Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta lesnická a dřevařská

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů

Vliv vlhkosti na jakost laserového řezu a její hodnocení podle normy ČSN EN ISO 9013

Diplomová práce

Autor: Jiří Peňáz

Vedoucí práce: Ing. Miroslav Sedlecký, Ph.D.

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta lesnická a dřevařská

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Jiří Peňáz

Dřevařské inženýrství
Dřevařské inženýrství

Název práce

Vliv vlhkosti na jakost laserového řezu a její hodnocení podle normy ČSN EN ISO 9013

Název anglicky

Influence of moisture on the quality of laser cut and its evaluation according to ČSN EN ISO 9013

Cíle práce

Práce bude zaměřena na zjištění úchylek jakosti řezu a kvality povrchu obrobeného pomocí laseru při rozdílné vlhkosti řezaných vzorků. Celkové hodnocení bude podle normy ČSN EN ISO 9013 (2017). V práci bude zpracován návrh na úpravu této obecné normy a možnosti aplikace při hodnocení obráběného dřeva.

Metodika

1. Zpracování literární rešerše, která bude zaměřena především na řezání dřeva laserem, hodnocení jakosti řezu a konvenční metody obrábění.

2. Návrh metodiky diplomové práce.

3. Výroba zkušebních vzorků, a změření kvality obrobeného povrchu.

4. Vyhodnocení naměřených dat statistickými analýzami a zpracování výsledků

5. Vyhodnocení výsledků, závěr a zhodnocení přínosu pro praxi a vědu a doporučení k užívání zmíněné normy.

Doporučený rozsah práce

minimálně 50 stran

Klíčová slova

řezání laserem, kvalita povrchu, řezání okružní pilou

Doporučené zdroje informací

Barcík,Š. Stroje a zariadenia – NCV. TU Zvolen, 2001.,s.150, ISBN 80-228-1035-5.
Csanády, E. a Magoss, E.; Mechanics of Wood Machining; Springer 2013; s 202; ISBN 978-3642299544
Csanády, E. et al.; Quality of Machined Wood Surfaces; Springer 2015; 978-3-319-22418-3
DAVIM, J P. *Wood machining.* London: Wiley, 2011. ISBN 978-1-84821-315-9.

Předběžný termín obhajoby

2019/20 LS – FLD

Vedoucí práce

Ing. Miroslav Sedlecký, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů

Elektronicky schváleno dne 27. 2. 2020

Ing. Radek Rinn

Vedoucí ústavu

Elektronicky schváleno dne 3. 3. 2020

prof. Ing. Róbert Marušák, PhD.

Děkan

V Praze dne 10. 06. 2020

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Vliv vlhkosti na jakost laserového řezu a její hodnocení podle normy ČSN EN ISO 9013** vypracoval samostatně pod vedení Ing. Miroslava Sedleckého, Ph.D. a použil jen prameny, které uvádím v seznamu použitých zdrojů.

Jsem si vědom, že zveřejněním diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách v platném znění, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Praze dne 11. 6. 2020 Podpis autora

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat panu Ing. Miroslavu Sedleckému, Ph.D. za jeho odbornou pomoc, cenné rady a připomínky, bez nichž by tato práce nemohla vzniknout. Dále bych chtěl poděkovat všem, kteří jakýmkoli způsobem přispěli při tvorbě této práce, především mojí rodině a přátelům.

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce se zabývá problematikou obrábění dřeva technologií laserového paprsku s ohledem na jakost obrobené plochy, včetně porovnání s konvenční technologií zastoupenou řezáním pilovým kotoučem.

Práce má dvě stěžejní části. V první části popisuje klasickou, konvenční technologii řezání dřeva. Zabývá se především vlivy, které působí na jakost obráběného povrchu při řezání. Následuje vysvětlení, co je nekonvenční dělení materiálu, jaké metody rozeznáváme, principy jejich fungování. Dále je popisován zkoumaný materiál, tedy dřevo, jeho vlastnosti. Součástí je i popis vlastností konkrétní zkoumané dřeviny - dubu. Dále je zde popsána norma, zabývající se tepelným dělením materiálu.

Druhá část je věnována metodologii výzkumu vlivu řezání laserovým paprskem na zkoumanou dřevinu. Obsahuje taktéž doporučení pro využití zmíněné normy, včetně návrhu na její doplnění. Důležitou součástí je diskuze a zhodnocení výsledků výzkumu.

Klíčová slova

pilový kotouč, laserový paprsek, jakost povrchu, norma

Abstract

The presented diploma thesis deals with the issue of woodworking by laser beam technology with regard to the quality of the machined surface, including a comparison with conventional technology represented by saw blade cutting.

The work has two main parts. The first part describes the classic, conventional technology of wood cutting. It mainly deals with the influences that affect the quality of the machined surface during cutting. The following is an explanation of what is an unconventional division of material, what methods we recognize and the principles of their operation. Furthermore, the investigated material, ie wood, its properties are described. It also includes a description of the properties of the specific tree species examined - oak. Furthermore, a standard dealing with the thermal separation of material is described here.

The second part is devoted to the methodology of research into the influence of laser beam cutting on the examined tree species. It also contains recommendations for the use of the said standard, including a proposal for its amendment. An important part is the discussion and evaluation of research results.

Keywords

saw blade, laser beam, surface quality, standard

1 Úvod 13
2 Cíl práce 14
3 Konvenční a nekonvenční dělení materiálu 15
3.1 Konvenční dělení materiálu 15
3.1.1 Rámová pila 15
3.1.2 Pásová pila 17
3.1.3 Kotoučová pila 19
3.1.4 Pilový kotouč 20
3.1.5 Části pilového kotouče 20
3.1.6 Řezný klín 21
3.1.7 Tvar řezného klínu 21
3.1.8 Materiál řezného klínu 22
3.1.9 Ovlivňující faktory při řezání pilovým kotoučem 22
3.1.9.1 Vliv kotouče 23
3.1.9.2 Geometrie řezného klínu 24
3.1.9.3 Vliv stroje 24
3.1.9.4 Vliv vlastností řezaného dřeva 25
3.1.10 Vlastnosti kotouče ovlivňující kvalitu povrchu obrobku 25
3.2 Nekonvenční dělení materiálu 29
3.2.1 Elektrotepelné obrábění 29
3.2.2 Mechanické obrábění 31
3.2.3 Obrábění laserem 32
3.2.3.1 pevnolátkové lasery 34
3.2.3.2 kapalinové lasery 34
3.2.3.3 plynové lasery 35
3.2.3.4 polovodičové lasery 37

4 ZKOUMANÝ MATERIÁL 40
4.1 Stavba dřeva 40
4.2 Dubové dřevo 44
4.2.1 Struktura dubového dřeva 45
4.2.2 Vlastnosti a využití dubového dřeva 46
4.2.3 Obrábění dubového dřeva 46
5 Tepelné dělení podle normy 48
5.1 Norma ČSN EN 9013 48
6 Metodika výzkumu 50
6.1 Zkoumané vzorky 52
6.1.1 Zjišťování vlhkosti vzorků 52
6.2 Strojní vybavení 52
6.2.1 Laser 53
6.2.2 Kotoučová pila 55
6.3 Přístrojové vybavení 56
6.3.1 Nastavení profilometru 57
6.4 Softwarové vybavení 57
6.5 Podmínky výzkumu 57
6.6 Měření vzorků 58
6.7 Statistické zpracování dat 58
7 Výsledky a diskuze 60
7.1 Naměřené hodnoty 60
7.2 Vliv směru řezu a vlhkosti na Rz - řez laserem 61
7.2.1 Vliv směru řezu na Rz 61
7.2.2 Vliv vlhkosti na Rz 62
7.2.3 Vliv vlhkosti a směru řezu na Rz 63

7.3 Vliv směru řezu a vlhkosti na Pt - řez laserem 64
7.3.1 Vliv směru řezu na Pt 64
7.3.2 Vliv vlhkosti na Pt 65
7.3.1 Vliv vlhkosti a směru řezu na Pt 66
7.4 Vliv směru řezu a vlhkosti na PV - řez laserem 67
7.4.1 Vliv směru řezui na PV 67
7.4.2 Vliv vlhkosti na PV 68
7.4.1 Vliv směru řezu a vlhkosti na PV 69
7.5 Vliv vlhkosti na řez laserem v porovnání s kotoučem 70
7.5.1 Vliv vlhkosti a směru řezu na Rz 70
7.5.2 Vliv vlhkosti a směru řezu na Pt 71
7.5.3 Vliv vlhkosti a směru řezu na PV 72
7.6 Návrh na použití, případně úpravu normy ČSN EN ISO 9013 ... 73
7.7 Diskuze 78
8 Závěr 79
8.1 Přínos pro vědu 79
8.2 Přínos pro praxi 79
9 Seznam literatury 81
10 Elektronické zdroje 83
11 Technické normy 85

Seznam obrázků

Obrázek 1: Ruční rámová pila (https://www.kutil.cz/)....15
Obrázek 2: Stolní rámová pila (https://www.zahrada-naradi.cz/)....16
Obrázek 3: Kmenová rámová pila (https://www.hoechsmann.com/) 17
Obrázek 4:Pohyb výřezu pořez naostro a prizmováním (vlastní) 17
Obrázek 5:Stolní pásová pila (https://www.conrad.cz/) 17
Obrázek 6: Kmenová pásová pila (https://www.pilous.cz/) 18
Obrázek 7: Formátovací kotoučová pila PKS-300F (https://www.simek.eu/) 19
Obrázek 8: Popis pilového kotouče 20
Obrázek 9: Tvary řezného klínu (Siklienka,Kminiak 2013) 22
Obrázek 10: Geometrie řezného klínu (https://eluc.kr-olomoucky.cz/)....24
Obrázek 11: Přesah zubu (PILANA Wood, 2015)....27
Obrázek 12: Nejpoužívanější tvary SK plátku (PILANA Wood, 2015)....28
Obrázek 13: Elektrojiskrové řezání (http://solicad.com/) 30
Obrázek 14: Konstrukce plazmových hořáků (Humár 2005) 30
Obrázek 15: Rubínový laser (https://www.cez.cz/)....33
Obrázek 16: Optická úprava paprsku (http://www.lt.cz/)....36
Obrázek 17: Různé módy laserového paprsku (http://www.lt.cz/)....39
Obrázek 18: Příčný řez dubovým dřevem (https://lesycr.cz/, 2020) 45
Obrázek 19: Tangenciální řez dubovým dřevem (https://lesycr.cz/, 2020) 45
Obrázek 20:Průměrná výška prvků profilu (ČSN EN 9013)....50
Obrázek 21:Úchylka kolmosti nebo úhlu (ČSN EN 9013)....50
Obrázek 22: Schematické znázornění postupu výzkumu (zdroj vlastní) 51
Obrázek 23: Výrobní linka BLT WoodCut (www.directindustry.com)....53
Obrázek 24: Výtěž dosažená řezáním na laserové lince (www.directindustry.com) 54
Obrázek 25: Výtěž dosažená řezáním kotoučovou pilou (www.directindustry.com)....55
Obrázek 26: Formátovací kotoučová pila SCM Class si 300 (www.panas.cz/)....55
Obrázek 27: Princip kontaktního induktivního snímače (Havelková,Hiklová 2014) 56
Obrázek 28: Profilometr Form Talysurf 50 Intra 2 (vlastní)....57
Obrázek 29:Místa měření zkušebního vzorku (zdroj vlastní) 58
Obrázek 30:Značení dílu na výkresu (ČSN EN 9013) 77
Obrázek 31: Příklad označení (ČSN EN 9013) 77

Seznam tabulek

Tabulka 1: Doporučené otáčky stroje vzhledem k průměru kotouče (PILANA Wood, 2015) 25
Tabulka 2: Doporučený posuv na zub (PILANA Wood, 2015) 26
Tabulka 3:Použité značky a jejich význam (ČSN EN 9013) 49
Tabulka 4: Parametry výrobní linky (www.directindustry.com) 53
Tabulka 5: Parametry SCM Class si 300 (www.panas.cz/) 56
Tabulka 6: Vážené průměry naměřených hodnot 60
Tabulka 7: Hodnoty na hladině významnosti p=0,05 dle Duncanova testu 64
Tabulka 8: Hodnoty na hladině významnosti p=0,05 dle Duncanova testu 66
Tabulka 9: Hodnoty na hladině významnosti p=0,05 dle Duncanova testu 70
Tabulka 10: Toleranční pole u (ČSN EN 9013) 75
Tabulka 11: Toleranční pole Rz (ČSN EN 9013) 75
Tabulka 12: Toleranční pole u, Rz pro podélný a příčný řez 76

Seznam grafů

Graf 1: Vliv směru řezu na Rz 61
Graf 2: Vliv vlhkosti materiálu na Rz 62
Graf 3: Vzájemné působení vlhkosti a směru řezu na Rz 63
Graf 4: Vliv směru řezu na Pt 64
Graf 5: Vliv vlhkosti na Pt 65
Graf 6: Vzájemné působení vlhkosti a směru řezu na Pt 66
Graf 7: Vliv směru řezu na PV 67
Graf 8: Vliv vlhkosti na PV 68
Graf 9: Vzájemné působení směru řezu a vlhkosti na PV 69
Graf 10: Vliv vlhkosti a směru řezu na Rz 70
Graf 11: Vliv vlhkosti a směru řezu na Pt 71
Graf 12: Vliv vlhkosti a směru řezu na PV 72

Seznam použitých zkratek

Al_2O_3 rubín, chemická značka

ANOVA analysis of variance (analýza rozptylu)

AWJ abrasive water jet (obrábění abrazivním vodním paprskem)

BNV bod nasycení vláken

CNC computer numeric control (počítačové číslicové řízení)

CO_2 oxid uhličitý, chemická značka

DTD dřevotřískový materiál

DVD dřevovláknitý materiál

Nd:YAG yttrium aluminium garnet (syntetický granát dopovaný ionty neodymu)

PKD polykrystalický diamant

Pt výška prvku profilu

PV úchylka kolmosti

Rz průměrná výška prvků profilu

SK slinutý karbid

SW software (počítačový program)

TEM transverse electromagnetic mode (mód laserového paprsku)

WJM water jet machining (obrábění vodním paprskem)

1 Úvod

Vzhledem k tomu, že se celý život pohybuji okolo dřeva a jeho obrábění, zajímám se o vše, týkající se tohoto oboru. Dřevo je všude kolem nás, ať v podobě rostlého dřeva nebo v podobě materiálů na bázi dřeva. Zdroj přírodního materiálu, který nestále dorůstá, se může zdát nevyčerpatelným - opak je však pravdou. Pro budoucí generace musíme tento zdroj uchovat v co největší míře, je tedy třeba dřevo uváženě využívat.

Klasické neboli konvenční metody obrábění jsou známy a používány již velmi dlouho. Odpad vznikající při použití této technologie je třeba co nejlépe využívat, jedná se ale stále o odpad. V dnešní době stále se rozvíjející nové technologie přinášejí nové možnosti, jak obrábět materiály a minimalizovat ztráty vzniklé obráběním.

Padesátiletá existence laseru se projevuje ve všech odvětvích lidské tvořivé činnosti. Laser nachází uplatnění v oblastech strojírenské výroby, elektrotechnice, medicíně atd. Je tedy logickou snahou využívat možnosti této technologie i v oblasti zpracování dřeva. Proto jsem přijal nabídku výzkumu, ve kterém se snažím ověřit možnosti využití této technologie.

2 Cíl práce

Cílem předkládané práce je zjištění úchylek jakosti řezu a kvality povrchu řezných ploch při obrábění dřeva technologií laserového paprsku při rozdílné vlhkosti řezaných vzorků. Kvalita povrchu bude hodnocena podle normy ČSN EN ISO 9013 (2017).

Pro splnění cíle bude práce rozdělena do jednotlivých dílčích cílů:

- Nejprve bude provedena analýza možností dělení materiálů, základních principů fungování jednotlivých technologií, způsobu hodnocení kvality podle normy ČSN EN ISO 9013.
- Kvalita povrchu řezných ploch bude posuzována z hlediska vlastností materiálu, kterou je rozdílná vlhkost a směru, kterým je dělen:
    1. Vlhkost 8%
    2. Vlhkost 30% (BNV)
    3. Příčný směr
    4. Podélný směr

- Dílčím cílem bude i srovnání s konvenční metodou řezání dřeva (pilovým kotoučem).
- Měřenými veličinami budou Rz, Pt a PV. Tyto hodnoty naměřené na povrchu obráběném laserem budou porovnány s povrchem vzniklým při řezání pilovým kotoučem.
- Součástí vyhodnocení bude posouzení možností využití normy ČSN EN ISO 9013 včetně návrhu, jak tuto normu aplikovat v případě hodnocení obráběného dřeva.

3 Konvenční a nekonvenční dělení materiálu

Obecně provádíme dělení materiálu za účelem získání polotovaru nebo výsledného dílce, který je určen k dalšímu zpracování nebo použití. Dělení materiálu je možno rozlišit na dělení beztřískové, kdy nevznikají žádné nechtěné části a dělení třískové, při kterém vznikají drobné částečky materiálu jako odpad. Tento můžeme dále využívat pro jiné účely.

3.1 Konvenční dělení materiálu

Dále v této kapitole se budu zabývat pouze dělením dřeva a to dělením třískovým, při kterém vznikají třísky (piliny), dále použitelné například k výrobě aglomerovaných materiálů jako jsou DTD, DVD desky, k vytápění, v menší míře jako mulčovací prostředek či přídavek do kompostu.

3.1.1 Rámová pila

- ruční rámová pila (truhlářská) (Obr. 1) - pilový list je napnut v kovovém nebo dřevěném rámu, různá šířka pilových listů podle zamýšlené geometrie řezu. Přímočarý řez využívá širokého listu, zakřivený řez listu užšího.

Obrázek 1: Ruční rámová pila (https://www.kutil.cz/)

- stolní rámová pila (Obr. 2) - horní rameno stroje kmitá, čímž uvádí do přímočarého vratného vertikálního pohybu pilový list. Na rozdíl od lupenkové pilky je poháněna elektromotorem.

Obrázek 2: Stolní rámová pila (https://www.zahrada-naradi.cz/)

- kmenová rámová pila

Kmenová rámová pila (Obr. 3) je hlavní pilařský stroj, který je používán k pilařskému skupinovému pořezu především jehličnatého dřeva. K řezání dochází pomocí jednoho nebo více pilových listů, které jsou umístěny v rámu. Tento rám vykonává přímočarý vratný pohyb nebo přerušovaný kyvný pohyb po dráze rámu. Pohyb je od rotačního pohybu pohonu přenášen klikovým ústrojím na pohyb přímočarý vratný. (Klement, Detvaj 2007) Kolmo k pilovým listům je posouván výřez, který je pilovými listy dělen. (Obr. 4)

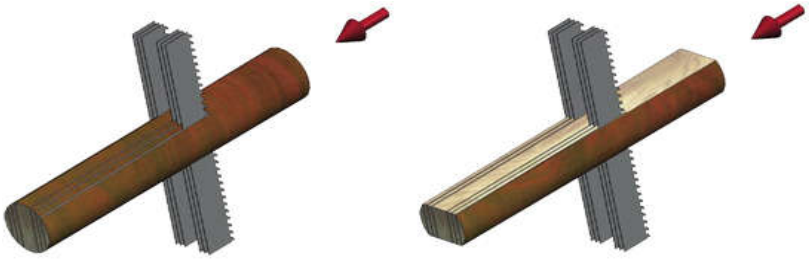
Maximální průměr výřezu, který je možno strojem zpracovat je určen světlostí rámu. Podle světlosti rámu se kmenové rámové pily rozdělují na tyto:

- malé - světlost rámu do 450 mm
- střední - světlost rámu do 710 mm
- velké - světlost rámu nad 710 mm

K provozu kmenové rámové pily nutně patří zařízení před strojem - upínací, podávací a centrovací vozík pro manipulaci s výřezem nebo prizmou a zařízení za strojem - vodící a odlučovací nože při pořezu výřezu nebo odlučovací disky při pořezu prizmy.

Řezná rychlost kmenové rámové pily je cca 5 $m.s^{-1}$, stejně jako posuvná rychlost, závisí na otáčkách motoru. Ty bývají v rozmezí 300-400 $ot.min^{-1}$.

Obrázek 3: Kmenová rámová pila (https://www.hoechsmann.com/)



Obrázek 4:Pohyb výřezu pořez naostro a prizmováním (vlastní)

3.1.2 Pásová pila

- stolní pásová pila (Obr. 5)

Tento druh pily je používán při truhlářském zpracování dílců k přímočarým nebo zakřiveným řezům, řezům pod úhlem apod. Řez je prováděn nekonečným pilovým pásem vedeným po dvou pásnicích. Řez pod úhlem je umožněn změnou úhlu pracovního stolu.

Obrázek 5:Stolní pásová pila (https://www.conrad.cz/)

- kmenová pásová pila

Kmenová pásová pila (Obr. 6) je hlavní pilařský stroj, který je používán k pilařskému individuálnímu pořezu především listnatého dřeva. Individuální pořez listnatého dřeva je volen z důvodu rozmanitosti výřezů jak z tvarového, tak z kvalitativního hlediska. Je proto nutno volit pořezové schéma vhodné pro jednotlivé výřezy.

Nástrojem dělícím materiál je v tomto případě nekonečný pilový pás, který je veden po dvou pásnicích. Jedna z nich je hnaná (v případě vertikálního uspořádání pásnic spodní), druhá je hnací a napínací. Pouze kmenová pásová pila je hlavním pilařským strojem, který není limitován průměrem výřezu.

Stejně jako u kmenové rámové pily je nedílnou součástí stroje vozík plnící funkci podávací, upínací a polohovací. V případě, že je pásová pila konstruována tak, že pohyb do řezu vykonává stroj, výřez je pevně fixován. Nespornou výhodou je možnost mobilní konstrukce kmenové pásové pily, je tedy možno stroj přemístit na místo zpracování dřeva.

Posun stroje nebo výřezu, poloha nebo otáčení výřezu často bývá řízeno centrálně od obsluhy stroje, může být použito i počítačového vybavení k úkonům spojeným s pořezem.

Nejdůležitější parametry průmyslové kmenové pásové pily jsou:

- výška/šířka řezu - 700 ÷ 1200 mm
- průměr pásnice - 1400÷1800 mm
- řezná rychlost - 0÷40 $m.s^{-1}$
- podávací rychlost - 0÷60 $m.min^{-1}$
- šířka řezné spáry - 2,4÷2,8 mm (Klement, Detvaj 2007)

Obrázek 6: Kmenová pásová pila (https://www.pilous.cz/)

3.1.3 Kotoučová pila

Kotoučová pila (Obr. 7) je stroj, který dělí materiál pomocí nástroje - pilového kotouče. Pilový kotouč vykonává rotační pohyb, jeho ozubený obvod se pohybuje stálou rychlostí po kruhové dráze. Obráběný materiál provádí přímočarý pohyb. Složením těchto dvou pohybů vzniká řezná dráha v podobě cykloidy. Protože řezná rychlost (rychlost ostří zubů pilového kotouče) je mnohem vyšší, než posuvná rychlost (rychlost posunu obrobku do řezu) posuzujeme část řezné spáry jako kruhový oblouk. Směr otáčení pilového kotouče a směr posuvu dělí způsob řezání na **sousledné**, kdy směr otáčení pilového kotouče je stejný se směrem posuvu a řezání **nesousledné**, kdy se pilový kotouč otáčí proti směru posuvu. (Prokeš 1978)

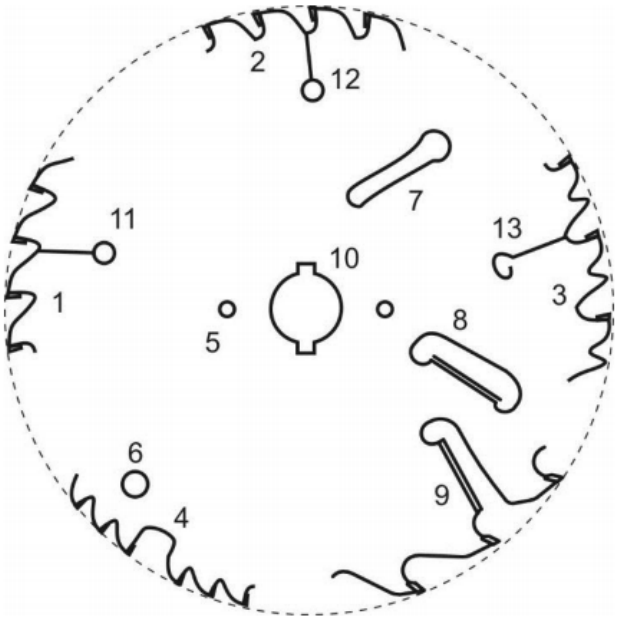
Kotoučové pily je možno rozdělovat podle různých hledisek:

- podle použití - truhlářské, zkracovací, rozmítací, omítací, formátovací
- podle konstrukce - stolní, ramenové, stojanové, vahadlové, formátovací, ruční
- podle polohy pilového kotouče - spodní, vrchní
- podle počtu nástrojů - jednokotoučové, dvoukotoučové, vícekotoučové
- podle způsobu podávání materiálu - ruční, mechanizované, automatické
- podle druhu zpracovávaného materiálu - na kulatinu, na řezivo a přířezy, na zpracování aglomerovaných materiálů (Lisičan, Prokeš)

Obrázek 7: Formátovací kotoučová pila PKS-300F (https://www.simek.eu/)

3.1.4 Pilový kotouč

Pilový kotouč (Obr. 8) je nástroj s řeznými břity (zuby) umístěnými po celém jeho obvodu. Kotouč je umístěn na hřídeli poháněné elektromotorem. Na jedné hřídeli může být umístěno více kotoučů (např. omítací pila). Směr dřevních vláken určuje, jestli se jedná o řezání příčné nebo podélné a tomu je uzpůsobena i konstrukce kotouče.



Obrázek 8: Popis pilového kotouče

1 - zaoblený zub, 2 - zalomený zub, 3 - zub s omezovačem třísky, 4 - zubová mezera, 5 - otvory pro upevnění příruby, 7 - otvor pro ochlazování, 8,9 - vnitřní, vnější čistící a stabilizační otvor s SK plátkem, 10 - upínací otvor s drážkami pro pera, 11,12 - dilatační otvory, 13 - dilatační otvor s protihlukovou úpravou (Siklienka,Kminiak 2013)

3.1.5 Části pilového kotouče

- tělo kotouče - nese ozubení umístěné na obvodu kotouče, nejdůležitějšími rozměry jsou: vnější průměr kotouče **D**, průměr otvoru pro upnutí **d**, tloušťka kotouče **s**.
- ozubení - po obvodu jsou umístěny řezné klíny různých geometrických tvarů, z různých materiálů. Pro řezné klíny se používá rychlořezná ocel, plátky ze slinutých karbidů-SK, stelit

- otvory pro ochlazování - ochlazováním kotouče během řezání se dosahuje stability a tuhosti ovlivňované teplem vznikajícím třením nástroje a obráběného materiálu
- stabilizační prvky - zabraňují zanesení řezné spáry pilinami, aby nedocházelo ke zvýšenému tření těla nástroje a tím k pálení dřeva a negativnímu ovlivnění tuhosti nástroje
- dilatační otvory - jejich úkolem je vyrovnávat pnutí obvodu nástroje, které vzniká v důsledku řezného odporu, odstředivé síly a zahřívání nástroje (Siklienka,Kminiak 2013)

3.1.6 Řezný klín

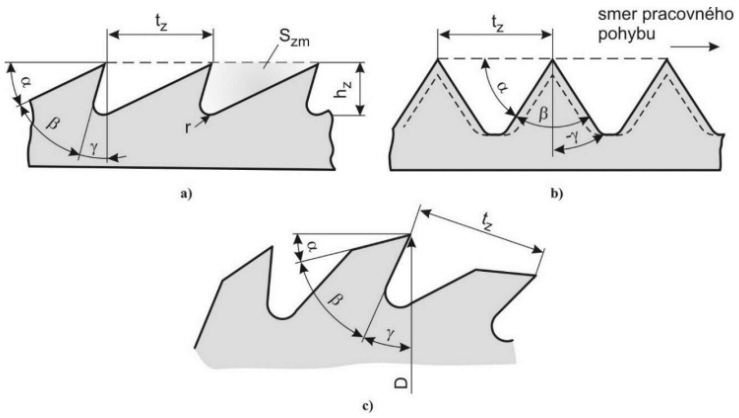
Řezný klín je tou součástí nástroje, který přichází do styku s obrobkem, lze ho tedy považovat za nejdůležitější část nástroje. Právě řezný klín vytváří třísku, jeho působením je ovlivněn konečný výsledek řezání.

Vztahy mezi úhly řezného klínu a obráběného materiálu nazýváme geometrie řezného klínu na (Obr. 10). Správná geometrie řezného klínu ovlivňuje zejména:

- jakost obrobené plochy
- trvanlivost řezné hrany ↔ životnost nástroje
- produktivitu práce
- hospodárnost
- celkový průběh řezného procesu (Siklienka,Kminiak 2013)

3.1.7 Tvar řezného klínu

různé tvary řezného klínu (Obr. 9)



Obrázek 9: Tvary řezného klínu (Siklienka,Kminiak 2013)

a) - trojúhelníkové zuby nesouměrné- pro podélné řezání, b) - trojúhelníkové zuby souměrné- pro příčné řezání (ruční), c) - trojúhelníkové zuby s lomeným hřbetem - pro podélné řezání, r - rádius zubní mezery, t_z - rozestup zubů, h_z - výška zubu, α- úhel hřbetu zubu, β - úhel řezného klínu, γ- úhel čela zubu, -γ - záporný úhel čela zubu, S_{zm} - plocha zubní mezery, D - průměr řezného kotouče (Siklienka,Kminiak 2013)

3.1.8 Materiál řezného klínu

Pilové kotouče mohou mít zuby buď pěchované, tzn. řezná hrana je mírně rozšířena nebo rozváděné, tzn. jednotlivé zuby jsou střídavě odkloněny vlevo/vpravo o stejnou vzdálenost. Řezný klín kotouče nemusí být ze stejného materiálu jako jeho tělo, osazují se plátky ze slinutých karbidů - SK plátky, nebo ze syntetického polykrystalického diamantu - PKD. (Prokeš 1978)

3.1.9 Ovlivňující faktory při řezání pilovým kotoučem

V truhlářské výrobě nebo provozech jsou používány kotouče s řeznými klíny z rychlořezné oceli, řeznými klíny s plátky ze slinutých karbidů, případně PKD. Kotouče ocelové lze vidět již jenom na domácích cirkulárkách, které jsou využívány pro pořez palivového dřeva. Další informace se tedy budou týkat pilových kotoučů s SK plátky. Tradičním českým výrobcem pilových kotoučů je PILANA s.r.o. (www.pilana.cz)

Na kvalitu povrchu opracovaného pilovým kotoučem má vliv několik faktorů, které působí současně.

3.1.9.1 Vliv kotouče

Použitím nesprávného kotouče dochází k nechtěným vadám na řezu. Důležitým faktorem ovlivňujícím výsledek řezání je řezná rychlost a posuv na zub. Řezná rychlost je okamžitá rychlost břitu zubu, kterou vniká do obrobku. Řezná rychlost se vypočítá podle vzorce (3.1), posuv na zub potom podle vzorce (3.2).

$$v_c = \frac{\pi . D . n}{60000} \quad [m.s^{-1}] \tag{3.1}$$

kde v_c = řezná rychlost ($m.s^{-1}$)

D = průměr kotouče (mm)

n = počet otáček (min^{-1})

$$f_z = \frac{v . 1000}{n . z} \quad [m.min^{-1}] \tag{3.2}$$

kde f_z = posuv na zub (mm)

v_f =rychlost posuvu ($m.min^{-1}$)

n = počet otáček (min^{-1})

z = počet zubů (Siklienka a Kminiak 2013)

Pro podélné řezání volíme kotouč s menším počtem zubů a tím pádem s většími rozestupy mezi zuby, což vede k lepšímu odvádění třísek z řezné spáry. Pro příčné řezání naopak kotouč s větším počtem zubů. Rovněž pro dělení aglomerovaných materiálů jako jsou DTD je vhodnější použít kotouč s větším počtem drobnějších zubů, protože tím lze dosáhnout čistšího řezu bez otřepů. (http://www.pilove-kotouce.eu/)

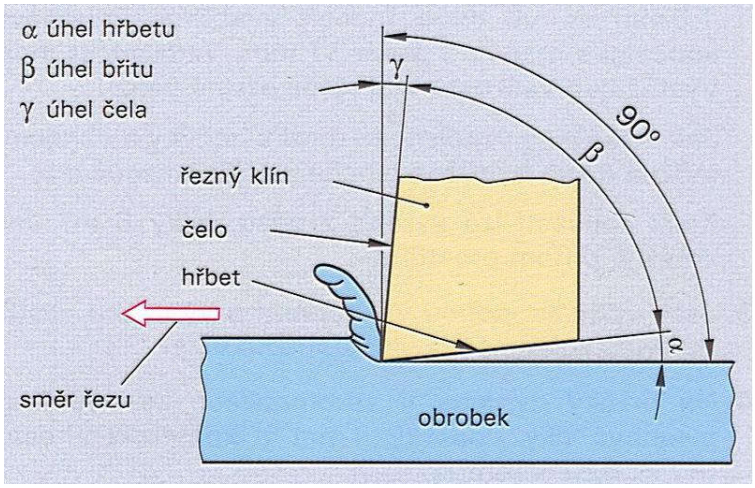
U DVD, DTD desek je někdy využíváno i kotoučů s negativním sklonem čela zubu - materiál potom není odřezáván, ale „odškrabáván“ čímž je zamezeno odštěpování povrchu ve spodní části desky.

Výzkumem, kterému se věnoval R. Kminiak na TU ve Zvolenu, bylo zjištěno, že povrch po opracování kotoučem o větším počtu zubů vykazuje menší drsnost. To je způsobeno tím, že hustota drážek vytvořených řeznými klíny je vyšší. Rovněž použití kotouče s omezovačem třísky vede ke zlepšení kvality povrchu až o 40%. (Kminiak 2014)

3.1.9.2 Geometrie řezného klínu

Špatná geometrie zubu způsobuje zahřívání kotouče, což má za následek zhoršení kvality obráběného povrchu nebo zvlnění kotouče. Dále se zvyšuje energetická náročnost řezání, otupování nástroje, čímž se zvyšuje ekonomická náročnost procesu. Je třeba také věnovat pozornost průměru kotouče (ovlivňuje úhel, pod kterým vniká břit řezného klínu do materiálu), jakož i počtu zubů kotouče. (Barcík 2013)

Geometrie řezného klínu, jak byla zmíněna v oddíle 3.1.6, je na (Obr. 10).



Obrázek 10: Geometrie řezného klínu (https://eluc.kr-olomoucky.cz/)

- α - úhel hřbetu - jeho velikost ovlivňuje tření nástroje o obrobek, při zmenšení úhlu dochází ke zvýšení tření a tím k otupování nástroje, řezný odpor se zvyšuje
- β - úhel břitu - úhel svíraný hřbetem a čelem řezného klínu, je-li příliš velký, hůře vniká do obrobku, zvyšuje se řezný odpor, je-li příliš malý, pevnost břitu klesá a zároveň se snadněji otupí
- γ - úhel čela - úhel mezi čelem břitu a rovinou kolmou k obrobku, je-li příliš malý, zvětšuje se řezný odpor
- součet α + β + γ = 90° (https://eluc.kr-olomoucky.cz/)

3.1.9.3 Vliv stroje

Pro zamýšlenou kvalitu řezu je zapotřebí kvalitního strojního vybavení bez nežádoucích vibrací (ložiska, hřídele), dále je třeba zvolit správnou rychlost otáčení stroje potažmo nástroje, správnou rychlost posuvu a odpovídající upnutí obrobku.

3.1.9.4 Vliv vlastností řezaného dřeva

Vlastnostmi nejvíce ovlivňujícími kvalitu řezu jsou stavba dřeva, proměnná vlhkost, hustota dřeva a tvrdost. Tvrdost dřeva se zvětšuje s jeho hustotou, naopak klesá s jeho vlhkostí (Prokeš 1978). Požadované kvality tedy dosáhneme správnou volbou řezného kotouče pro tvrdé, respektive měkké dřevo. (Viz. vliv kotouče.)

3.1.10 Vlastnosti kotouče ovlivňující kvalitu povrchu obrobku

Kvalitu povrchu obráběného materiálu ovlivňuje několik aspektů. Je to především nástroj (pilový kotouč), stroj (kotoučová pila), řezná rychlost, podávací rychlost a druh děleného materiálu. (www.pilana.cz)

Pilový kotouč - při použití technologie řezání pilovým kotoučem dosahujeme vysoké řezné rychlosti - až 100 $m.s^{-1}$ u kotoučů s SK plátky, pro kotouče z nástrojové oceli 60-80 $m.s^{-1}$. Tato rychlost je uváděna výrobcem kotouče (Tab. 1) jako maximální možná. Nelze ji překročit zejména z důvodu bezpečnosti, protože při vyšších rychlostech může dojít k pozbývání vlastností nástroje. Při stabilních otáčkách stroje a zvětšení průměru kotouče by došlo ke zvýšení řezné rychlosti, což je nutno ověřit. (www.pilana.cz)

Tabulka 1: Doporučené otáčky stroje vzhledem k průměru kotouče (PILANA Wood, 2015)

Doporučené otáčky [1/min]										
Ø D [mm]	Řezná rychlost v_c [m/sec]									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
100	1910	3820	5730	7640	9550	11460	13370	15280	17190	19100
150	1270	2550	3820	5100	6370	7640	8920	10190	11500	12730
200	960	1910	2870	3820	4780	5730	6690	7640	8600	9550
250	760	1530	2290	3060	3820	4590	5350	6110	6880	7640
300	640	1270	1910	2550	3180	3820	4460	5100	5740	6370
350	550	1090	1640	2180	2730	3280	3820	4370	4900	5460
400	480	960	1430	1910	2390	2870	3340	3820	4300	4780
450	430	850	1270	1700	2120	2550	2970	3400	3820	4250
500	380	760	1150	1530	1910	2290	2680	3060	3440	3820
550	350	690	1040	1390	1740	2080	2430	2780	3120	3470
600	320	640	960	1270	1590	1910	2230	2550	2880	3180
650	290	590	880	1180	1470	1760	2060	2350	2640	2940
700	270	550	820	1090	1360	1640	1910	2180	2450	2730
750	250	510	760	1020	1270	1530	1780	2040	2290	2550
800	240	480	720	950	1190	1430	1670	1910	2150	2390

Důležitým parametrem kotouče je počet zubů - řezných klínů. Stanovíme jej tak, že nejdříve vypočítáme rozteč zubů. Vycházíme ze skutečnosti, že počet

zubů, které se současně podílejí na opracování materiálu, by měl být 2-3. Záleží tedy na tloušťce řezaného materiálu. (PILANA Wood, 2015)

Rozteč zubů vypočítáme podle vzorce (3.3), podle této hodnoty potom stanovíme požadovaný počet zubů podle vzorce (3.4). (PILANA Wood, 2015)

$$t = \frac{h.1{,}45}{z} \quad [\text{mm}] \qquad \textit{Vzorec pro výpočet rozteče zubů} \qquad (3.3)$$

Na základě výpočtu rozestupu zubů stanovíme počet zubů při určitém průměru kotouče

$$z = \frac{D.\pi}{t} \qquad \textit{Vzorec pro výpočet počtu zubů} \qquad (3.4)$$

kde t = rozteč zubů (mm)

D = průměr kotouče (mm)

z = počet zubů

Další parametr, který je třeba brát v úvahu je rychlost posuvu, která významně ovlivňuje kvalitu řezu. Vyšší řezná rychlost výslednou kvalitu ovlivňuje pozitivně, zvýšení posuvné rychlosti však má vliv negativní (Gaff a Kaplan 2016). Negativní vliv posuvné rychlosti lze kompenzovat zvýšením řezné rychlosti (Gaff a Kaplan 2016). Při stanovování správné rychlosti posuvu vycházíme z rychlostí posuvu na zub doporučených výrobcem pilového kotouče, jak ukazuje (Tab. 2).

Tabulka 2: Doporučený posuv na zub (PILANA Wood, 2015)

Doporučené hodnoty posuvu na zub		
Materiál		**Posuv na zub s_z [mm/zub]**
Měkké dřevo	podélné řezání	0,2 – 0,3
	příčné řezání	0,1 – 0,2
Tvrdé dřevo		0,06 – 0,15
Dřevotříska		0,1 – 0,25
Překližka		0,05 – 0,12
Laminované desky		0,05 – 0,1
Neželezné kovy a plasty		0,02 – 0,05

Stanovení rychlosti posuvu:

$$\boldsymbol{S = \frac{s_z.n.z}{1000}}$$ *Vzorec* pro výpočet posuvu (3.5)

kde s = rychlost posuvu ($m.min^{-1}$)

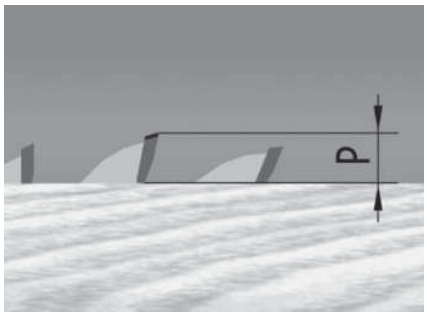
n = počet otáček ($l.m^{-1}$)

z = počet zubů

s_z = posuv na zub ($mm.zub^{-1}$)

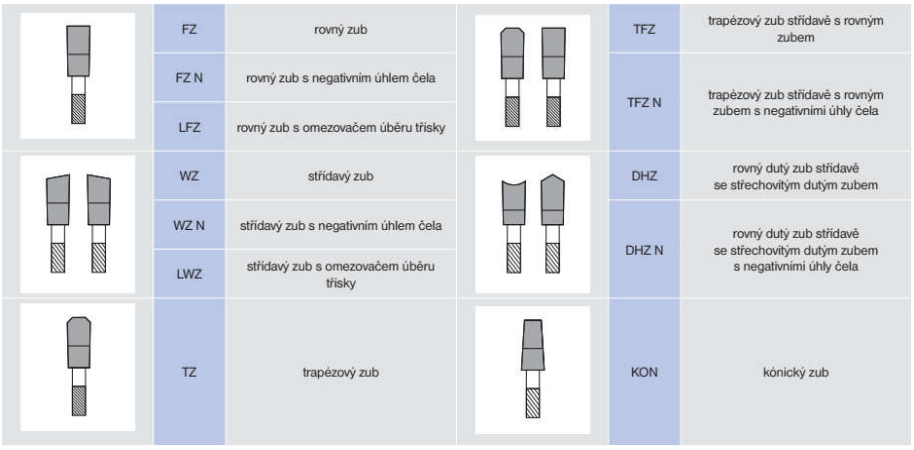
Posledním neméně důležitým pravidlem je seřízení pilového kotouče na stroji, respektive prořez kotouče vzhledem k opracovávanému dílu.

Vodící lišta musí být rovnoběžná s kotoučem, je však žádoucí, aby její výstupní část měla určitou vůli, tak aby nedocházelo k sevření obráběného dílu mezi kotouč a lištu. Výška stolu má být nastavena tak, aby kotouč přesahoval dělený materiál o výšku SK plátku. (Prokeš 1978) Přesah kotouče znázorňuje (Obr. 11).



Obrázek 11: Přesah zubu (PILANA Wood, 2015)

Pilové kotouče jsou vyráběny v širokém sortimentu s rozdílnými průměry, počty zubů a především s různými tvary SK plátku (Obr. 12), které tvoří řezný klín nástroje. (PILANA Wood, 2015)



Obrázek 12: Nejpoužívanější tvary SK plátku (PILANA Wood, 2015)

Vliv stroje - kromě rychlosti otáčení stroje, případně posuvu, není-li řešen jinak než ručně, má největší vliv na kvalitu povrchu řezu sám stroj. Důležité je zejména uložení hnacího hřídele v ložiscích, které nesmí mít vůli. Dále je třeba, aby unášený řezný kotouč byl na hřídeli upevněn mezi dvěma přírubami - jejich doporučený průměr je 1/3 průměru kotouče. Použitím správného průměru přírub je zajištěna dostatečná tuhost kotouče, který by svým axiálním kmitáním tzv. házením významně ovlivňoval kvalitu obráběného povrchu. (PILANA Wood, 2015)

Již při nízkých otáčkách lze pozorovat výchylky kotouče v rovině kolmé k ose otáčení nástroje, které jsou způsobeny kvalitou uložení hnacího hřídele, vůlí v ložiscích, přesností přírub. Pokud se tyto nepřesnosti sečtou, (pro kotouč s SK plátky by neměla být hodnota větší než 0,10 mm) hovoříme o tzv. házivosti kotouče. Při plynulém zvyšování otáček (a měření výchylek snímačem) se při nízkých otáčkách neprojevují velké změny. V určitých momentech však pozorujeme změny razantnější - označujeme je jako kritické otáčky. Při dalším nárůstu otáček, dojde ke stabilizaci kotouče, další zvyšování otáček znovu vede k rozkmitání = další kritické otáčky. Je to způsobeno rezonančními frekvencemi chvění. (Prokeš 1978)

Důležité zásady při používání řezných kotoučů:

- dobrá kondice stroje bez vibrací
- příruby pro upnutí musí mít stejný průměr, cca 1/3 průměru kotouče
- příruby musí být čisté, nutno ověřit jejich házivost na hřídeli
- břity nástroje musí být vždy správně naostřené, pod stejnými úhly

(PILANA Wood, 2015)

Při současném správném nastavení kotouče ve stroji, správné geometrii řezného kotouče a jeho zubů, správném naostření a kvalitním stroji je možno dosáhnout téměř hladkého řezu.

3.2 Nekonvenční dělení materiálu

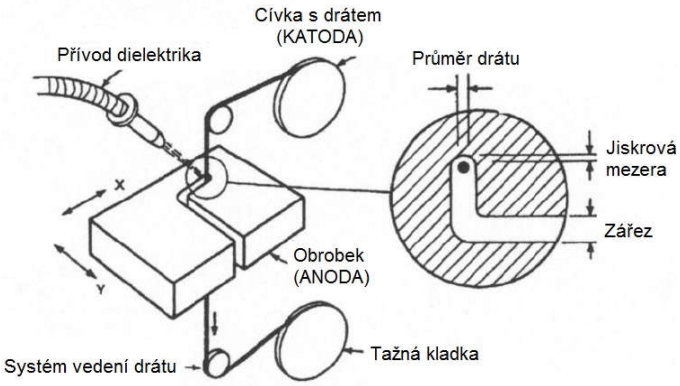
Za nekonvenční způsoby dělení materiálu lze považovat všechny způsoby, které nepoužívají klasické řezné nástroje a nevznikají při tomto procesu třísky. Proto se takovýto způsob obrábění nazývá též beztřískovým. Nekonvenčních způsobů obrábění je celá řada, pokusím se je stručně vyjmenovat a charakterizovat. Pro obrábění dřeva se nehodí všechny způsoby, nejvýhodnější se jeví plynový CO_2 laser.

3.2.1 Elektrotepelné obrábění

- **elektroerozivní** - společným znakem elektroerozivního způsobu obrábění je úběr materiálu vyvolaný elektrickými výboji mezi obrobkem a nástrojem. Natavené mikročástečky materiálu jsou odplavovány dielektrickou kapalinou. Dielektrickou kapalinou může být petrolej, různé solné roztoky, vodní sklo, deionizovaná destilovaná voda. (ŘASA, KEREČANINOVÁ)

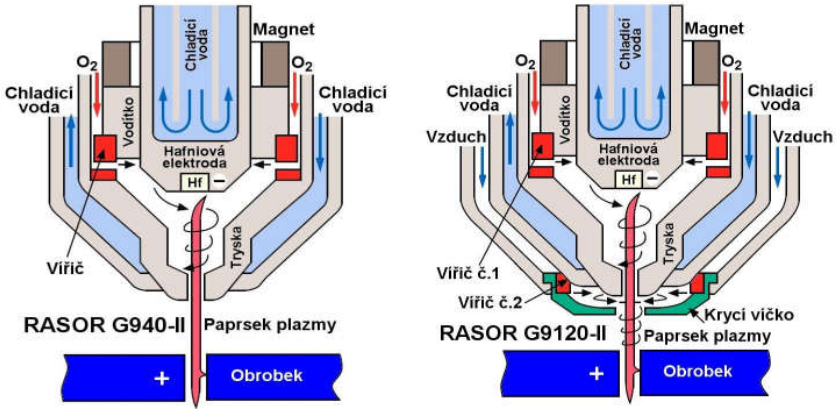
  a) elektrojiskrové hloubení - nástrojová elektrody má tvar negativu prohlubně, kterou zamýšlíme vytvořit

  b) elektrojiskrové řezání (Obr. 13) - nástrojové elektroda má tvar drátu nejčastěji mosazného, který je odvíjen a posouván skrz obráběný materiál. Působením elektrického výboje mezi drátem a obrobkem dochází k úběru materiálu, který je vyplavován dielektrikem. Použití pro řezání složitých tvarů ve velmi tvrdých, těžko opracovatelných materiálech. (ŘASA, KEREČANINOVÁ)



Obrázek 13: Elektrojiskrové řezání (http://solicad.com/)

- **obrábění paprsky koncentrované energie** - je využíváno soustředěného paprsku elektronů, který vysokou rychlostí dopadá na obráběný materiál. Materiál je nataven a dochází k jeho vypařování.
- **obrábění iontovým paprskem** - iontový paprsek je svazek iontů inertního plynu (Argon, Krypton, Xenon) urychlovaný a řízený elektrickým polem. (Maňková 2000)
- **obrábění plazmovým paprskem** - (Obr. 14) plazma je ionizovaný plyn vznikající odtržením elektronů z elektronového obalu molekul plynu. Teplota plazmatu dosahuje 10 000 až 30 000 °C. (Humár 2005)



Obrázek 14: Konstrukce plazmových hořáků (Humár 2005)

- **obrábění laserem** - podrobněji v části 3.2.3

3.2.2 Mechanické obrábění

- **obrábění ultrazvukem** - nástroj kmitá kolmo k povrchu obrobku frekvencí 18 - 25 kHz. Mezi nástroj a obrobek je přiváděno abrazivo, které mechanicky naruší obráběný povrch. Používají se zrna karbidu bóru, karbidu křemíku, oxidu hlinitého ve směsi s kapalinou - vody, benzín, líh, petrolej. Pro dřevo nevhodné.
- **řezání vodním paprskem** - tuto technologii lze rozdělit na dvě skupiny: **WJM** - water jet machining tj. obrábění čistým vodním paprskem - hydrodynamické obrábění s pracovním tlakem až 690 MPa **AWJ** - obrábění abrazivním vodním paprskem pracovní tlak vody 60-400 MPa. (www.flowwaterjet.cz/)

V obou případech jde principiálně o technologii, kdy je tlak vysokotlakým olejovým čerpadlem zvýšen na cca 20 MPa, přes uzavírací ventil přiveden do hydraulického zesilovače tlaku - multiplikátoru. Zde je zvýšen tlak vody na několikanásobnou hodnotu - ve stovkách MPa. Vysokotlakým potrubím je voda přivedena do řezací hlavy, z které přes trysku z rubínu, safíru nebo polykrystalického diamantu proudí paprsek o průměru 0,2 - 0,4 mm. Vodní paprsek tak získá velmi vysokou rychlost (až trojnásobek rychlosti zvuku) a tím velmi velkou kinetickou energii, která nárazem do obráběného materiálu provádí jeho rozrušení. (www.flowwaterjet.cz/)

V případě technologie AWJ je v řezací hlavě (Obr. 15) pomocí směšovače přidáváno abrazivo, které zvyšuje řezací výkon (až 1000x). Jako abrazivo se nejčastěji používá olivín - $(\underline{Mg},\underline{Fe})_2$, přírodní granát, mletý korund, karbid křemíku, diamantový prach – volba závisí na tvrdosti děleného materiálu. Zrnitost abrazivního materiálu je v rozmezí 16μm – 63μm. Abrazivo je možno použít opakovaně (použité abrazivo může být bez problémů uloženo na skládku), stejně jako médium, tedy vodu. Tu je však pro opětovné použití třeba čistit, aby nedocházelo k předčasnému opotřebování součástek stroje. (www.flowwaterjet.cz/)

Metoda řezání vodním paprskem je bezprašná, tedy ekologická, pro dřevo vzhledem k jeho nasákavosti se však jeví jako nevhodná. (Brym 2008)

Obrázek 15: Řezací hlava pro řezání vodním paprskem (https://www.flowwaterjet.cz/)

3.2.3 Obrábění laserem

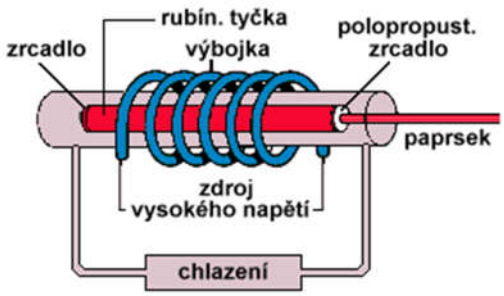
Název laser je akronymem z anglického Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, což lze volně přeložit jako stimulovaná emise záření. Jde tedy o paprsek světla, které má určité vlastnosti. Laserový paprsek je:

- koherentní - vlnění o stejné frekvenci, stejného směru kmitání a stejné fázi
- monochromatický - vlnová délka záření je stejná, jeví se jako jednobarevný
- divergentní - minimální rozbíhavost

Světlo z běžných zdrojů jako žárovka, svíčka, slunce je vyzařováno velkým množstvím na sobě nezávislých atomů, které vyzařují elektromagnetické vlnění o různých vlnových délkách šířící se všemi směry. Není tedy ani koherentní ani monochromatické. (https://www.lt.cz/)

Princip vzniku laserového paprsku vysvětlím na příkladu rubínového laseru na (Obr. 16) a červeného respektive modrého světla.

Rubín = oxid hlinitý, chemická značka Al_2O_3 je krystalická látka, obvykle bílé barvy vznikající spalováním hliníku nebo dehydratací hydroxidu hlinitého. V přírodě se vyskytuje jako velmi tvrdý nerost korund (tvrdost 9 v Mohsově stupnici). Odrůdami korundu jsou smirek a drahokamy safír, který má modrou barvu, a rubín barvy červené. Vzhledem k vzácnosti, tedy i ceně rubínu, se používáv průmyslu oxid hlinitý synteticky vyrobený. (https://www.eppi.cz/)



Obrázek 15: Rubínový laser (https://www.cez.cz/)

Rubínová tyčka tvoří **aktivní prostředí,** ve kterém dochází ke vzniku laserového paprsku. Atomy se nacházejí na energetické hladině E_1, po **excitaci** (vybuzení) zábleskem výbojky se přesunou na energetickou hladinu E_2, zde dojde k absorpci fotonů modrého světla. Prakticky okamžitě se fotony přesunou na metastabilní energetickou hladinu E_m. V okamžiku, kdy se objeví foton červeného světla, vybuzené atomy se vrátí na energetickou hladinu E_1, přičemž vyzáří přebytek své energie ve formě fotonů červeného světla. Do aktivního prostředí vnikl jeden stimulující foton a vystupuje z něj několik fotonů - světlo bylo zesíleno. Tyto fotony je třeba udržet v aktivním prostředí tak dlouho, dokud se nenahromadí energie v dostatečné míře, aby ji bylo možno využít. K tomu se využívá část laserového zařízení nazývaná **optický rezonátor** tvořený dvěma zrcadly. Oba konce rubínové tyčky jsou rovnoběžně sbroušeny kolmo k její ose. Jeden konec je postříbřen a tvoří nepropustné zrcadlo (odrazivost až 99,9 %), druhý konec tvoří zrcadlo částečně propustné. Fotony kmitají mezi zrcadly a excitují další atomy, až dojde k nahromadění energie, která je polopropustným zrcadlem uvolněna ve formě paprsku o stejné vlnové délce a směru. Fotony, které se šíří jiným směrem než kolmým na zrcadlo po nějaké době uniknou z optického rezonátoru a zbydou jenom fotony šířící se rovnoběžně s osou rubínové tyčky. (https://www.cez.cz)

Zbývá podotknout, že vše probíhá velmi rychle - na vyšší energetické hladině zůstává atom po dobu asi 10^{-8} **s**. Na metastabilní hladině však zůstává po dobu asi 10^{-3} **s**. Pro představu: kdyby atom zůstal v excitovaném stavu 1 s, na metastabilní hladině by zůstal cca 28 hodin. (https://www.cez.cz)

Všechny lasery fungují na principu stimulované emise záření, podle vlastností konstrukce však můžeme lasery rozdělit:

a) podle skupenství aktivního prostředí - lasery pevnolátkové, kapalinové, plynové, polovodičové
b) podle vlnové délky paprsku - submilimetrové, infračervené, viditelné světlo, ultrafialové, rentgenové
c) podle druhu buzení - optickým zářením, elektrickým polem, chemickou reakcí, elektronovým svazkem, atd.
d) podle počtu energetických hladin - dvou, tří a vícehladinové
e) podle režimu práce - pulzní, pulzní s rychlým opakováním, kontinuální (https://www.cez.cz)

3.2.3.1 pevnolátkové lasery

Prvním funkčním laserem byl **rubínový laser** sestrojený Theodorem Maimanem v roce 1960. Aktivním prostředím byl krystal rubínu, ze kterého se podařilo získat laserový paprsek červeného světla. Lasery této doby se potýkaly se zásadním problémem nízké účinnosti (<1%), což bylo překonáno až vynálezem CO_2 laseru (15%) a polovodičového laseru (40%). Nejrozšířenějším pevnolátkovým laserem je dnes **neodymový laser**. Tento laser se označuje Nd:YAG podle zkratky anglického názvu „yttrium aluminum garnet“. Jeho základem je krystal $Y_3Al_5O_{12}$ s příměsí iontů neodymu Nd^{3+}. Tyto lasery mohou být zdrojem kontinuálního infračerveného záření o výkonu až 1 kW, v pulzním režimu je schopen během 10-12 s dosáhnout výkonu až 106 MW. (https://www.cez.cz)

3.2.3.2 kapalinové lasery

Aktivním prostředím kapalinových laserů jsou roztoky organických barviv nebo speciálně připravené kapaliny, dopované ionty vzácných zemin. Pro buzení kapalinových laserů se užívá optické záření. Pomocí několika druhů barviv a metod tzv. nelineární optiky je možno dosáhnout prakticky všech vlnových délek od 300 nm do 1500 nm. Proto se kapalinové lasery používají např. ve spektroskopii. Jejich nevýhodou je krátká životnost aktivního prostředí, které se teplem a světlem rozkládá. Kapalinové lasery se nepoužívají pro řezání. (https://www.cez.cz)

3.2.3.3 plynové lasery

Aktivní plynné prostředí může být tvořeno atomy, ionty nebo molekulami. Plynové lasery pracují ve velmi širokém rozsahu vlnových délek v kontinuálním nebo pulzním režimu. Jejich excitace je většinou pomocí elektrického výboje ve zředěném plynu, optická excitace se používá jen zřídka. Plynové lasery mají homogenní aktivní prostředí, které zajišťuje jejich výborné parametry. (https://www.cez.cz)

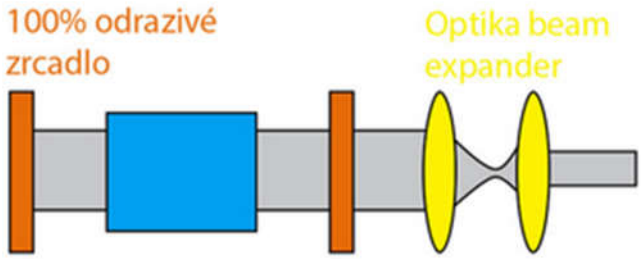
Zvláštním typem plynových laserů jsou lasery **excimerové**, které jsou výkonným zdrojem ultrafialového záření. Aktivním prostředím jsou molekuly, které mohou existovat jen ve vybuzeném stavu, při návratu do základního stavu se rozpadnou na jednotlivé atomy. K vzniku excimerových molekul dochází při srážkách atomů plynů se svazkem elektronů o vysoké energii. Nejtypičtější plynovou náplní těchto laserů jsou kombinace halogenů a vzácných plynů, většina vyzařuje v ultrafialovém pásmu. Název „*excimer*“ vznikl jako zkratka slov „*excited*“ a „*dimer*“, neboli excitovaná molekula. Excimerové lasery se používají například v lékařství - oční operace apod. (https://www.cez.cz)

K nejrozšířenějším typům patří červeně zářící helium - neonový laser, v průmyslu a medicíně se nejvíce používá infračervený laser CO_2. Světelné efekty poskytuje např. modře a zeleně zářící laser argonový. (https://www.cez.cz/)

CO_2 laser je stále jedním z nejpoužívanějších laserů. Jde o nejvýkonnější kontinuální laser s účinností okolo 30%. Aktivní prostředí tvoří Oxid uhličitý (CO_2) - kolem 10–20 %, Dusík (N_2) - kolem 10–20 %, Vodík (H_2) a/nebo Xenon (Xe) - několik procent-obvykle používaný jen v zatavené trubici, Helium (He) - zbytek směsi plynu. Vzájemné poměry těchto prvků se mohou u jednotlivých CO_2 laserů lišit. Ke stimulované emisi dochází pouze v molekulách CO_2, ostatní plyny zlepšují podmínky vzniku inverzní populace. (https://www.cez.cz)

Tvar paprsku vystupujícího z expanderu je čtvercový, pomocí optického systému je upraven na kruhový s největším výkonem ve středu - rozložení výkonu v Gaussově křivce četnosti. Výstupní optika (Obr. 17) tvořená čočkami ze ZnSe materiálu zaostří paprsek a rozšíří jej (beam expander) do bodu o průměru cca 0,2 mm. Některé optiky jsou neprůhledné, pro vlnovou délku 10,6 μm však zcela

transparentní. Paprsek může být polarizovaný nebo může mít polarizaci náhodnou, což je výhodné pro řezání a dělení materiálu. (http://www.lt.cz/)



Obrázek 16: Optická úprava paprsku (http://www.lt.cz/)

Řezání laserem - na místo řezání se přivádí společně s laserovým svazkem také proud plynu (pro kovy reaktivní plyny, pro nekovové materiály inertní plyn). Paprsek laseru přivedený do místa řezu svojí energií zahřeje materiál, který se vlivem teploty roztaví nebo roztaví a vypaří nebo rovnou vypaří. Zároveň je do místa řezu přiváděn pomocný plyn pod vysokým tlakem. Tento proud pomáhá odstraňování roztaveného a odpařeného materiálu. Výhody – rychlost, kvalita, možnost automatizace, bezkontaktní působení. (http://www.lt.cz/)

Neopominutelnou výhodou je skutečnost, že v případě laserového řezání není potřeba materiál nijak upevňovat nebo řešit jeho posun vzhledem k nástroji, jako je tomu v případě konvenčního obrábění. Laserové řezání je metoda bezkontaktní, obrobek je na pracovním stole položen bez upínacích prvků. Odvod spalin je uskutečňován proudem asistenčního plynu, v případě CO_2 laseru se používá stlačený vzduch. (https://www.lt.cz/)

Laserovým paprskem lze řezat s velkou přesností, řez nemusí být přímočarý. Směr řezu určuje pohyb řezací hlavy laseru. Tento pohyb je řízen programem vytvořeným na počítači, jedná se tedy o CNC řešení. Při laserovém řezání není potřeba ostřit nástroje, laserový paprsek se nijak neotupuje. Vzniká sice potřeba paprsek zaostřovat, tak aby bylo dosaženo optimální kvality řezu, to však obstarává stroj, respektive jeho nastavení. Není zde potřeba nějaké výměny dílů stroje. (https://www.lt.cz/)

Určitým nedostatkem vyplývajícím z chemických reakcí plynu CO_2, který se po čase rozkládá, je nutnost měnit plynovou náplň. Není to ale často, například

u značkovacích laserů s výkonem 10 - 150W náplň plynu vydrží v trubici 8 - 10 let. CO_2 lasery vyžadují vysokou čistotu plynu pro bezproblémový chod. (http://www.lt.cz/)

3.2.3.4 polovodičové lasery

Tato skupina laserů dnes patří mezi nejrozšířenější, zdrojem záření je tzv. **laserová dioda**. Diody mají velmi malé rozměry, což je na jedné straně jejich výhoda, na druhé straně je jejich paprsek rozbíhavější než u jiných typů laserů. Účinnost diod je vysoká (až 50 %), jejich výkon se dá snadno měnit změnou elektrického proudu. Proto našly laserové diody velké uplatnění zejména v telekomunikacích, ve výpočetní technice i spotřební elektronice. Polovodičové laserové diody o výkonu jen několik mW jsou součástí řady běžných zařízení, najdeme je např. v laserovém ukazovátku, laserové tiskárně nebo kopírce, čtečce čárového kódu v obchodě, v přehrávačích disků CD atd. (http://lasery.wz.cz/)

Vlnová délka paprsku - laserový paprsek v závislosti na použitém aktivním prostředí se liší svojí vlnovou délkou (Tab. 3), která určuje i barvu paprsku.

Aktivní prostř.	Vlnová délka (nm)	Poznámka
argon - fluor	193	UV, excimer
krypton - fluor	248	UV, excimer
xenon - chlor	308	UV, excimer
helium - kadmium	325, 442	UV, viditelné
argon	488, 514	viditelné
rubín	694	viditelné
Nd:YAG	532, 1064	viditelné, IČ
helium - neon	543, 594, 612, 633, 1150, 3390	viditelné, IČ
polovodičové diody	630 - 1600	viditelné, IČ
erbium	1540	IČ
oxid uhličitý	9600, 10600	IČ

Tabulka 3:Vlnové délky paprsku v různých aktivních prostředích (https://www.cez.cz/)

Excitace aktivního prostředí - je prováděna:

světelným zábleskem - potřebná energie je dodávána opticky (u pevnolátkových nebo kapalinových laserů)

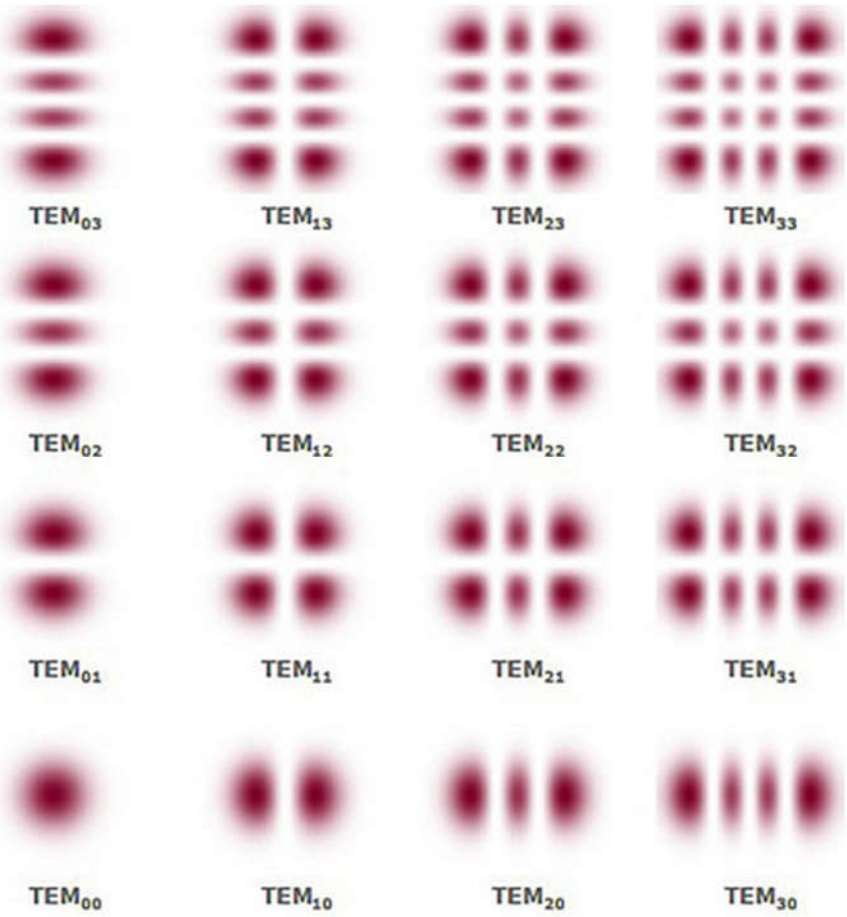
elektrickým polem - elektrický výboj, ke kterému dochází v plynové náplni laseru

chemickou excitací - využívá energie exotermických chemických reakcí.

(https://www.lt.cz/)

Systém energetických hladin - jednoduchý dvouhladinový systém by nebyl efektivní, protože emitované koherentní záření by se absorbovalo tím, že by excitovalo elektrony do vyšší hladiny a neudržovala by se nezbytná inverzní populace stavů. Lasery proto používají tříhladinové (méně efektivní) nebo čtyřhladinové systémy. (https://www.lt.cz/)

Mód laserového paprsku - další neopominutelnou vlastností laserového paprsku je mód laserového paprsku (Obr. 18) označovaný TEM z anglického transverse elektromagnetic mode. TEM je dán vlastnostmi rezonátoru, největší intenzity paprsku dosahuje paprsek v Gaussově rozložení intenzity označovaný TEM_{00}. Index 00 nám říká, že paprsek je soustředěn do jednoho bodu, největší intenzity dosahuje uprostřed. Hodnoty v indexu udávají počet bodů paprsku ve dvou na sebe kolmých směrech. (https://www.lt.cz/)



Obrázek 17: Různé módy laserového paprsku (http://www.lt.cz/)

Pro dělení dřeva a materiálů na bázi dřeva je využíváno technologie CO_2 laseru. Paprskem v módu TEM_{00} s největší intenzitou ve středu je dosahováno nejkvalitnějšího řezu s minimální řeznou spárou, tedy minimem odpadu.

4 ZKOUMANÝ MATERIÁL

V historii lidstva má dřevo svoji nezastupitelnou úlohu. Patřilo k prvním materiálům, ze kterého člověk vyráběl primitivní nástroje, zbraně nebo příbytky. Dřevo sloužilo člověku jako zdroj tepla, ať již bylo určeno k zahřátí, tedy k přežití nebo k přípravě pokrmů. Další využití našlo i jako zdroj světla. Lze tedy říct, že dřevu vděčí lidstvo za svoji existenci.

Od počátku tedy lidé využívají dřevo k uspokojení svých potřeb, a to napříč nejrůznějšími odvětvími. Je tomu především kvůli jeho nezaměnitelným vlastnostem. Dřevo je využíváno kupříkladu ve stavebnictví, výrobě nábytku, pro výrobu sportovních potřeb nebo hudebních nástrojů, je hlavním zdrojem v papírenském průmyslu. V dnešní době zřejmě neexistuje možnost žít bez dřeva ať již v podobě dřevěných výrobků nebo z materiálů ze dřeva vyrobených.

Dřevo jako materiál lze považovat za přírodní kompozit, který vytvořila sama příroda a nelze jej vytvořit průmyslově. Jedná se o materiál ekologický, obnovitelný, relativně snadno recyklovatelný. Obnovitelnost spatřuji ve skutečnosti, že dřevo stále dorůstá, a i když jeho spotřeba stoupá, vzhledem k využívání dřevních odpadů k výrobě například aglomerovaných materiálů stále zbyde dostatek dřevní hmoty pro budoucí generace.

4.1 Stavba dřeva

Dřevo je substance složená z celulózy 40-50%, hemicelulóz 20-30%, ligninu 20-30% a doprovodných složek zastoupených v několika procentech v závislosti na druhu dřeviny: organické látky terpenteny, tuky, pektiny, pryskyřice, steroly, třísloviny a anorganické látky, které po spálení tvoří popel. U tropických dřev je obsah těchto doprovodných látek větší.

Růst dřeva probíhá díky dělivé činnosti kambia, což je vrstva buněk mezi kůrou a dřevem. Při růstu buňky vnitřní straně této vrstvy tvoří dřevo, na straně vnější kůru. Důsledkem této činnosti vytváření letokruhů. V našem klimatickém pásu kambium pracuje a letokruhy vznikají pouze ve vegetačním období jaro-podzim. Na jaře vzniká jarní dřevo = světlejší část letokruhu, v létě vzniká tmavší, tvrdší část letokruhu = letní dřevo.

Letokruh je tedy tloušťkový přírůstek vytvořený činností kambia za jeden rok. U některých dřevin lze letokruhy dobře rozlišit, jelikož se skládají z již zmíněných dvou vrstev – jarního a letního dřeva. Jarní dřevo je tvořeno z velkých a tenkostěnných buněk bohatých na vodu, proto je světlé a má nižší hustotu. Jeho funkcí je primárně vedení vody. Letní dřevo je tvořeno z menších, tlustostěnných a zploštělých buněk, proto je tvrdší, tmavší a má větší hustotu. Letní dřevo má funkci mechanickou. (Vanin, 1955)

Podle stavby letokruhů na příčném řezu lze rozlišit tyto skupiny dřev:

dřeva jehličnatých dřevin (řadíme sem jedli, smrk, modřín, borovici, jalovec, tis, borovici vejmutovku a douglasku)

dřeva listnatých dřevin s kruhovitě pórovitou stavbou (řadíme sem kaštanovník, jasan, akát, jilm, morušovník, pajasan a dub)

dřeva listnatých dřevin s polokruhovitě pórovitou stavbou (řadíme sem ořešák, třešeň a švestku)

dřeva listnatých dřevin s roztroušeně pórovitou stavbou (řadíme sem platan, buk, habr, olši, javor, břízu, topol, vrbu, hrušeň, jabloň, jeřáb a jírovec)

Jádro a běl - jádro je centrální část kmene (mezi dření a bělí), která mívá tmavší barvu. Neprobíhá zde transport vody a zásobních látek. Fyziologicky se jedná o mrtvé pletivo, jeho funkcí je zvyšování stability kmene. Jádro je, oproti bělovému, dřevo obvykle trvanlivější a odolnější proti napadení škůdci.

Typickými dřevinami tvořícími jádrové dřevo jsou: borovice, modřín, platan, dub aj.

Běl (bělové dřevo) je vnější a světlejší část kmene (mezi jádrem a kambiem). Funkcí běli je transport vody a rozpuštěných minerálních látek od kořenů směrem k listům, má však i funkci zásobní. Běl se od jádra odlišuje svými fyzikálními a mechanickými vlastnostmi – je propustná pro kapaliny, málo trvanlivá a snadno podléhá hnilobě i jiným škůdcům.

Dřeva, která nemají vylišeno jádro, označujeme jako bělová (např. smrk, jedle, olše a další). (Vanin, 1955)

Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva - základní vlastností dřeva, podle které jej posuzujeme je jeho **tvrdost**. Tvrdost dřeva závisí na jeho anatomické stavbě, hustotě jednotlivých dřevních vláken. Dřevo tvrdší má vlákna hustší, což se projevuje na jeho hmotnosti, ale především na opracovatelnosti, potažmo kvalitě opracovaného povrchu. (Horáček 2008)

Hustota dřeva - pojem hustota dřeva není jednoznačný, protože musíme oddělit pojmy hustota dřevní substance a hustota dřeva. **Hustota dřevní substance** je hustota vypočítaná podílem hmotnosti a objemu buněčných stěn (celulózy, hemicelulóz a ligninu). Tato hodnota kolísá mezi 1490 a 1560 $kg.m^{-3}$. Závisí pouze na procentuálním zastoupení jednotlivých složek dřeva, druh dřeviny má vliv pouze velmi malý. Při výpočtech uvažujeme průměrnou hodnotu 1500 $kg.m^{-3}$. **Hustota dřeva** zohledňuje určité množství vody ve dřevě, v našich podmínkách kolísá, jak je zřejmé z (Tab. 4). U tropických dřev nacházíme extrémy (130/1360 $kg.m^{-3}$). (Horáček 2008)

Dřeva s nízkou hustotou (σ_{12}<540 $kg.m^{-3}$)	Borovice, smrk, jedle, topol, lípa, vrba, olše, osika
Dřeva se střední hustotou (σ_{12}=540-750 $kg.m^{-3}$)	Modřín, tis, bříza, buk, hrušeň, dub, ořešák, jilm, jabloň, jasan, jeřáb, třešeň, kaštanovník
Dřeva s nízkou hustotou (σ_{12}>750 $kg.m^{-3}$)	habr, zimostráz, dřín, moruše, akát

Tabulka 4:Rozdělení dřev podle hustoty při vlhkosti 12% (Horáček 2008)

V oblasti zpracování dřeva je nejdůležitější jeho **vlhkost**. Čerstvě pokácené dříví je třeba vysušit na vlhkost, která je odvislá od zamýšleného použití (Tab. 5). Podle tohoto kritéria rozlišujeme řezivo určené do exteriéru, které by mělo být vysušeno na absolutní vlhkost 12-20% a určené do interiéru, kdy by mělo dosahovat absolutní vlhkosti 8-10%. (http://www.n-i-s.cz/)

Použití	Teplota prostředí (C°)	Vlhkost dřeva (% abs.)
- v exteriéru	neuvedena	12 -19 *)
- v interiéru	v nevytápěných budovách	12- 16
	s teplotou 12 – 21	9 - 13
	s teplotou nad 21	6 - 10
interiér v ČR (ČSN 91 0001)	běžná teplota Ø 21	7 - 10

Tabulka 5: Obsah vlhkosti dřeva pro způsob použití v Evropě podle ČSN EN 942/5/3

*)V ČR upřesněno pro regionální klimatické podmínky v rozmezí 17 % ±2 % dle ČSN 91 3001 Nábytek pro venkovní použití –zahradní nábytek – technické požadavky (2008).

Voda ve dřevě - dřevo vzrostlého živého stromu obsahuje velké množství vody. Působením fotosyntetické reakce se z vody vytvoří dřevní hmota. Voda je také transportním prostředkem, který v cévách stromů přepravuje živiny a různé jiné látky potřebné pro růst z kořene až do koruny stromů. Vodu najdeme také ve dřevě již zpracovaném. Dřevo je totiž materiál **hygroskopický** (navlhavý) - má schopnost vyrovnávat svoji vlhkost s vlhkostí okolí. (https://is.mendelu.cz/)

Dřevo obsahuje tři druhy vody. Je to **voda volná**, která vyplňuje ve dřevě mezibuněčné prostory, vlhkost takového dřeva je větší než 30% - MNBS = mez nasycení buněčných stěn (obsah vody v kapalném stavu) MH = mez hygroskopicity (obsah vody v plynném stavu). Charakteristiku fyzikálních a mechanických vlastností ovlivňuje mnohem méně než voda vázaná. **Voda vázaná** (hygroskopická), ta se nachází v buněčných stěnách a je vázána vodíkovými můstky na hydroxilové skupiny OH amorfní části celulózy a hemicelulóz. Voda vázaná se ve dřevě vyskytuje při vlhkostech 0-30%. Při charakteristice fyzikálních a mechanických vlastností má největší a zásadní význam. Třetí vodou ve dřevě je **voda chemicky vázaná**, to je voda, která je součástí chemických sloučenin, nelze ji odstranit, na charakteristiku fyzikálních a mechanických vlastností nemá žádný význam. (https://is.mendelu.cz/)

Jak již bylo řečeno, voda vázaná má vliv na rozměrové změny dřeva při různé vlhkosti. Při zvýšení vlhkosti dřevo bobtná, zvětšuje svoje rozměry (pouze do meze hygroskopicity), při snížení naopak sesychá a rozměry se zmenšují. Dřevo však vykazuje nestejné změny v různých směrech vláken dřeva. Tato vlastnost

dřeva se nazývá anizotropie. Nerovnoměrným sesycháním nebo bobtnáním vzniká ve dřevě napětí, které vede k borcení dřeva. (http://www.n-i-s.cz/)

Bobtnání dřeva - bobtnání **α** je jev, způsobovaný přijímáním vody vázané v rozmezí 0% - MNBS. V důsledku různého tvaru buněčných stěn se míra bobtnání liší v různých anatomických směrech - podélné, radiální, tangenciální. Tyto změny nazýváme lineární. Pokud uvažujeme změnu plochy, hovoříme o bobtnání plošném, při změně objemu o bobtnání objemovém. (Horáček 2008)

Bobtnání **α** je vyjádřeno podílem změny rozměru k původní hodnotě v procentech. Při změně obsahu vody 0%-MNBS hovoříme o bobtnání celkovém, v menším intervalu změny o bobtnání částečném. Bobtnání vypočítáme podle vzorce (4.1):

$$\alpha_i = \frac{a_{iw_2} - a_{iw_1}}{a_{iw_1}}.100 = \frac{\Delta a_{iw}}{a_{iw_1}}.100 \qquad (4.1)$$

kde α_i - rozměr, plocha nebo objem (m, m^2, m^3), i - index udávající směr, plochu nebo objem, w_1 - vlhkost před bobtnáním (%), w_2 - vlhkost po ukončení bobtnání (%), $\Delta\alpha_{iw}$ - změna vlhkosti. (Horáček 2008)

Sesychání dřeva - sesychání **β** je zmenšování rozměrů dřeva z důvodu ztráty vázané vody ve dřevě, tedy jev opačný k bobtnání. Stejně jako bobtnání, můžeme sesychání vyjádřit vztahem (4.2):

$$\beta_i = \frac{a_{iw_1} - a_{iw_2}}{a_{iw_1}}.100 = \frac{\Delta a_{iw}}{a_{iw_1}}.100\,. \qquad (4.2)$$

kde α_i - rozměr, plocha nebo objem (m, m^2, m^3), i - index udávající směr, plochu nebo objem, w_1 - vlhkost před bobtnáním (%), w_2 - vlhkost po ukončení bobtnání (%), $\Delta\alpha_{iw}$ - změna vlhkosti. (Horáček 2008)

4.2 Dubové dřevo

Dub je listnatá, kruhovitě pórovitá dřevina. Roste především v mírných až subtropických oblastech severní polokoule. Jde o dlouhověký, pomalu rostoucí strom. Dub čítá okolo 450 druhů, v České republice lze nalézt 7 - 8 druhů dubu,

nejrozšířenějšími jsou Dub zimní (*Quercus petraea*) a Dub letní *(Quercus robur).* Dub zimní roste v chladnějších oblastech s méně kvalitní půdou, špatně snáší přemokřené půdy. Dub letní se vyskytuje v oblastech mírně teplejších, náchylnost na vlhkost v půdě není tak výrazná, dobře snáší výkyvy vlhkosti i počasí. Oba druhy se mohou křížit, jejich hybridy potom vykazují různé kombinace typických rysů. Odlišit Dub zimní od letního může být potom poněkud problematické. (Vanin 1955)

4.2.1 Struktura dubového dřeva

Dub je dřevina s hnědě zbarveným jádrem, úzkou světle hnědou bělí. Letokruhy jsou dobře znatelné na všech řezech. Na příčném řezu je typická jarní vrstva letokruhu tvořená velmi širokými cévami o průměru 200-400 μm. Letní vrstva letokruhu má hustou strukturu úzkých cév. Obě vrstvy letokruhu jsou protkány dřeňovými paprsky tvořícími nezaměnitelnou kresbu dřeva. Lze je pozorovat ve formě nestejně dlouhých podélných skvrn i na radiálním, nebo tangenciálním řezu. (Vanin 1955)

Obrázek 18: Příčný řez dubovým dřevem (https://lesycr.cz/, 2020)

Obrázek 19: Tangenciální řez dubovým dřevem (https://lesycr.cz/, 2020)

4.2.2 Vlastnosti a využití dubového dřeva

Základními vlastnostmi dubového dřeva jsou tvrdost, pevnost, houževnatost a trvanlivost. Tvrdostí se řadí mezi dřeva středně tvrdá (40-80 MPa), jednoduchou orientační zkouškou lze zjistit, že na příčném povrchu, při 12% procentní vlhkosti dřeva není možno udělat výrazný vryp nehtem. Co se hustoty týče, patří mezi dřeva se střední hustotou (540-750 $kg.m^{-3}$). Dubové dřevo v našich klimatických podmínkách velmi dobře odolává všem změnám, jako je střídání sucha a vlhka. (Balabán 1955, http://www.n-i-s.cz/)

Dubové dřevo je vysoce ceněno, slouží jako surovina v mnoha oblastech, jako například k výrobě sudů, stavebních prvků, konstrukci vodních staveb, dříve se z něj vyráběly mlýnská kola, piloty mostků, železniční pražce. Dále je využíváno k nábytkářským účelům pro výrobu drahého exkluzivního nábytku nebo k výrobě parket. Vzhledem k ceně jsou stejně jako z exotických dřev ze dřeva dubu vyráběny krájené dýhy.

4.2.3 Obrábění dubového dřeva

Dubové dřevo, stejně jako ostatní tvrdá dřeva se neobrábějí tak snadno jako například dřevo smrkové. Jednou z vlastností dřeva je jeho špatná tepelná vodivost. Při obrábění nutně dochází k tření a tím zvyšování teploty v řezné spáře. V případě konvenčního řezání pilovým kotoučem je vznikající teplo částečně odváděno oddělenými třískami a tělem zubu, část tepla však ovlivňuje teplotu řezaného povrchu. Se zvyšující se teplotou dochází nejenom k ovlivnění povrchu vedoucí až k jeho spálení a jeho zčernání, ale také k ovlivnění nástroje. Pilový list vystavený velkým teplotám ztrácí tak svoji pevnost, může docházet i ke vzniku trhlin v těle kotouče, čímž se kotouč stává zdraví nebezpečným nástrojem. Vliv má rovněž naostření řezných klínů kotouče. Zvýšené tření způsobuje nárůst teploty v řezné spáře, čímž dochází k otupování břitů. K otupování nástroje přispívají i elektrochemické děje způsobované vznikající elektrostatickou energií. (Lisičan 1996)

Tato skutečnost vede k nutnosti ostřit nástroje, případně nástroje vyměnit za nové, což zvyšuje ekonomickou stránku obrábění. Rovněž energetická náročnost obrábění se zvyšuje.

Neméně důležitou vlastností dřeva ovlivňující obrábění je hygroskopicita dřeva, speciálně voda volná, nacházející se v buňkách letního dřeva. Na komplikace řezného procesu vlivem nestejnoměrné vlhkosti bělového a jádrového dřeva upozorňují ve své práci (Siklienka a Kminiak 2013).

Tento nedostatek lze vyřešit použitím jiné metody dělení materiálu, konkrétně využití CO_2 laseru. Právě vysoká vlhkost dřeva je pro řezání kotoučovou pilou zásadním problémem. Nelze použít stejné řezné podmínky pro řezání suchého nebo vlhkého dřeva. V tom spočívá jedna z velkých výhod laserového řezání, protože laser je schopen řezat dřevo bez ohledu na jeho vlhkost.

Dalším problémem při řezání dřeva kotoučovou pilou je vznikající odpad, tedy odřezky, piliny. Vzhledem k vysoké ceně dubového dřeva ztráty vznikající při konvenčním způsobu obrábění jsou obrovské. CO_2 laser tento problém minimalizuje tím, že řezná spára je několikanásobně užší (cca 0,3 mm), než spára vznikající při použití kotoučové pily. Tím je možno dosáhnout maximální možné výtěže. (www.lesprom.com)

5 Tepelné dělení podle normy

Norma **„ČSN EN ISO 9013 Tepelné dělení - Klasifikace tepelných řezů - Geometrické požadavky na výrobky a úchylky jakosti řezu“** je normou, která se zabývá úchylkami jakosti povrchu řezů.

„Tento dokument představuje geometrické požadavky na výrobky a úchylky řezů pro třídu tepelných řezů materiálů vhodných pro řezání kyslíkovým plamenem, plazmové řezání a řezání laserem. Platí pro řezy plamenem od 3 mm do 300 mm, řezy plazmou od 0,5 mm do 150 mm a řezy laserem od 0,5 mm do 32 mm.“ (ČSN EN ISO 9013)

Podle normy „Materiál je vhodný pro řezání laserem, pokud jsou jeho vlastnosti v oblasti řezu ovlivněny pouze do té míry, že si součást zachová alespoň ty vlastnosti, které jsou požadovány pro předpokládané použití. Vhodné pro řezání jsou nelegované a legované oceli, materiály na bázi niklu, slitiny titanu, hliníku a další.“ (ČSN EN ISO 9013, s. 30)

Z uvedeného vyplývá, že dřevo, případně aglomerované materiály na bázi dřeva lze požadovat za „další“. Protože se tato norma, (ani jiné), nezabývají speciálně problematikou laserového řezání dřeva, jedním z cílů této práce je návrh aplikování normy pro dělení rostlého dřeva.

5.1 Norma ČSN EN 9013

Norma ČSN EN 9013 se zabývá tepelným dělením a geometrickými požadavky na výrobky zpracovávané touto technologií. Využití této normy je však zaměřeno na zpracovávání kovů jako například legované i nelegované oceli, hliníku a jeho slitin a podobně. Obrábění dřeva touto metodou není v normě popsáno.

V kapitole 4 normy jsou uvedeny použité značky s popisem jejich významu. Značky s jejich významem v Tabulce 3.

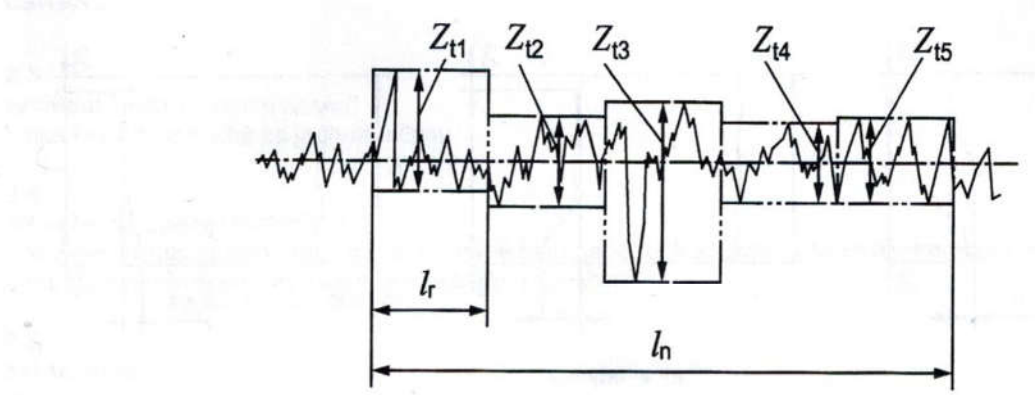
Tabulka 3:Použité značky a jejich význam (ČSN EN 9013)

Značka	Termín
a	tloušťka zpracovávaného kusu
Δa	zmenšení tloušťky
A	jmenovitý rozměr dokončeného dílu
α	úhel nastavení hubice
b	vzdálenost trysky
B	jmenovitý rozměr uříznutého dílu
β	úhel řezu
Bz	přídavek na opracování
c	směr posuvu
d	šířka řezné spáry na horní ploše
e	řezná tloušťka
f	délka řezu
g	šířka řezné spáry na spodní ploše
Go	horní mezní úchylka
Gu	dolní mezní úchylka
h	směr řezání
i	řezná tloušťka
j	výška kořenové ploochy
k	skluzová rýha
ln	celková délka
lr	základní délka
m	šířka skluzové rýhy
n	skluz
o	hloubka drážky
r	natavení horní hrany
Rz5	průměrná výška prvků profilu
t_G	úchylka přímosti
t_P	úchylka rovnoběžnosti
t_W	úchylka kolmosti
u	úchylka kolmosti nebo úhlu
Zt	výška prvku profilu

Zvýrazněné položky svým označením neodpovídají označení, která byla použita při měření profilometrem Talysurf, mají však stejný význam.

Zt „výška prvku profilu - součet výšky výstupku a hloubky prohlubně prvku profilu“ (ČSN EN 9013) pro data z měření představuje **Pt** (μm).

Rz5 „průměrná výška profilu - aritmetický průměr z jednotlivých výšek profilu na pěti za sebou následujících základních délkách“ (ČSN EN 9013) odpovídá parametru $\mathbf{R_z}$ (μm) použitém při měření. (Obr. 21)

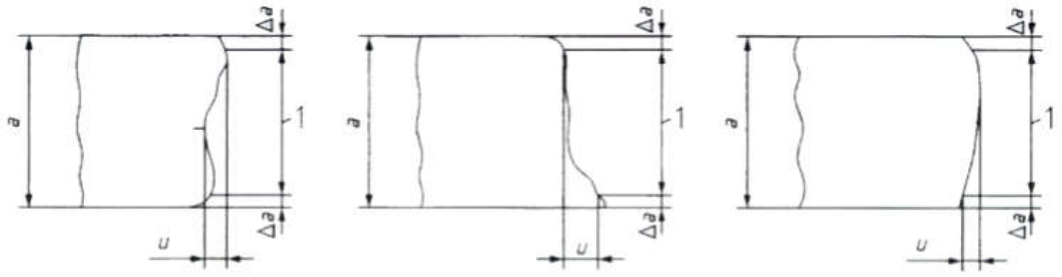


Legenda

Zt_1 až Zt_5	charakterizuje jednotlivé prvky profilu
ln	celková délka
lr	základní délka (1/5 z *ln*)

Obrázek 20:Průměrná výška prvků profilu (ČSN EN 9013)

u „úchylka kolmosti nebo úchylka úhlu“ je normou definována jako „vzdálenost mezi dvěma rovnoběžnými přímkami (dotýkajícími se řezného povrchu), mezi které je vepsán profil řezu. Přímky svírají s povrchem řezaného materiálu určený úhel, tj. 90°v případě svislých řezů.“ (ČSN EN 9013) Při měření profilometrem parametr **PV** (μm). (Obr. 22)



Obrázek 21:Úchylka kolmosti nebo úhlu (ČSN EN 9013)

6 Metodika výzkumu

Pro splnění vytčených cílů byla metodika výzkumu rozdělena do následujících postupných kroků:

1. řezání vzorků laserovou technologií při vlhkosti 8% a 30%

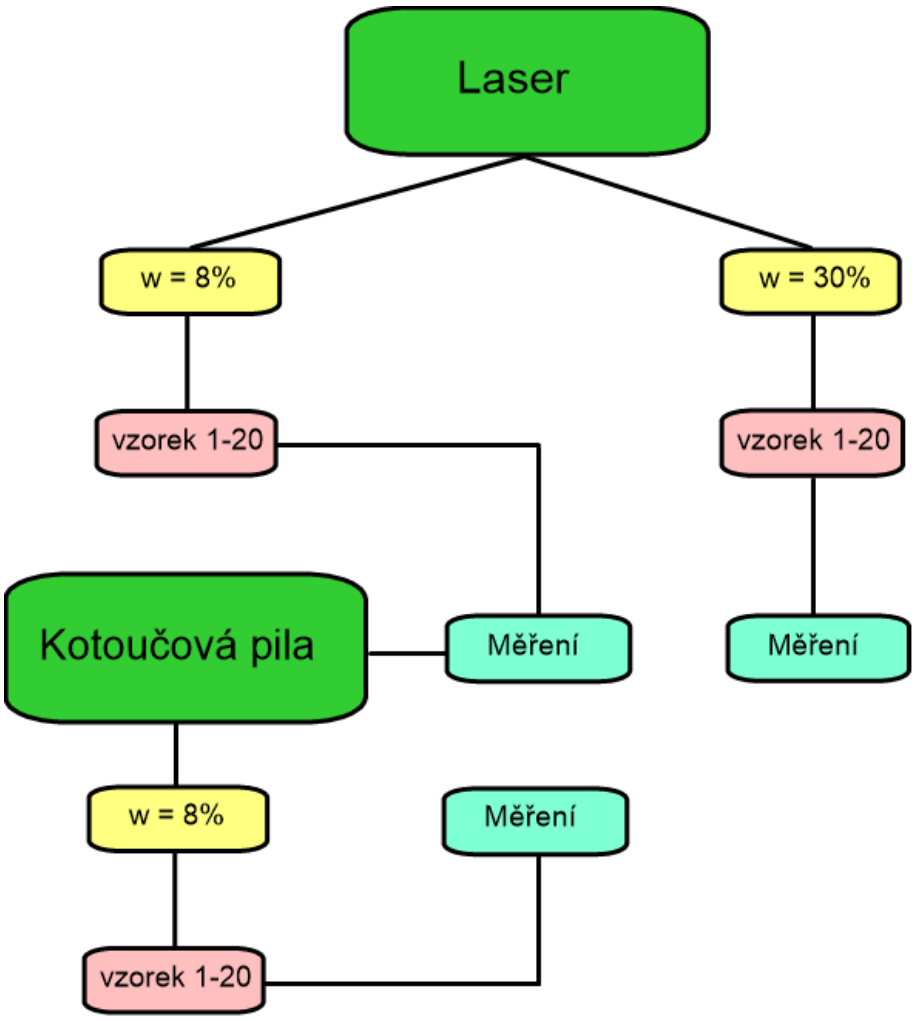
2. měření jakosti obrobeného povrchu laserem

3. ořezání vzorků o vlhkosti 8% kotoučovou pilou

4. měření jakosti obrobeného povrchu pilovým kotoučem

5. návrh úpravy normy ČSN EN 9013

Jak je zřejmé ze schématu na (Obr. 23), bylo vytvořeno 60 vzorků pro měření a následné statistické zpracování.



Obrázek 22: Schematické znázornění postupu výzkumu (zdroj vlastní)

6.1 Zkoumané vzorky

Ke svému výzkumu jsem použil vzorky z dubového dřeva (*Quercus robur*, L.) bez vad jako jsou suky a podobně. Bylo vyrobeno 40 ks vzorků o rozměrech 100 x40x30 mm, z toho 20 ks o vlhkosti 8% a 20 ks o vlhkosti 30% (BNV).

6.1.1 Zjišťování vlhkosti vzorků

Prvním krokem výzkumu bylo zjištění vlhkosti měřených vzorků. Použito bylo standartní laboratorní vybavení - laboratorní váhy pro zjištění hmotnosti.

Zjišťování vlhkosti bylo provedeno podle normy ČSN EN 322 (1994) jako procentuální podíl hmotnosti vody obsažené ve vzorku a hmotnosti vzorku ve vysušeném stavu.

Postup výpočtu:

$$W = \frac{m_w - m_0}{m_0} \cdot 100 \ [\%]$$

Kde:

m_w – hmotnost zkušebního tělesa ve vlhkém stavu [g]

m_0 – hmotnost zkušebního tělesa ve vysušeném stavu [g]

W – vlhkost [%]

Výsledek byl zaokrouhlen na jedno desetinné místo a činil **7,8 %**.

Po zjištění vlhkosti byly vzorky uloženy do klimatizační skříně.

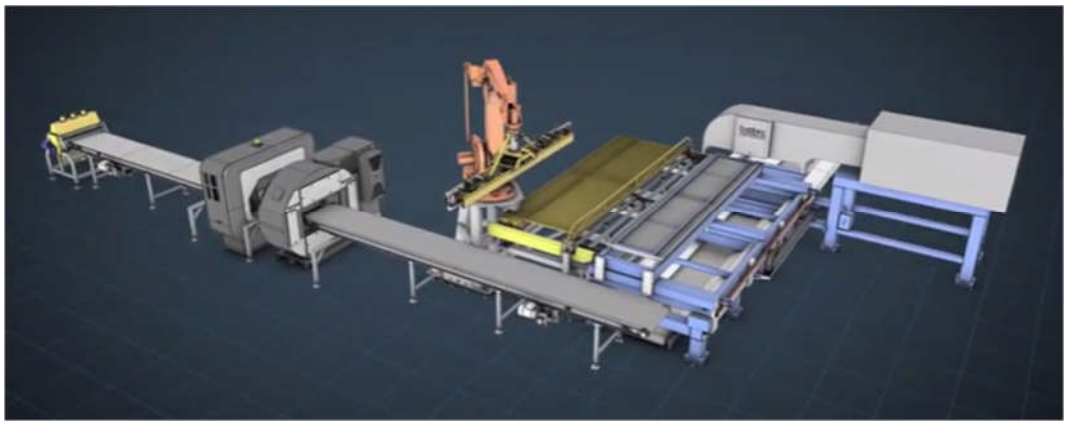
6.2 Strojní vybavení

K nařezání vzorků byla použita laserová výrobní linka jako zástupce inovativního přístupu obrábění, vzorky o vlhkosti 8% byly poté ořezány konvenčním strojem - kotoučovou pilou.

Při řezání vzorků bylo laserové zařízení o výkonu 5 kW nastaveno na rychlost posunu hlavice 3 $m.min^{-1}$, ohnisko paprsku bylo zaostřeno do horní třetiny tloušťky materiálu.

6.2.1 Laser

Použitým laserovým zařízením byla výrobní linka BLT WoodCut (Obr. 24) od firmy Biatec Laser Technology s.r.o., která se zabývá vývojem a konstrukcí laserových zařízení. Laser použitý v této lince je CO_2, jeho hlavní parametry ukazuje tabulka 4. Linka je speciálně navržena pro laserové řezání dřeva jak suchého, tak vlhkého. Je vybavena scanerem povrchu, rentgenovým snímáním i uvnitř materiálu. Na základě získaných dat nejprve materiál vyhodnotí, SW navrhne rozložení dílců pro optimální hodnotu výtěže. Vše probíhá s maximální možnou mírou automatizace a robotiky.



Obrázek 23: Výrobní linka BLT WoodCut (www.directindustry.com)

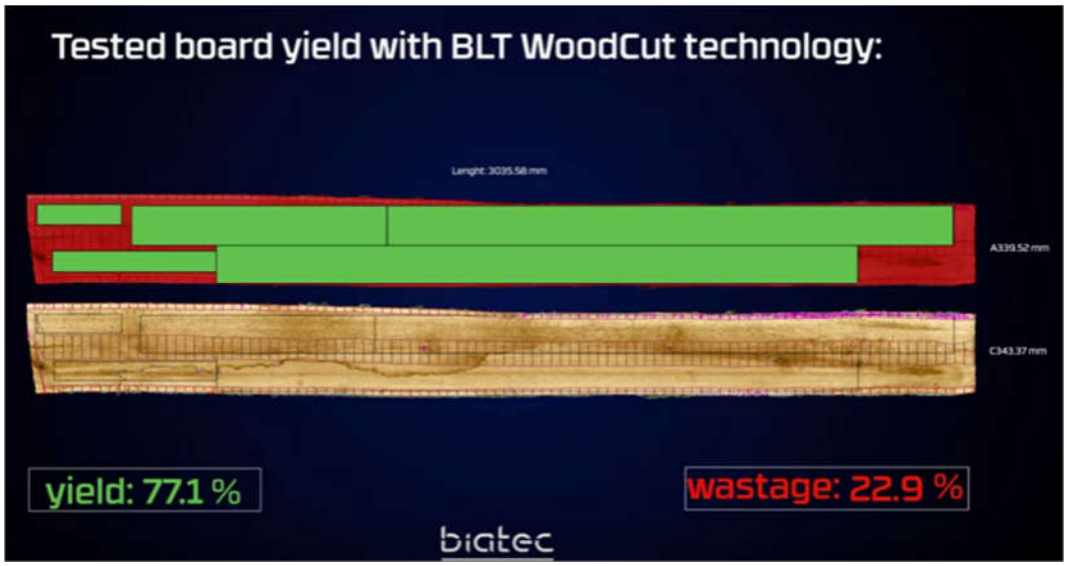
Nejdůležitější parametry linky BLT WoodCut uvádí tabulka (Tab. 4).

Tabulka 4: Parametry výrobní linky (*www.directindustry.com)*

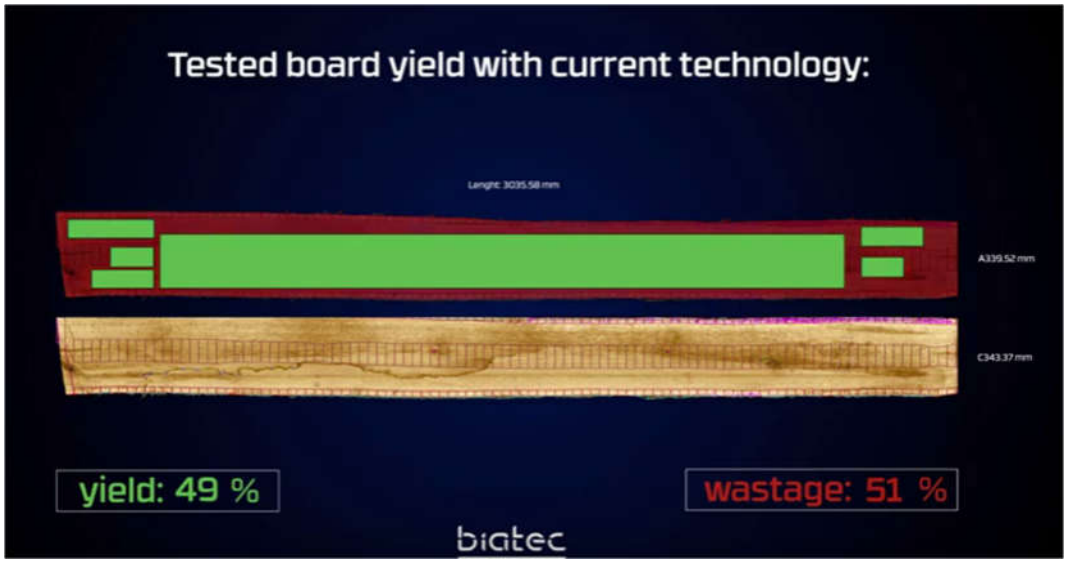
Výkon [kW]	Vlhkost řezaného materiálu [%]	Tloušťka řezaného materiálu [mm]	Šířka řezné spáry [mm]	Pracovní rovina	Rok výroby
5	0 - 80	max 80	0,3	2 osy X,Y	2017

Jak je zřejmé z (Tab. 4) linka je schopna řezat dřevo o vlhkosti až 80%, což je pro kotoučovou pilu nemožné. Maximální tloušťka řezaného materiálu 80 mm je taktéž dostatečná pro běžnou výrobu. Nejdůležitějším parametrem je šířka řezné spáry, které nelze dosáhnout konvenčními metodami řezání. Tím je ovlivněna maximalizace výtěže, minimalizace vzniku odpadu a dochází tak k zefektivnění výroby.

Kromě šířky řezné spáry podstatným způsobem ovlivňuje výtěž i SW návrh rozložení výřezů na zpracovávaném materiálu. Obrázky 25 a 26 ukazují, že ovlivnění výtěže je opravdu markantní. Výtěž při řezání na laserové lince je o 53,35% vyšší, než při řezání kotoučovou pilou. Odpadu je v tomto případě o 55,1% méně.



Obrázek 24: Výtěž dosažená řezáním na laserové lince (*www.directindustry.com)*



Obrázek 25: Výtěž dosažená řezáním kotoučovou pilou (www.directindustry.com)

6.2.2 Kotoučová pila

Zástupcem konvenčního způsobu obrábění byla zvolena formátovací kotoučová pila SCM Class si 300, vyráběná firmou PANAS spol. s. r. o. Výrobce uvádí tento stroj (na Obr. 27) jako nejprodávanější pilu, která je vhodná pro řezání masivu i aglomerovaných deskových materiálů na bázi dřeva.

Obrázek 26: Formátovací kotoučová pila SCM Class si 300 (www.panas.cz/)

Pojezdový pracovní stůl o délce 3200 mm je vyroben z hliníkové slitiny s povrchovou úpravou. Vysoký konstrukční profil pohyblivé části stolu zaručuje perfektní tuhost a stálost i při maximálním vyložení a velkém zatížení. Uzavřený tvar konstrukce velmi omezuje vnikání nečistot do systému pojezdu. Pevná část stolu je tvořena monolitickým uzavřeným profilem, který není přerušen žádným nastavovacím mechanismem. *(*www.panas.cz*/)*

Nejdůležitější parametry pily jsou v Tab. 5.

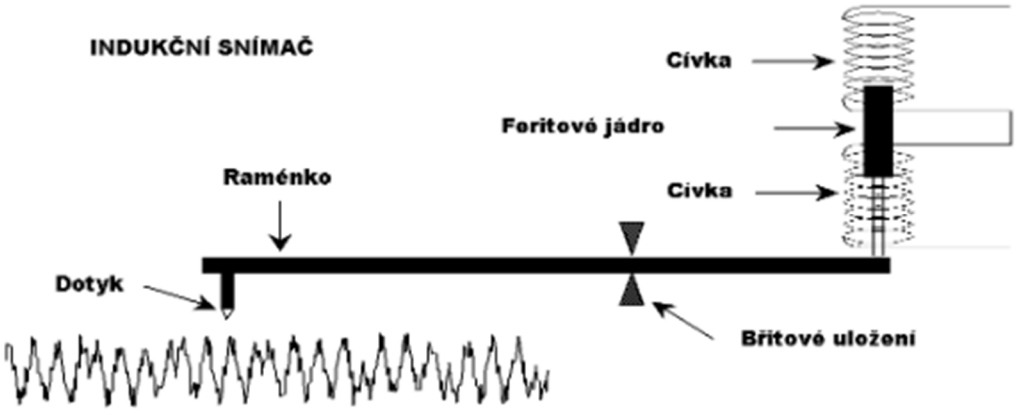
Tabulka 5: Parametry SCM Class si 300 (www.panas.cz/)

Výkon [kW]	Maximální výška řezu (kotouč 350 mm) při 90°	Maximální výška řezu (kotouč 350 mm) při 45°	Šířka řezné spáry [mm]	Otáčky pilového kotouče n/min	Otáčky předřezu n/min
4	100	70	dle kotouče	4000	8500

6.3 Přístrojové vybavení

Měření zkušebních vzorků bylo realizováno za použití kontaktního profilometru Form Talysurf 50 Intra 2 od firmy Taylor Hobson (Liecester, UK). Tento přístroj je periferním hardwarovým vybavením PC a ve spojení s dodávaným softwarem tvoří nástroj pro kontaktní induktivní měření a analýzu povrchu těles.

Výrobce udává délku snímání 50 mm, úchylka max. 0,4 µm na 50mm, chyba měření je ± 2%. Obrázek 28 ukazuje princip fungování indukčního snímače.



Obrázek 27: Princip kontaktního induktivního snímače (Havelková,Hiklová 2014)

6.3.1 Nastavení profilometru

Pro měření byl profilometr Form Talysurf 50 Intra 2 osazen dodávaným snímacím raménkem s kuželovým diamantovým měřícím hrotem s radiusem $\mathbf{r_{tip} = 2\ \mu m}$. Obrázek 29 ukazuje měření profilometrem. Byl použit Gaussův filtr a filtr profilu λ_c. Před měřením byl přístroj zkalibrován podle pokynů výrobce.

Obrázek 28: Profilometr Form Talysurf 50 Intra 2 (vlastní)

6.4 Softwarové vybavení

Pro zaznamenání naměřených hodnot byl použit software Microsoft Excel (Microsoft, Redmont, Washington, USA). Data získaná měřením byla exportována do software Statistica 12 (Statsoft Inc., Tulsa, Oklahoma, USA). V tomto programu byla data statisticky zpracována.

6.5 Podmínky výzkumu

Celý výzkum probíhal v laboratoři Katedry zpracování dřeva a biomateriálů Fakulty lesnické a dřevařské ČZU v Praze.

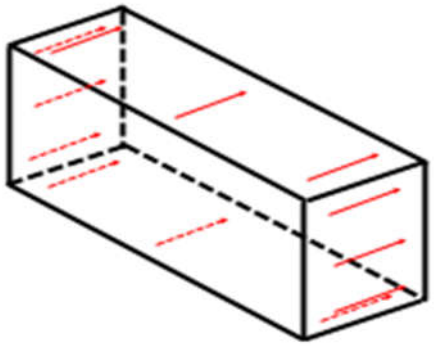
Měření probíhalo při vlhkosti okolního prostředí 65±3% a teplotě 20±2°C.

6.6 Měření vzorků

Všechny vzorky vyřezané laserem byly změřeny. Vzorky o vlhkosti 8% byly po změření ořezány s minimálním úběrem na kotoučové pile, poté byly znovu změřeny.

Každý vzorek byl měřen celkem 12x - vždy cca 5mm od obou okrajů řezu a ve středu délky plochy, celkově tedy 720x. Měření probíhalo ve směru průniku laserového paprsku, tedy od vrchní strany ke spodní. Orientace fošny při řezání vzorků byla ve stroji umístěna pravou stranou nahoru. Místa měření ukazuje Obr.30.

Po ukončení měření byly vzorky uloženy do klimatizační skříně.



Obrázek 29:Místa měření zkušebního vzorku (zdroj vlastní)

6.7 Statistické zpracování dat

Získaná data byla vyhodnocována statistickou metodou ANOVA (Analysis of variance). Touto metodou bylo ověřeno, jestli mají naměřené hodnoty statisticky významný vliv, či nikoli. Hodnoty měření ze souboru Excel byly tedy importovány do SW Statistica 12.

Dříve než byla získaná data statisticky zpracována, bylo nutno vyloučit ze souboru odlehlé hodnoty dat. Pokud byla taková data zjištěna, bylo nutno přistoupit k opětovnému přeměření toho vzorku, u kterého byla tato skutečnost odhalena.

Zjištění, které hodnoty bylo třeba vyloučit bylo provedeno pomocí Dean-Dixonova testu. Hodnoty byly nejdříve seřazeny vzestupně a vypočítáno variační rozpětí jako rozdíl mezi nejnižší a nejvyšší hodnotou (x_n - x_1). Poté pomocí vzorců 6.1 a 6.2 byla vypočtena kritéria Q_{min} a Q_{max}.

$$Q_{min} = \frac{(x_2 - x_1)}{(x_n - x_1)} \quad (6.1)$$

$$Q_{max} = \frac{(x_n - x_{n-1})}{(x_n - x_1)} \quad (6.2)$$

Q_{min} a Q_{max} byla poté porovnána s tabulkovou kritickou hodnotou Q_{kr} pro daný počet opakování (n). Pokud bylo zjištěno, že vypočtené hodnoty Q_{min} a Q_{max} jsou vyšší nebo rovné kritické hodnotě Q_{kr}, byly vyřazeny ze souboru a vzorky opětovně změřeny. Důvodem je skutečnost, že by bylo ovlivněno rozpětí hodnot.

V dalším kroku byla posuzována normalita zpracovávaných hodnot pomocí Shapiro-Wilkova testu na hladině významnosti p = 0,05 tj. 5%.

Vlastní statistické vyhodnocení bylo provedeno pomocí vícefaktorové analýzy rozptylu ANOVA (Analysis of variance) v SW Statistica 12. V této analýze rozptylu jsou hodnoceny účinky jednotlivých faktorů a jejich kombinací.

7 Výsledky a diskuze

7.1 Naměřené hodnoty

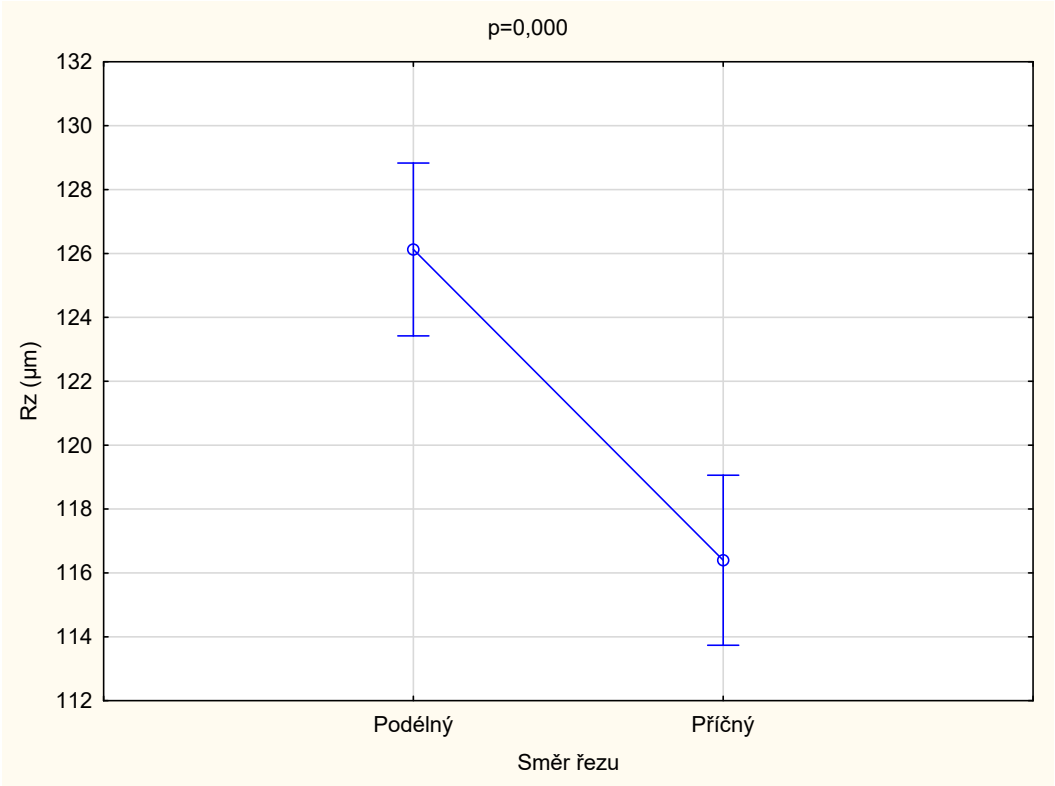
V tabulce 6 jsou uvedeny vážené průměry hodnot, které byly naměřeny u vzorků nařezaných laserovou technologií.

Tabulka 6: Vážené průměry naměřených hodnot

Vlhkost*Směr řezu; Weighted Means							
	Vlhkost	Směr řezu	Rz (Mean)	Rz (Std.Err.)	Rz (-95,00%)	Rz (+95,00%)	počet měření(n)
1	8	Podélný	143,6161	3,947080	135,8005	151,4317	120
2	8	Příčný	142,9019	2,868557	137,2219	148,5819	120
3	30	Podélný	108,6364	2,947465	102,8002	114,4727	120
4	30	Příčný	89,8935	2,896136	84,1589	95,6281	120
			Pt (Mean)	Pt (Std.Err.)	Pt (-95,00%)	Pt (+95,00%)	
1	8	Podélný	273,3294	7,195516	259,0816	287,5772	120
2	8	Příčný	232,0116	5,262589	221,5912	242,4321	120
3	30	Podélný	185,3650	4,973308	175,5174	195,2127	120
4	30	Příčný	154,3379	4,622198	145,1855	163,4903	120
			Pv (Mean)	Pv (Std.Err.)	Pv (-95,00%)	Pv (+95,00%)	
1	8	Podélný	411,5030	10,97298	389,7754	433,2306	120
2	8	Příčný	424,9994	11,34218	402,5408	447,4581	120
3	30	Podélný	283,1264	9,28058	264,7499	301,5028	120
4	30	Příčný	271,2941	6,37946	258,6622	283,9261	120

7.2 Vliv směru řezu a vlhkosti na Rz - řez laserem

7.2.1 Vliv směru řezu na Rz

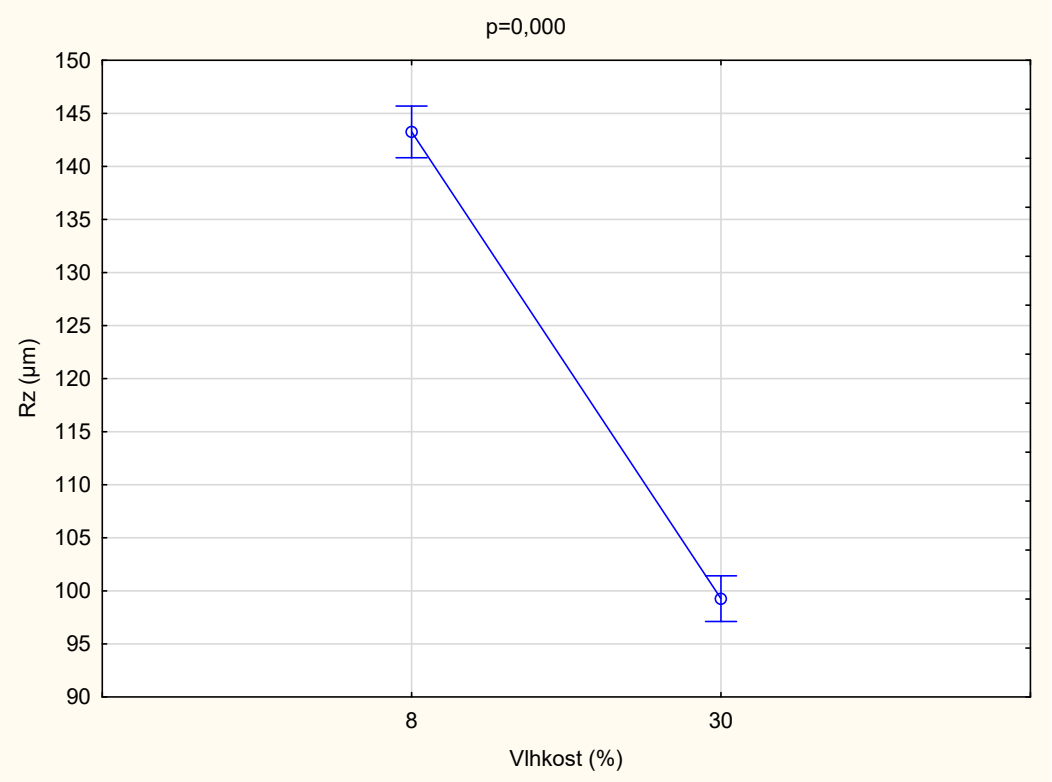


Graf 1: Vliv směru řezu na Rz

Metodou ANOVA na hladině významnosti p = 0,05 bylo prokázáno, že R_z pro podélný řez je odlišná od řezu v příčném směru. Na hladině významnosti p byl prokázán statisticky významný rozdíl. Viz Graf 1.

Z tohoto grafu je patrné, že pokud je laserovým paprskem dělen materiál v příčném směru, největší průměrná výška profilu je nižší, řez má tedy vyšší kvalitu. Procentuálně vyjádřeno R_z je v případě příčného řezu o 7,94% nižší, než u podélného řezu. Kvalita řezu při příčném dělení se zvýší.

7.2.2 Vliv vlhkosti na Rz

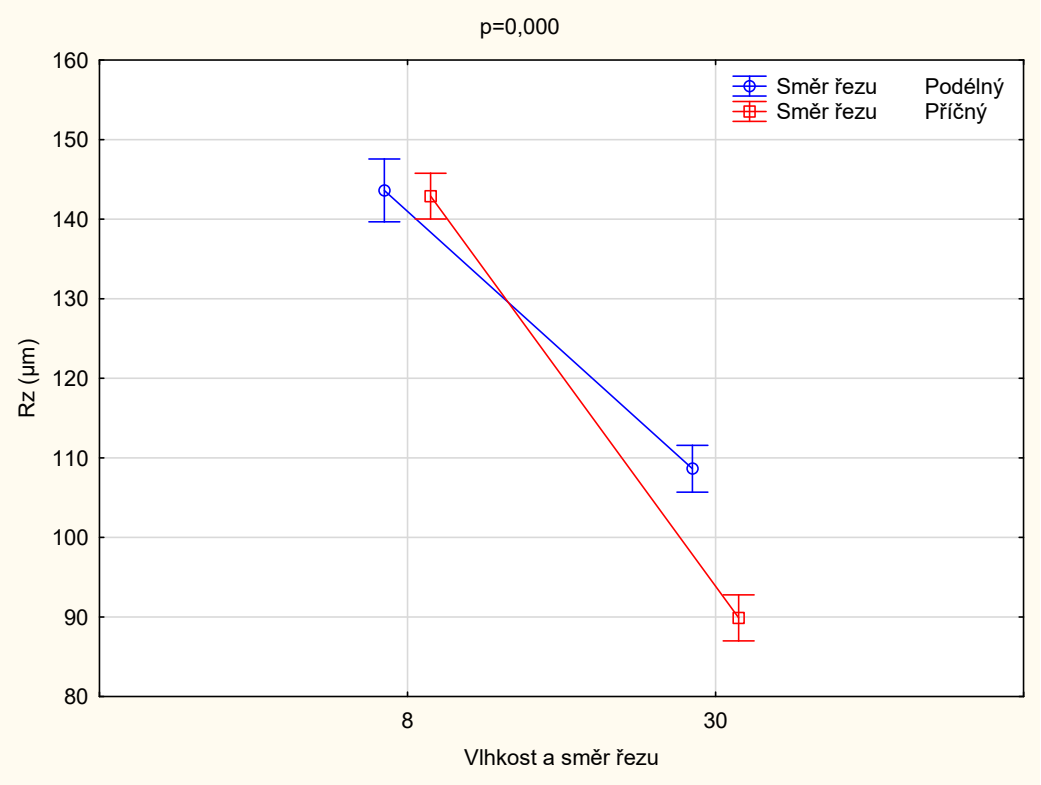


Graf 2: Vliv vlhkosti materiálu na Rz

Na hladině významnosti p = 0,05 statistickou metodou ANOVA bylo prokázáno, že kvalita řezání dubového dřeva o vlhkosti 30% je rozdílná oproti řezání dřeva o vlhkosti 8%. Vliv rozdílu vlhkosti je statisticky významný.

Vliv vlhkosti materiálu při laserovém dělení je patrný z Grafu 2. Průměrná výška profilu Pt je výrazně nižší při řezání při vlhkosti 30% oproti řezání při vlhkosti 8%. Při vlhkosti 30% je hodnota tohoto parametru o 30,77% nižší. Je tedy velmi vhodné pro řezání vlhkého dřeva použít technologii laseru, nehledě k nemožnosti dělení dřeva kotoučovou pilou při takové vlhkosti.

7.2.3 Vliv vlhkosti a směru řezu na Rz



Graf 3: Vzájemné působení vlhkosti a směru řezu na Rz

Vlhkost dřeva jako vlastnost děleného materiálu a směr, ve kterém je dělen působí společně. Jak naznačuje Graf 3, je zřejmé, že vzájemné působení těchto dvou veličin je statisticky významné, jak ukazuje hodnota p = 0,000.

Duncanův test

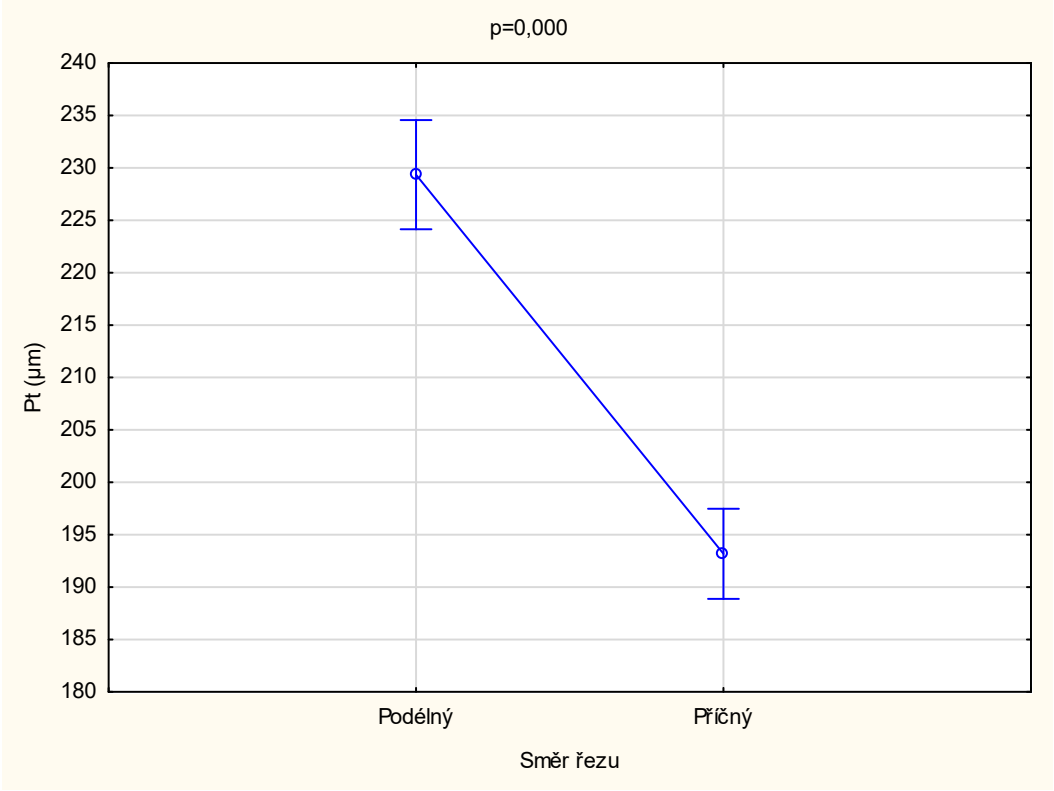
Tabulka 7 znázorňuje vyhodnocení vlivu směru řezu na R_z pomocí Duncanova testu. Statisticky významný vliv mezi naměřenými hodnotami nebyl prokázán při porovnání podélného a příčného řezu při vlhkosti 8%. Hodnota p je přibližně 17 x vyšší, než mez statistické významnosti vlivu 0,05. Při porovnání obou směrů řezu při vlhkosti 8 % s oběma směry řezu při vlhkosti 30% můžeme pozorovat statisticky velmi významné působení faktoru směr řezu na R_z.

Tabulka 7: Hodnoty na hladině významnosti p=0,05 dle Duncanova testu

Cell No.	Duncan test; variable Rz					
	Vlhkost	Směr řezu	{1} (143,62)	{2} (142,90)	{3} (108,64)	{4} (89,893)
1	8	Podélný		0,874	0,000	0,000
2	8	Příčný	0,874		0,000	0,000
3	30	Podélný	0,000	0,000		0,000
4	30	Příčný	0,000	0,000	0,000	

7.3 Vliv směru řezu a vlhkosti na Pt - řez laserem

7.3.1 Vliv směru řezu na Pt

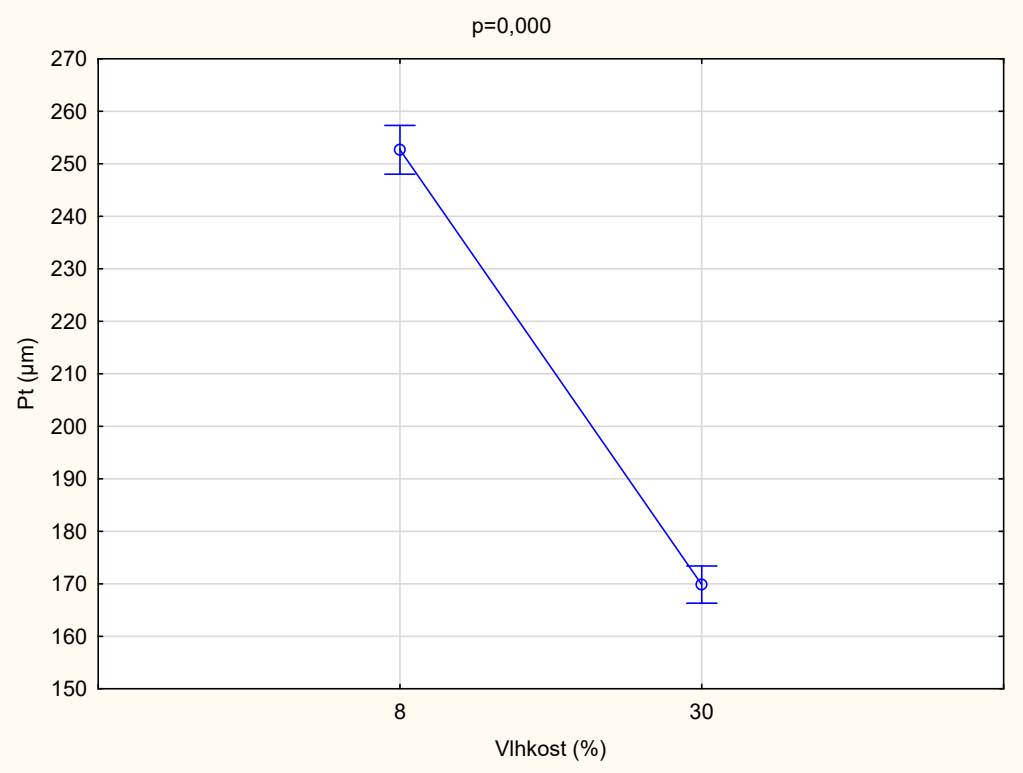


Graf 4: Vliv směru řezu na Pt

Metodou ANOVA na hladině významnosti p = 0,05 bylo prokázáno, že Pt pro podélný řez je odlišná od řezu v příčném směru. Na hladině významnosti p byl prokázán statisticky významný rozdíl. Viz Graf 4.

Z tohoto grafu je patrné, že pokud je laserovým paprskem dělen materiál v příčném směru, největší výška profilu je nižší, řez má tedy vyšší kvalitu. Procentuálně vyjádřeno R_z je v případě příčného řezu o 16,09% nižší, než u podélného řezu. Kvalita řezu při příčném dělení se zvýší.

7.3.2 Vliv vlhkosti na Pt

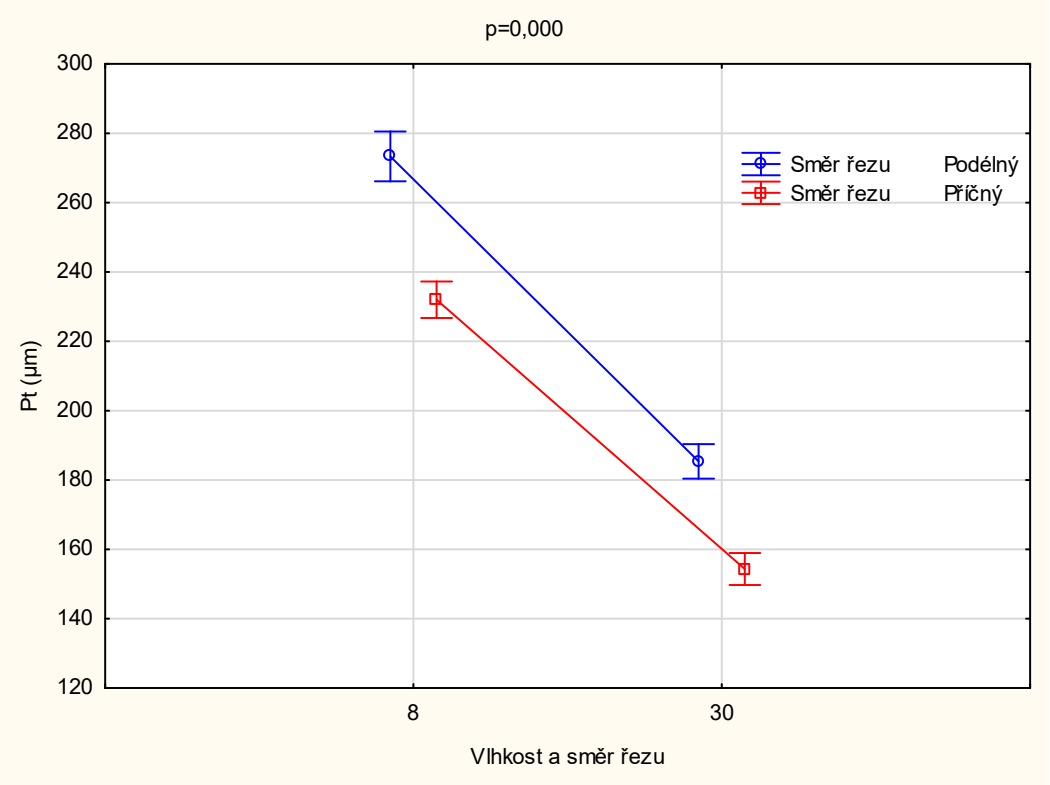


Graf 5: Vliv vlhkosti na Pt

Na hladině významnosti p = 0,05 statistickou metodou ANOVA bylo prokázáno, že kvalita řezání dubového dřeva o vlhkosti 30% je rozdílná oproti řezání dřeva o vlhkosti 8%. Vliv rozdílu vlhkosti je statisticky významný.

Vliv vlhkosti materiálu při laserovém dělení je patrný z Grafu 5. Výška profilu Pt je výrazně nižší při řezání při vlhkosti 30% oproti řezání při vlhkosti 8%. Při vlhkosti 30% je hodnota tohoto parametru o 32,81% nižší.

7.3.1 Vliv vlhkosti a směru řezu na Pt



Graf 6: Vzájemné působení vlhkosti a směru řezu na Pt

Vlhkost dřeva jako vlastnost děleného materiálu a směr, ve kterém je dělen působí společně. Jak naznačuje Graf 6, je zřejmé, že vzájemné působení těchto dvou veličin je statisticky významné, což ukazuje hodnota p = 0,000.

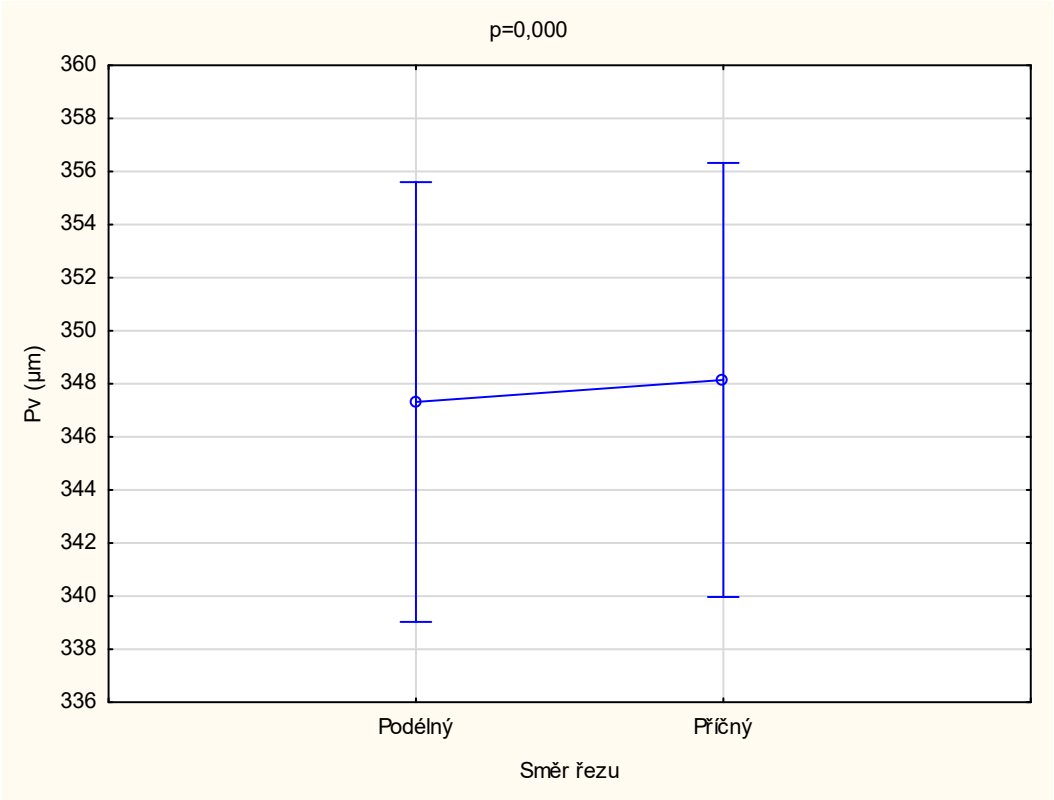
Duncanův test v Tab. 8 prokázal statisticky významné vzájemné působení směru řezu a vlhkosti na Pt.

Tabulka 8: Hodnoty na hladině významnosti p=0,05 dle Duncanova testu

Cell No.	Duncan test; variable Pt					
	Vlhkost	Směr řezu	{1} (273,33)	{2} (232,01)	{3} (185,37)	{4} (154,34)
1	8	Podélný		0,000	0,000	0,000
2	8	Příčný	0,000		0,000	0,000
3	30	Podélný	0,000	0,000		0,000
4	30	Příčný	0,000	0,000	0,000	

7.4 Vliv směru řezu a vlhkosti na PV - řez laserem

7.4.1 Vliv směru řezui na PV

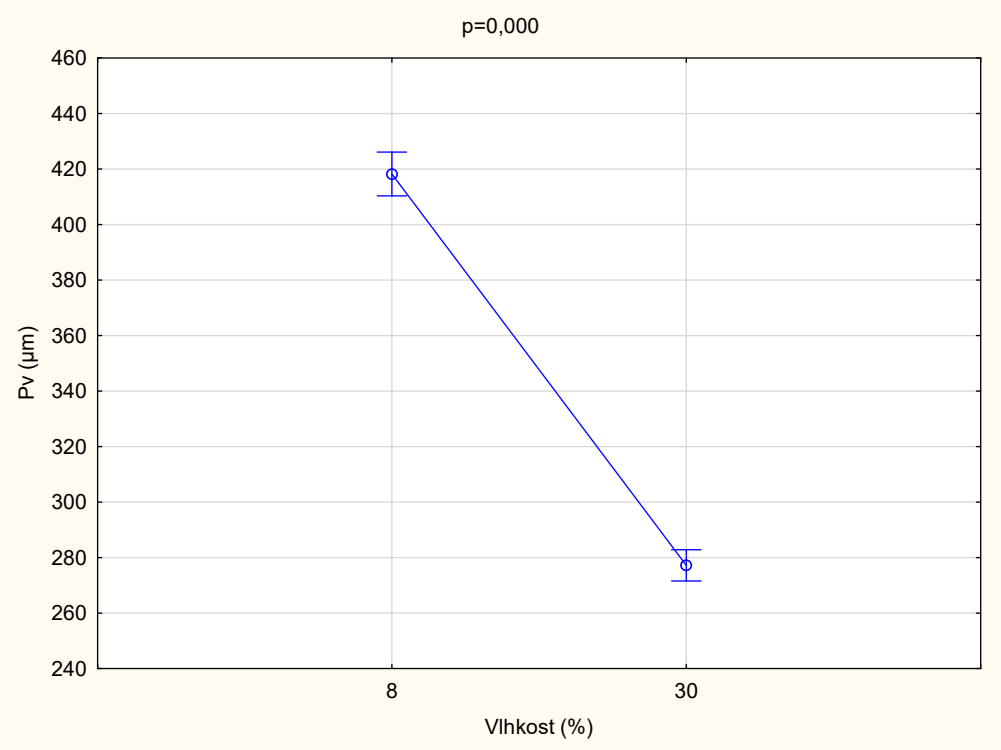


Graf 7: Vliv směru řezu na PV

Metodou ANOVA na hladině významnosti p = 0,05 bylo prokázáno, že PV pro podélný řez je odlišná od řezu v příčném směru. Střední hodnota pro směr příčný a směr podélný je téměř totožná, rozptyl hodnot je však relativně velký. Na hladině významnosti p byl prokázán statisticky významný rozdíl. Viz Graf 7.

Z tohoto grafu je patrné, že pokud je laserovým paprskem dělen materiál v příčném směru, výška profilu je mírně vyšší, řez má tedy mírně nižší kvalitu. Procentuálně vyjádřeno PV je v případě příčného řezu o 0,29% vyšší, než u podélného řezu. Kvalita řezu při příčném dělení se téměř nesníží.

7.4.2 Vliv vlhkosti na PV

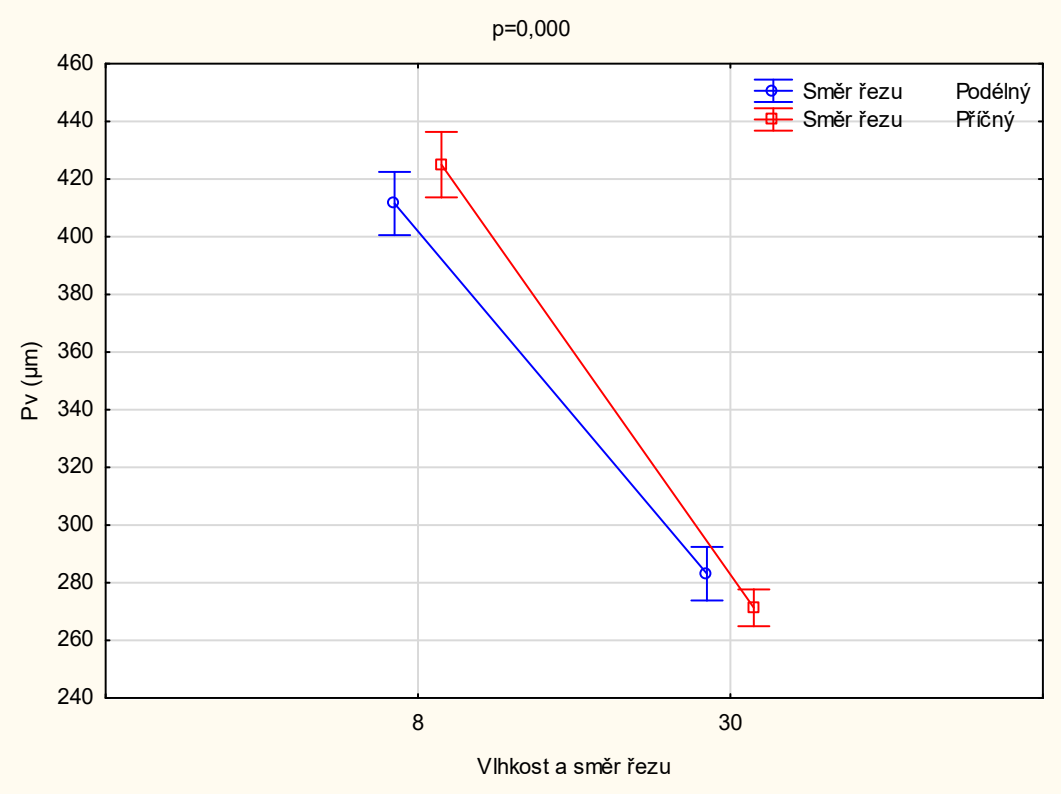


Graf 8: Vliv vlhkosti na PV

Na hladině významnosti p = 0,05 statistickou metodou ANOVA bylo prokázáno, že kvalita řezání dubového dřeva o vlhkosti 30% je rozdílná oproti řezání dřeva o vlhkosti 8%. Vliv rozdílu vlhkosti je statisticky významný.

Vliv vlhkosti materiálu při laserovém dělení je patrný z Grafu 8. Úchylka kolmosti PV je výrazně nižší při řezání při vlhkosti 30% oproti řezání při vlhkosti 8%. Při vlhkosti 30% je hodnota tohoto parametru o 33,81% nižší.

7.4.1 Vliv směru řezu a vlhkosti na PV



Graf 9: Vzájemné působení směru řezu a vlhkosti na PV

Při společném působení vlhkosti materiálu a směru jeho řezu ukazuje Graf 9, že je zřejmý statisticky významný vliv působení těchto dvou veličin, o čemž vypovídá hodnota p = 0,000.

Duncanův test

Tabulka 9 znázorňuje vyhodnocení vzájemného vlivu směru řezu na PV pomocí Duncanova testu. Při porovnání obou směrů řezu při vlhkosti 8 % s oběma směry řezu při vlhkosti 30% můžeme pozorovat statisticky velmi významné působení faktoru směr řezu na R_z. Statisticky významný vliv mezi naměřenými hodnotami nebyl prokázán při porovnání podélného a příčného řezu při vlhkosti 8%, kdy hodnota p je 6,5 x vyšší a při porovnání podélného a příčného řezu při vlhkosti 30%, kdy je hodnota p 7,76 x vyšší, než mez statistické významnosti vlivu 0,05.

Tabulka 9: Hodnoty na hladině významnosti p=0,05 dle Duncanova testu

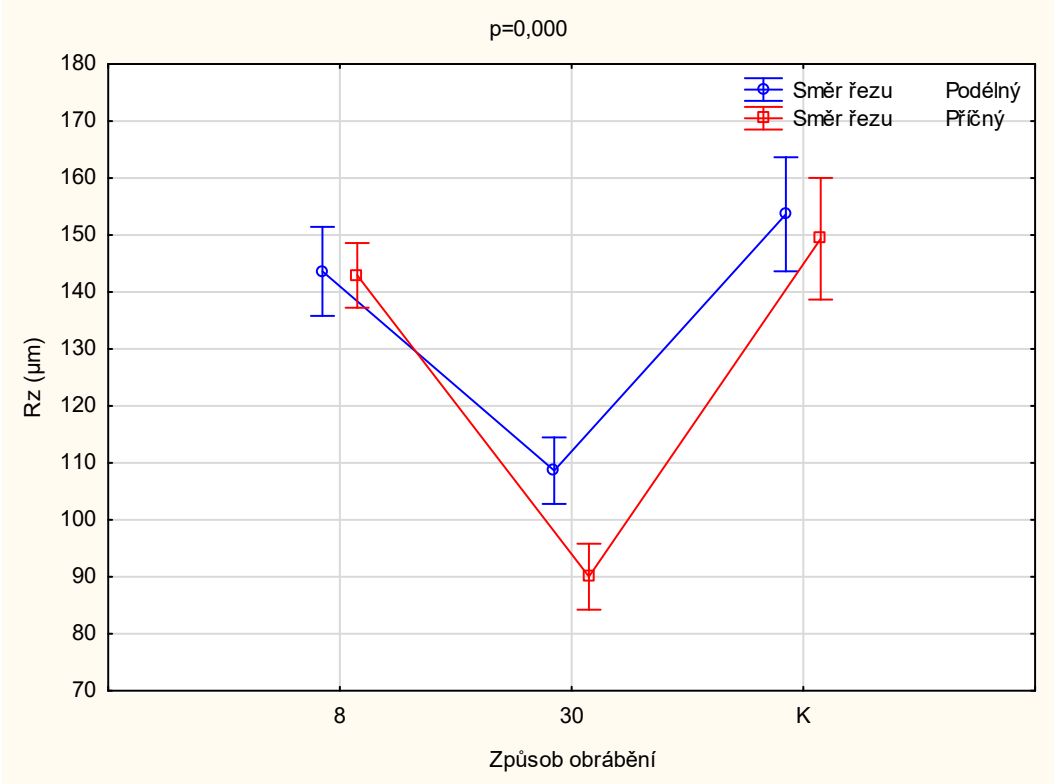
Cell No.	Duncan test; variable PV					
	Vlhkost	Směr řezu	{1} (411,50)	{2} (425,00)	{3} (283,13)	{4} (271,29)
1	8	Podélný		0,325	0,000	0,000
2	8	Příčný	0,325		0,000	0,000
3	30	Podélný	0,000	0,000		0,388
4	30	Příčný	0,000	0,000	0,388	

7.5 Vliv vlhkosti na řez laserem v porovnání s kotoučem

Je nutno podotknout, že pro řez dřeva o vyšší vlhkosti (BNV) nebyly pro účel této práce měřeny žádné hodnoty, protože při těchto vlhkostech se řezání kotoučovou pilou neuvažuje.

V grafech na ose x 8 a 30 = vlhkost při řezu laserem, K = řez kotoučem.

7.5.1 Vliv vlhkosti a směru řezu na Rz

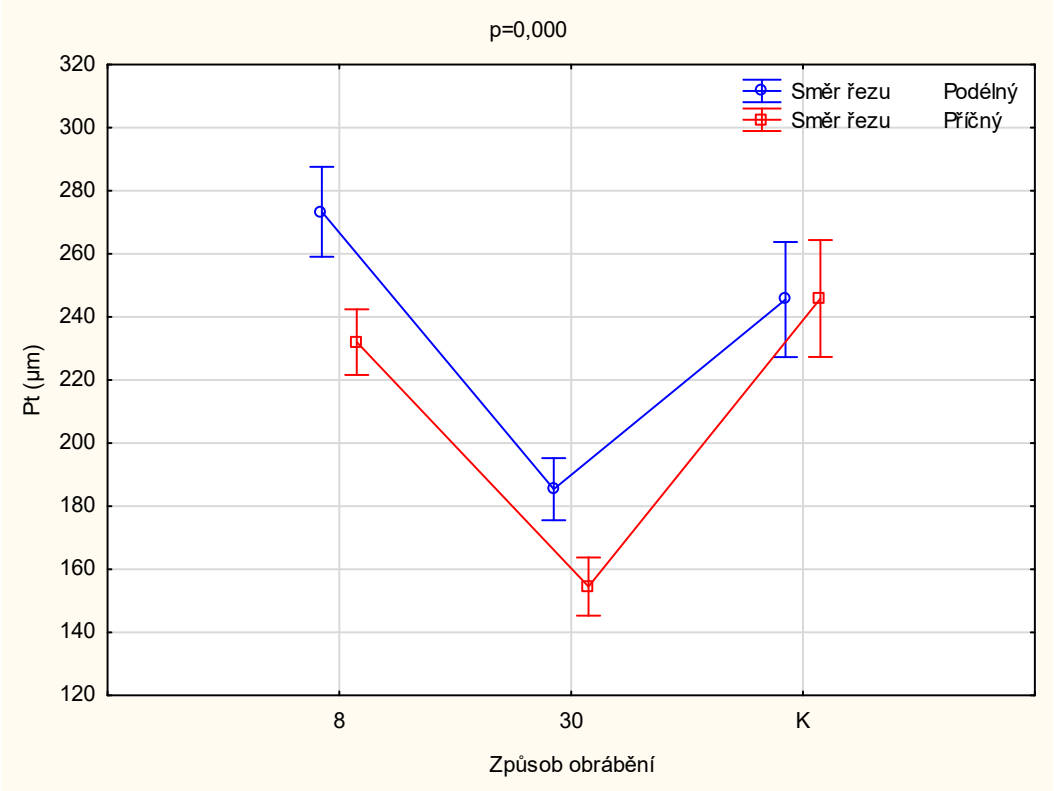


Graf 10: Vliv vlhkosti a směru řezu na Rz

Metodou ANOVA na hladině významnosti p = 0,05 byl prokázán statisticky významný rozdíl.

Hodnoty Rz pro podélný řez jsou podobné Rz řezu v příčném směru. Z Grafu 10 je patrné, že pokud je laserovým paprskem dělen materiál o vlhkosti 30%, největší průměrná výška profilu je nižší, řez má tedy vyšší kvalitu. V případě řezání o vlhkosti 8% má Rz podobné hodnoty u obou způsobů obrábění. Kvalita řezu se zvýší při dělení laserovým paprskem.

7.5.2 Vliv vlhkosti a směru řezu na Pt



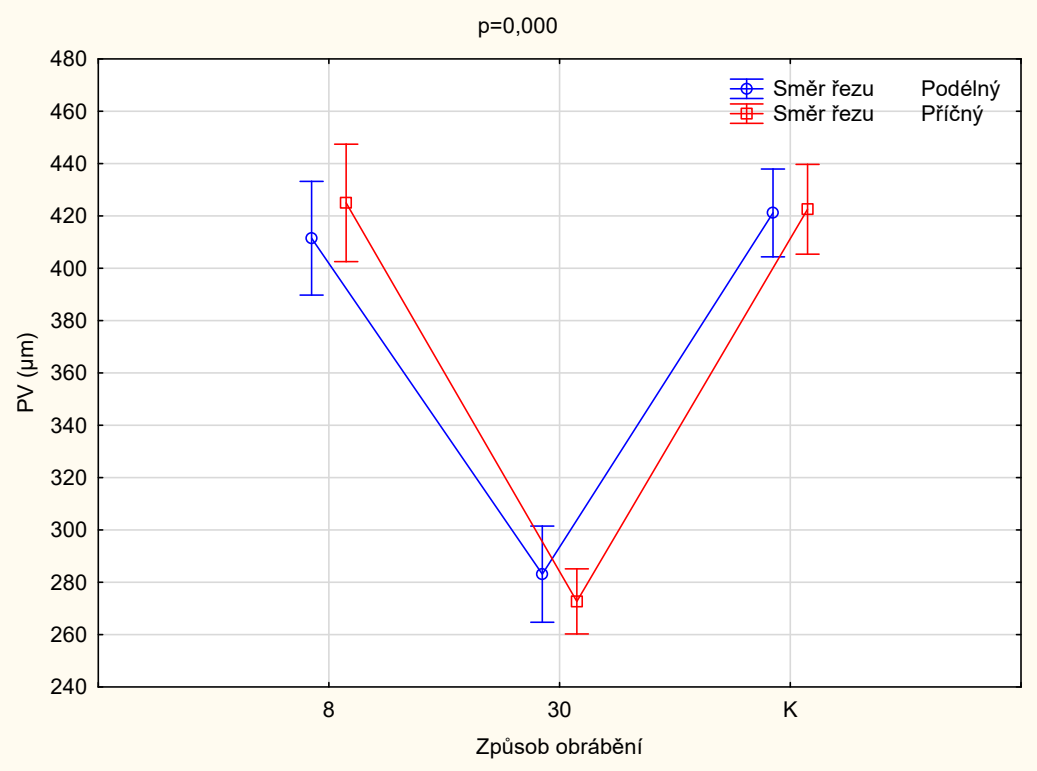
Graf 11: Vliv vlhkosti a směru řezu na Pt

Metodou ANOVA na hladině významnosti p = 0,05 byl prokázán statisticky významný rozdíl.

Pt pro podélný řez je podobná Pt řezu v příčném směru. Z Grafu 11 je patrné, že pokud je laserovým paprskem dělen materiál o vlhkosti 30%, největší průměrná výška profilu je nižší, řez má tedy vyšší kvalitu. V případě řezání o vlhkosti 8% má

Pt podobné hodnoty u obou způsobů obrábění. Kvalita řezu se zvýší při dělení laserovým paprskem.

7.5.3 Vliv vlhkosti a směru řezu na PV



Graf 12: Vliv vlhkosti a směru řezu na PV

Metodou ANOVA na hladině významnosti p = 0,05 byl prokázán statisticky významný rozdíl.

Hodnoty PV pro podélný řez jsou podobné hodnotám PV řezu v příčném směru. Z Grafu 12 je patrné, že pokud je laserovým paprskem dělen materiál o vlhkosti 30%, největší průměrná výška profilu je nižší, řez má tedy vyšší kvalitu. V případě řezání o vlhkosti 8% má PV podobné hodnoty u obou způsobů obrábění. Kvalita řezu se zvýší při dělení laserovým paprskem.

Podobné výsledky týkající se kvality obráběného povrchu vyzkoumal ve své diplomové práci (zkoumal parametry Ra a Wa) (Vališ 2019). V závěrech práce uvádí, že sledované faktory u dřeva dubu vykazovaly cca 30% -ní snížení u vlhkosti BNV oproti vlhkosti 8%. K obdobným výsledkům bylo dospěno i v tomto výzkumu.

7.6 Návrh na použití, případně úpravu normy ČSN EN ISO 9013

Jedním z dílčích cílů této práce je posouzení možností použití normy ČSN EN ISO 9013 pro dělení dřeva, případně materiálů na bázi dřeva. Tato norma, zabývající se tepelným dělením materiálu, blíže neřeší možnost obrábění dřeva technologií laserového paprsku. Uvádí značky včetně popisu jejich významu (viz kapitola 5.1 tabulka 3). Budu věnovat jednotlivým termínům, které norma uvádí a které jsou důležité pro posouzení kvality obrábění dřeva.

V části 1 a 2 norma obsahuje obecné informace.

V části 3 jsou vyjmenovány jednotlivé termíny a definice, které norma popisuje:

skluz (n) - skluz norma definuje jako průmět vzdálenosti mezi dvěma body skluzové rýhy ve směru řezání. Při řezání materiálu laserem se na ploše řezu objevuje rýhování se sklonem opačného směru, než směr řezání (skluzová rýha). Tento jev se vyskytuje při řezání homogenních/izotropních látek. Ve výzkumu byl skluz měřen, ale nijak se neprokázal, protože byl správně zaostřen paprsek a řezná rychlost byla správně nastavena. Při řezání dřeva bych doporučil skluz měřit právě proto, že výskyt skluzových rýh dokazuje nesprávné nastavení parametrů řezného procesu.

úchylka kolmosti nebo úchylka úhlu (u) - jeden z parametrů, kterým je třeba se zabývat. Při měření profilometrem byl tento parametr označen PV. Vyjadřuje vzdálenost mezi dvěma rovnoběžnými přímkami, mezi které je vepsán profil řezu (viz Obrázek 22 v kapitole 5.1). Úchylka úhlu přichází v úvahu v případě šikmého řezu.

výška prvku profilu (Zt) - je součet výšky výstupku a hloubky prohlubně prvku profilu, při měření představuje parametr Pt, je dalším ze sledovaných hodnot, které se u dřeva vyskytují.

průměrná výška prvků profilu (Rz5) - aritmetický průměr z jednotlivých výšek prvků profilu na pěti za sebou následujících délkách (viz Obrázek 21 v kapitole 5.1) - její měření, u profilometru označené Rz, lze doporučit.

natavení horní hrany - vyskytuje se pouze při obrábění kovů

otřep, okuje - vyskytuje se pouze u obrábění kovů

drážkování - pro dřevo není nutné posuzovat, vzhledem k jeho struktuře, která se liší u jednotlivých druhů dřevin. Velikost drážek není měřitelná, respektive nelze s určitostí odlišit takovou drážku od drážky způsobené strukturou dřeva.

Ostatní pojmy (řezání, řez, rychlost řezání, šířka řezné spáry, začátek řezu) řešené v části 3 normy jsou obecné, není třeba je pro obrábění dřeva specifikovat.

V části 5 norma definuje **úchylky tvaru a polohy**. V této práci byla řešena kvalita opracovávaného povrchu, úchylky tvaru a polohy nebyly předmětem vyhodnocování.

V části 6 **Stanovení jakosti povrchu řezu** uvádí norma způsoby měření řezných ploch. Část 6.2.2.2 doporučuje v případě u provádět dvakrát tři měření 20 mm na každý metr řezu. V prováděném výzkumu bylo měřeno vícekrát. V případě Rz_5 jedno měření na každý metr řezu. Dále je stanoven v části 6.2.3 postup měření. Na rozdíl od normy probíhalo měření Rz ve směru průchodu laserového paprsku materiálem a to z toho důvodu, že byly zaznamenány vyšší hodnoty. Norma na kvalitu sama určuje měření tam, kde jsou předpokládány nejvyšší hodnoty drsnosti. Kromě vlastní hodnoty Rz tím mohlo být posouzeno, jestli bylo při řezání použito optimální nastavení hloubky ohniska paprsku v obráběném materiálu.

Část 7 **Jakost povrchu řezu** je z hlediska veličin zkoumaných v této práci nejdůležitější. Podle normy je jakost povrchu řezu představována již popsanými veličinami u a Rz. Stanovuje tzv. toleranční pole pro u a Rz. (Tabulky 10 a 11).

Toleranční pole je jednou z částí označení jakosti zpracovávaného kusu na výkresu (podrobněji v části 10 normy). Naměřené hodnoty byly zařazeny do tolerančních polí u a Rz dle normy, rozpětí nebylo nijak upravováno.

Tabulka 10: Toleranční pole u (ČSN EN 9013)

Toleranční pole	**Úchylka kolmosti nebo úhlová úchylka**, *u* mm
1	0,05 + 0,003 *a*
2	0,15 + 0,007 *a*
3	0,4 + 0,01 *a*
4	0,8 + 0,02 *a*
5	1,2 + 0,035 *a*

Tabulka 11: Toleranční pole Rz (ČSN EN 9013)

Toleranční pole	**Průměrná výška prvků profilu**, *Rz*5 µm
1	10 + (0,6 *a* mm)
2	40 + (0,8 *a* mm)
3	70 + (1,2 *a* mm)
4	110 + (1,8 *a* mm)

Toto rozdělení (Tab.12) bylo provedeno dle rozptylů hodnot uvedených v normě, která však zohledňuje především dělení kovů. Proto hodnoty zařazením do těchto tabulek dosáhly pole 3 nebo 4. Těchto hodnot bylo dosaženo v případě zkoumání dubového dřeva. Vzhledem k různé struktuře různých druhů dřevin lze předpokládat i jejich odlišné reakce na tepelné zpracování, což by bylo vhodné ověřit dalšími výzkumy. To však nebylo cílem této práce.

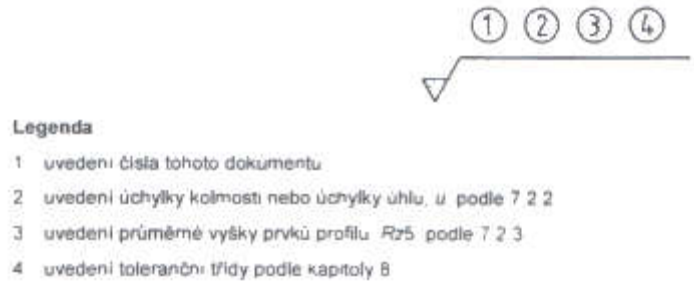
Tabulka 12: Toleranční pole u, Rz pro podélný a příčný řez

Vzorek	Vlhkost	Toleranční pole **u** **podélný řez**	Toleranční pole **u** **příčný řez**		Toleranční pole **Rz** **podélný řez**	Toleranční pole **Rz** **příčný řez**
21	BNV	3	3		3	3
22	BNV	3	3		3	3
23	BNV	3	3		3	3
24	BNV	3	3		4	3
25	BNV	3	3		3	2
26	BNV	3	3		3	3
27	BNV	3	3		3	3
28	BNV	3	3		3	3
29	BNV	3	3		3	2
30	BNV	3	3		4	3
31	BNV	3	3		3	3
32	BNV	3	3		3	2
33	BNV	3	3		4	3
34	BNV	3	3		3	3
35	BNV	4	3		3	3
36	BNV	3	3		3	4
37	BNV	3	3		4	4
38	BNV	3	3		4	4
39	BNV	3	3		4	3
40	BNV	3	3		4	4
21	8%	4	4		4	4
22	8%	3	4		4	4
23	8%	3	4		4	4
24	8%	3	4		4	4
25	8%	4	3		4	4
26	8%	4	3		4	4
27	8%	4	3		4	4
28	8%	3	4		4	4
29	8%	3	4		4	4
30	8%	4	3		4	4
31	8%	3	3		4	4
32	8%	4	3		4	4
33	8%	4	3		4	4
34	8%	4	4		4	4
35	8%	3	4		4	4
36	8%	3	4		4	4
37	8%	3	4		3	4
38	8%	4	3		4	4
39	8%	3	4		4	4
40	8%	3	4		4	4
Průměr	BNV	3,05	3		3,35	3,05
Průměr	8%	3,1	3,05		3,4	3,1

Část 8 **Rozměrové úchylky** obsahuje informace o požadavcích na rozměry zpracovávaných dílů. Rozděluje úchylky rozměrů do dvou tříd, na úchylky pro díly bez nebo s dodatečným opracováním. Pro dodatečná opracování určuje přídavek na opracování, opět pro kovové materiály. Stanovení těchto hodnot nebylo cílem této práce.

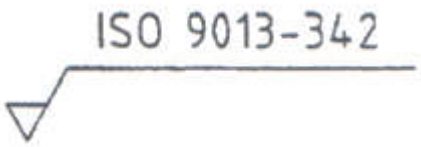
Část 9 **Označení** stanovuje správné označení prvku vytvořeného tepelným řezem. Např. Tepelný řez ISO 9013-312:2017 (podrobněji v části 10 normy).

Část 10 **Údaje v technické dokumentaci** určuje podrobně, jak má být uveden stupeň jakosti a toleranční třída pro jednotlivý zpracovávaný kus. (Obr. 32)



Obrázek 30:Značení dílu na výkresu (ČSN EN 9013)

Příklad označení (Obr. 33)



Obrázek 31: Příklad označení (ČSN EN 9013)

Další části normy - přílohy jsou pouze informativní a pro posouzení použití při obrábění dřeva nejsou důležité.

7.7 Diskuze

Výzkumu obrábění dřeva laserovým paprskem se zabývalo již mnoho autorů.

Barnekov et al. (1996) uvádí, že nejvíce laserů pro řezání je navrženo tak, aby generovaly výstupní laserový paprsek v Gaussově rozložení distribuce energie, tedy byl v módu TEM_{00}.

Vališ (2019) zkoumal vliv řezání dřeva laserem na Ra a Wa a zjistil, že kvalita povrchu z hlediska jím zjišťovaných parametrů se zlepšila až o 30 % u dubového dřeva. U dřeva bukového tomu bylo naopak, z čehož lze usuzovat, že na jakost povrchu řezu má neméně významný vliv i druh dřeviny. Tyto rozdíly jsou zřejmě způsobeny různou stavbou různých dřevin.

Sikora (2016) ve své diplomové práci, kde zkoumal změnu kontaktního úhlu při smáčení kapalinou, říká, že kromě chemického složení dřeva má i drsnost povrchu velký vliv na absorpci kapaliny. Z toho můžeme usoudit, že zlepšení kvality povrchu řezu laserem při vlhkosti blízké BNV bude mít vliv i na smáčitelnost povrchu.

Hernández (2011) uvádí, že byla prokázána zvýšená spotřeba energie při řezání laserem u vlhkého dřeva, oproti dřevu vysušenému - energetická náročnost roste s rostoucí vlhkostí.

Z toho, co bylo prokázáno v diplomové práci a při srovnání s dalšími výzkumy, můžeme vyvodit výsledky, které poukazují na to, že z hlediska kvality je nejlepší řezat dřevo laserem při zvýšené vlhkosti, což má za následek i nižší možnost absorbovat kapalinu. Pokud však horší výsledná kvalita dostačuje, bylo by lepší řezat laserem vysušené dřevo, kdy bude nižší spotřeba elektrické energie. Je důležité vědět, jakou kvalitu musí mít výsledný produkt, abychom podle toho optimalizovali výrobu a technicko-technologické parametry obráběcího stroje.

8 Závěr

Laserové obrábění dřeva je podle mého názoru, progresivní technologií, ke které se bude muset provést ještě velké množství výzkumů. Výzkum provedený v rámci této diplomové práce se zaměřil na vliv vlhkosti řezaného materiálu na výslednou kvalitu obrobené plochy. Je možno konstatovat, že obrábění dřeva technologií laserového paprsku je nejen možné, ale zejména při vyšších vlhkostech velmi vhodné z hlediska kvality. Vlhkost na úrovni BNV i vyšší není pro laserový paprsek omezením, jako je tomu u kotoučové pily.

Vyšší vlhkost pozitivně ovlivňuje kvalitu řezné plochy u zkoumané dřeviny, kterou byl dub. Tento ceněný materiál je vzhledem k maximálnímu využití a minimalizaci odpadu vhodné obrábět laserem. Nelze opominout ani skutečnost, že na rozdíl od konvenčních způsobů řezání dřeva není laserový paprsek omezen na přímé řezy, což významně zvyšuje výtěž.

8.1 Přínos pro vědu

Výzkum vlivu řezu laserovým paprskem na kvalitu povrchu řezných ploch je jen částí všech vlivů, které na dřevo působí při tomto způsobu obrábění. Jistě je mnoho dalších oblastí, které je třeba vyzkoumat a tato práce by mohla k objasnění celé problematiky přispět. Je součástí uceleného výzkumu, který se zabývá laserovým obráběním a nejen vlivem na kvalitu, ale i na změnu fyzikálních a mechanických vlastností takto obráběného dřeva.

8.2 Přínos pro praxi

Prokázáním výhod řezání laserem oproti klasické metodě řezání pilovým kotoučem může být podnětem k zamyšlení, není-li vhodné zavést tuto metodu namísto klasické. Jistě je zde otázka ekonomiky takové technologie, protože rozdíl mezi pořizovací cenou kotoučové pily a stroje dělícího materiál laserem je velký. Dále je důležité se zamyslet nad spotřebou elektrické energie, která roste s rostoucí vlhkostí řezaného dřeva (Hernández-Castañeda, J. C., 2011). Vždy je nutné zvážit,

jaký druh technologie zvolené pro zamýšlenou výrobu je nejvhodnější. Nelze se soustředit pouze na jednu výhodu, protože do procesu obrábění vstupují ještě další faktory ovlivňující finální cenu jako je energetická náročnost, náklady na sušení apod. Důležité je tedy brát v úvahu všechna hlediska a poté rozhodnout, kterou technologii zvolit. Řezání laserem je však stále ještě ve vývoji a jak už to bývá, cena všeho nového stále klesá a věřím, že není daleko doba, kdy bude takovéto zařízení vybavením téměř každé provozovny. Dovedu si představit i situace, kdy nebudou negativní vlivy laserového řezání jako je například zuhelnatění povrchu řezu na závadu. Např. při změně kontaktního úhlu, což se nám promítne do vlastnosti povrchu absorbovat vodu. Podle výzkumu (Sikora, A. 2017), který tvrdí, že s nižší drsností se zvyšuje kontaktní úhel, z čehož můžeme vyvodit, že náš materiál řezaný při vlhkosti blízké BNV bude méně absorbovat kapalinu.

9 Seznam literatury

BALABÁN K. *Nauka o dřevě, 1. část, Anatomie dřeva.* Státní zemědělské nakladatelství, Praha, 1955.

BARCAL, J. *Nekonvenční metody obrábění*. Praha: ČVUT, 1989.

BARCÍK, Štefan. *Dřevoobráběcí nástroje - údržba a provozování: vysokoškolská učebnice*. Praha: Powerprint, 2013. ISBN 978-80-87415-80-1.

BARNEKOV, V, H.A. HUBER a C.W. MCMILLIN. Factors influencing laser cutting of wood. *Forest Products Journal*. 1996, 1996(1), 55–58.

BÖHM, Martin, Jan REISNER a Jan BOMBA. *Materiály na bázi dřeva*. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, Fakulta lesnická a dřevařská, Katedra zpracování dřeva, 2012. ISBN 978-80-213-2251-6.

BRYM, Radek. *Trendy vývoje obrábění vodním paprskem.* Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. 2008

CSANÁDY, E. a MAGOSS, E.; Mechanics of Wood Machining; Springer 2013; s 202; ISBN 978-3642299544

GAFF, M.; GÁBORÍK, J. Vlastnosti povrchu dreva modifikovaného reliéfovaním. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene. 2009. 81 s. ISBN 978-80-228-2035-6.

GAFF, Milan a Lukáš KAPLAN. Vliv posuvné a řezné rychlosti na kvalitu obrábění. *Dřevařský magazín*. 2016, 2016(3).

HAVELKOVÁ, M.; HIKLOVÁ, H. *Mapování povrchu pevných těles se zaměřením na kontaktní profilometrii*. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2014, 48 s. Ediční řada - Studijní opora. ISBN 978-80-244-4043-9

HERNÁNDEZ-CASTAÑEDA, Juan Carlos. *Optics and Lasers in Engineering*. Elsevier, 2011. ISSN 0143-8166.

HORÁČEK, Petr. *Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva I*. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 2008.

HUMÁR, A. *Technologie I, technologie obrábění – 3. část* [online]. Brno, 2005, [cit. 2020-03-10]. Dostupné z: <http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/Dokoncovaci_a_nekonvencni_metody_obrabeni/TI_TO-3.cast.pdf>.

Katalog produktů. Hulín: PILANA Wood, 2015.

KLEMENT, Ivan a Juraj DETVAJ. *Technológia prvostupňového spracovania dreva: [vysokoškolská učebnica]*. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2007. ISBN 978-80-228-1811-7.

KMINIAK, Richard. *Vplyv konštrukcie pílového kotúča na kvalitu vytvoreného povrchu při priečnom pílení smrekového reziva na kapovacej pokosovel píle*. ACTA FACULTATIS XYLOLOGIAE ZVOLEN. Zvolen: Vydavateľstvo Technickej univerzity vo Zvolene, 2014, 56(2): 87-96.

LISIČAN, J. *Teória a technika spracovania dreva*. 2. vyd. Zvolen: MATCENTRUM. 1996. 626 s. ISBN 80-967315-6-4.

MAŇKOVÁ, Ildikó. *Progresívne technológie: Advanced methods of material removal*. Košice: Vienala, 2000. ISBN 80-7099-430-4.

NUTSCH, W. a kolektiv. *Příručka pro truhláře*. 1. vydání, Praha: Sobotáles, 1999. ISBN 80-85920-60-3

PEXA, Bohumír. *Dřevo a technologie jeho zpracování*. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1976.

POWEL, J.: CO_2 Laser Cutting - Notes for Jobshops: CO2 laser cutting of wood-based products. The Industrial Laser User. June 2002, Nr. 27,

POŽGAJ, Alexander, Dušan CHOVANEC, Stanislav KURJATKO a Marián BABIAK. *Štruktúra a vlastnosti dreva*. Bratislava: Príroda, 1993. ISBN 80-07-00600-1.

PROKEŠ, Stanislav. *Obrábění dřeva a nových hmot ze dřeva*. 2., přeprac. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1978.

ŘASA, Jaroslav, Přemysl POKORNÝ a Vladimír GABRIEL. *Strojírenská technologie 3*. 2. vyd. Praha: Scientia, 2005. ISBN 80-718-3336-3.

ŘASA, J., KEREČANINOVÁ, Z. Nekonvenční metody obrábění. [online], kód článku: 070710. [cit. 2020-03-06]. Dostupné z WWW: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni >.

SARVAŠOVÁ KVIETKOVÁ, Monika. *Obrábění dřeva*. V Praze: Česká zemědělská univerzita, Fakulta lesnická a dřevařská, 2015. ISBN 978-80-213-2604-0.

SIKLIENKA, Mikuláš a Richard KMINIAK. *Delenie a obrábanie dreva*. Technická univerzita vo Zvolene, 2013. Skriptum. Technická univerzita vo Zvolene.

SIKORA, A. 2016. *Vliv urychleného stárnutí na kvalitu povrchové úpravy dřeva upraveného nátěrovými látkami.* Diplomová práce. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene. Drevárská fakulta. 2016. 78 s.

SVOBODA, Luboš. *Stavební hmoty (volně dostupná elektronická kniha)*. 4. vyd., Praha 2018. Dostupné online. ISBN 978-80-260-4972-2. [cit. 2020-03-06].

VALIŠ, Michal. *Vliv řezání laserovým paprskem na změnu drsnosti řezaných ploch laserem v porovnání s řezáním pilovým kotoučem*. Praha, 2019. Diplomová práce. ČZU FLD, Praha. Vedoucí práce Doc. Ing. Milan Gaff, PhD.

VANIN, Stepan Ivanovič. *Nauka o dřevě*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1955. Řada dřevařské a papírenské literatury.

10 Elektronické zdroje

http://lasery.wz.cz/polovodicove_lasery.html [online]. [cit. 2020-03-06].

http://solicad.com/i/detailni-popis-funkci-programu-sprutcam/c/sprutcam-detaily/g/sprutcam-info?page=9 [online]. [cit. 2020-03-06].

http://www.directindustry.com/soc/biateclaser-technology-s-r-o-182215.html [online]. [cit. 2020-03-06].

http://www.lt.cz/e-learning/laser/princip-co2-laseru [online]. [cit. 2020-03-06].

http://www.n-i-s.cz/cz/fyzikalni-a-mechanicke-vlastnosti-dreva/page/317/ [online]. [cit. 2020-03-06].

http://www.pilana.cz/cz/nastrojova-poradna-pilove-kotouce-pasy-a-listy-na-rezani-dreva [online].[cit. 2020-03-06].

http://www.pilana.cz/cz/pilove-kotouce-na-rezani-dreva-a-kovu[online].[cit. 2020-03-06].

http://www.pilanawood.cz/cz/nastrojova-poradna-pilove-kotouce-pasy-a-listy-na-rezani-dreva [online].[cit. 2020-03-06].

http://www.pilove-kotouce.eu/Jak-spravne-vybrat-pilovy-kotouc/[online]. [cit. 2020-03-06].

https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/ [online]. [cit. 2020-03-06].

https://is.mendelu.cz/eknihovna/opory/zobraz_cast.pl?cast=9177;lang=cz [online]. [cit. 2020-03-06].

https://lesycr.cz/drevo/charakteristika-dreva-jednotlivych-drevin/dub/ [online]. [cit. 2020-03-06].

https://www.cez.cz/edee/content/microsites/laser/laser.htm [online]. [cit. 2020-03-06].

https://www.eppi.cz/napoveda/laboratorne-vytvorene-drahokamy#lA [online].[cit. 2020-03-06].

https://www.flowwaterjet.cz/Prectete-si-vice/Jak-funguje-vodni-paprsek.aspx#pure [online]. [cit. 2020-03-06].

https://www.hoechsmann.com/cz/article/64795/ramova_pila_katr/mohringer_es_775.html [online]. [cit. 2020-03-06].

https://www.lesprom.com/en/members/Biatec_Laser_Technology_40467/press-releases/Laser_introduces_a_new_era_in_wood_processing_1953/ [online]. [cit. 2020-03-06].

https://www.mezistromy.cz/vlastnosti-dreva-a-drevostaveb/[online]. [cit. 2020-03-06].

https://www.panas.cz/katalog/class/produkt/si-300-class#anchorage [online]. [cit. 2020-03-06].

https://www.simek.eu/drevoobrabeci-stroje/pily-na-drevo/formatovaci-pily/ online]. [cit. 2020-03-06].

https://www.taylor-hobson.com/ [online]. [cit. 2020-03-06].

11 Technické normy

ČSN 91 3001 *Nábytek pro venkovní použití – zahradní nábytek – technické požadavky.* Praha: Český normalizační institut, 2008.

ČSN 91 0001 *Dřevěný nábytek - Technické požadavky*. Praha: Český normalizační institut, 2007.

ČSN EN ISO 9013 Tepelné dělení - Klasifikace tepelných řezů - Geometrické požadavky na výrobky a úchylky jakosti řezu. Praha: Český normalizační institut, 2019.

ČSN EN ISO 4287. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda – Termíny, definice a parametry struktury povrchu*. Praha: Český normalizační institut, 1999. 24 s.

ČSN EN ISO 4288. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda – Pravidla a postupy pro posuzování struktury povrchu*. Praha: Český normalizační institut, 1999. 16 s.

ČSN EN ISO 9013. *Tepelné dělení - Klasifikace tepelných řezů - Geometrické požadavky na výrobky a úchylky jakosti řezu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2019.

ČSN EN 322: Dosky z dreva. Zisťovanie vlhkosti. Praha: Český normalizační institut, 1994.