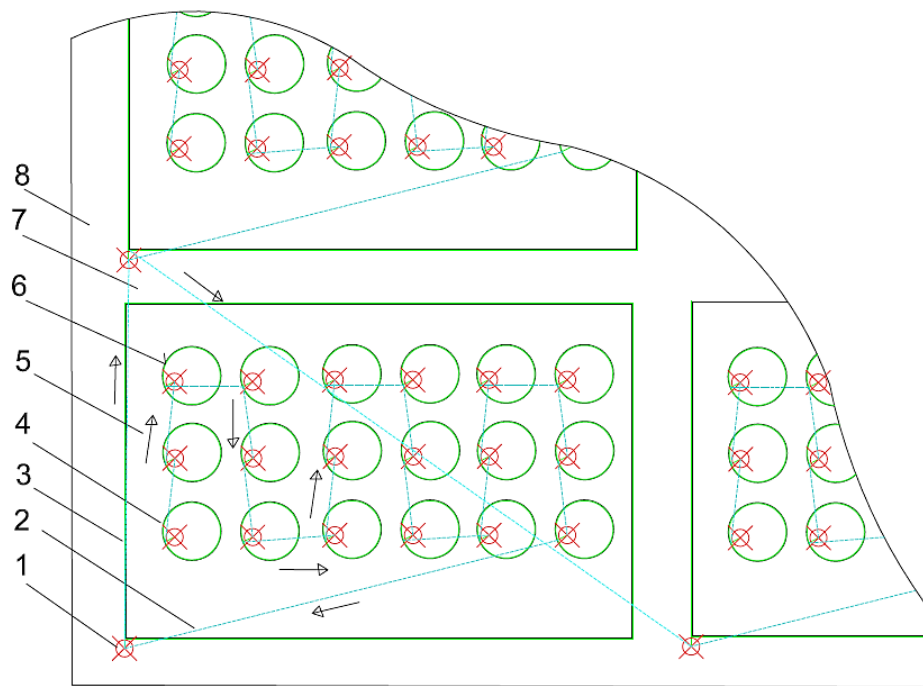
Během experimentu bylo zjištěno, že tabule plechů mají rozdílnou tvrdost i tloušťku v celém průřezu. Okraje tabule obvykle mají tvrdosti nižší, ale s větší tloušťkou. Toto je zřejmě způsobeno nestejným tlakem válců v celé délce. Pozorované rozdíly byly 0,15–0,4 mm. Během experimentu byla pozorována rovněž souvislost s rozmístěním dílů na tabuli plechu. Jestliže je díl umístěn blíže ke kraji, dochází k větší deformaci než u středu. Na tabulích plechu je pak patrné jiné zbarvení okrajů a středu, které je způsobeno jinou rychlostí chladnutí po procesu válcování. Okraje bývají v barevné škále od modra až do fialova, zatímco střed má jednotnou barvu kovově šedou.

Možnosti nabízené softwarem byly prověřovány a je jimi obecně možné zlepšit spíše jen kvalitu řezu, avšak nelze s nimi řešit problém s *torzí*.

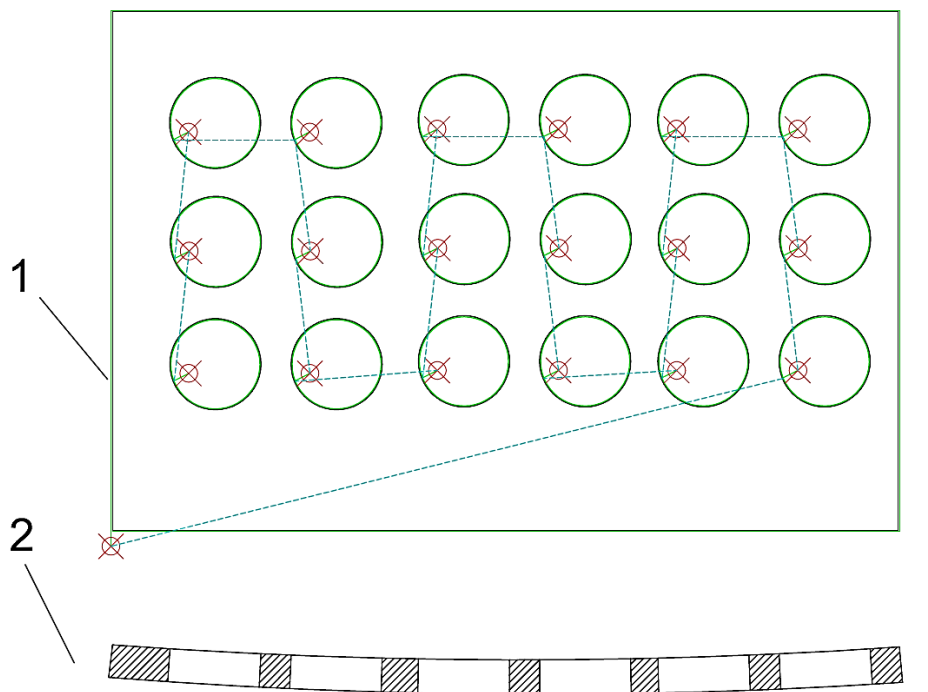
Jelikož není vhodné do materiálu při dělení laserem nerovnoměrně vnášet příliš energie v podobě tepla, bylo třeba vyřešit otázku, kdy do materiálu vstupuje *nejvíce tepelné energie* a jak ohřívat materiál rovnoměrně. Má se za to, že nejvíce energie je do materiálu vnášeno při *propalu*, kdy je vlivem maximální energii soustředěné do jednoho bodu vneseno velké množství tepla, které je tepelnou vodivostí šířeno do většího okolí. Bezpochyby však záleží i na tloušťce děleného plechu.

Dále je to během procesu *dělení*. Jestliže má například díl menších rozměrů mnoho otvorů, viz obr. 7.2.3, které jsou páleny před dělením vnějšího obrysu dílu, dochází k torzi a špatné kvalitě řezu, viz obr. 7.2.4.





Obr. 7.2.3 Schéma dělení dílů: 1) startovní propal, 2) přejezd mezi konturami, 3) vnější obrys dílu, 4) vnitřní obrys dílu, 5) směr přejezdu, 6) řezná geometrie, 7) zbytkový rastr, 8) okraj tabule plechu



Obr. 7.2.4 Dělený díl: 1) dělený díl, 2) predikovaná torze dílu

Bylo tedy otázkou, jak případně oddělit propal od procesu dělení nebo omezit počet propalů. *Jak začít dělit materiál s absencí velkého množství propalů.* Toho lze dosáhnout pouze u již vytvořeného řezu nebo propalu. Ne do otvoru, protože by řezná hlava kolidovala s materiálem (spadla by do otvoru).

### 7.3 Optimalizace technologického procesu v software

Jak již bylo uvedeno, disponuje firma TRUMPF pro programování stroje vlastním software, TruTops (dále jen TT). Programovací prostředí od doby vzniku ToPsu doznalo obrovských změn a jedná se uživatelsky celkem přátelskou aplikaci. TT je rozdělen do tří modulů:

- kreslení (CAD)
- skládání na tabule plechů (NEST)
- technologie řezání (LASER)

Pro optimalizaci, resp. minimalizaci deformace, je třeba použít všechny zmíněné moduly.

#### 7.3.1 Modul CAD

Bylo vytvořeno mnoho zkušebních výkresů pro ověření úvahy, zda by kontury odsazené od sebe (obr. 7.3.1), umožnily v *modulu LASER* pracovat s výkresem i dále. ***Kontury musejí být jednoznačně odděleny (nesmějí být kresleny přes sebe), jinak by se v modulu LASER vlivem omezené rozlišovací schopnosti spojily v jednu konturu,*** a nebylo by možné díl ***dělit postupně.***

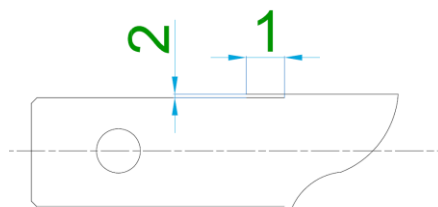
Na stroji by tento rozdíl neměl být identifikován. Zatímco SW je schopen rozlišovat vektorovou grafiku řádově v 0,001 mm, na stroji při tloušťce plechu 8 mm s řeznou spárou 0,4 mm toto není identifikovatelné. Paprsek stroje by rozdíl, resp. případné odsazení kontur, neměl rozlišovat. Jestliže však kontury oddělíme (obr. 7.3.1), musí být u každé kontury vždy startovní otvor včetně propalu, což znamená mnoho vneseného tepla.

Materiál musí mít před řezem kontury vytvořený startovní propal, aby mohl paprsek dále pokračovat v řezu po dané trajektorii. V *modulu LASER* je pochopitelně

možné propal vypnout, ale **bez propalu nelze materiál dělit**. Je tedy nezbytné konturu rozdělit, ale přiblížit se konturami k sobě na takovou vzdálenost, abychom mohli *startovní otvor vynechat* a stroj *startoval opět v kontuře dříve vyříznuté*. Teoreticky je v tomto případě možné kontury odsadit o 0,2 mm, což je ½ šíře řezné spáry námi děleného plechu tloušťky 8 mm. V ideálním případě je vhodné startovat v již vypálené (předpálené) kontuře. Jediným způsobem, jak je možné tohoto dosáhnout, je kontury *odsadit* do strany o 0,2 mm a *překrýt* o minimální vzdálenost, viz o br. 7.3.1.

Jestliže bychom kontury rozdělili a překryly, byly by v *modulu LASER* spojeny v jednu. V případě, že bychom je pouze překryly, splynuly by v modulu technologie v celek, a nedalo by se s nimi dále pracovat. Jenže odsazení kontury o 0,2 mm by představovalo nepřesnost výsledného rozměru výrobku.

Je tedy s výhodou možné využít *omezenou rozlišovací schopnost (chybu) software a odsadit konturu o 0,01 mm*. V *modulu LASER* toto nebude rozpoznáno a při šíři řezné spáry u námi řezaného dílu z tloušťky 8 mm, která činí 0,4 mm a s přesností dělení laserem 0,1 mm, nebude rozdíl již měřitelný.

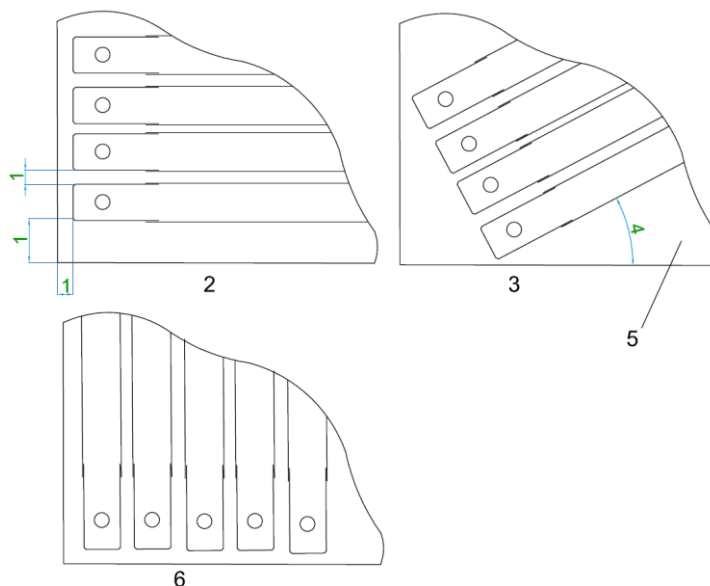


Obr. 7.3.1. Přesazení kontur: 1) přesazení, 2) odsazení

### 7.3.2 Modul NEST

V *modulu CAD* bylo možné si připravit výkres námi děleného dílu pro experiment. Díl by byl dále importován do *modulu NEST*. Tento modul slouží k optimálnímu rozmístění dílů na tabuli, viz obr. 7.3.2.1. Zde je možné volit vhodnou orientaci, tedy úhel otočení na tabuli a velikost zbytkového rastru, což je vzdálenost mezi díly a šíří okraje. Právě *vhodná orientace dílu na tabuli* je jednou z možností, jak se vyhnout *torzi*. Dílem však nelze na tabuli vždy otáčet libovolně. Kdybychom pominuli enormní spotřebu materiálu, jelikož není možné na tabuli poskládat stejný

počet dílů, jako v případě skládání po 90°, je použitelnost tohoto řešení omezená rozměry tabule plechu a dílu. V našem případě s délkou dílu 2 100 mm byl tento způsob nemožný.



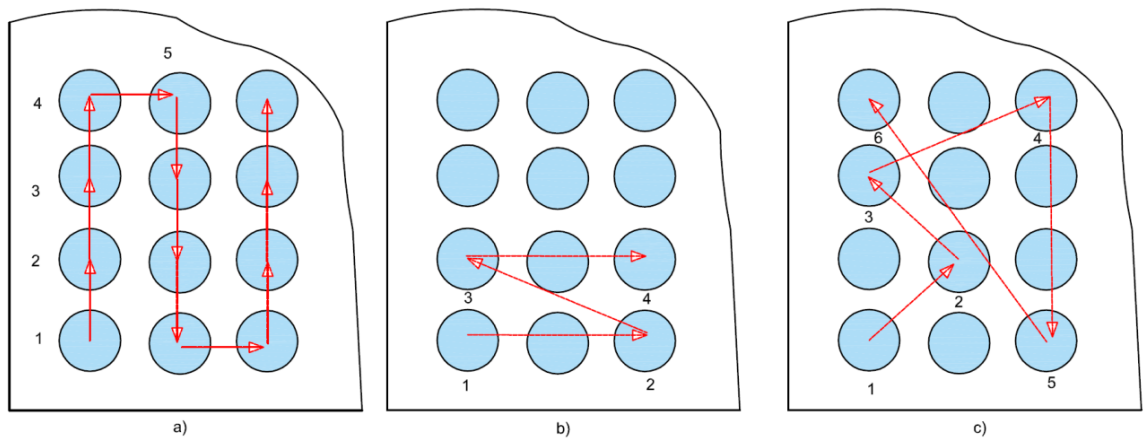
**Obr. 7.3.2.1** Možnosti rozložení dílu na tabuli: 1) velikost zbytkového rastru, 2) úhel otočení dílu 0°, 3) příklad natočení dílů 4) úhel natočení 5) nevyužitelný zbytek plechu 6) otočení dílů o 90° vůči pozici 2

### 7.3.3 Modul LASER

Jak bylo zmíněno výše, *torzi* je možné eliminovat vhodnou orientací na tabuli a postupným (rovnoměrným) vnášením tepla. V tomto modulu bylo možné ověřit teoretické návrhy, a po předchozích úpravách výkresu a optimálním uspořádáním dílů na tabuli opracovat dále. Vezmeme-li v úvahu analogii s technologií sváření, kdy obvykle k nejmenší torzi svařence dochází při postupném sváření a dostatečně pevném upnutí, bylo by vzhledem k tomu, že se jedná rovněž o tepelný proces, při operaci dělení laserem vhodné zkusit zanechání děleného dílu co nejdéle ve zbytkovém rastru. *Modul LASER* nabízí tyto varianty pálení dílů (na obrázcích jsou pro pochopení úmyslně malé díly):

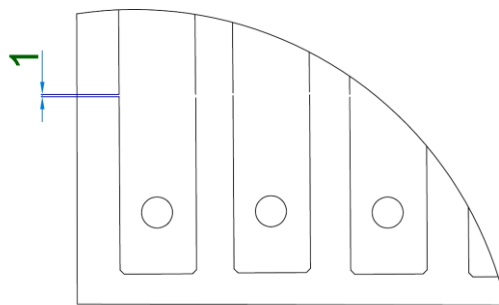
- postupné vnášení tepla – postupné *dělení dílů*, viz obr. 7.3.3.1:
  - *meandrování*
  - *pálení dílů přes jeden*

- *odsazení kontur* (viz výše)
- *pálení náhodně*



**Obr. 7.3.3.1** Varianty postupu dělení dílů: a) meandrování, b) přes jeden díl, c) náhodně

- postupné vnášení tepla – postupné *pálení obrysu* a *udržení dílu co nejdéle ve zbytkovém rastru*,
  - *postupné pálení vnějšího obrysu – můstky* (obr. 7.3.3.2)
  - *postupné pálení vnějšího obrysu – odsazením kontur*

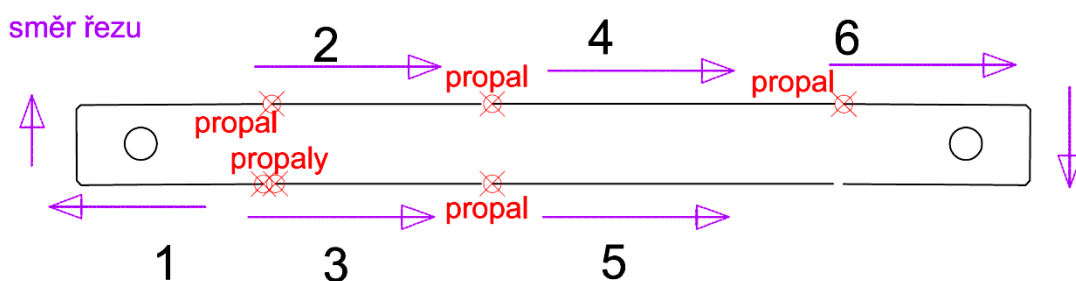


**Obr. 7.3.3.2** Dělení s můstky: 1) místo přerušení kontury

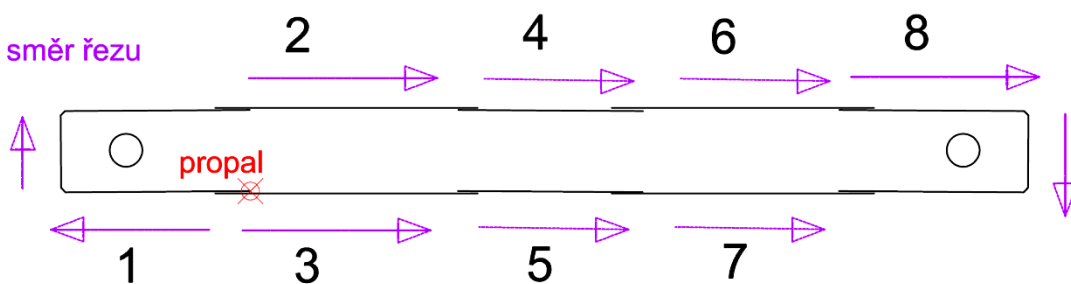
Je patrné, že výše uvedené varianty mají společnou variantu: *postupné pálení*. Jedná-li se o malé díly, je vhodnější volit variantu postupného pálení jednotlivých dílů, jelikož nedochází tolik k deformaci vnášeným teplem, ale spíše k nekvalitnímu řezu. Pokud se však jedná, jako v našem případě o díly dlouhé, zbývá nám varianta *postupného pálení vnějšího obrysu*.

Jedná se totiž o *analogii svařovacího procesu* s pevně upnutým svařencem a „stehováním“, tedy o spojení varianty udržení dílu v tabuli i během chladnutí s postupným vnášením tepla. Toto lze aplikovat dvěma způsoby, a to *s můstky a s odsazením kontury*. Na obrázcích 7.3.3.3 a 7.3.3.4 jsou pro ilustraci opracovány pouze vnější obrysy a je vyobrazen algoritmus *postupného pálení* (vnášení tepla) a *s odsazením pouze s jedním propalem* u startovní kontury.

Na obrázku 7.3.3.4 jsou děleny pouze vnější obrysy v tak těsné blízkosti, že není potřeba dalších zápalů v celé délce zbylého obrysu. U námi řešeného dílu, v délce 2 100 mm je pochopitelně přerušených obrysových kontur více. Rozdělení dlouhého dílu na určitý počet segmentů dílů je pak záležitostí zkoušení a praxe.



Obr. 7.3.3.3 Algoritmus řezání kontur pouze *s můstky*



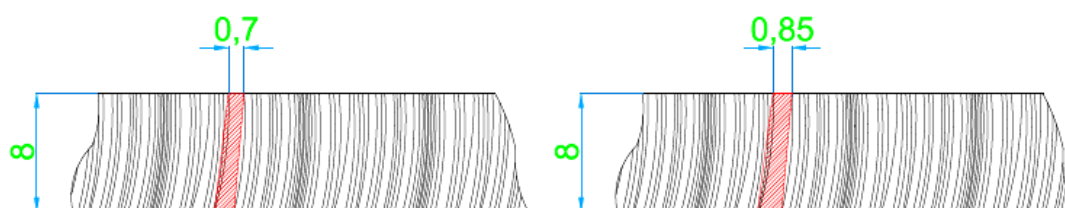
Obr. 7.3.3.4 Algoritmus řezání kontur *s odsazením* pouze s jedním propalem

## 8 Experimentální ověření

Uvedené varianty s můstky, postupným řezem, byly postupně prověřovány na sadě 48 (tři tabule plechu 3 000 x 1 600 mm) zkušebních vzorků (obr. 8.2) i přes fakt, že jsou díly vyráběny standardně. Z první tabule plechu byly díly děleny

dosavadním způsobem a následovaly dvě tabule se změnou technologického postupu.

Variantu *s můstkem* bylo nutné po prvních kusech zavrhnout. Můstky s šíří 0,4–0,7 mm se upalovaly a díly nedržely v tabuli plechu. Při zkoušení zvětšit šíři můstků, tedy jejich průřez z 0,7-0,85 mm, viz obrázek 8.1, se u námi testovaných dílů při tloušťce 8 mm změnil průřez můstku natolik (nutno násobit počtem můstků na dílu), že díly již nebylo možné běžným způsobem (ručně) vyjmout.



**Obr. 8.1 Průřez můstkem**

Dále tato metoda zanechávala v místech přerušení, po rozšíření můstků, znatelný otřep, který bylo nutné následně odstraňovat broušením, což by v budoucnu znamenalo zbytečné vícenáklady. Ukázalo se tedy, že tato varianta není vhodná, jak z hlediska jakosti, tak po stránce ekonomické. Nutno podotknout, že pokud bychom řešili díly z tenčích plechů, tato metoda by se zmenšeným průřezem můstků byla použitelná.

Zbylá varianta, kterou dodávaný software nenabízí a ke které jsem logicky došel, je *řezání s odsazením*. Tuto metodu jsem nazval pracovním názvem „*metoda postupného řezu*“.

Nadto uvádím, že byly díly děleny strategií *přes jeden kus* (Obr. 8.2 a 7.3.3.1 výše), a zbylé díly dopalovány, opět ve snaze vnášet tepelnou energii do celé tabule plechu rovnoměrně s cílem eliminovat deformace.



Obr. 8.2 Výztuhy – pálení prvních kusů – rozmístěné na tabuli plechu

### 8.1 Průběh experimentu

V experimentální části byla ověřována mnou navržená *metoda postupného řezu*, která není standardně v software nabízena. Primárně bylo třeba prověřit, zda je domněnka odsazení kontur funkční i při dělení laserem a nezpůsobuje problémy s kvalitou řezu.

*Metoda postupného řezu* po vypálení prvních kusů, u kterých byla kvalita řezu kontrolována a splňovala očekávání, byla prověřována dále.

Experiment byl prováděn během standardního pracovního procesu. Výsledný průhyb byl měřen po vyjmutí dílů z tabule plechu. Postupně bylo vypáleno 48 dílů. Primárně byla pálena sada 16 kusů z první tabule plechu standardní, resp. dosavadní metodou, aby bylo měřitelné, tedy porovnatelné, jak velký průhyb byl před použitím mého návrhu a s použitím této nové metody.

*Dílů v tomto případě bylo páleno pouze 16 ks*, jelikož nebylo přijatelné testem vytvářet velký počet dílů s nepřijatelnou torzí, a tím zatěžovat další výrobu následnými vícepracemi.



## 8.2 Kontrola měřidel

Před samotným měřením byla provedena kontrola měřidel. Digitální hloubkoměr, stejně jako deska firmy Planolith, byl označen Českým metrologickým institutem (ČMI) jako vyhovující. Měření bylo provedeno digitálním hloubkoměrem (obr. 8.2.1 a). Libela byla kontrolována rozdělením na úseky po 200 mm (obr. 8.2.1 b) a v celé délce měřena pro případnou odchylku průhybu a šířky.

Hodnoty naměřené v jednotlivých bodech byly zapisovány do tabulky (tab. 8.2). Libela v celé své délce vykazovala maximální odchylku od hodnoty udávané výrobcem 0,09 mm. Což bylo vzhledem k experimentu, kdy je primárně zjišťována existence průhybu v milimetrech, zanedbatelné.



Obr. 8.2.1 a Měření libely



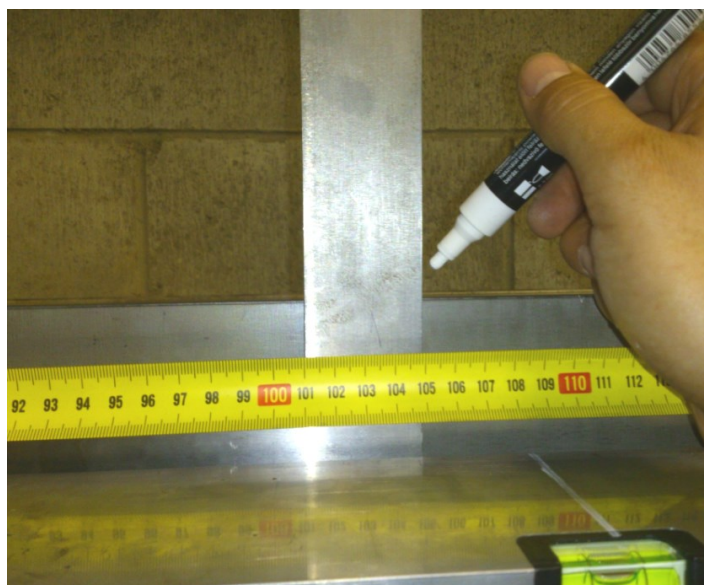
Obr. 8.2.1 b Úseky měření

Tab. 8.2 Měřené hodnoty přesnosti libely

Místo měření	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000
Průhyb [mm]	89,72	89,72	89,71	89,71	89,73	89,71	89,71	89,72	89,72	89,8
Místo měření	2200	2400	2600	2800	3000	3200	3400	3600	3800	4000
Průhyb [mm]	89,75	89,73	89,72	89,73	89,74	89,71	89,71	89,72	89,73	89,72

### 8.3 Měření deformací

Díly byly měřeny digitálním hloubkoměrem na granitové měřicí desce a pomocí duralové libely o délky 4 000 mm. Pro měření byla primárně stanovena a označena středová symetrála každého dílu, tedy normála k delší straně (obr. 8.3.1).



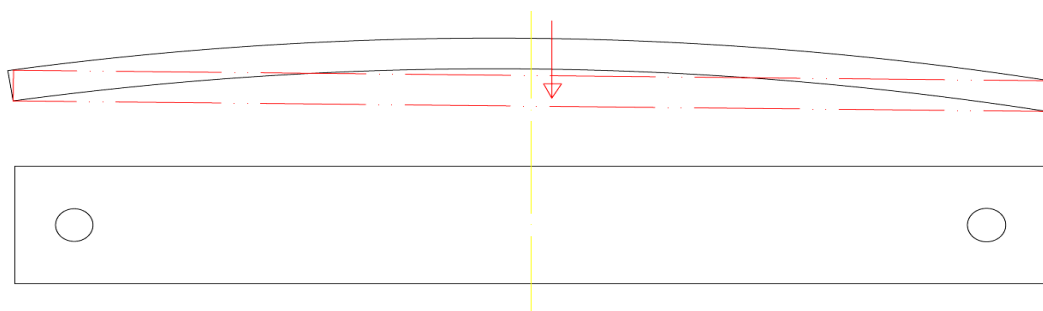
Obr. 8.3.1 Stanovení symetrály

Měření probíhalo tak, že byl každý vzorek položen svým průřezem (dle obr. 8.3.2) na desku a přiložen k libele.



Obr. 8.3.2 Měření průhybu v symetrále dílu i libely

Díly *nebylo* vhodné měřit dle obrázku 8.3.3, jelikož se vlivem své hmotnosti sami vyrovnaly s rovinou desky.



**Obr. 8.3.3** Průhyb dílu

Díly byly proměřovány v úsecích po 200 mm, nicméně vzhledem k charakteru dílu byly maximální hodnoty průhybu vykazovány právě uprostřed dílu, jak je znázorněno na obr. 8.3.4. Do tabulek hodnot 8.3.1 a 8.3.2 tak byly postupně zapisovány pouze maximální naměřené hodnoty průhybu jednotlivých vzorků bez šíře libely, tedy čistý průhyb. Tabulka 8.3.1 zachycuje stav před užitím *metody postupného řezu*. Tabulka 8.3.2 zachycuje stav po aplikaci této metody.



**Obr. 8.3.4** Měření průhybu v symetrále dílu i libely

**Tabulka 8.3.1 Před aplikací**

Bez optimalizace	
Vzorek. č	Hodnota [mm]
1	13,91
2	12,02
3	11,93
4	10,37
5	13,37
6	10,64
7	11,18
8	12,09
9	10,64
10	10,42
11	12,51
12	13,38
13	13,21
14	10,42
15	10,51
16	13,25
průměr	11,87
maximum	13,91
minimum	10,37

**Tabulka 8.3.2 Výsledné hodnoty po aplikaci**

S optimalizací			
Vzorek. č	Hodnota [mm]	Vzorek. č	Hodnota [mm]
1	2,83	17	1,58
2	3,17	18	2,45
3	3,25	19	1,98
4	1,06	20	1,56
5	0,97	21	2,81
6	0,86	22	1,38
7	0,54	23	2,46
8	2,09	24	1,56
9	1,55	25	3,38
10	3,14	26	3,45
11	2,54	27	1,45
12	1,38	28	2,35
13	3,08	29	2,34
14	2,56	30	2,38
15	1,98	31	2,35
16	1,35	32	2,55
průměr	2,14		
maximum	3,45		
minimum	0,54		

## 9 Vyhodnocení

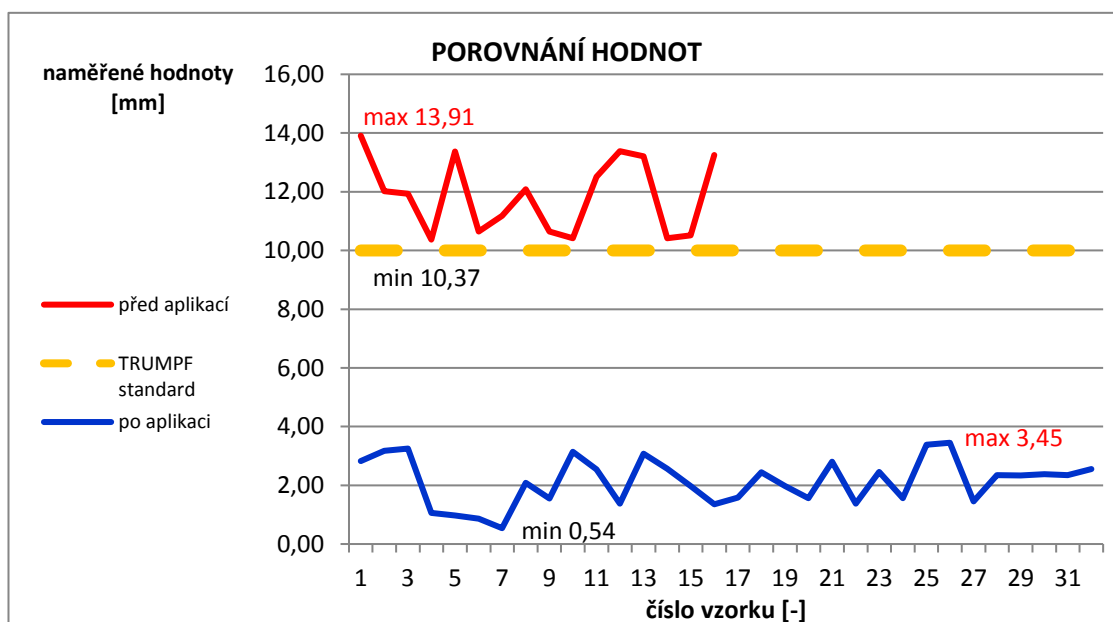
Ze zapsaných kontrolních hodnot v tabulkách výše, tedy před a po zvolené aplikaci minimalizace, byly vypočítány hodnoty, viz tab. 10.1, ukazující minimální a maximální deformace vzhledem k **Trumpf standardu 10 mm/m**, a k nulové hodnotě. Jelikož výsledek práce ukazuje na takové snížení deformace, které už není měřitelné, dle této interní normy, viz graf č. 10.1, bylo výsledné snížení deformace vztaženo k nulové hodnotě. Z grafu je pak jasně patrné, že **došlo k minimalizaci deformace při pálení laserem** a zbylý minimální průhyb **dalece splňuje** interní normu maximálně povoleného průhybu.

Tab. 9. 1 Porovnání měřených hodnot

Stav před aplikací metody postupného řezu	Hodnota [mm]	Stav po aplikaci metody postupného řezu	hodnota [mm]
maximální odchylka - od TRUMPF st.	3,91	maximální odchylka - od TRUMPF st.	-6,55
minimální odchylka - od TRUMPF st.	0,37	minimální odchylka - od TRUMPF st.	-9,46
maximálně naměřené hodnoty od 0	<b>13,91</b>	maximálně naměřené hodnoty od 0	<b>3,45</b>
minimálně naměřené hodnoty od 0	<b>10,37</b>	minimálně naměřené hodnoty od 0	<b>0,54</b>
průměrná hodnota	<b>11,87</b>	průměrná hodnota	<b>2,14</b>

výsledné snížení deformace  
vztažené k 0

9,73 mm



;

Graf 9. 1 Porovnání měřených hodnot

## Závěr

Cílem této práce byla minimalizace deformace u dílů dělených laserem. Výše uvedený nový postup, je možné aplikovat i při dělení podobné skupiny dílů.

**Experimentem bylo dosaženo požadovaného výsledku** a byla ověřena minimalizace deformace zvolených dílů. Po rozboru jednotlivých variant a aplikaci mnou vymyšlené *metody postupného řezu* se prokázalo, že tato metoda vedla k velmi dobrému výsledku, kdy se *průměrná* hodnota deformace dílu snížila o **81,97 %**.

Výše je rovněž popsán způsob, jak s výhodou využít nedokonalosti dodávaného software. Pokud se tedy uživatel laseru setká s podobnou skupinou dlouhých a úzkých plechových dílů, je touto *metodou postupného řezu* možné takové deformace výrazně snížit.

Dodávaný materiál je nestejně kvality, ale v rozměrových tolerancích. Tabule plechů mají rozdílnou tvrdost i tloušťku. Okraje tabule jsou tvrdší a rozdílné tloušťky, což je problematické zejména v následné operaci tváření. Díly je vhodné rozmístit na tabuli co možná nejdále od okraje. Pokud je díl umístěn blíže ke kraji, dochází k větší deformaci než u středu. Problémy s nestejně vnášeným teplem během dělení materiálu laserem je analogií svařovacího procesu, pevně upnutého svařence a „stehování“, tedy spojení varianty udržení dílu v tabuli i během chlazení s postupným vnášením tepla.

Cílem této práce však nebylo metalografické posouzení okolí řezu. To by bylo vhodné zkoumat v další studii, stejně jako souvislost mezi způsobem válcování, diferencí tloušťky, vneseným vnitřním pnutím, které není stejné v celé ploše plechové tabule. Tedy jak by bylo možné předejít vnesení vnitřního pnutí už při samotné výrobě hutního polotovaru. Totiž rozdílná tvrdost a tloušťka v celé šíři plechové tabule způsobuje obtíže při dalším tváření, kdy jsou díly ohýbány s nejistým výsledkem, případně praskají následkem zanechaného nestejného pnutí v materiálu.

## Citovaná literatura

- [1] GREIPL, E., KRIŽKO, B. *Hutnický materiál a polotovary v strojárkej výrob.* Bratislava: Vydavateľstvo technickej a ekonomickej literatúry, 1979.
- [2] HLUCHÝ, M. a kol. *Mechanická technologie*, Praha: SNTL, 1963.
- [3] WIKIPEDIA. *wikipedia.cz* [online]. ©2015 [cit. 2017-04-09]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/V%C3%BDroba\\_oceli](https://cs.wikipedia.org/wiki/V%C3%BDroba_oceli).
- [4] ENERGETICKÝ ÚSTAV, Štětina, J. *eu.fme.vutbr.cz*, [online]. ©2017 [cit. 2017-04-09]. Dostupné z: <http://ottp.fme.vutbr.cz/vyzkum/kontiliti01.php>.
- [5] ČERVINKA, J., PASTOR, V. *Tváření oceli*, Praha: SNTL, 1964.
- [6] VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, *kke.zcu.cz*, [online]. ©2016 [cit. 2017-04-09]. Dostupné z: [http://kke.zcu.cz/export/sites/kke/about/projekty/enazp/projekty/14\\_Strojirenska-technologie\\_35-37/35\\_IUT/071\\_Plynule-odlevani-oceli---P1.pdf](http://kke.zcu.cz/export/sites/kke/about/projekty/enazp/projekty/14_Strojirenska-technologie_35-37/35_IUT/071_Plynule-odlevani-oceli---P1.pdf).
- [7] DUNAFERR, „[www.dunaferr.hu](http://www.dunaferr.hu)“, ISD Dunaferr, [online]. ©2017 [cit. 2017-04-13]. Dostupné z: <http://www.dunaferr.hu/en/products/technology/continuous-casting>.
- [8] LENFELD, P. *Technologie II. - 1. Část (tváření kovů)*. Liberec: 2009. ISBN 978-80-7372-466-5.
- [9] LLOYD, E., *Metal forming - Theory, Principles and Practise*, Metalforming machinery makers' association, 1986. ISBN 0-86108-383-0.
- [10] THELIBRARYOFMANUFACTURING, *thelibraryofmanufacturing.com*, [online]. ©2017 [cit. 2017-04-11]. Dostupné z: [http://thelibraryofmanufacturing.com/metal\\_rolling.html](http://thelibraryofmanufacturing.com/metal_rolling.html).
- [11] TRINET *zdas.cz*, [online]. ©2017 [cit. 2017-04-17]. <http://www.zdas.cz/cs/content.aspx?id=95>.
- [12] TRUMPF GmbH. *Technická informace - Obrábění CO2 laserem*, Ditzingen: TRUMPF Werkzeugmaschinen GmbH + Co. KG, 2009.
- [13] TECHNICKENORMY. *technickenormy.cz*, [online]. ©2017 [cit. 2017-04-15]. Dostupné z: <https://www.technickenormy.cz/csn-en-iso-9013-tepelne-deleni-klasifikace-tepelnych-rezu-geometricke-pozadavky-na-vyrobky-a-uchylky-jakosti-rezu/?gclid=Cj0KEQjwicfHBRCh6KaMp4-asKgBEiQA8GH2x1VZiR1rt8HeDexxNT3MVSqbmVtVPoQGS07-YYCygBDoaAqQV8P8HAQ>.
- [14] KONSTRUKCE. Roubíček, M. *konstrukce.cz*, [online]. ©2015 [cit. 2017-04-16]. Dostupné z: <http://www.konstrukce.cz/clanek/vliv-technologickych-parametru-na-vznik-vad-pri-tepelnem-deleni-materialu-kyslikem/%3Cp%3EAdditionally,%20a%20404%20Not%20Found>.
- [15] VRBOVÁ, M. JENÍKOVÁ, A. H. GAVRILOV P. *Úvod do laserové techniky*, Praha: ČVUT, 1994.
- [16] THEFABRICATOR. Bustreo, A. *thefabricator.com*, [online]. ©2016 [cit. 2017-04-13]. Dostupné z: <http://www.thefabricator.com/article/shopmanagement/all-you-need-to-know-about-the-heat-affected-zone>.

- [17] WOOD, W. E. *Heat-Affected Zone Studies of Thermally Cut Structural Steels*, Virginia: Research and Development - Turner-Fairbank Highway Research Center, 1994. No. FHWA-RD-93-015.
- [18] ZVARACKY-BRUSIVO. *zvaracky-brusivo.sk*, [online]. ©2017 [cit. 2017-04-17]. Dostupné z: <http://www.zvaracky-brusivo.sk/kategoria/prislusenstvo/zvaranie-plamenom-autogen/rucne-rezacie-horaky/rezaci-horak-r-8/>.
- [19] SCHINKMANN. *Schinkmann.cz*, [online]. ©2016 [cit. 2017-04-17]. Dostupné z: <http://www.schinkmann.cz/autogen>.
- [20] EICHLER, M. *Porovnání metod dělení materiálu*, Bakalářská práce, Praha: ČZU, 2015.
- [21] CTP ENGINEERING. Němeček, S. *ctps.cz*, [online]. ©2017 [cit. 2017-04-17]. Dostupné z: [www.ctps.cz/cs/dokumenty/soubor-laserove-technologie/84/](http://www.ctps.cz/cs/dokumenty/soubor-laserove-technologie/84/).
- [22] TRUMPF GmbH, *Technologie pálení laserem*, Ditzingen: Technische redakcion, 2011.
- [23] LUŇÁČEK, M., SOBOTKA, J., SOLFRONK, P., *The Effect of Blank Preparation on the Formability of Ultra High-Strength Steels*. Liberec: Technical University of Liberec, 2011. ISBN 978-80-7372-806-9.