

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta lesnická a dřevařská

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů



Obrábění vybraných druhů materiálů paprskem laseru

Bakalářská práce

Autor: Danil Teterin

Vedoucí práce: doc. Ing. Monika Sarvašová Kviětková, PhD.

2020

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta lesnická a dřevařská

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Danil Teterin

Dřevařství

Podnikání ve dřevozpracujícím a nábytkářském průmyslu

Název práce

Obrábění vybraných druhů materiálů paprskem laseru

Název anglicky

Machining selected types of materials by laser beam

Cíle práce

Cílem bakalářské práce je charakteristika nekonvenčních metod obrábění. Jejich rozdělení a následně přiblížení metody obrábění paprskem laseru. Zaměříme se na řezání vybraných druhů masivního dřeva a materiálů na bázi dřeva (dřevotřískové a polotvrdé dřevovláknité desky) za pomoci tohoto způsobu obrábění.

Metodika

Vytvoření literární rešerše, která bude zaměřena na teoretický rozbor metody obrábění laserem. Historie a rozdělení laserů. Přiblížení problematiky z pohledu použitých materiálů jako rostlého dřeva tak i materiálů na bázi dřeva. Popsání změn zaměřených na změnu barvy, lesku a kvality povrchu po řezání laserem.

Doporučený rozsah práce

40-50 stran

Klíčová slova

laser, technologie obrábění, materiál, drsnost, lesk, barva

Doporučené zdroje informací

BEER, P. Niekonwencjonalne narzedzia do obróbki drewna. Poznań, Wydawnictwo Akademii Rolniczej. 2007. s. 58-70. ISBN 978-83-7160-445-4.

CARISTAN, Ch. L. Laser cutting guide for manufacturing. 1 th ed. Michigan: SME. 2004. 447 s., ISBN 978-0-87263-686-6.

GANDELOVÁ, L., HORÁČEK, P., ŠLEZINGEROVÁ, J. Nauka o dřevě. 1.vyd. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 1996. 176s. ISBN 80-7157-194-6.

JOSTEN, E., REICHE, T., WITTCH, B., Dřevo a jeho obrábění. Průvodce truhláře, přel. Friess, F., Šedivka, P., Zeidler, A., 1. vydání, Praha: Grada Publishing, 2010. ISBN 978-80-247-2961-9.

SARVAŠOVÁ KVIETKOVÁ, M. SEDLECKÝ, M. Stroje a zařízení pro zpracování dřeva I. CARTER Praha. 2019. 98 s., ISBN 978-80-213-2982-9.

STELLMAN, D. S. a kol. Cancer Mortality and Wood Dust Exposure Among Participants in the American Cancer Society Cancer Prevention Study-II (CPS-II). American Journal of Industrial Medicine. Vol. 34, Iss. 3. Sept. 1998. p. 229-237. ISSN 1097-0274.

Předběžný termín obhajoby

2019/20 LS – FLD

Vedoucí práce

doc. Ing. Monika Sarvašová Kvietková, PhD.

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 04. 03. 2020

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Obrábění vybraných druhů materiálů paprskem laseru** vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Moniky Sarvašové Kvietkové, PhD. a použil jen prameny, které uvádím v seznamu použitých zdrojů.

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

V Praze dne:

Podpis autora

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Monice Sarvašové Kvietkové PhD. a konzultantovi Ing. Tomáši Kytkovi za pomoc, odborné rady a cenné informace při vedení práce.

Dále bych rád poděkoval kolektivu LZB FLD ČZU. Velký dík patří také mé rodině a přátelům za jejich podporu a pomoc.

Abstrakt

Bakalářská práce je zaměřena na charakteristiku nekonvenčních metod obrábění. Jejich rozdělení a následně přiblížení metody obrábění paprskem laseru. Práce je zaměřena na řezání vybraných druhů masivního dřeva a materiálů na bázi dřeva (dřevotřískové a polotvrdé dřevovláknité desky) za pomoci tohoto způsobu obrábění.

Práce je rozdělena na dvě části, teoretickou a praktickou. První část se zabývá historií vývoje laseru, popisem jeho součástí, fyzikálními jevy a popisem použitých materiálů. Druhá část je věnovaná řezání zkušebních materiálů při výkonu laseru: 70 %, 80 %, 90 % a rychlosti posuvu laseru: 3 mm.s⁻¹, 6 mm.s⁻¹, 9 mm.s⁻¹, měřením barvy, lesku a kvality povrchu na zkušebních tělesech, zhodnocení výsledků měření a přínosem pro vědu a praxi. Z výsledků vyplývá, že obráběním laserovým paprskem při výkonu laseru: 70 %, 80 %, 90 % a rychlosti posuvu laseru 3 mm.s⁻¹, 6 mm.s⁻¹, 9 mm.s⁻¹ není vhodné pro aglomerované materiály na bázi dřeva, především pro dřevovláknitou desku se střední hustotou a dřevotřískovou desku. Avšak, z hlediska barvy, je vhodné pro materiál „smrk ztepilý“ kombinace výkonu laseru 70 % a rychlost posuvu laseru 9 mm.s⁻¹. Z hlediska zkoumání lesku je vhodná a doporučena kombinace pro materiál „dub zimní“ při parametrech nastavení výkon laseru 80 % a posuvná rychlost laseru 9 mm.s⁻¹. Z hlediska kvality povrchu měl nejlepší výsledek testovaný materiál „dřevotřísková deska“, při nastavení výkonu laseru 90 % a posuvné rychlosti laseru 9 mm.s⁻¹. Zde je potřeba říct, že nízké rychlosti posuvu laseru, jako 3 mm.s⁻¹ nebo 6 mm.s⁻¹ začínají ničit materiál, respektive začínají hořet. Proto není nízká posuvná rychlost laseru pro materiál „dřevotřísková deska“ doporučena.

Klíčová slova

Laser, technologie, obrábění, materiál, drsnost, lesk, barva

Abstract

The bachelor thesis is focused on the characteristics of unconventional machining methods. Their distribution and subsequent approach to the laser beam machining method. The work is focused on cutting selected types of solid wood and wood-based materials (chipboard and semi-hard fiberboard) using this method of machining.

The work is divided into two parts, theoretical and practical. The first part deals with the history of laser development, a description of its component, physical phenomena and a description of the materials used. The second part is devoted to cutting test materials at laser power: 70 %, 80 %, 90 % and laser feed rate: 3 mm.s⁻¹, 6 mm.s⁻¹, 9 mm.s⁻¹, measurements on paint test specimens, gloss, surface quality, evaluation of measurement results and benefits for science and practice. The results show that laser beam machining at laser power: 70 %, 80 %, 90 % and laser feed rate: 3 mm.s⁻¹, 6 mm.s⁻¹, 9 mm.s⁻¹ are not suitable for agglomerated materials wood-based, especially for medium-density fiberboard and particleboard. However, in terms of color, a combination of a laser power of 70 % and a laser feed rate of 9 mm.s⁻¹ is suitable for spruce material. From the point of view of the examined gloss, a combination for winter oak material with laser setting parameters of 80% laser power and laser sliding speed of 9 mm.s⁻¹ is suitable and recommended. In terms of surface quality, the best result was the tested material – chipboard, with a laser power setting of 90 % and a laser feed rate of 9 mm.s⁻¹. Here it is necessary to say that low laser feed rates, such as 3 mm.s⁻¹ or 6 mm.s⁻¹, start to destroy the material or start to burn. Therefore, a low laser feed rate for chipboard material is not recommended.

Key words

Laser, technology, machining, material, roughness, gloss, color

Obsah

1. Úvod.....	11
2. Cíle práce.....	12
3. Nekonvenční metody obrábění	13
3.1 Základní rozdělení nekonvenčních metod obrábění.....	14
4. Historický vývoj laserů	14
4.1 Nejdůležitější mezníky z historie vzniku laseru.....	16
5. Princip laseru	16
5.1 Fyzikální základy laseru	17
5.2 Absorbování.....	18
5.3 Spontánní emise	20
5.4 Stimulovaná emise.....	21
5.5 Části laseru.....	22
5.6 Druhy laserů	22
6. CO ₂ laser.....	23
7. Pomocný plyn	24
8. Řezání dřeva laserem	25
8.1 Smrk ztepilý – <i>Picea abies</i>	26
8.2 Dub zimní – <i>Quercus petraea</i>	26
9. Použité materiály na bázi dřeva	28
9.1 Dřevotřísková deska (DTD).....	29
9.2 Dřevovláknité desky se střední hustotou (MDF)	30
10. Metodika.....	32
10.1. Výběr a příprava zkušebních vzorků	32
10.1.1 Výroba vzorků	32
10.1.2 Výroba vzorků z aglomerovaných kompozitních materiálů.....	34

10.1.3 Výroba vzorků z masivního dřeva	36
10.2 Metodický postup zkoušek.....	38
10.3 Průběh zkoušek.....	38
11. Výsledky.....	43
11.1 Výsledky měření barvy.....	43
11.2 Výsledky měření lesku.....	44
11.3 Výsledky měření kvality povrchu	45
11.4 Zhodnocení výsledků.....	46
12. Diskuse	47
13. Přínos pro vědu	48
14. Přínos pro praxi.....	49
15. Závěr	51
16. Seznam literatury a použitých zdrojů.....	53
17. Seznam příloh	55

Seznám obrázků

Obrázek 1 Základní rozdělení nekonvenčních metod obrábění	14
Obrázek 2 Rubínový laser	15
Obrázek 3 Záření běžného zdroje světla a laseru	17
Obrázek 4 Absorpce a emise energie	18
Obrázek 5 Schematické znázornění tří procesů: absorpce; spontánní emise; stimulovaná emise.....	19
Obrázek 6 Spontánní emise.....	21
Obrázek 7 Stimulovaná emise	21
Obrázek 8 Schémata laserového zařízení.....	22
Obrázek 9 Druhovú skladba lesů v ČR	25
Obrázek 10 Smrk	26
Obrázek 11 Mikroskopická stavba smrkového dřeva – tangenciální řez.....	26

Obrázek 12 Dub.....	27
Obrázek 13 Tangenciální řez dubového dřeva pod mikroskopem	28
Obrázek 14 Dřevotřísková deska (DTD)	30
Obrázek 15 Dřevovláknitá deska se střední hustotou (MDF)	31
Obrázek 16 Kotoučová formátovací pila SCM si 400 Class.....	32
Obrázek 17 Gravírovací a řezací CO2 laser Numco C 1290	34
Obrázek 18 Ukázka vzorků MDF po řezání.....	35
Obrázek 19 Ukázka vzorků MDF, který laser neprořízne	35
Obrázek 20 Ukázka vzorku DTD po řezání	36
Obrázek 21 Ukázka vzorků smrků po řezání	37
Obrázek 22 Ukázka vzorků smrků, který laser neprořízne.....	37
Obrázek 23 Příklad vzorků dubů, který laser neprořízne	38
Obrázek 24 Spektrofotometr CM 400d.....	39
Obrázek 25 Šablona pro měření barvy.....	39
Obrázek 26 Barevný prostor CIELAB	40
Obrázek 27 Tři základní úhly	41
Obrázek 28 Leskoměr	41
Obrázek 29 Profiloměr.....	42
Obrázek 30 Vyhodnocení parametru barvy "L"	44
Obrázek 31 Vyhodnocení lesku při úhlu 60°	45
Obrázek 32 Vyhodnocení kvality povrchu.....	46
Obrázek 33 Výsledek měření barvy při parametru „a“	57
Obrázek 34 Výsledek měření barvy při parametru „b“.....	58
Obrázek 35 Výsledek měření lesku při úhlu 20°	59
Obrázek 36 Výsledek měření lesku při úhlu 85°	60
Obrázek 37 Výsledek měření kvality povrchu na vzdálenosti 3 mm	61
Obrázek 38 Výsledek měření kvality povrchu na vzdálenosti 6 mm	62
Obrázek 39 Výsledek měření kvality povrchu na vzdálenosti 12 mm	63

Seznám tabulek

Tabulka 1 Technické parametry	33
Tabulka 2 Technická data	56

1. Úvod

V historii mělo ovládnutí nové formy energie významný vliv na zlepšení kvality lidského života. Snadno se dá za významný krok ve vývoji lidstva označit objev laseru, tedy velkého množství soustředěné a kontrolované energie, která je nám dnes k dispozici jako nová forma energie pro civilizovaný svět. Během více než půl století, které uplynulo od jeho objevu jsme ho dokázali usměrnit a produkovat v různých variacích.

V moderní praxi 21. století se v růstu dřevozpracujícího průmyslu začínají získávat stále větší popularitu stroje pracující na principu využití kvantové energie. Zejména beztrískové obrábění a řezání dřeva a materiálů na jejich bázi, vysoce koncentrovanou energií laserového paprsku nebo vysokotlakým tokem kapaliny.

Za určitých podmínek lze princip těchto metod považovat za metody beztrískového obrábění dřeva, na rozdíl od klasických obráběcích strojů, které se nazývají metody trískového obrábění, protože dochází k oddělování dřevěných částic (vláken), v důsledku čehož se tento proces nazývá trískové obrábění. Beztrískové laserové obrábění je pojmenováno proto, že během řezání laserem nedochází k oddělování dřevěných částic (vláken). Laser má využití ve všech oblastech průmyslu.

V nábytkářském průmyslu se metoda beztrískového obrábění používá tam, kde se nedá využít standardní trískové obrábění. Zejména při řezání dřevěných materiálů různých geometrických tvarů a gravírování povrchu různých nábytkářských dílců. Beztrískové obrábění laserem má množství pozitiv, jako jsou bezkontaktní obrábění, žádná deformace materiálu, žádný odpad, zejména třísky, hoblíny, prach. Dále provádění práce na malých dílcích a rovný řez a mnoho dalších výhod.

I tohle byl jeden z důvodů výběru této práce na dané téma, které je stále aktuální.

2. Cíle práce

Hlavním cílem této práce bylo charakterizovat obrábění vybraných druhů materiálů paprskem laseru.

K naplnění hlavního cíle byly potřebné dílčí cíle, které jsou:

- charakterizovat metody nekonvenčního obrábění,
- popsat princip a součásti laseru,
- popsat použitý materiál z hlediska vlastností.

3. Nekonvenční metody obrábění

Pod celkové označení „Nekonvenční metody obrábění“ zahrnujeme způsoby obrábění, které v převážné míře nevyužívají mechanické práce pro úběr materiálu, na rozdíl od klasických technologií třískového obrábění.

Tyto metody jsou založeny na využití některého fyzikálně-chemického nebo fyzikálního principu k úběru materiálu, bez vzniku třísek, a hlavně bez silového působení na obráběný materiál (Barcal, 1989).

Nekonvenční metody obrábění se používají tam, kde by klasický způsob obrábění byl složitý, nákladný a náročný. V některých případech je to jediný možný způsob výroby určité součástky. Díky vhodně zvolené nekonvenční metodě obrábění dokážeme v dnešní době obrábět všechny druhy materiálů.

Původně byly nekonvenční metody vyvinuty jako alternativní způsob obrábění. Zavádění a rozšiřování nekonvenčních metod slouží ke zvyšujícímu se podílu těžkoobrobitelných materiálů (žárupevné a žáruvzdorné) v konstrukcích. Rovněž kvůli tvarové složitosti součástek stříhacích a tvářecích nástrojů, nebo při výrobě rezných nástrojů. Jde o produktivitu s cílem vytvořit předpoklady pro zavedení automatizace výroby pro stroje s CNC řízením a systémy CAD / CAM a CIM.

V dnešní době představují obyčejný způsob obrábění, nebo jednu z možností obrábění (Kvietková, 2015).

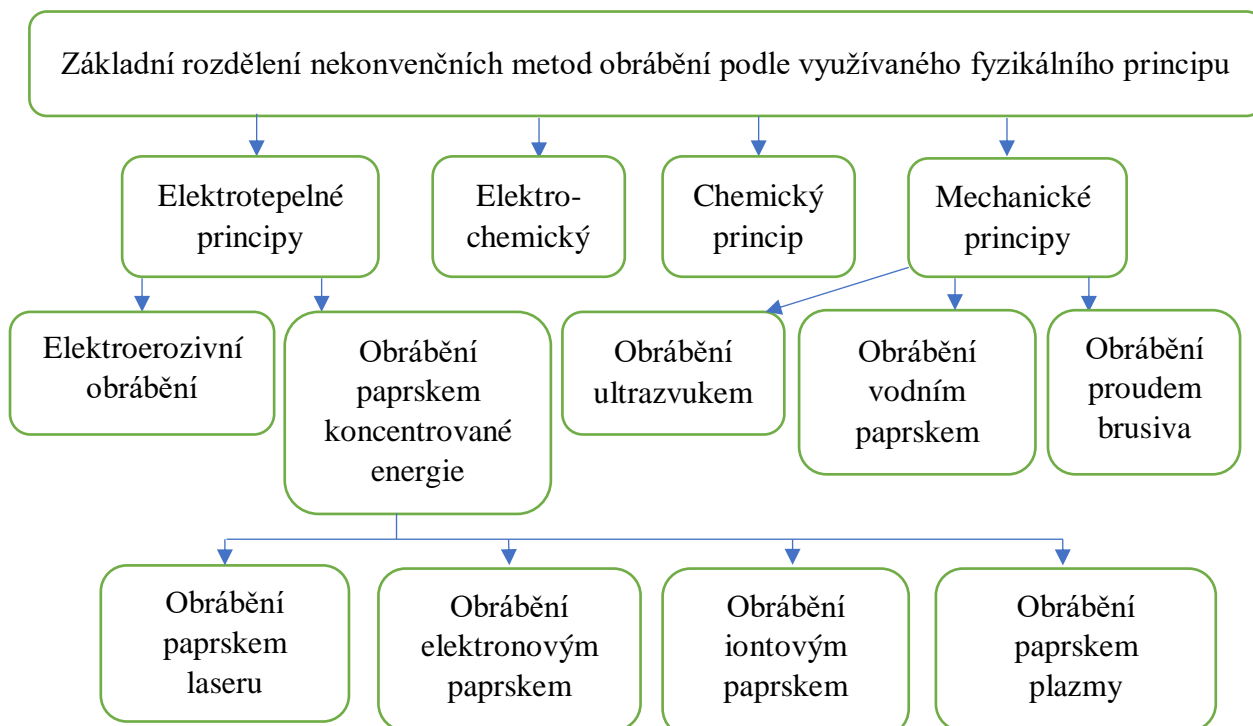
Obrobitelnost materiálu není limitována mechanickými vlastnostmi (tvrdość, pevnost), ale je vázána na fyzikální vlastnosti (tepelná vodivost, teplota tání, elektrická vodivost, elektroerozivní odolnost, chemické složení, ...).

Při hodnocení nekonvenčních způsobů obrábění není bez významu faktor bezsilového obrábění, který vytváří předpoklady vzniku povrchu bez mechanického zpevnění a minimální tepelné zatížení obrobku.

V případě metod využívajících tepelné účinky elektrického proudu pro obrábění jsou tyto tepelné množství koncentrovány do mikroobjemů materiálu a zasahují jen tenké povrchové vrstvy v rozsahu od několika setin mm až do několika mm. Celkové oteplení součástky se pohybuje řádově ve stupních a s ohledem na požadovanou přesnost výroby je závislé také od tepelné stability obráběcího stroje (Mičietová, 2001).

3.1 Základní rozdělení nekonvenčních metod obrábění

Metody nekonvenčních metod obrábění (Obr. 1) se liší především fyzikálními účinky, které byly použity při obrábění (Sadílek, 2009).



Obrázek 1 Základní rozdělení nekonvenčních metod obrábění (Sadílek, 2009)

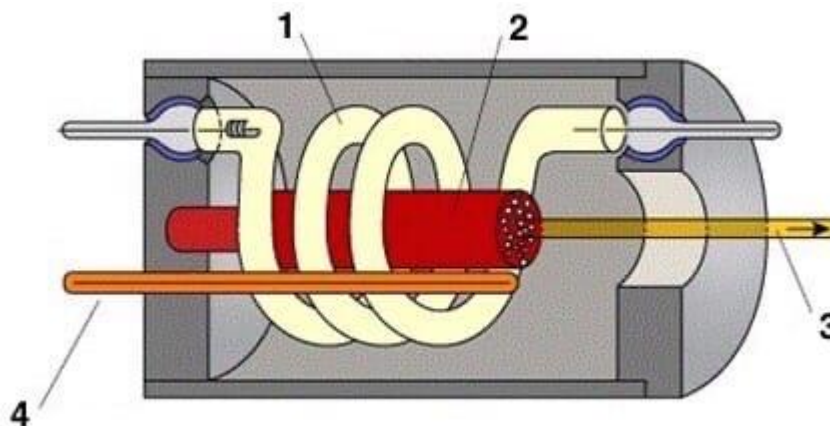
Ve své práci jsem využil zejména jednu skupinu nekonvenčních metod obrábění, a to obrábění paprskem laseru.

4. Historický vývoj laserů

Laser je akronym anglického názvu Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, který můžeme přeložit jako zesílení světla pomocí vybuzení emise záření a slovenské pojmenování laseru je kvantový generátor světla, které je však používáno zřídka.

Pro pochopení činnosti laseru je důležitý pojem stimulována emise záření, který zavedl Albert Einstein v roce 1917. Předchůdcem laseru byl Maser. Maser je zařízení, které na rozdíl od laseru generuje mikrovlnné záření, ale pracuje na stejném principu jako laser, což znamená na principu stimulované emise.

V USA v roce 1960 Theodore H. Maiman vytvořil a prezentoval první funkční laser. Jako aktivní prostředí použil krystal rubínu, s využitím tří energetických hladin. Tento laser pracoval pouze v pulzním režimu (Obr. 2).



Obrázek 2 Rubínový laser

www.electricalschool.info (18.10.2019)

1. křemenná zářící trubice, 2. rubínová tyč, 3. laserový paprsek, 4. spouštěcí elektroda.

Western Electric Company byla první společnost, která se nachází v USA a zapojila laser do průmyslu v roce 1965. Tato společnost postavila laserový systém pro obrábění diamantových raznic. O dva roky později byl ve Velké Británii vyvinut laserový systém pro řezání ocelových plošných výrobků využívající kyslík jako asistenční plyn. Lasery konkrétně určené pro řezání nekovových materiálů následovaly až později.

Nejvýznamnějšího rozvoje bylo dosaženo v 70. letech dvacátého století. Vzhledem k vzrůstu použití CO₂ laserů v průmyslu bylo dosaženo vývoje laserových zdrojů. Zároveň se zdroji byly vyvíjeny přesnější řídicí systémy a rychlejší pohony. Jednou z nejdůležitějších etap ve vývoji CO₂ laserů bylo uvedení tzv. neprůtočného difusně chlazeného (DC-Diffusion Cooled) laseru. Tento typ laseru nepotřebuje externí zdroj asistenčních plynů k svému fungování, což značně snižuje náklady na provoz a usnadňuje obsluhu.

Na konci minulého tisíciletí došlo se značným zjednodušením řezacího procesu a ke zvyšujícím se výkonům laserů. V konstrukcích řezacích laserů začali přidávat různí výrobci lineární motory s možností naprogramování pohybů laseru

v osách x, y a z. V dnešní době jsou tyto technologie nedílnou součástí strojního i dřevobráběcího průmyslu (Kvietková, 2015).

4.1 Nejdůležitější mezníky z historie vzniku laseru

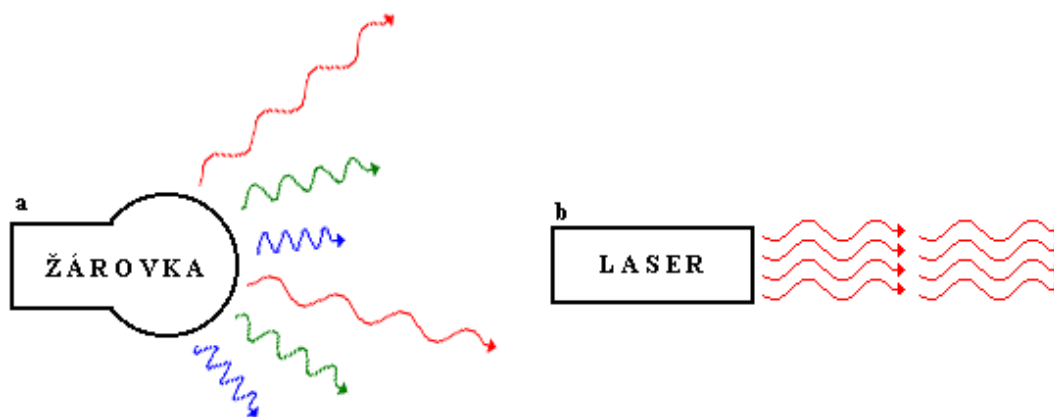
Níže jsou uvedeny nejdůležitější mezníky z historie vývoje laseru. Především A. Einstein s jeho teorií laseru, ohledně absorpce a emise světla atomy. Dále jsou vyznačeni sovětští vědci, kteří měli vliv na jeho vývoj, jak v Sovětském svazu, tak i mimo.

- 1916 A. Einstein založil teorii laseru, ohledně absorpce a emise světla atomy. Einstein zvažoval interakci fotonů se systémem (atomy a molekuly), který má dvě energetické úrovně E_1 a E_2 , a energie fotonu se shoduje s energetickým rozdílem mezi těmito úrovněmi.
- 1938 Sovětský fyzik V.A. Fabrikan navrhl metodu experimentálního prokázání existence stimulované emise, jako první upozornil na základní možnost vytvoření prostředí, které zesiluje záření (negativní absorpce).
- 1954 N. G. Basov, A. M. Prochorov a Ch. H. Townes objevili nový fyzikální obor, kvantovou elektroniku. Vznikl první maser s komorou čpavku, dále pak vznikaly masery různých typů.
- 16. 5. 1960 T. Meyman (USA) zahájil provoz prvního laseru, za použití aktivního prostředí krystalu rubínu.
- 2. 6. 1961 Zahájení provozu prvního laseru v SSSR s krystalem rubínu.
- 1962 skupina I.M. Belousova (která zahrnovala I.M. Belousova, O.B. Danilova, I.A. Yelkina) zkonstruovala plynový helium-neonový laser s rovinným rezonátorem (Belousova, 2014).

5. Princip laseru

Běžné světelné záření je vlnění, které se šíří všemi směry. Zesílením je vytvořen úzký svazek fotonů (kvant elektromagnetického záření). Laserové světlo vzniká v prostředí určitého stimulujícího elektromagnetického záření potlačením spontánní emise na úkor emise stimulované (Obr. 3). Spontánní (samovolná) emise

záření vzniká v případě, že atomy vybuzené s energetickou hladinou E_2 mají tendenci zaujmout hladinu s nižší energií E_1 , a přitom emitují kvantum světelného záření (Sadílek, 2009).



Obrázek 3 Záření běžného zdroje světla a laseru

www.fyzika.jreichl.com (19.10.2019)

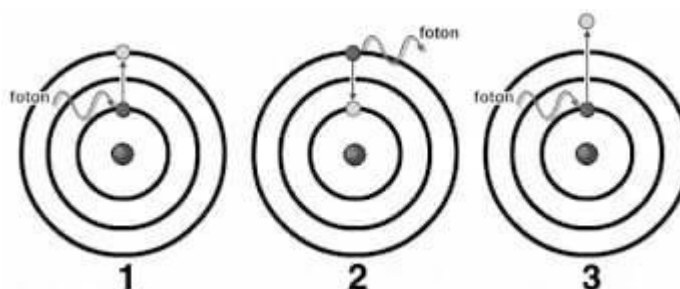
1. žárovka, 2. laser.

5.1 Fyzikální základy laseru

Princip funkce laseru (generátoru elektromagnetického záření v optické oblasti vlnových délek založeného na využití stimulovaného záření, viz. ČSN 36 7703) je možné objasnit na základě zjednodušeného planetárního modelu atomu a pojmů kvantové fyziky. V tomto modelu okolo kladně nabitého jádra – protonu – krouží na uzavřených drahách elektrony, které podléhají elektrostatickým silám. Každé dráze přísluší přesně určené množství energie, jelikož na překonání přitažlivé síly protonu je nutné vykonat větší práci. Čím je dráha elektronu bližší k jádru, tím je jeho energie menší. Za normálních podmínek se atom nachází v kvantovém stavu s nejmenší energií. Takový stav se nazývá stavem základním. Podstata kvantového charakteru modelu atomu leží v tom, že energie elektronu v atomu může nabývat pouze určité hodnoty, a tedy elektron se může nacházet jenom ve vymezených energetických hladinách. Dráhy přechodné neexistují, což znamená, že elektron se nemůže nacházet ve střední poloze mezi vymezenými dráhami (Obr. 4).

Přechod elektronu ze základní energetické hladiny E_0 na vyšší energetickou hladinu E_1 je doprovázen absorpcí a přechodem emisí určité hodnoty energie

v opačném směru. Toto přesné množství se nazývá kvantem a je ve své podstatě elektromagnetickým zářením o určité frekvenci.



Obrázek 4 Absorpce a emise energie
 www.encrypted-tbn0.gstatic.com (19.10.2019)
 1. absorpce, 2. emise, 3. ionizace.

Atom, který dostal z vnějšku dodáno určité množství energie se nazývá vybuzeným. Tento atom se může vrátit zpět do základního stavu (na nižší energetickou hladinu) odevzdáním přebytečné energie, například spontánní emisí ve formě elektromagnetického záření (světelné záření rozžhaveného předmětu). Podle kvantové teorie světla je velikost kvanta energie E úměrná rezonanční frekvenci záření f a je rovna

$$E = h * f \quad (1)$$

Kde:

E – velikost kvanta energie,

h – Planckova konstanta ($h = 6,62 * 10^{-34}$),

f – frekvence záření.

Charakteristickým znakem spontánní emise je široké spektrum výstupního záření, jelikož přechody se uskutečňují mezi různými energetickými hladinami (Barcal, 1989).

5.2 Absorbování

Velmi významný je směr přechodů mezi energetickými stavy. Přechod z nějaké nižší úrovně do nějaké vyšší úrovně odpovídá zvýšení energie atomového systému, tj. absorpci fotonu (Obr. 5). Takový proces se nazývá absorpce. Přechod z určité horní úrovně do jiné nižší úrovně odpovídá snížení její energie, tj. emisi

fotonu. Takový proces se nazývá záření. Existují dva typy záření – spontánní a stimulované záření (Obr. 5).

Lze to vysvětlit na příkladu prostředí, ve kterém se nacházejí dvě energetické úrovně 1 a 2 s energií E_1 a E_2 ($E_1 < E_2$). Tyto úrovně mohou být libovolné dvě úrovně z neomezené sady úrovní specifických pro dané prostředí. Předpoklad je, že atom je zpočátku na úrovni 1. Pokud je to hlavní úroveň, atom na něm zůstane, dokud na něj nepůsobí nějaké vnější rušení.

Pokud však na hmotu dopadá elektromagnetická vlna s frekvencí ν je definovaná výrazem (2).

$$\nu = \frac{1}{h}(E_2 - E_1) \quad (2)$$

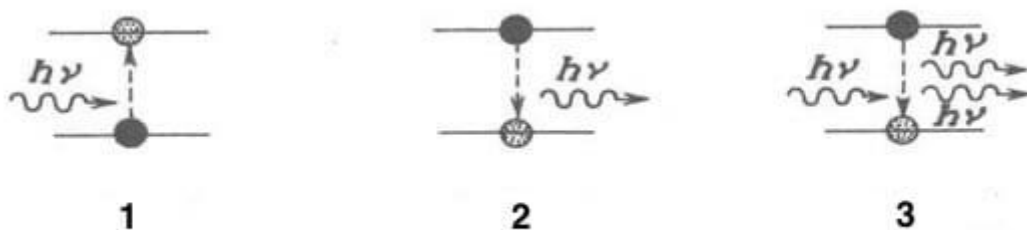
Kde:

$E_2 - E_1$ – energetický rozdíl,

ν – frekvencí elektromagnetické vlny,

h – Planckova konstanta ($h = 6,62 \cdot 10^{-34}$).

V tomto případě existuje konečná pravděpodobnost, že se atom přesune na horní úroveň 2. Energetický rozdíl $E_2 - E_1$, který je nezbytný pro atom pro přechod, je převzat z energie dopadající elektromagnetické vlny. To je proces absorpce.



Obrázek 5 Schematické znázornění tří procesů: absorpce; spontánní emise; stimulovaná emise

www.ciselniky.dasta.mzcr.cz (21.10.2019)

1. absorpce, 2. spontánní emise, 3. stimulovaná emise.

Každý jednotlivý přechod je charakterizován, společně s frekvencí přechodu, distribucí intenzit přechodu. Intenzita přechodu závisí na

pravděpodobnosti jednotlivých přechodů a na počtu atomových systémů v různých stacionárních stavech.

Pravděpodobnost absorpce W_{12} , neboli Einsteinův koeficient je dán rovnicí

$$\frac{dN_1}{dt} = -W_{12}N_1 \quad (3)$$

Kde:

W_{12} – pravděpodobnost absorpce,

N_1 – počet atomů na jednotku objemu, které jsou v současné době na úrovni 1.

Kromě toho lze absorpční pravděpodobnost W_{12} vyjádřit pomocí hustoty fotonového toku F a absorpčního průřezu σ_{12} , který závisí pouze na specifickém přechodu (Hayrapetyan, 2012).

$$W_{12} = \sigma_{12}F \quad (4)$$

Kde:

W_{12} – absorpční pravděpodobnost,

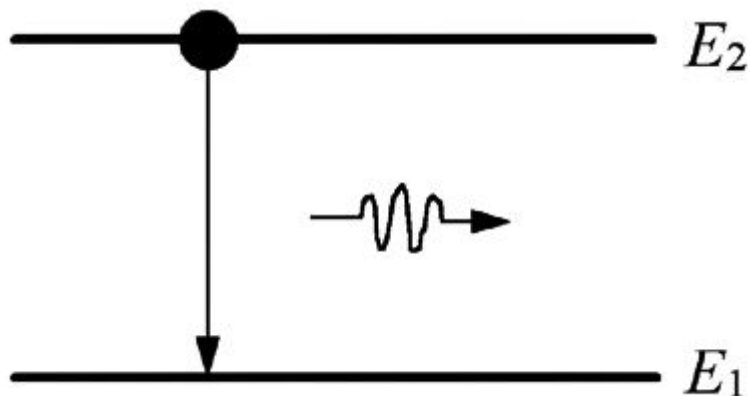
F – hustota fotonového toku,

σ_{12} – absorpční průřez.

5.3 Spontánní emise

Atom může zůstat v excitovaném stavu po velmi krátký časový interval, řádově 10^{-8} s. Po takové době, i při nepřítomnosti vnější činnosti, atom spontánně přechází do stavu základního a emituje kvantové záření. Taková spontánní emise excitovaného atomu, která není způsobena vnějšími faktory, se jmenuje spontánní emise (Obr. 6) (Martinson, 2012).

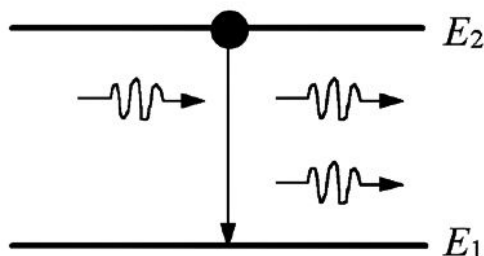
Charakteristickým znakem spontánní emise je velmi široké spektrum výstupního záření, jelikož přechody se uskutečňují mezi různými energetickými hladinami (Barcal, 1989).



Obrázek 6 Spontánní emise
(Martinson, 2012)

5.4 Stimulovaná emise

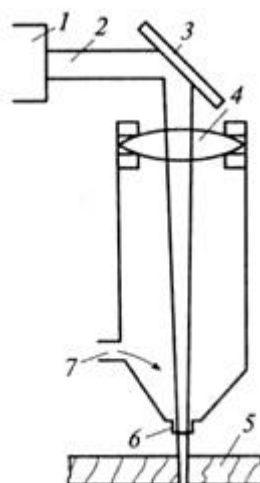
Aby bylo možné vysvětlit termodynamickou rovnováhu mezi látkou a jím vydávaným (absorbovaným) světelným paprskem, formuloval A. Einstein v roce 1916 postulát, že kromě absorpce a spontánního záření by měl existovat třetí, kvalitativně odlišný typ interakce. Bylo navrženo, že k přechodu elektronu v atomu z horní energetické úrovně na nižší může dojít pod vlivem vnějšího elektromagnetického pole, jehož frekvence se rovná přirozené frekvenci přechodu. Výsledné záření se nazývá stimulované (Obr. 7). Stimulovaná emise se liší od spontánní emise tím, že v důsledku interakce excitovaného atomu s fotonem atom emituje další foton o stejné frekvenci a šíří se stejným směrem (Alekhina, 2011).



Obrázek 7 Stimulovaná emise
www.fn.bmstu.ru (21.10.2019)

5.5 Části laseru

Obecně se laser skládá z účinné látky umístěné v optické dutině a excitačního zdroje. V účinné látce probíhá přetvoření energie, která postupuje z excitačního zdroje v monochromatické (s konstantní vlnovou délkou) koherentní (fázově přizpůsobené) záření ve světelném rozsahu a v optické dutině se akumuluje světelná energie a vytváří se úzce směřované záření.



Obrázek 8 Schémata laserového zařízení
(Amalitsky, 2002)

1. plynový laser, 2. paprsek, 3. zrcadlo, 4. čočka, 5. obrobek, 6. inertní plyn, 7. nátrubek.

Plynový (aktivní látka – CO_2) laser s výkonem 200 W vytváří paprsek o průměru 15 mm, který je koncentrován pomocí systému zrcadel a čoček a zaslán do obrobku (Obr. 8). Pro rychlé odstranění produktů spalování zpracovaného materiálu z řezací zóny je přes trysku přiváděn inertní plyn s vysokou rychlostí dodávaný přes nátrubek (Obr. 8). Pohyb laserového paprsku (řezného nástroje) vzhledem k obrobku se provádí automaticky podle programu.

5.6 Druhy laserů

Typ laseru je zpravidla určen stavem agregace aktivního prostředí, proto jsou lasery rozděleny do následujících hlavních typů:

- 1) lasery v pevném stavu (na krystalech nebo sklech);

- rubínový,
- safírový krystal s titanovými ionty.

2) plynové lasery;

- hélium neonový,
- argonový,
- CO₂,
- dusičný.

3) barvicí lasery;

4) chemické lasery;

5) polovodičové lasery;

6) volné elektronové lasery;

7) rentgenové lasery.

Díky jedinečným výstupním parametrům jsou lasery široce využívány v různých oblastech vědy a techniky: fyzice a chemii, biologii a medicíně, holografii, při optickém zpracování a zaznamenávání informací, optické komunikaci, pro provádění termonukleární fúze, průmyslové technologie, pro měření a kontrolu, v armádě (Hayrapetyan, 2012).

6. CO₂ laser

Hlavní část každého CO₂ laseru je dielektrická komora, vyplněná směsí plynů obsahujících CO₂ tzv. aktivním prostředím. Z hlediska otevřenosti systému lze lasery dělit na lasery průtočné a lasery s uzavřeným rezonátorem. Průtočné lasery mohou dosahovat výstupních výkonů až 20 kW, jelikož ohřátý plyn je z aktivního prostředí odsáván vývěvou a nový plyn ochlazuje rezonátor. Difúzně uzavřené lasery lze chladit jen nepřímo, vzduchem či vodou a vyrábí se ve výkonech do 8 kW. Jejich uplatnění najdeme mimo jiné při gravírování a značení či řezání nekovů a jiných materiálů.

K dosažení požadované emise fotonů je potřeba dočasně vybudit elektrony aktivního prostředí na vyšší energetickou hladinu. Toho může být dosaženo radiofrekvenčním vybuzením či výbojem stejnosměrného el. proudu. Vybuzení všech elektronů je všeobecně nazýváno inverze populace. Po vybuzení se elektrony vrací nazpět na svou původní elektronovou hladinu a současně dochází k emisím fotonů. Ty jsou v rezonanční komoře postupně směřovány soustavou dvou zrcadel, tak, aby komoru opustily jenom ty elektrony, které mají svou trajektorii rovnoběžnou s podélnou osou komory. Hlavní nevýhodou CO₂ laserů je nemožnost vést jejich paprsek optickým vláknem. Pro vedení svazku je nezbytně nutné použít soustavu zrcadel. Komplikovaná optická dráha paprsku však zvyšuje nároky na kalibraci systému a čistotu samotných zrcadel (Kvietková, 2015).

7. Pomocný plyn

Pomocným plynem může být vzduch, dusík, nebo kyslík, který se pod určitým tlakem zavádí do prostoru čočkové hlavy a odtamtud přes koaxiální trysku do řezné spáry. Koaxiální tryska usměrní pomocný plyn tak, že vytváří na fokusovaném svazku paprsku plášť ve tvaru mezikruží.

Jeho účelem je:

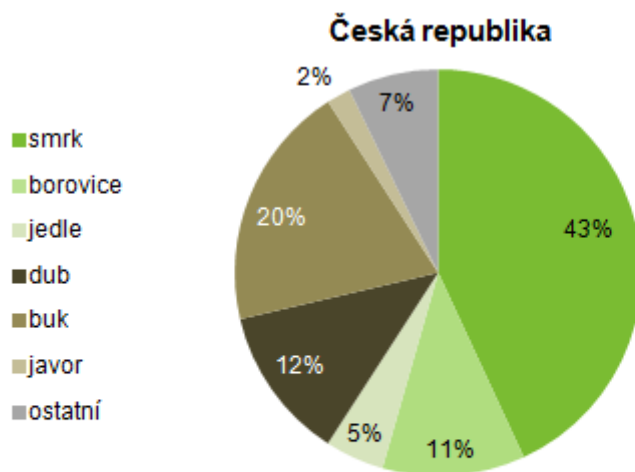
- odfouknout zplodiny rozrušeného materiálu a chránit čočku před znečištěním a poškozením,
- pomáhat procesu rozrušování materiálu při řezání opticky "odrazivých" materiálů. U kovů je vhodný kyslík, u dřevěných materiálů i sám vzduch způsobuje podobné účinky, proto je někdy nutné odfukovat laser dusíkem,
- ochladit prostředí okolo působícího fokusovaného svazku, aby se tavné účinky laseru nešířily zbytečně do šířky, neztrácela se tak zbytečně teplená energie, a aby se v konečném důsledku neztrácel výkon laseru a nepálil zbytečně materiál. To je velmi důležité pro materiály na bázi dřeva s poměrně nízkou hranicí hořlavosti (Lisičan, 1988).

8. Řezání dřeva laserem

Nyní je známo, že laserové záření se používá ke zpracování různých materiálů, včetně dřeva. Jednou z metod obrábění je řezání laserem. Použití laserové technologie může zlepšit kvalitu produktu.

Laserové řezání dřeva vyvolává sadu otázek, které vyžadují experimentální studium podmínek zpracování. Proto dochází k nadměrnému využívání energie a času při použití stejných režimů pro různé materiály. V případě nepřesných režimů laserového řezání se mohou vyskytovat možné velké popáleniny, karbonizace, a dokonce i požáry na povrchu obráběného materiálu (Novoselova a Kuzněcov, 2013).

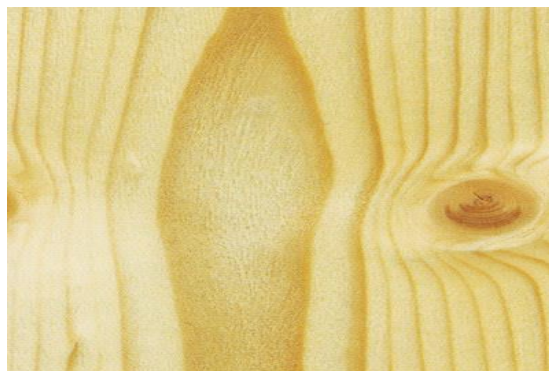
Ve své práci jsem použil dva druhy masivního dřeva pro řezání laserem. První dřevinou byl smrk ztepilý, druhou dub zimní. Použil jsem je z toho důvodu, že tyto dvě dřeviny jsou velmi populární v nábytkářském a dřevozpracujícím průmyslu. V České republice je ze všech jehličnanu nejvíce smrku (Obr. 9). Vysoký podíl ze všech listnáčů má domácí dřevina – dub (Obr. 9). Další kapitoly 7.1 a 7.2 zabývají popisem těchto dvou dřevin a jejich mikroskopickou stavbou.



Obrázek 9 Druhová skladba lesů v ČR
www.czso.cz (15.02.2020)

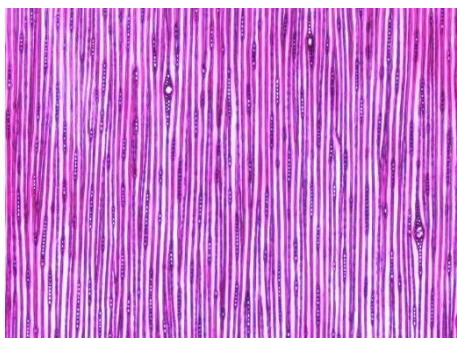
8.1 Smrk ztepilý – *Picea abies*

Je jehličnatá dřevina, s pryskyřičnými kanálky, které jsou rozlišitelné zpravidla pouze na podélných řezech. Má pozvolný přechod mezi jarním a letním dřevem, bez rozlišitelného jádra, barva dřeva bělavá až nažloutlá (Obr. 9). Dřevo smrku je měkké a lehké.



Obrázek 10 Smrk
www.riha-rezivo.cz (13.11.2019)

Na základě mikroskopické stavby smrkového dřeva můžeme rozlišit následující znaky: dřevina jehličnatá, s pryskyřičnými kanálky, pryskyřičné kanálky s tlustostěnným epitelem (Obr. 10); pozvolný přechod mezi jarním a letním dřevem; tracheidy bez spirálních ztluštěnin; dřevové paprsky heterocelulární, příčné tracheidy bez zhuštění (Zeidler a Borvůvka, 2016).



Obrázek 11 Mikroskopická stavba smrkového dřeva – tangenciální řez
www.n-i-s.cz (13.11.2019)

8.2 Dub zimní – *Quercus petraea*

Dřevo dubu má velké, žlutohnědé až temnohnědé jádro, úzkou světlehnědou bělu, je význačně kruhovitě pórovité; tracheje v jarním dřevě jsou široké a velké,

pouhým okem velmi dobře viditelné na příčném řezu jako kruhovitě otvůrky a na podélných řezech jako dlouhé podélné trhlinky. Od okruhu jarních cév se rozměr pórů rychle zmenšuje, takže v pozdním dřevě jsou nezřetelné a tvoří radiální, poněkud zprohýbané, často vidlicovité řady. Dřeňové paprsky jsou velmi četné, mohutné, značně široké a jeví se na tangenciálních řezech jako široké (Obr. 11), tmavé až 7 cm dlouhé pruhy a na radiálním řezu jako zrcátka různých velikostí a tvarů. I na příčném řezu jsou dřeňové paprsky dobře patrné jako světlé pásy, paprscitě se rozbíhající z dřeně, kolmo k letokruhům. Kolem cév je rozmanitě vyvinut dřevní parenchym, který na příčném řezu tvoří světlé, s dřeňovými paprsky souběžné nebo i rozmanitě zprohýbané čárky, způsobující nápadné kresby v letokruzích. V jádrovém dřevě bývají cévy často vyplněny thylami, které jsou na podélných řezech, především na řezu radiálním, nápadné jako lesklé čárky. Všechny dřevní buňky jsou vyplněny velkým množstvím tříslovin, které způsobují černání dřeva, přijde-li do styku se železem.



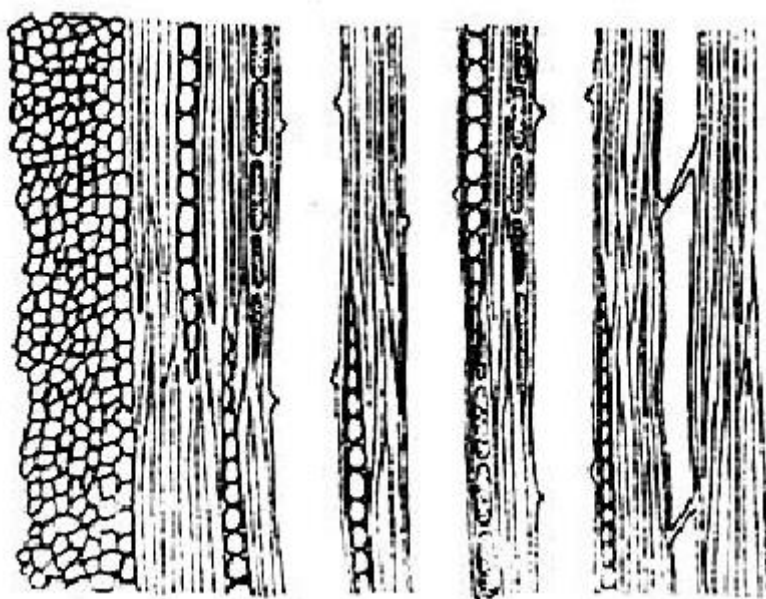
Obrázek 12 Dub

www.stolarskedrevo.sk (13.11.2019)

Mikroskopický popis

Anatomická stavba dřeva všech druhů je velmi analogická, takže nelze dobře a zcela správně jednotlivé druhy poznat mikroskopem. Všechny mají velmi široké cévy s jednoduchou nebo mřížovitou perforací na hladkých stěnách, hustě tečkovaných. Tracheje (Obr. 12) jsou osamocené nebo tvoří skupinky po 2-4; tracheje pozdního dřeva se zužují až na 20 μm tangenciálního průměru a jsou sestaveny v radiálních řadách, střídajících se s dřevním parenchymem a s pruhy libriformu. Perforace jarních cév je převážně jednoduchá, úzké cévy mají většinou mřížovitou perforaci. Tracheální články jarních cév jsou krátké; pozdější cévy mají

články delší, vybíhající vedle perforace v tupý přívěsek. Stěny všech cév jsou hladké, ale hustě posety dvojtečkami se štěrbinovitým pórem. Dřeňové paprsky jsou homogenní ve dvou různých velikostech: mnohvrstevné, velmi široké a úzké, nejčastěji jednovrstevné. Libriform je bohatě vyvinut a skládá se z dlouze vláknitých, tlustostěnných buněk; převládá hlavně v pozdním dřevě. Dřevní parenchym je častý v četných nepravidelných a jednořadých tangenciálních pásech; tvoří široké vrstvy, zejména v jarním dřevě. Náhradní buňky nejsou. V jádrovém dřevě jsou cévy vyplněny thylami (Balabán, 1955).



Obrázek 13 Tangenciální řez dubového dřeva pod mikroskopem
www.delostroika.ru (13.11.2019)

9. Použité materiály na bázi dřeva

V dnešní době se vzrůstajícím technickým a technologickým rozvojem se množství konstrukčních materiálů na bázi dřeva stále rychleji zvyšuje. Nově vznikající materiály mají vlastnosti odpovídající jejich různorodým způsobům využití. Vznikají lepší voděodolná lepidla a hydrofobizační přísady, které se používají u materiálů vystavených podmínkám trvale se měnící vlhkosti. Tento výrazný pokrok ve vývoji aglomerovaných materiálů na bázi dřeva dnes umožňuje jejich použití i v oblastech, kde bylo jejich využití dříve nemyslitelné. Stejně jako u ostatních stavebních materiálů je ale nutné respektovat jejich vlastnosti a používat

konstrukční řešení vhodná pro konkrétní způsoby aplikace. Jen v takovém případě bude možné využívat plně jedinou obnovitelnou surovinu zajišťující trvalý rozvoj ve stavebnictví – dřevo – aniž by se snižovala kvalita a bezpečnost realizovaných staveb (Böhm, et al., 2012).

Ve své práci jsem použil materiály na bázi dřeva, jako jsou dřevotřísková deska a polotvrdá dřevovláknitá deska. Výběr těchto dvou materiálů na bázi dřeva byl na základě toho, že jsou populární na výrobu různých součástí nábytků.

Se začátkem výroby dřevotřískových desek se úplně změnilo využití zbytku dřeva různých druhů, které nebyly původně využívány, nebo byly využívány pouze pro energetické účely. V současné době jsou dřevotřískové desky velmi oblíbené jako nejprodukovatější materiály na bázi dřeva (Böhm, et al., 2012).

Popularita dřevovláknitých desek se střední hustotou ve světě je důsledkem o 60 % nižší nákladu než na přírodní dřevo, jakož i jeho kvality, která je do značné míry podobná vlastnostem přírodního dřeva. To vše nám umožňuje říci, že dřevovláknitá deska se střední hustotou je ideálním řešením pro výrobu nábytku ekonomické třídy (Gomon, 2018).

V následujících kapitolách přiblížím základní informace o DTD a DVD, které jsem v mojí práci použil spolu se smrkem a dubem.

9.1 Dřevotřísková deska (DTD)

Dřevotřísková deska je kompozitní aglomerovaný materiál vyráběný z dřevěných částic, jako je dřevní štěpka, piliny nebo hobliny, které jsou spojeny syntetickou pryskyřicí, nebo jiným vhodným pojivem a dále lisovány.

Dřevotřískové desky se vyrábějí lisováním z dřevní hmoty listnatých i jehličnatých dřevin. Dřevní hmotu tvoří směs rozmělněné dřevní třísky, která vzniká při opracování masivního dřeva. Dřevní tříška je spojována pomocí pryskyřice na bázi močoviny a formaldehydu a je vrstvena nejčastěji ve třech vrstvách. Pro svoji vysokou nasákavost jsou výrobky z dřevotřísky vhodným materiálem do interiéru se suchým prostředím. Použití formaldehydových sloučenin ve spojovacích pryskyřicích je nevýhodné z hlediska likvidace odpadu. Dřevotříška je recyklovatelná jen v omezené míře. Při hoření se pryskyřice rozkládají a uvolňují fenoly a dráždivý formaldehyd. Současné trendy ve

stavebnictví a interiérové architektuře se promítají do inovací nových typů materiálů a zlepšování vlastností materiálů tradičních. Velká pozornost se začíná věnovat i oblasti organické materiálové báze (Sarvašová Kvietková, 2019).



Obrázek 14 Dřevotřísková deska (DTD)
www.megastroy.com (13.11.2019)

9.2 Dřevovláknité desky se střední hustotou (MDF)

Polotvrdé dřevovláknité desky (Obr. 14), běžně označované jako MDF desky (Medium Density Fiberboard), mají hustotu od 400 do 900 kg/m³. Nejdůležitější vlastností MDF je homogenita ve všech směrech desky, která umožňuje čisté kvalitní opracování frézováním reliéfů do ploch desek a profilování boků desek. U tohoto typu desek je také pozitivně hodnocena vysoká relativní hodnota pevnosti v tahu kolmo na plochu (rozlupčivosti).

MDF desky jsou používány tam, kde nevyhovují běžné typy dřevotřískových desek, které mají nehomogenní strukturu, ale jsou levnější. Nejčastější použití tohoto materiálu je ve výrobě nábytku, kde bývají používány desky s hustotou okolo 650 kg/m³. Používají se na dílce s reliéfovanými plochami nebo tvarově profilovanými boky. Tvarově profilované boky desek obvykle bývají dokončeny lakem. Velmi časté použití je také na čela zásuvek a kuchyňská dvířka. V dýhovaném nebo laminovaném provedení mohou být využívány pro výrobu stolních desek (Böhm, et al., 2012).



Obrázek 15 Dřevovláknitá deska se střední hustotou (MDF)
www.fdpn.ru (13.11.2019)

10. Metodika

10.1. Výběr a příprava zkušebních vzorků

V mé bakalářské práci se jednalo o dva druhy masivního dřeva, a to konkrétně smrku a dubu a také dva druhy aglomerovaných kompozitních materiálů- dřevotřísková deska a dřevovláknitá deska se střední hustotou. Testování bylo zaměřeno na zkoumání barvy, lesku a kvality povrchu (drsnosti) po řezání laserem.

Zkušební tělesa pro provádění zkoušek barvy, lesku a drsnosti nemají určité rozměry z toho důvodu, že normy na provádění zkoušek nestanovují rozměry zkušebních tělísek.

10.1.1 Výroba vzorků

Laboratorní vzorky ze smrku, dubu a aglomerovaných kompozitních materiálů, jako jsou dřevotřísková deska a dřevovláknitá deska se střední hustotou byly vyrobeny v Laboratoři zpracování biomateriálů na Fakultě lesnické a dřevařské, České zemědělské univerzity v Praze.

Desky dřevotřískových a dřevovláknitých desek se střední hustotou, o standartních rozměrech 2800 x 2070 mm byly dělené na kotoučové formátovací pile SCM si 400 Class (Obr. 16) na desky menších rozměrů 620 x 400 mm, pro následně řezání vzorků na laseru.



Obrázek 16 Kotoučová formátovací pila SCM si 400 Class
www.mkferrum.ru (23.02.2020)

Pro řezání vzorků na laseru z masivního dřeva, byly použity desky, které už byly opracovány na tloušťkovací a srovnávací frézce.

Samotná výroba zkušebních těles probíhala na gravírovacím a řezacím CO₂ laseru Numco C 1290 (Obr. 17) s určitými technickými daty (viz. příloha). Pro všechny materiály na výrobu vzorků byly zvoleny stejné technické parametry (Tab. 1). Pro každý materiál platily technické parametry, při použité rychlosti laseru 3 mm.s⁻¹, byly použity výkony 70 %, 80 %, 90 %, a rovněž pro další rychlosti laseru dle tabulky č. 1.

Tabulka 1 Technické parametry

Materiál	Rychlost	Výkon
1. MDF	3 mm.s ⁻¹ , 6 mm.s ⁻¹ , 9 mm.s ⁻¹ .	70 %, 80 %, 90 %
2. DTD	3 mm.s ⁻¹ , 6 mm.s ⁻¹ , 9 mm.s ⁻¹ .	70 %, 80 %, 90 %
3. Smrk	3 mm.s ⁻¹ , 6 mm.s ⁻¹ , 9 mm.s ⁻¹ .	70 %, 80 %, 90 %
4. Dub	3 mm.s ⁻¹ , 6 mm.s ⁻¹ , 9 mm.s ⁻¹ .	70 %, 80 %, 90 %



Obrázek 17 Gravírovací a řezací CO2 laser Numco C 1290

10.1.2 Výroba vzorků z aglomerovaných kompozitních materiálů

Po řezání prvního materiálu (Obr. 18), kterým byla dřevovláknitá deska se střední hustotou, se podařilo při rychlosti laseru, $3 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ a $6 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ při výkonu 70 %, 80 % a 90 % desku úplně proříznout. Většina vzorků při technických parametrech $9 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ a výkonu 70 %, 80 % a 90 % laser úplně neproříznul (Obr. 19).



Obrázek 18 Ukázka vzorků MDF po řezání

Aby bylo možné dostat vzorky, bylo potřeba vybrousit zbytek na širokopásové brusce do tloušťky 8 mm.



Obrázek 19 Ukázka vzorků MDF, který laser neprořízne

Zatímco po řezání druhého materiálu (Obr. 20), kterým byla dřevotřísková deska, dokázal laser proříznout jen polovinu vzorků při rychlosti $6 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ a $9 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ při výkonu 70 %, 80 % a 90 %. Při rychlosti laseru $3 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ a výkonech 70 % a 80 % začaly vzorky hořet. Z důvodu mále řezné rychlosti a výkonu docházelo k hořenu vzorků. Polovinu vzorků, které laser nedokázal proříznout, bylo nutné vybrousit na širokopásové brusce do tloušťky 8 mm, aby bylo možné dostat mechanicky vzorky ven.



Obrázek 20 Ukázka vzorku DTD po řezání

10.1.3 Výroba vzorků z masivního dřeva

Řezání třetího druhu materiálu (Obr. 21), kterým byl smrk, bylo nejméně úspěšným z hlediska toho, že laser dokázal proříznout téměř všechny vzorky. Jen malou část vzorků (Obr. 22), které laser nepropálil měly rychlost $9 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ a výkon 90 %.



Obrázek 21 Ukázka vzorků smrků po řezání

Zbylé vzorky, které laser nepropálil, byly následně vybroušeny na tloušťku 8 mm na širokopásové brusce, pro jejich mechanické vymanipulování.



Obrázek 22 Ukázka vzorků smrků, které laser neproříznul

Posledním druhem materiálu byl dub, kde laser při rychlosti 3 mm.s⁻¹ a 6 mm.s⁻¹ při výkonech 70 %, 80 % a 90 % prořízl všechny vzorky. Pouze při rychlosti 9 mm.s⁻¹ a výkonech 70 %, 80 % a 90 % nedocházelo k proříznutí materiálu (Obr. 23). Tudíž všechny vzorky s technickými parametry rychlosti 9 mm.s⁻¹ a výkonech 70 %, 80 % a 90 % byly broušeny na širokopásové brusce do tloušťky 8 mm, kde se po vybroušení na 8 mm, podařilo mechanicky vymanipulovat zbytek vzorků.



Obrázek 23 Příklad vzorků dubů, který laser neprořízl

10.2 Metodický postup zkoušek

Cílem bylo stanovit kvalitu povrchu příslušných vzorků. Kvalita povrchu byla zkoumaná pomocí měření barvy, lesku a drsnosti povrchu zkušebních těles po řezání laserem. Měření barvy probíhalo dle normy ČSN 01 1718. Tato norma stanovuje měření barev, jejich chromatičnosti a kolority a jejich číselné vyjádření v některé z kolorimetrických soustav. Měření lesku probíhalo dle normy ČSN EN ISO 2813, kde norma specifikuje měření lesku při úhlech 20°, 60° a 85°. Měření drsnosti povrchu bylo dle příslušné normy ČSN EN ISO 4288, kde norma stanovuje pravidla pro porovnání měřených hodnot s tolerančními mezemi stanovenými pro parametry struktury povrchu v ISO 4287, ISO 12085, ISO 13565-2 a ISO 13565-3.

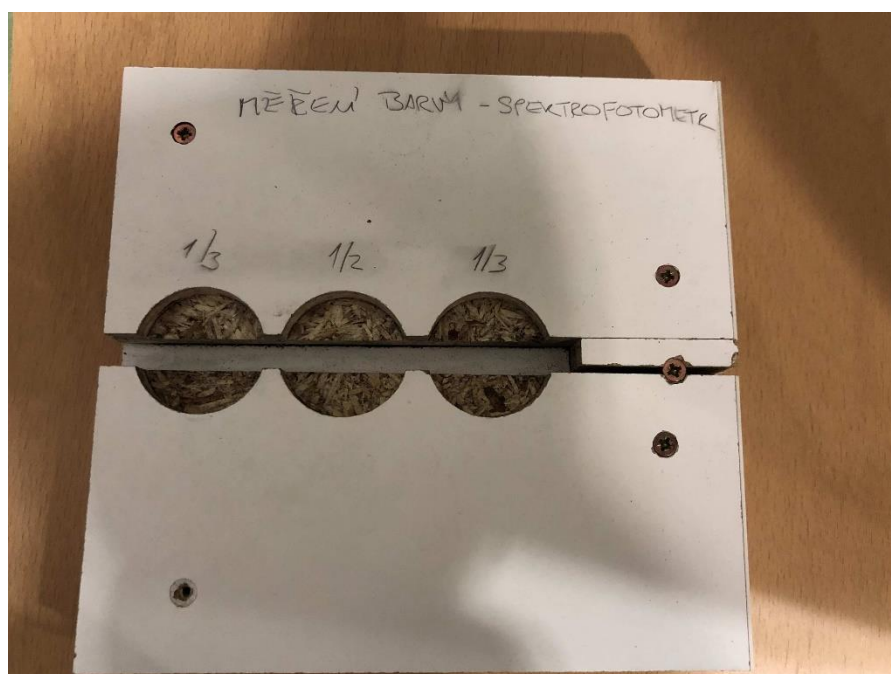
10.3 Průběh zkoušek

Zkouška měření barvy proběhla dle normy ČSN 01 1718. Testovacím přístrojem byl spektrofotometr CM 400d (Obr. 24).



Obrázek 24 Spektrofotometr CM 400d

Všechny zkušební tělíska měly stejnou délku 150 mm. Pro zjednodušení provádění měření barvy spektrofotometrem byla navržnuta šablona (Obr. 25), do které stačilo vložit vzorek a naměřit z každé strany třikrát barvu.



Obrázek 25 Šablona pro měření barvy

Posléze byl spočítán aritmetický průměr pro každý typ vzorků a dopočítána celková změna barvy v jednom z nejpoužívanějších barevných prostorů (Obr. 26) CIE L*a*b (CIELAB), kde je rozdíl dvou barevných souřadnic vyjádřen pomocí parametru delta E, podle příslušné rovnice (Gašparík, et al., 2019):

$$\Delta E = \sqrt{(L_2 - L_1)^2 + (a_2 - a_1)^2 + (b_2 - b_1)^2} \quad (5)$$

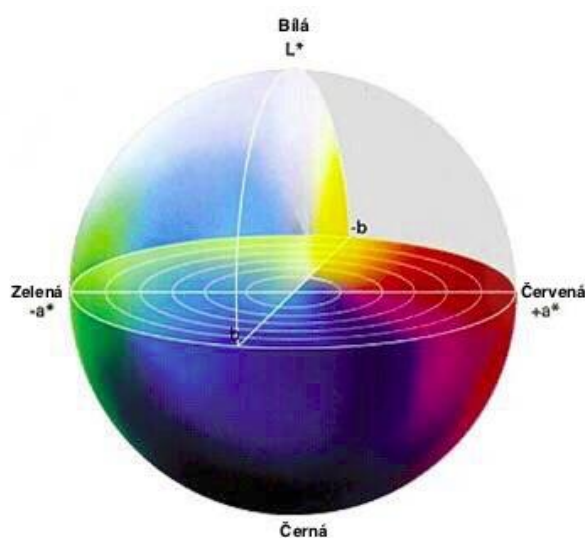
Kde:

ΔE – celková změna barvy,

L – měrná světlost a hodnota z intervalu 0 (černá) až 100 (bílá),

a – osa, která probíhá od zelené barvy k červené,

b – osa, která probíhá od modré ke žluté barvě.

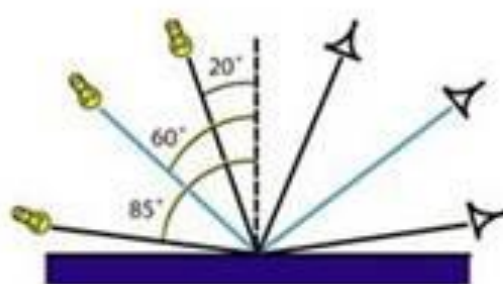


Obrázek 26 Barevný prostor CIELAB

www.sony.cz (04.03.2020)

Zkouška měření lesku proběhla dle příslušné normy ČSN EN ISO 2813. Norma ČSN EN ISO 2813 - stanovení čísla lesku při úhlu 20°, 60° a 85°, stanovuje zkušební vzorky rovné a bez deformací. Pro dané měření byl zvolen speciální přístroj na měření lesku – „leskoměr“, který funguje na jednoduchém principu reflexní geometrie (Obr. 27), což znamená měření vyslaného paprsku světla, a jeho odraz od povrchu měřeného materiálu, přičemž je hodnota povrchu vyjádřena

pomocí lesklých jednotek v rozmezí od 0 do 100 jednotek. Na základě normy ČSN EN ISO 2813 byl úhel měření 60° (Anonym, 2017).



Obrázek 27 Tři základní úhly
www.proinex.cz (04.03.2020)

Měření leskoměrem KSJ 3 – gloss (Obr. 28) probíhalo tak, že byla měřena každá strana všech vzorků, a následně spočítán aritmetický průměr.



Obrázek 28 Leskoměr

Zkouška měření drsnosti povrchu byla provedená v souladu s normou ČSN EN ISO 4288. Měření proběhlo čtyřikrát z každé strany na všech zkušebních tělíscích, a to ve vzdálenostech 3 cm, 6 cm, 9 cm a 12 cm od kraje. Hlavním parametrem pro měření byla drsnost povrchu (R_a a R_z). Parametr R_a znamená střední aritmetickou úchytku profilu, a parametr R_z výšku nerovnosti profilu

určenou z 10 bodů (Kiselev, 2015). Měření probíhalo pomocí profiloměru Taylor Hobson (Obr. 29).



Obrázek 29 Profiloměr

Následně byly všechny naměřené hodnoty barvy, lesku a drsnosti povrchu vyhodnoceny za pomoci programu Statistica.

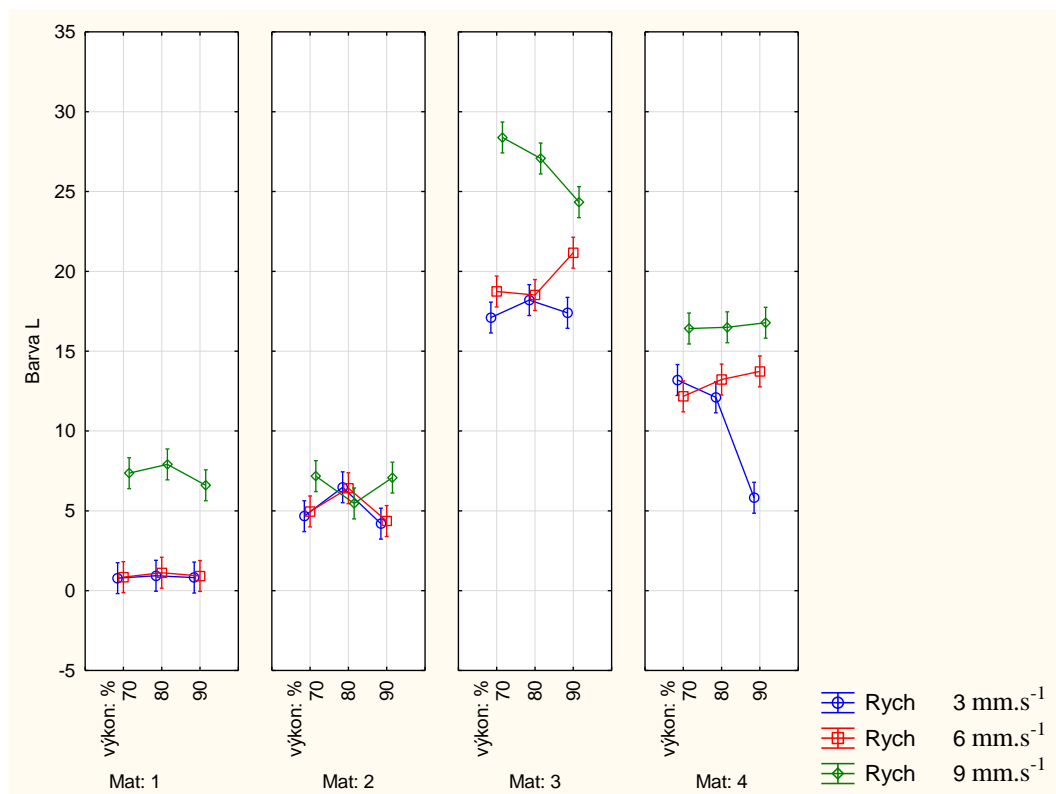
11. Výsledky

Naměřené hodnoty jsem zpracoval a vyhodnotil pomocí dvou počítačových programů. Použité programy byly software Microsoft EXCEL 2016 (Microsoft, Redmont, Washington, Spojené státy americké) a STATISTICA 12 (Statsoft Inc., Tulsa, Oklahoma, Spojené státy americké).

Naměřené hodnoty byly v programu STATISTICA zpracovány použitím statistické metody ANOVA na zvolené hladině významnosti $\alpha = 0,05 = 5 \%$ (Sedlecký, 2017).

11.1 Výsledky měření barvy

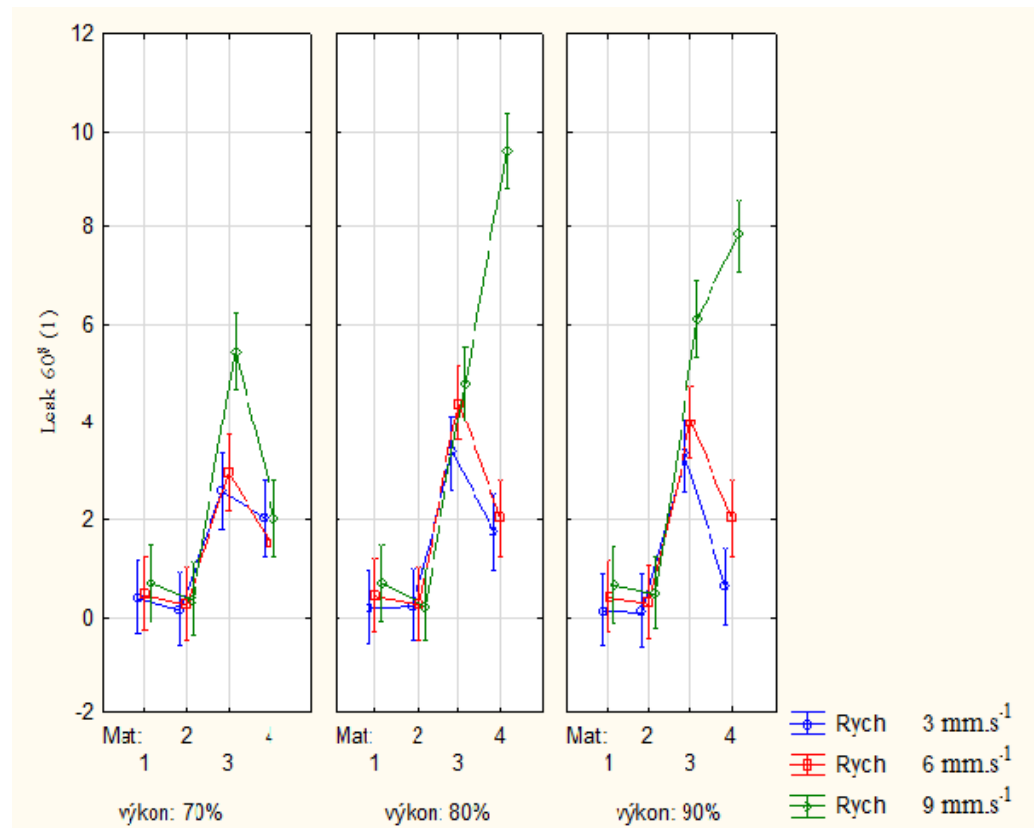
Podkapitola „Výsledky měření barvy“ se zabývá výsledky měření barvy za pomoci počítačového programu Statistica 12. Měření bylo provedeno u všech kombinací včetně grafického vyhodnocení všech kombinací, ostatní výsledky měření jsou uvedeny v příloze (viz. příloha). Materiál číslo 3 (smrk ztepilý), při výkonu laseru 70 % a rychlosti posuvu laseru $9 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ měl nejlepší parametry při zkoumání měrné světlosti barvy, přičemž tento parametr „L“ má hodnotu přibližně 28 (Obr. 30).



Obrázek 30 Vyhodnocení parametru barvy "L"

11.2 Výsledky měření lesku

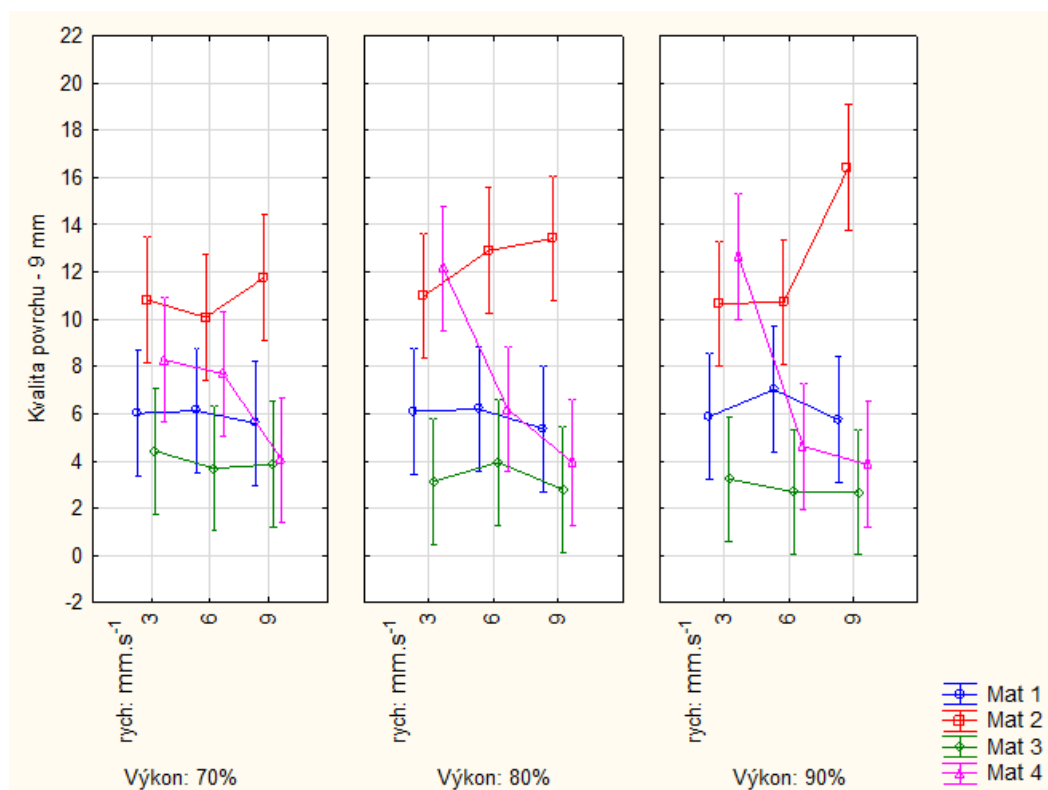
Podkapitola „Výsledky měření lesku“ se zabývá výsledky měření lesku za pomoci počítačového programu Statistica 12. Měření bylo provedeno u všech kombinací, ostatní výsledky měření jsou uvedeny v příloze (viz. příloha). Materiál číslo 4 (dub zimní), měl při výkonu laseru 80 % a rychlosti posuvu laseru 9 mm.s⁻¹ nejlepší parametry při zkoumání lesku pod úhlem 60°, přičemž tento parametr má hodnotu přibližně 9 (Obr. 31).



Obrázek 31 Vyhodnocení lesku při úhlu 60°

11.3 Výsledky měření kvality povrchu

Podkapitola „Výsledky měření kvality povrchu“ se zabývá výsledky měření barvy za pomoci počítačového programu Statistica 12. Měření bylo provedeno u všech kombinací, ostatní výsledky měření jsou uvedeny v příloze (viz. příloha). Materiál číslo 2 (dřevotřísková deska), při výkonu laseru 90 % a rychlosti posuvu laseru 9 mm.s⁻¹ měl nejlepší parametry při zkoumání drsnosti povrchu na délce 9 mm od začátku vzorku, přičemž tento parametr má hodnotu přibližně 16 mikrometrů (Obr. 32).



Obrázek 32 Vyhodnocení kvality povrchu

11.4 Zhodnocení výsledků

Výsledky měření **barvy** prokázaly, že nejlepší výsledky má materiál číslo 3 (smrk ztepilý) při kombinaci výkonu laseru 70 % a rychlosti posuvu laseru 9 mm.s⁻¹. Oproti tomu, nejhorší výsledky má materiál číslo 1 (dřevovláknitá deska se střední hustotou) při kombinaci rychlostí 3 mm.s⁻¹ a 6 mm.s⁻¹ a výkonu laseru 70 % (Obr. 30).

Výsledky měření **lesku** prokázaly, že nejlepší výsledky má materiál číslo 4 (dub zimní), při kombinaci výkonu laseru 80 % a rychlosti posuvu laseru 9 mm.s⁻¹. Nejhorší výsledky má materiál číslo 1 (dřevovláknitá deska se střední hustotou) při kombinaci rychlosti 3 mm.s⁻¹ a výkonu laseru 90 % (Obr. 31).

Výsledky měření **kvality povrchu** prokázaly, že nejlepší výsledky má materiál číslo 2 (dřevotřísková deska), při kombinaci výkonu laseru 90 % a

rychlosti posuvu laseru 9 mm.s^{-1} . Nejhorší výsledky má materiál číslo 3 (smrk ztepilý) při kombinaci rychlosti 9 mm.s^{-1} a výkonu laseru 90 % (Obr. 32).

12. Diskuse

Na základě provedených zkoušek řezání některých druhů materiálů, jako jsou dřevovláknitá deska se střední hustotou, dřevotřísková deska, smrk ztepilý a dub zimní bylo stanoveno, že pro dřeviny smrk ztepilý a dub zimní je vhodné použít metodu nekonvenčního obrábění dřeva laserem. Dřevovláknitá deska se střední hustotou, jakož i dřevotřísková deska nejsou vhodnými materiály pro řezání laserem při kombinacích výkonu laseru: 70 %, 80 %, 90 % a rychlostech posuvu laseru: 3 mm.s^{-1} , 6 mm.s^{-1} a 9 mm.s^{-1} . Z toho vyplývá potřeba dalšího zkoumání nastavení parametru laseru při jiných kombinacích výkonu laseru a jeho rychlosti posuvu, aby se ověřily i jiné kombinace nastavení parametrů.

Většina autorů z oblasti zpracování – obrábění laserem je zaměřená na jiné materiály jako jsou kovy, plasty, aj. Avšak výsledky této práce lze porovnat s jinými výzkumy v oblasti obrábění dřeva laserem. V roce 2019 Vališ prováděl výzkum vlivu řezání laserovým paprskem na změnu drsnosti dřevin buku a dubu. Výsledek drsnosti povrchu dubového dřeva při řezání laserovým paprskem při rychlosti posuvu laseru 3 mm.s^{-1} a výkonu laseru 60 % byl 6,5 Ra (Vališ, 2019). Což je téměř stejný výsledek, jako v této práci (Obr. 32). V roce 2016 Jindra ve své práci „Optimalizace parametrů laserového zařízení v závislosti na druhu obráběného materiálu“ prováděl zkoušky ideálního nastavení laseru pro řezání dvou aglomerovaných materiálů (dřevotřísková deska a dřevovláknitá deska se střední hustotou) a masivů (smrku a dubu). Ve své práci psal, že dokázal proříznout masiv smrku při rychlosti posuvu laseru 3 mm.s^{-1} a výkonu laseru 80 % a rovněž masiv dubu při stejné rychlosti a výkonu laseru, jako u smrku. Dále psal, že dokázal proříznout dřevotřískovou desku při nastavení rychlosti laseru 3 mm.s^{-1} a výkonu 80 %. Pro dřevovláknitou desku se střední hustotou byla zvolena posuvná rychlost laseru 6 mm.s^{-1} a výkon laseru 80 % (Jindra, 2016). V této práci bylo rovněž popsáno, že laser dokázal proříznout výše uvedené materiály při různých parametrech nastavení laserového zařízení. V roce 2019 Čiháková prováděla zkoušky na téma „Vliv řezání laserovým paprskem na změnu barvy a lesku

řezaných ploch“, kde popisovala, jak se mění barva a lesk dubového masivu po řezání laserem při výkonu laseru 5kW a rychlosti 3 mm.s⁻¹. Autorka uvádí že, po provedení zkoušek hodnoty barvy, dosáhla parametru „L“ 25,678. Pro lesk při úhlu 60° pak uvádí 1,061 (Čiháková, 2019). V této práci jsou hodnoty barvy a lesku téměř totožné, jak psala ve své práci Čiháková (2019). Tato problematika si zaslouží větší pozornost a více výzkumů v této oblasti, a to především proto, že doposud neexistují žádné standardy pro řezání dřeva laserem.

13. Přínos pro vědu

Technologie řezání laserem je technologie, která patří do kategorie „nekonvenčních metod obrábění“. Obrábění dřeva laserem je stále ve stádiu výzkumu, stále neexistuje norma, která by mohla stanovit určité podmínky řezání i obrábění aglomerovaných kompozitních materiálů a různých dřevěných masivů v oblasti zpracování laserem.

Ohledně metody obrábění dřeva laserem lze konstatovat, že je nejen z ekonomického hlediska náročná, ale také z hlediska časového. Čas přípravy těles na řezání zabírá mnoho času, a to především z důvodu nastavení laseru, jeho základních parametrů, jako jsou rychlost, výkon a rozmístění těles v pracovním poli programu LaserCut. Se zavedením laserového zařízení do výrobní linky hromadné výroby však čas na přípravu klesá, především z toho důvodu, že nastavení probíhá automaticky, prostřednictvím počítačových programů.

Také je potřeba říct, že obrábění menších materiálů laserem je přesnější než obráběním CNC obráběcím centrem. Další výhodou laseru oproti CNC obráběcím centrům je v tom, že řezný nástroj laseru, čočka, se neotupuje, resp. čočka vydrží mnohem déle než fréza na CNC.

Přínosem pro vědu je ucelená práce zaměřená na obrábění čtyř druhů materiálů (dřevovláknitá deska se střední hustotou, dřevotřísková deska, smrk ztepilý a dub zimní) paprskem laseru při kombinaci výkonu laseru: 70 %, 80 %, 90 % a rychlosti posuvu laseru: 3 mm.s⁻¹, 6 mm.s⁻¹ a 9 mm.s⁻¹.

Rovněž bylo stanoveno, že obrábění laserem není vhodné pro materiály na bázi dřeva především pro dřevovláknitou desku se střední hustotou a dřevotřískovou desku při kombinacích výkonu laseru: 70 %, 80 %, 90 % a

rychlostech posuvu laseru: 3 mm.s^{-1} , 6 mm.s^{-1} a 9 mm.s^{-1} , a proto je třeba provést více výzkumů v této oblasti, aby se tento fakt potvrdil.

14. Přínos pro praxi

Přínose této práce pro praxi je, že zkoumané kombinace nastavení laseru, výkon laseru: 70 %, 80 %, 90 % a jeho posuvná rychlost: 3 mm.s^{-1} , 6 mm.s^{-1} a 9 mm.s^{-1} , jsou vhodné pro obrábění testovaných materiálů. Z hlediska barvy především pro materiál smrk ztepilý, pro lesk dub zimní a pro kvalitu povrchu dřevotřísková deska. V této práci bylo stanoveno, při jakých parametrech nastavení laseru dojde k prořezání zkušebních materiálů a jaký vliv má laserový paprsek na řezanou plochu, což bylo zkoumáno prostřednictvím různých testů.

Přínos pro zkoumání barvy

Na základě zkoumání barvy lze říct, že hodnoty nastavení laseru: výkon laseru 70 % a posuvná rychlost laseru 9 mm.s^{-1} jsou doporučené hodnoty pro materiál smrk ztepilý. Pro materiály dřevovláknitá deska se střední hustotou a dřevotřísková deska jsou kombinace laseru: výkon 70 %, 80 %, 90 % a rychlosti posuvu laseru: 3 mm.s^{-1} , 6 mm.s^{-1} a 9 mm.s^{-1} nevhodné. Pro materiál dub zimní nejsou výše uvedené kombinace vhodné z hlediska zkoumání barvy. Rovněž nejsou doporučené kombinace pro materiál smrk ztepilý: výkon laseru 80 % a 90 % a rychlost posuvu laseru: 3 mm.s^{-1} a 6 mm.s^{-1} .

Přínos pro zkoumání lesku

Na základě zkoumání lesku lze tvrdit, že hodnoty nastavení laseru: výkon laseru 80 % a posuvná rychlost laseru 9 mm.s^{-1} jsou doporučené hodnoty pro materiál dub zimní. Pro materiály dřevovláknitá deska se střední hustotou a dřevotřísková deska jsou kombinace laseru: výkon 70 %, 80 %, 90 % a rychlosti posuvu laseru: 3 mm.s^{-1} , 6 mm.s^{-1} a 9 mm.s^{-1} nevhodné. Pro materiál smrk ztepilý nejsou výše uvedené kombinace vhodné z hlediska zkoumání lesku. Všechny kombinace nejsou doporučené pro materiály dřevovláknitá deska se střední hustotou, dřevotřísková deska, smrk ztepilý. Rovněž nejsou doporučené kombinace pro materiál dub zimní: výkon laseru 70 % a 90 % a rychlost posuvu laseru: 3 mm.s^{-1} a 6 mm.s^{-1} .

Přínos pro zkoumání kvality povrchu

Na základě zkoumání kvality povrchu lze říct, že hodnoty nastavení laseru: výkon laseru 90 % a posuvná rychlost 9 mm.s^{-1} jsou doporučené hodnoty pro materiál dřevotřísková deska. Pro materiály dřevovláknitá deska se střední hustotou, smrk ztepilý a dub zimní z hlediska zkoumání kvality povrchu hodnoty nastavení laseru: výkon 70 %, 80 %, 90 % a rychlosti posuvu laseru: 3 mm.s^{-1} , 6 mm.s^{-1} a 9 mm.s^{-1} jsou nevhodné. Taktéž nejsou doporučené hodnoty nastavení laseru pro materiál „dřevotřísková deska“: výkon laseru 70 % a 80 % a rychlost posuvu laseru: 3 mm.s^{-1} a 6 mm.s^{-1} .

Zhodnocení přínosu pro praxi

Tyto hodnoty kombinací nastavení laseru (výkon laseru: 70 %, 80 %, 90 % a posuvná rychlost laseru: 3 mm.s^{-1} , 6 mm.s^{-1} , 9 mm.s^{-1}) jsou důležité z hlediska prováděných testů barvy, lesku a kvality povrchu pro další zkoumání optimálních podmínek nastavení parametrů laseru a pro jejich budoucí vývoj.

15. Závěr

Táto bakalárská práca sa zabyvá obráběním vybraných druhů materiálů (dřevovláknitá deska se střední hustotou, dřevotřísková deska, smrk ztepilý, dub zimní) paprskem laseru. Cílem práce bylo charakterizovat nekonvenční metody obrábění, jejich rozdělení a následně přiblížení metody obrábění paprskem laseru. Záměr této práce byl kladen na řezání vybraných druhů masivního dřeva a materiálů na bázi dřeva (dřevotřískové a polotvrdé dřevovláknité desky) pomocí tohoto způsobu obrábění.

Práce rozdělena na dvě základní části. První část se zabyvá teoretickou charakteristikou popisu laseru, historií vzniku laseru, složením jeho částí, fyzikálními jevy a popisem materiálů. Druhá část se zabyvá praktickým výzkumem, výsledkům prováděných testů, popisem pracovního zařízení, zkoušek, výsledky a jejich vyhodnocení.

V rámci řešení byly zkoumány 4 materiály (dřevovláknitá deska se střední hustotou, dřevotřísková deska, smrk ztepilý, dub zimní) po řezání laserem na barvu, lesk a kvalitu povrchu řezné hrany. Základními parametry nastavení laseru byly zvoleny výkon laseru a posuvná rychlost laseru. V této práci činil výkon laseru 70 %, 80 %, 90 % ze 100 W, zatímco posuvná rychlost laseru $3 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, $6 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ a $9 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$. Po nařezání materiálů, byly vzorky testovány na barvu, lesk a kvalitu povrchu.

Z výsledků vyplývá, že kombinace nastavení výkonu laseru: 70 %, 80 %, 90 % a rychlosti posuvu laseru: $3 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, $6 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ a $9 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ nejsou pro řezání aglomerovaných materiálů (dřevovláknitá deska se střední hustotou, dřevotřísková deska) vhodné. Avšak z hlediska zkoumání barvy je vhodná a doporučená kombinace pro materiál smrk ztepilý výkon laseru 70 % a posuvná rychlost laseru $9 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$. Z hlediska zkoumání lesku je vhodná a doporučená kombinace pro materiál dub zimní výkon laseru 80 % a posuvná rychlost laseru $9 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$. Z hlediska kvality povrchu měl nejlepší výsledek testovaný materiál dřevotřísková deska, při nastavení výkonu laseru 90 % a posuvné rychlosti laseru $9 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$. Zde je potřeba říct, že nízké rychlosti posuvu laseru, jako $3 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ nebo $6 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ začínají ničit materiál, respektive začínají hořet. Proto není nízká posuvná rychlost laseru pro materiál dřevotřísková deska doporučena.

S přihlédnutím k výsledkům této práce, i celosvětovým výzkumem na tohle téma, je zřejmé, že tato problematika je velmi aktuální a vyžaduje další důkladné řešení.

16. Seznam literatury a použitých zdrojů

Alekhina, T. Průvodce praktickými cvičeními „Elektrodynamika“. Petrohrad: Univerzita St.Petersburg, 2011. 156 str.

Amalitsky, V. Dřevoobráběcí stroje a nástroje. Saratov: Akademija, 2002. 400 s. ISBN 5-7695-1172-9.

Anonym. www.optixs.cz. <https://www.optixs.cz/aplikace-53/spektroskopie-145/mereni-barev-136>. [Online] Optixs, 2020. [Citace: 02. Březen 2020.]

Anonym. www.proinex.cz. https://www.proinex.cz/cs/blog/12_mereni-lesku-pomoci-leskomeru. [Online] Proinex Instruments s.r.o., 2017. [Citace: 04. březen 2020.]

Balabán, K. Nauka o dřevě. Praha: Státní zemědělské nakladatelství Praha, první část, Anatomie dřeva, 1955. 163 s.

Barcal, J. Nekonenční metody obrábění. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické, 1989. 122 s.

Gašparík, M., Gaff, M., Kačík, F., Sikora, A. Color and Chemical Changes in Teak (*Tectonia grandis* L. f.) and Meranti (*Shorea* spp.). Wood after Thermal Treatment. *Bioresources*. 14 (2). 17 str. 2019.

Belousova, I. Z historie vytvoření laserů. Vědecký a technický časopis o informačních technologiích, mechanice a optice. 90 str. 2014.

Böhm, M., Reisner, J., a Bomba, J. Materiály na bázi dřeva. 1. vyd. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, 2012. 183 s. ISBN 978-80-213-2251-6.

Čiháková, V. Vliv řezání laserovým paprskem na změnu barvy a lesku řezaných ploch. Praha, 2019. Diplomová práce. Česká zemědělská univerzita v Praze. Fakulta lesnická a dřevařská. 78 s.

Gomon, A. I. Přehled aplikace a porovnání vlastností MDF panelů a dalších materiálů. Inženýrský a ekonomický časopis. 18 str. 2018.

Hayrapetyan, V. Laserová fyzika. Novosibirsk: Sibiřská státní vysoká škola geodézie, 2012. 133 s. ISBN 978-5-87693-528-1.

Jinda, J. Optimalizace parametrů laserového zařízení v závislosti na druhu obráběného materiálu. Praha, 2016. Diplomová práce. Česká zemědělská univerzita v Praze. Fakulta lesnická a dřevařská. 59 s.

Kiselev, B. stankiexpert.ru. <https://stankiexpert.ru/tehnologii/sherokhovatost-poverkhnosti.html>. [Online] 2015. [Citace: 04. březen 2020.]

Kvietková, M. Obrábění dřeva. 1. vyd. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, 2015. 295 s. ISBN 978-80-2013-2604-0.

Liščan, J. Obrábanie a delenie drevných materiálov. Zvolen: Vysoká škola lesnícka a drevárska vo Zvolene v edičnom stredisku, 1988. 108 s.

Martinson, L., Morozov A. Kvantová fyzika. Moskva: Moskevská státní technická univerzita N. E. Baumana, 2012. 528 s. ISBN 5-7038-3580-7.

Mičietová, A. Nekonenčné metódy obrábania. 1. vyd. Žilina: Žilinská univerzita, 2001. 176 s. ISBN 80-7100-853-2.

Novoselova, M.V. , Kuzněcov, A.I. Výzkum režimů laserového řezání dřeva břízy. Zpracování dřeva: technologie, zařízení, řízení 21. století. 5 str. 2013.

Sadílek, M. Nekonenční metody obrábění I. 1. vyd. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2009. 146 s. ISBN 978-80-248-2107-8.

Sarvašová Kvietková, M. Dřevařské komodity I. 1. vyd. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, 2019. 103 s. ISBN 978-80-213-2951-5.

Sedlecký, M. Vliv druhu materiálu nástroje na kvalitu opracovaného povrchu při podélném frézování dřeva a materiálů na bázi dřeva. Praha, 2017. Disertační práce. Česká zemědělská univerzita v Praze. Fakulta lesnická a dřevařská.

Šlezingerová, J., a Gandelová, L. Stavba dřeva - cvičení. 2 vyd. Brno: Mendlova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 2004. 176 s. ISBN 80-7157-577-1

Vališ, M. Vliv řezání laserovým paprskem na změnu drsnosti řezaných ploch laserem v porovnání s řezáním pilovým kotoučem. Praha, 2019. Diplomová práce. Česká zemědělská univerzita v Praze. Fakulta lesnická a dřevařská. 76 s.

Barčík, Š., Gašparík, M., Razumov, E. Effect of the thermal modification on the colour changes of oak wood. Wood research. 60 (3). 396 s. 2015.

Zeidler, A., a Borůvka, V. Stavba a vlastnosti dřeva hospodářsky významných dřevin - podklady pro cvičení. 1. vyd. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, 2016. 89 s. ISBN 978-80-213-2674-3.

17. Seznam příloh

Příloha číslo 1 Technická data CO₂ laseru Numco C 1290

Příloha číslo 2 Výsledky měření barvy při parametrech „a“, „b“

Příloha číslo 3 Výsledky měření lesku při úhlech 20° a 85°

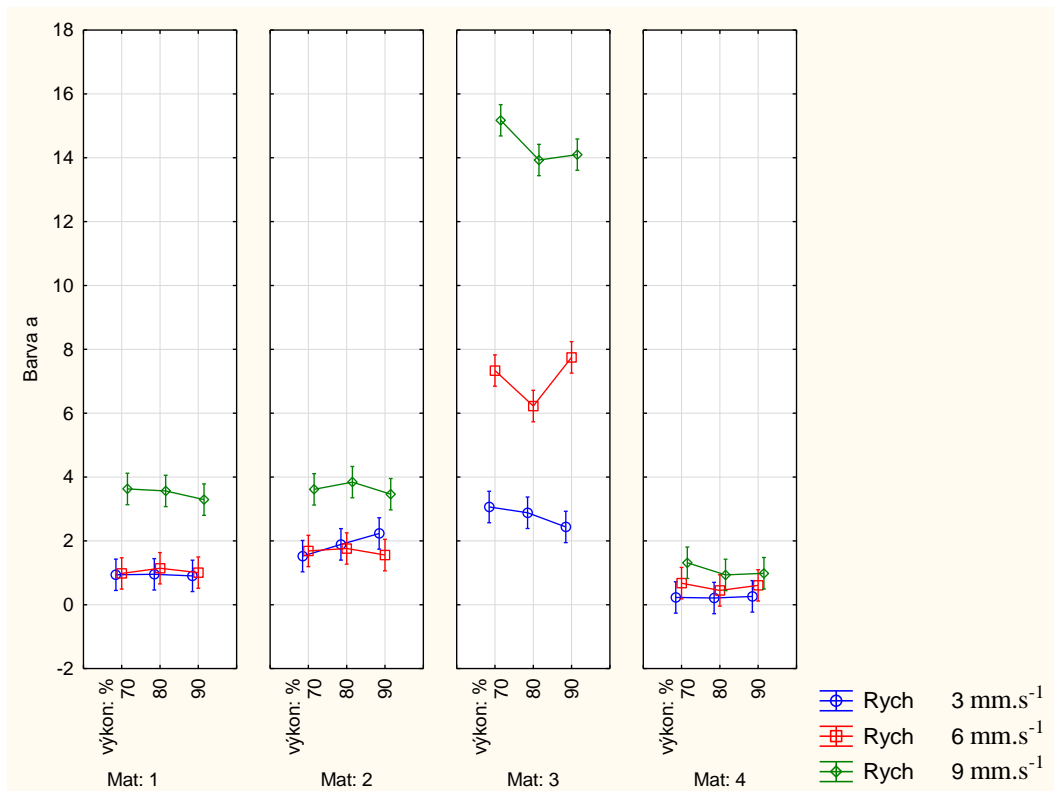
Příloha číslo 4 Výsledky měření kvality povrchu na vzdálenosti 3 mm, 6 mm a 12 mm

Příloha číslo 1 Technická data CO₂ laseru Numco C 1290

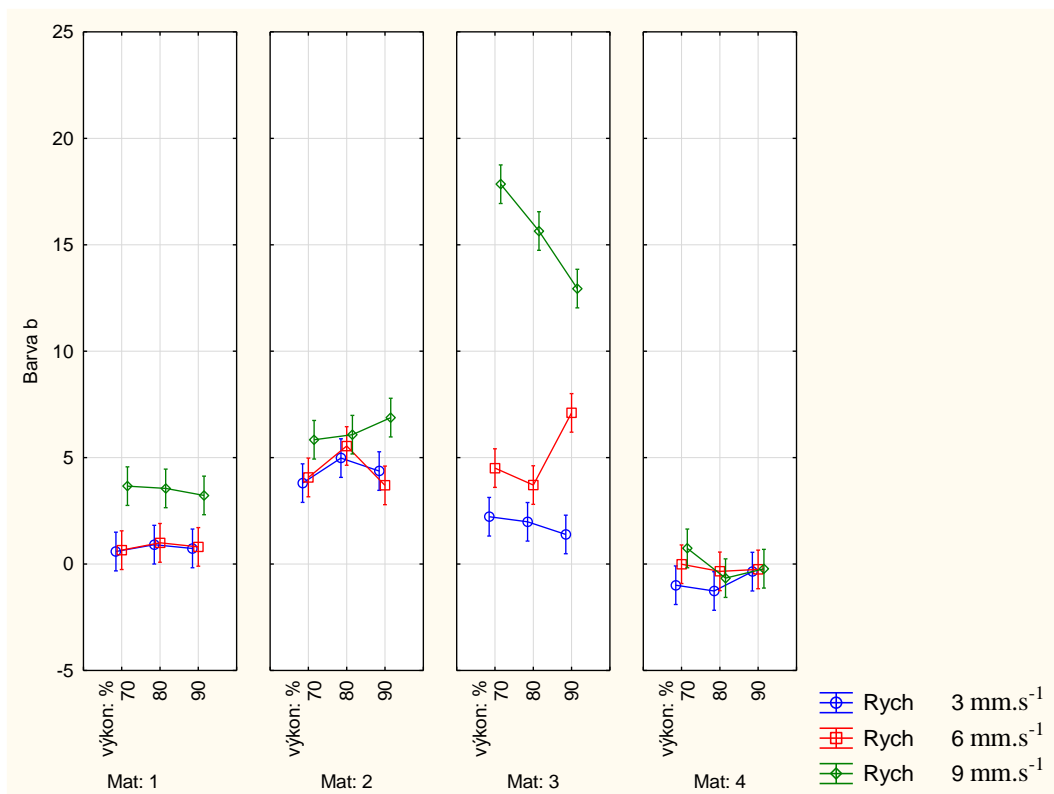
Tabulka 2 Technická data

Technický parametr	Hodnota
Min. rozměry gravírované plochy	1,5 x 1,5 mm
Max. rozměry gravírované plochy	1200 x 900 mm
Možnost gravírování rotačních těles	Ano
Výkon laseru	80 W, volitelně 100 W
Typ laseru	CO ₂
Životnost laserové trubice	8000 hodin
Rychlost gravírování	0–1000 mm.s ⁻¹
Řezná rychlost	0–600 mm.s ⁻¹
Max. hloubka řezu	Akryl 20 mm
Pohony os	Krokové motory
Opakovatelná přesnost	0,01 mm
Teplota pracovního prostředí	0–45°C
Vlhkost pracovního prostředí	30–75 %
Chlazení vodou	Ano
Podporovaný software	ArtCut, CorelDraw, PhotoShop, a AutoCad
Podporované grafické formáty	PLT, DXF, BMP, JPG, GIF, PGN, TIF
Komunikační rozraní	Nechybí tu něco? 1200 W
Celkový příkon	230 V
Elektrické připojení	0-280 mm
Rozměry	1830 x 1500 x 1240 mm
Hmotnost	320 kg

Příloha číslo 2 Výsledky měření barvy při parametrech „a“, „b“

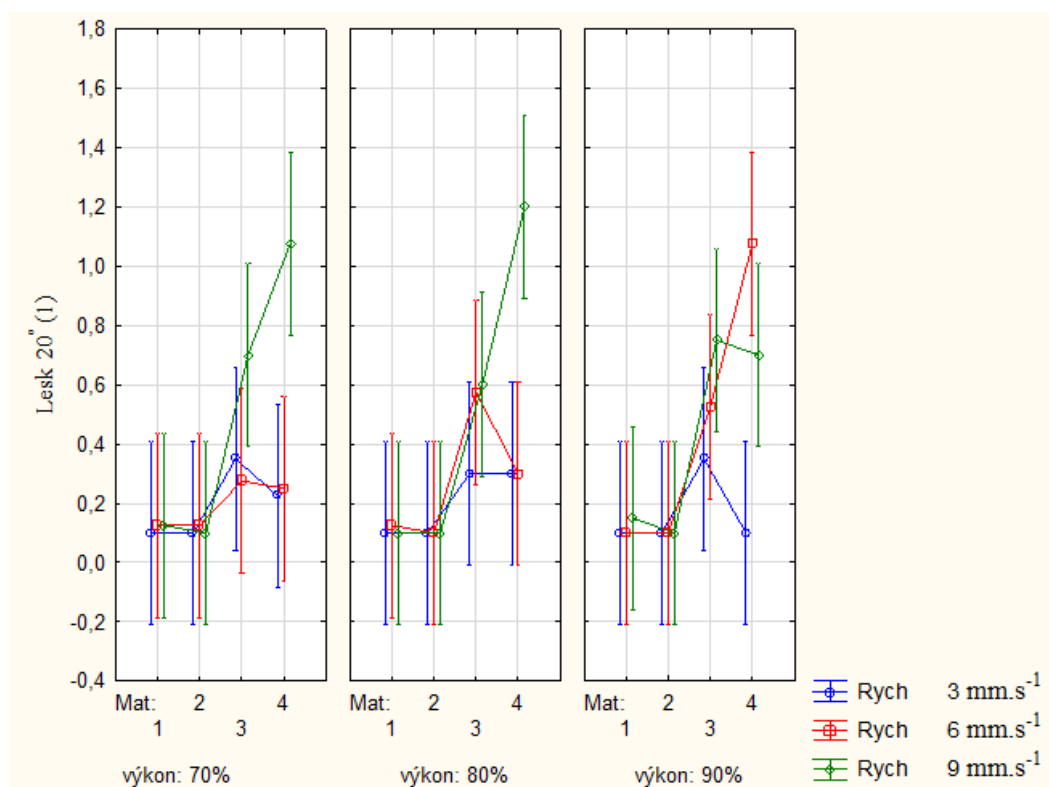


Obrázek 33 Výsledek měření barvy při parametru „a“

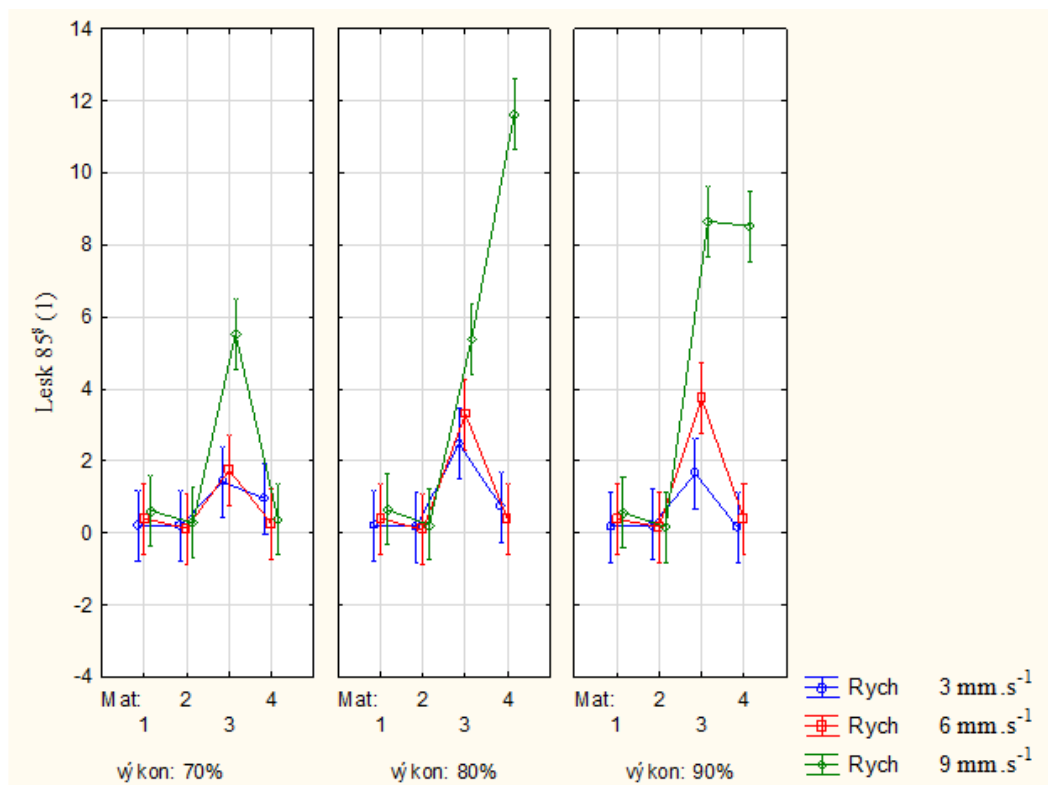


Obrázek 34 Výsledek měření barvy při parametru „b“

Příloha číslo 3 Výsledky měření lesku při úhlech 20° a 85°

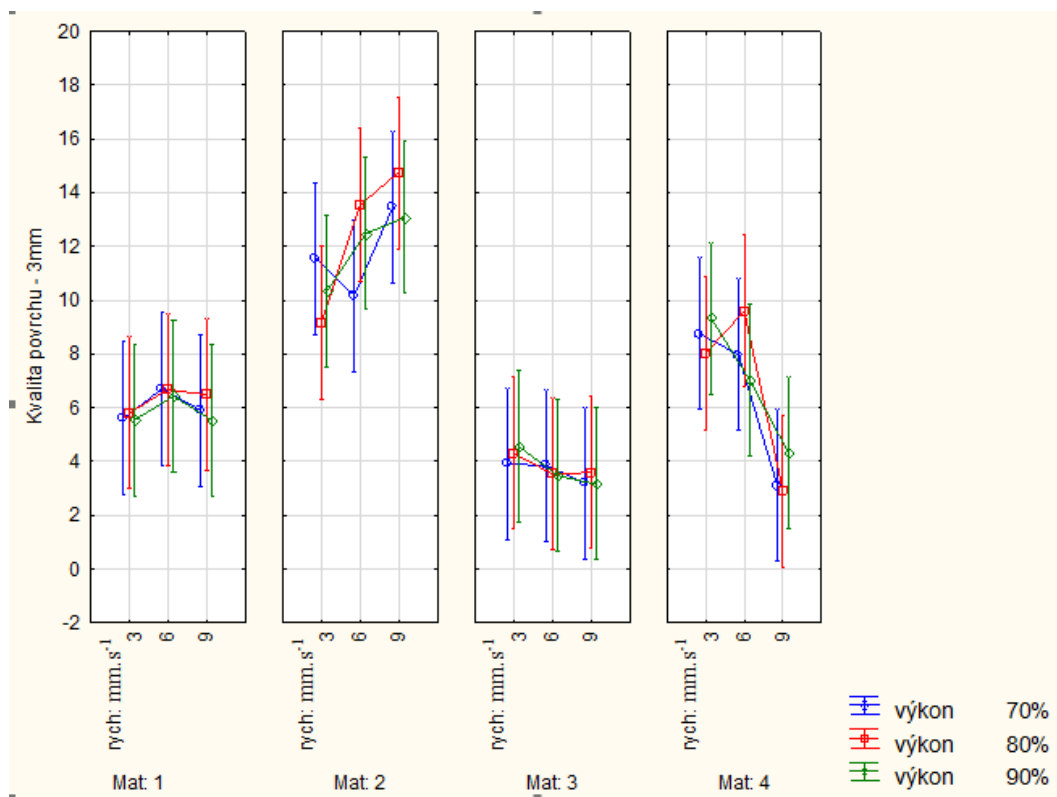


Obrázek 35 Výsledek měření lesku při úhlu 20°

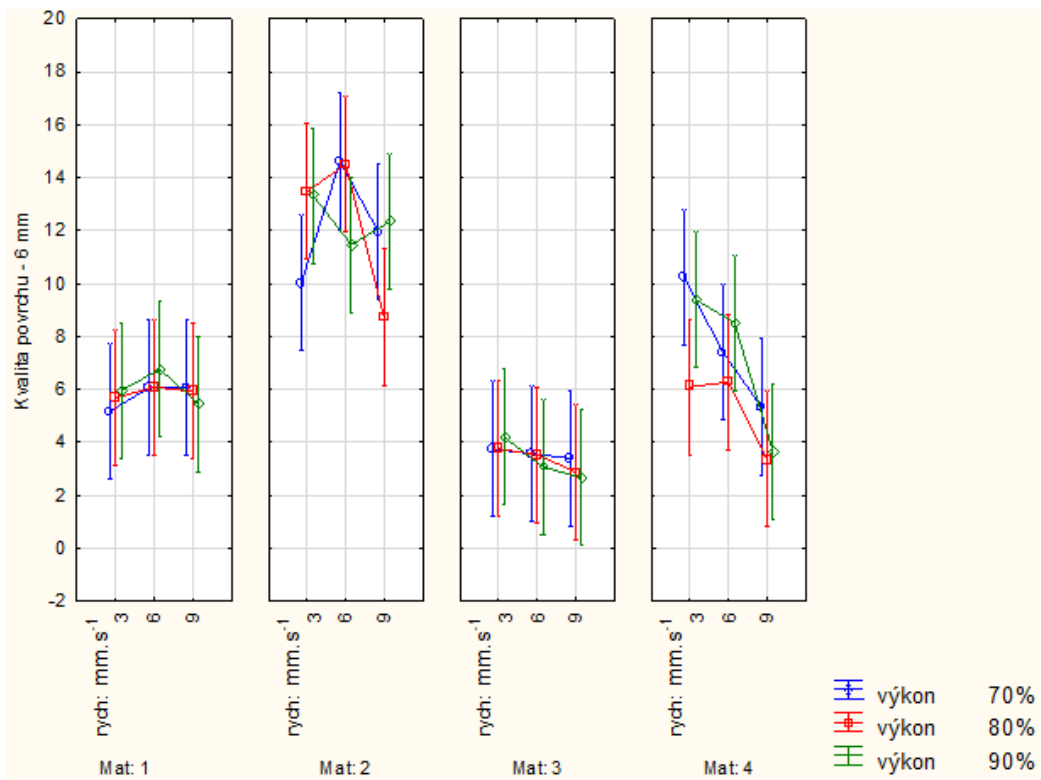


Obrázek 36 Výsledek měření lesku při úhlu 85°

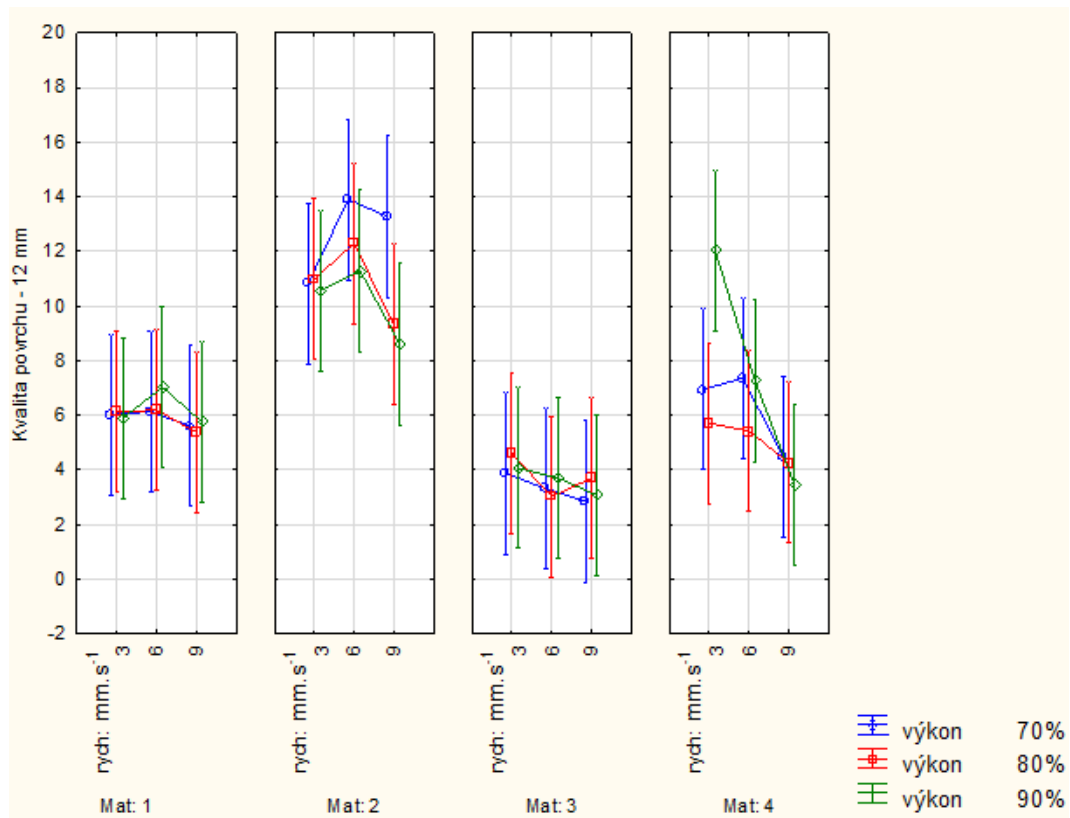
Příloha číslo 4 Výsledky měření kvality povrchu na vzdálenosti 3 mm, 6 mm a 12 mm



Obrázek 37 Výsledek měření kvality povrchu na vzdálenosti 3 mm



Obrázek 38 Výsledek měření kvality povrchu na vzdálenosti 6 mm



Obrázek 39 Výsledek měření kvality povrchu na vzdálenosti 12 mm