

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE
FAKULTA LESNICKÁ A DŘEVAŘSKÁ

**VLIV ŘEZÁNÍ LASEROVÝM PAPERSEM NA ZMĚNU
DRSNOSTI ŘEZANÝCH PLOCH LASEREM
V POROVNÁNÍ S ŘEZÁNÍM PILOVÝM KOTOUČEM**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Studijní program:

Dřevařské inženýrství

Pracoviště:

Katedra zpracování dřeva a
biomateriálů

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Milan Gaff, PhD.

Praha 2019

Bc. Michal VALIŠ

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Michal Vališ

Dřevařské inženýrství

Název práce

Vliv řezání laserovým paprskem na změnu drsnosti řezaných ploch laserem v porovnání s řezáním pilovým kotoučem

Název anglicky

The effect of laser cutting to change the surface roughness of laser-cut in comparison with the saw blade

Cíle práce

Cílem práce je experimentální srovnání účinku řezání dřeva pomocí laseru s řezáním pilovým kotoučem z hlediska změny kvality povrchu řezané plochy.

Úlohou práce je zkoumání změny parametrů kvality řezaných ploch dubového řeziva při řezání laserovým paprskem a pilovým kotoučem a jejich vzájemné srovnání.

Metodika

1. Analýza problematiky se zaměřením na řezání pilovým kotoučem a laserem. Dále analyzovat problematiku kvality řezaného povrchu.
2. Metodika práce se zaměřením na kvalitu povrchu a porovnání rozdílů mezi řezáním laserem a pilovým kotoučem.
3. Měření kvality povrchu.
4. Statistické zhodnocení naměřených dat a jejich vyhodnocení.
5. Závěr práce, kde budou zmíněny přínosy pro praxi a vědu.

Doporučený rozsah práce

70 – 80 stran

Klíčová slova

Laserový paprsek, kotoučová pila, kvalita povrchu

Doporučené zdroje informací

Barnekov, V. G.; McMillin, C. W.; Huber, H. A. Factors influencing laser cutting of wood. Forest Products Journal, 36 (1) (1986), pp. 55-58

Powell, J. CO2 Laser Cutting. 1993 Springer London (UK). ISBN 978-1-4471-3386-5

Szymani, R.; Dickinson, F. E. Recent developments in wood machining process: novel cutting techniques. Wood Science and Technology, 9 (1975), pp. 113-128

Předběžný termín obhajoby

2018/19 LS – FLD

Vedoucí práce

doc. Ing. Milan Gaff, PhD.

Garantující pracoviště

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů

Konzultant

Gaff Milan doc. Ing. PhD.

Elektronicky schváleno dne 4. 3. 2019

doc. Ing. Milan Gaff, PhD.

Vedoucí ústavu

Elektronicky schváleno dne 13. 3. 2019

prof. Ing. Marek Turčáni, PhD.

Děkan

V Praze dne 16. 04. 2019

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Vliv řezání laserovým paprskem na změnu drsnosti řezaných ploch laserem v porovnání s řezáním pilovým kotoučem vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Milana Gaffa, PhD. 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 17. 4. 2019

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu mé diplomové práce doc. Ing. Milanu Gaffovi, PhD. za připomínky, odbornou pomoc a ochotu, kterou mi v průběhu zpracování práce věnoval. Dále bych chtěl poděkovat své rodině, především své partnerce, za podporu a trpělivost během celého studia.

Abstrakt

Předložená diplomová práce se zabývá problematikou vlivu řezání nekonvenční technologií laserového paprsku na změnu kvality řezaných ploch charakterizovanou drsností a vlnitostí a je porovnávána s tradiční metodou řezání pilovým kotoučem.

Práce obsahuje dvě základní části. V první části je nejprve vysvětleno, jaká je principiální odlišnost mezi konvečními a nekonvenčními technologiemi obrábění. Dále je provedena analýza problematiky řezání laserovým paprskem. Nejprve je vysvětlen princip, na němž je technologie laseru založena, a pak jsou charakterizovány jednotlivé části laserového zařízení, včetně paprsku samotného. Neméně důležitou částí je rozdělení laserových paprsků podle režimu paprsku, podle aktivního prostředí a jejich více či méně stručné charakteristiky. Po této analýze teoretických poznatků je věnována část práce charakteristice faktorů ovlivňujících řezání dřeva laserovým paprskem. Jelikož je v práci srovnáván vliv laseru na kvalitu řezaných ploch s vlivem pilového kotouče, je v práci taktéž obdobně provedena analýza problematiky řezání pilovým kotoučem, a to jak rozbor teoretických poznatků technologie pilového kotouče, tak posléze charakteristika faktorů, které ovlivňují řezání dřeva pilovým kotoučem.

Druhá, stěžejní část diplomové práce, je zaměřena na experimentální zkoumání. Nejprve je zde popsána metodika zkoumání, ve které je vysvětleno, jaké bylo použito strojní zařízení, jak byly připraveny zkušební vzorky a také jaký byl postup samotného měření kvality povrchu obrobených ploch laserem i pilovým kotoučem. Významnou částí experimentálního celku je poté diskuze a vyhodnocení naměřených hodnot, kde je nutné si uvědomit, jaké faktory navzájem působí, a že je nelze řešit a vyhodnocovat samostatně.

Klíčová slova

laserový paprsek, kotoučová pila, kvalita povrchu

Abstract

This diploma thesis deals with the influence of cutting of the unconventional laser beam technology on the change of quality of laser-cut surfaces that is characterized by roughness and waviness and it is compared with the traditional saw blade cutting method.

The thesis contains two main parts. The first part explains first of all what the fundamental difference between the conventional and the unconventional machining technologies is. Furthermore, the analysis of laser beam cutting is provided and performed. Firstly, the principle on which the laser technology is based on is explained, and then the individual parts of the laser device, including the beam itself, are characterized. Equally important is the division of laser beams according to the beam mode, according to the active medium and their more or less brief characteristics. After this theoretical analysis the next part of the thesis is devoted to the characteristics of factors that have influence and impact on the cutting of wood by laser beam. With regard to the comparison of the influence of the laser on the quality of sawed surfaces and the influence of the saw blade demonstrated, the analysis of saw blade cutting is also similarly provided, both the analysis of the theoretical knowledge of the saw blade technology and the characteristics of the factors that have influence and impact on the cutting of wood by saw blade.

The second, fundamental part of the thesis is focused on experimental research. First of all, I describe the methodology of the research, which explains what machinery was used, how the samples were prepared, and what the procedure for measuring the surface quality of the surfaces both by the laser and by the saw blade was. An important part of the experimental piece is then discussion and evaluation of measured values, where it is necessary to bear in mind what factors interact with each other and that they cannot be solved and evaluated separately.

Key words

laser beam, saw blade, surface quality

Obsah

Seznam ilustrací	11
Seznam tabulek	13
Seznam zkratk a značek	14
1 Úvod.....	15
2 Cíle práce	18
3 Konvenční a nekonvenční metody obrábění.....	19
4 Technologie laseru.....	21
4.1 Princip laseru	22
4.1.1 Stimulovaná emise záření	22
4.1.2 Části laserového zařízení	23
4.1.3 Modulace laserového paprsku.....	25
5 Rozdělení laserů podle režimu paprsku	27
6 Rozdělení laserů podle aktivního prostředí	29
6.1 Plynné lasery	29
6.1.1 Atomární lasery.....	29
6.1.1.1 He-Ne laser.....	29
6.1.2 Iontové lasery.....	29
6.1.2.1 Ar ⁺ laser.....	30
6.1.2.2 Helium-kadmiový laser	30
6.1.3 Molekulární lasery	30
6.1.3.1 CO ₂ laser.....	30
6.1.4 Chemické lasery.....	31
6.2 Pevnolátkové lasery.....	32
6.2.1 Rubínový laser	32
6.2.2 Nd:YAG laser	32
6.2.3 Nd:sklo laser	32
6.3 Polovodičové lasery.....	32
6.4 Kapalinové lasery	33

7 Faktory ovlivňující řezání dřeva laserovým paprskem	34
7.1 Vliv vlastností laserového paprsku	34
7.2 Vliv vlastností strojního zařízení	35
7.3 Vliv vlastností materiálu obrobku	36
8 Technologie obrábění pilovým kotoučem	38
8.1 Charakteristika pilového kotouče	38
8.2 Části pilového kotouče a jeho tvar a velikost	40
8.3 Geometrie řezného klínu	41
8.4 Tvary zubů	43
8.5 Materiály pro pilové kotouče	44
8.6 Úprava pilového kotouče	45
8.6.1 Omezovače třísky	45
8.6.2 Otvory pro ochlazování	46
8.6.3 Čistící a stabilizační prvky	46
8.6.4 Dilatační drážky	46
8.6.5 Protihlukové úpravy	47
8.7 Úpravy řezného zubu	47
9 Faktory ovlivňující řezání dřeva pilovým kotoučem	49
9.1 Vliv vlastností pilového kotouče	49
9.2 Vliv vlastností strojního zařízení	50
9.3 Vliv vlastností materiálu obrobku	50
10 Metodika práce	51
11 Příprava zkušebních těles	52
11.1 Použitý materiál	52
11.1.1 Charakteristika dubu	52
11.1.2 Charakteristika buku	52
11.2 Příprava zkušebních vzorků	52
11.3 Zjištění hustoty a vlhkosti	54
11.3.1 Zjištění hustoty	54

11.3.2 Zjištění vlhkosti	54
11.4 Použité stroje	55
11.4.1 Laser.....	55
11.4.2 Formátovací pila	55
12 Měření	57
12.1 Kontaktní profilometr	57
12.2 Sledované parametry	58
12.3 Metodika měření průměrné aritmetické úchytky profilu drsnosti a vlnitosti	59
12.4 Nastavení profilometru.....	59
13 Statistické zpracování dat.....	61
14 Výsledky a diskuze	63
14.1 Vliv faktoru vzájemného působení sledovaných faktorů na hodnoty Ra.....	65
14.2 Vliv faktoru vzájemného působení sledovaných faktorů na hodnoty Wa.....	67
15 Závěr.....	70
16 Seznam použité literatury.....	73

Seznam ilustrací

Obrázek 1 Základní rozdělení nekonvenčních metod obrábění.....	20
Obrázek 2 Zdroje světla.....	21
Obrázek 3 Schéma vzájemného působení elektromagnetického záření a molekul nebo atomu.....	22
Obrázek 4 Schéma principu laserové technologie.....	24
Obrázek 5 Ukázky modální struktury laserů.....	26
Obrázek 6 Generovaná energie podle režimu laserového paprsku.....	27
Obrázek 7 Schéma CO ₂ laseru.....	31
Obrázek 8 Účinek ohniskové vzdálenosti.....	35
Obrázek 9 Řezání dřeva pilovými kotouči.....	39
Obrázek 10 Stolní kotoučová pila.....	39
Obrázek 11 Tvary těl v příčném průřezu.....	40
Obrázek 12 Pojmy řezného klínu.....	42
Obrázek 13 Rozměry řezného klínu.....	42
Obrázek 14 Tvary zubů.....	44
Obrázek 15 Prvky úpravy pilových kotoučů.....	45
Obrázek 16 Omezovač tloušťky třísky.....	46
Obrázek 17 Kotouč s protihlukovou úpravou.....	47
Obrázek 18 Úprava zubů pilového kotouče.....	48
Obrázek 19 Ukázka značení zkušebních těles opracovaných laserem.....	53
Obrázek 20 Ukázka vzorku po úpravě pilovým kotoučem.....	54
Obrázek 21 Formátovací pila SCM si 300 class.....	55
Obrázek 22 Princip indukčního snímače.....	57
Obrázek 23 Kontaktní profilometr Form Talysurf 50 Intra 2.....	57
Obrázek 24 Princip výpočtu parametru Ra.....	58
Obrázek 25 Ukázka umístění měřených oblastí na zkušebním tělese.....	59
Obrázek 26 Snímací raménko profilometru.....	60
Obrázek 27 Vliv vzájemného působení sledovaných faktorů na hodnoty Ra při řezání laserem.....	66
Obrázek 28 Vliv vzájemného působení sledovaných faktorů na hodnoty Ra při řezání pilovým kotoučem.....	67

Obrázek 29 Vliv vzájemného působení sledovaných faktorů na hodnoty W_a při řezání laserem	68
Obrázek 30 Vliv vzájemného působení sledovaných faktorů na hodnoty W_a při řezání pilovým kotoučem.....	69

Seznam tabulek

Tabulka 1 Parametry řezání laserem.....	55
Tabulka 2 Základní vlastnosti formátovací pily SCM si 300 class	56
Tabulka 3 Parametry měření podle normy ČSN EN ISO 4287 (1999)	60
Tabulka 4 Vyhodnocení testovaných faktorů na základě hodnoty P	62
Tabulka 5 Průměrné hodnoty drsnosti Ra, vlnitosti Wa, a hustoty pro jednotlivé sady zkušebních vzorků	63
Tabulka 6 Statistické vyhodnocení jednosměrné analýzy vzájemného působení sledovaných faktorů na hodnotu Ra na vzorcích řezaných laserem	64
Tabulka 7 Statistické vyhodnocení jednosměrné analýzy vzájemného působení sledovaných faktorů na hodnotu Ra na vzorcích řezaných pilovým kotoučem.....	64
Tabulka 8 Statistické vyhodnocení jednosměrné analýzy vzájemného působení sledovaných faktorů na hodnotu Wa na vzorcích řezaných laserem	65
Tabulka 9 Statistické vyhodnocení jednosměrné analýzy vzájemného působení sledovaných faktorů na hodnotu Wa na vzorcích řezaných pilovým kotoučem.....	65

Seznam zkratek a značek

a	vzdálenost osy hřídele od spodní hrany stolu
d_{fok}	průměr fokusovaného svazku paprsků v ohnisku
D	průměr paprskového svazku dopadajícího na čočku
D_{min}	minimální průměr pilového kotouče
e_{fok}	hloubka ostroty ohniska
E_0	energie základního stavu
E_i	energie excitovaného stavu
ΔE_i	excitační energie
f	ohnisková vzdálenost čočky
f_z	posuv na zub
h	Planckova konstanta
H	řezná výška
m_0	hmotnost tělesa při nulové vlhkosti
m_w	hmotnost tělesa při vlhkosti w
n	počet otáček
p	přesah kotouče na obrobek
r	poloměr upevňovacích přírub
s	tloušťka kotouče
TEM	transverse electromagnetic mode, mód laserového paprsku
v	frekvence vlnění
v_c	řezná rychlost
v_f	posuvná rychlost
V_w	objem tělesa při vlhkosti w
w	vlhkost
z	počet zubů
λ	vlnová délka záření
ρ_w	hustota tělesa při vlhkosti w

1 Úvod

Dřevo je dnes stejně jako v minulosti jedním z nejpoužívanějších přírodních materiálů na světě. Jeho obliba po celá staletí přetrvává snad i díky jeho poměrně snadné opracovatelnosti, jeho mechanickým vlastnostem či jeho přírodnímu původu, se kterým souvisí jeho obnovitelnost. Průmyslové využití dřeva je dnes velice široké, sahá od stavebních konstrukcí přes nábytek až po designové prvky automobilových karoserií (Barcikowski a kol., 2004).

Nedílnou součástí průmyslového zpracování nejen dřeva jsou samozřejmě také metody jeho zpracování a nástroje, kterými se na materiály působí a dává se jim požadovaný tvar a rozměry. Zde se setkáváme jak s tradičními ověřenými metodami, kterými se dřevo opracovává už stovky let, tak s metodami, které jsou v současnosti stále podrobovány intenzivnímu výzkumu a jsou známy spíše pouze odborné než široké veřejnosti. Jednou z takovýchto progresivních technologií obrábění je mimo jiné technologie laseru.

Technologie obrábění laserem neboli pomocí zesíleného světla stimulovanou emisí záření (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) byla na svět přivedena v druhé polovině dvacátého století. Základ této technologii však položil již Albert Einstein v roce 1917, ale první funkční lasery byly zkonstruovány až o více než čtyřicet let později, a to především pro obrábění diamantových raznic a pro řezání ocelových plošných dílců. Postupným vývojem se začal laser aplikovat i na nekovové materiály, respektive dřevo a materiály na bázi dřeva, a pronikl tak i do průmyslu dřevozpracujícího, kde bylo podle Barnekova a kol. (1986) mnohem náročnější pochopit a vnímat složité interakce mezi laserovým paprskem a dřevem.

Jedním z hlavních důvodů tohoto pozdějšího objevování laseru v dřevozpracujícím průmyslu je bezpochyby organický původ dřeva a vědomí, že i když máme dva na první pohled stejné kusy jedné dřeviny, tak jednoduše nejsou stejné a každý kus masivního dřeva je zkrátka originál. Rozdílná makroskopická i mikroskopická struktura dřeva u každé dřeviny, nebo alespoň u každé skupiny dřevin, má za důsledek jinou kvalitu svého povrchu po obrobení různými obráběcími nástroji. V důsledku toho, že dnešní průmyslové lasery nám již dovolí řezat materiály o tloušťce až do 80 mm, je v zájmu nejen mém, ale i výzkumných ústavů či samotných průmyslových podniků, intenzivně zkoumat vliv této progresivní metody právě na kvalitu nově vzniklých ploch po obrobení laserem. Minimální řezná spára, která

u laserů činí desetiny milimetru (oproti konvenčním technologiím, kde je řezná spára daná tloušťkou nástroje, u pilových kotoučů od 1,4 mm), tzn. minimální ztráta dřevní hmoty a z toho vyplývající zvýšení výtěže či žádné ostření nástrojů, to jsou určitě více než dobré důvody, proč se tímto tématem zabývat a objasňovat, za jakých podmínek je použití technologie laseru vhodné a zároveň výhodné.

Téma předkládané diplomové práce jsem proto při jejím výběru směřoval právě k této nekonvenční technologii a jejímu zkoumání v oblasti dřevozpracujícího průmyslu, respektive obrábění masivního dřeva. Ve své bakalářské práci, vypracované taktéž na půdě České zemědělské univerzity v Praze, jsem se rovněž věnoval nekonvenční technologii obrábění dřeva, a to technologii dělení vodním paprskem. Po zkoumání této technologie jsem se proto chtěl dále zaměřit na další nekonvenční metodu, kterou je právě laser. Konkrétní téma této diplomové práce se zabývá problémem kvalitativních změn nově vzniklých obrobených ploch masivního dřeva laserem, a to se zaměřením na vliv použité obráběcí metody, respektive srovnání vlivu laseru a pilového kotouče na kvalitu výsledných ploch, a to celé v kontextu zkoumání jejich dopadu na změnu drsnosti obrobených ploch vybraných dřevin. Téma práce mě osobně skutečně oslovilo, a to i z toho důvodu, že nedílnou součástí byla samozřejmě i výzkumná, experimentální část, při které si mohu vyzkoušet činnosti, kterými se mohu podílet na praktickém zkoumání s možným přínosem pro další výzkum dané problematiky. Současně si uvědomuji, že výsledky této práce budou pouze jedním aspektem zkoumání složitých interakcí mezi dřevem a laserovým paprskem, tedy, že zkoumaná oblast kvality povrchu není jediná, která v současné době podléhá intenzivnímu výzkumu, ale že je to důležitá část většího celku a že i díky tomu by mohly být ve výsledku přínosné pro celou oblast dřevozpracujícího průmyslu.

V práci se tedy nejprve věnuji teoretickým poznatkům, respektive analýze technologie řezání laserem a také analýze technologie řezání pilovým kotoučem. Tato tradiční a jedna z nejrozšířenějších technologií řezání dřeva vůbec bude sloužit k porovnání vlivu řezání laserovým paprskem na změnu drsnosti a vlnitosti obrobeného povrchu rostlého dřeva. Jako výzkumný materiál budou v této souvislosti zvoleny dvě z nejvíce používaných domácích listnatých dřevin, a to konkrétně dřevo dubové a bukové. Na nich bude prováděna experimentální část mé práce, a to za pomoci měřících nástrojů dostupných přímo na Fakultě lesnické a dřevařské České zemědělské univerzity v Praze. Následně se pokusím výsledné hodnoty vyhodnotit a okomentovat.

V předkládané práci budu s ohledem na její téma, obsah a koncepci vycházet z široké palety zdrojů. Je nezbytné pracovat jak s materiály domácích autorů, tak rovněž s literaturou a prameny zahraničními, anglických a německých odborných publikací, přičemž budu používat také technické normy.

Z hlediska metodologie bude v předložené práci použita jednak metoda deskriptivní, dále v některých částech metoda analytická a komparativní, a to samozřejmě za využití experimentálního zkoumání.

2 Cíle práce

Hlavním cílem předkládané diplomové práce je experimentální srovnání účinku řezání dřeva pomocí laseru s řezáním dřeva pilovým kotoučem z hlediska změny kvality povrchu řezané plochy.

Pro dosažení hlavního cíle je nutné provést analýzu teoretických poznatků. Uvědomit si rozdíl mezi konvenční a nekonvenční technologií obrábění. Dále se seznámit s tím, na jakém principu je založená technologie řezání laserem. Stejně tak je potřeba zanalyzovat problematiku technologie řezání pilovým kotoučem, se kterou bude technologie laseru v experimentální části srovnávána. Dále je potřeba zanalyzovat problematiku kvality řezaného povrchu, a to jak u laserové technologie, tak u technologie pilového kotouče. Podání těchto uvedených charakteristik je tedy možné považovat za dílčí cíle mé diplomové práce.

Experimentální část práce je zaměřená na zkoumání vlivu metody řezání na výslednou kvalitu nově vzniklého povrchu. Je proto nutné si stanovit metodický postup měření kvality povrchu, který bude posuzován pomocí dvou charakteristik:

- R_a – střední aritmetická úchylka posuzovaného profilu drsnosti,
- W_a – střední aritmetická úchylka posuzovaného profilu vlnitosti.

Posléze bude provedeno samotné měření a analýza naměřených dat, včetně jejich vyhodnocení.

3 Konvenční a nekonvenční metody obrábění

Vzhledem k tomu, že se v tématu své práce věnuji srovnání účinku metody obrábění pilovým kotoučem a obrábění laserem, tedy použití metody tradiční a metody progresivní, považuji v této souvislosti za vhodné na úvod alespoň stručně vysvětlit a přiblížit v obecné rovině rozdíl mezi těmito dvěma kategoriemi.

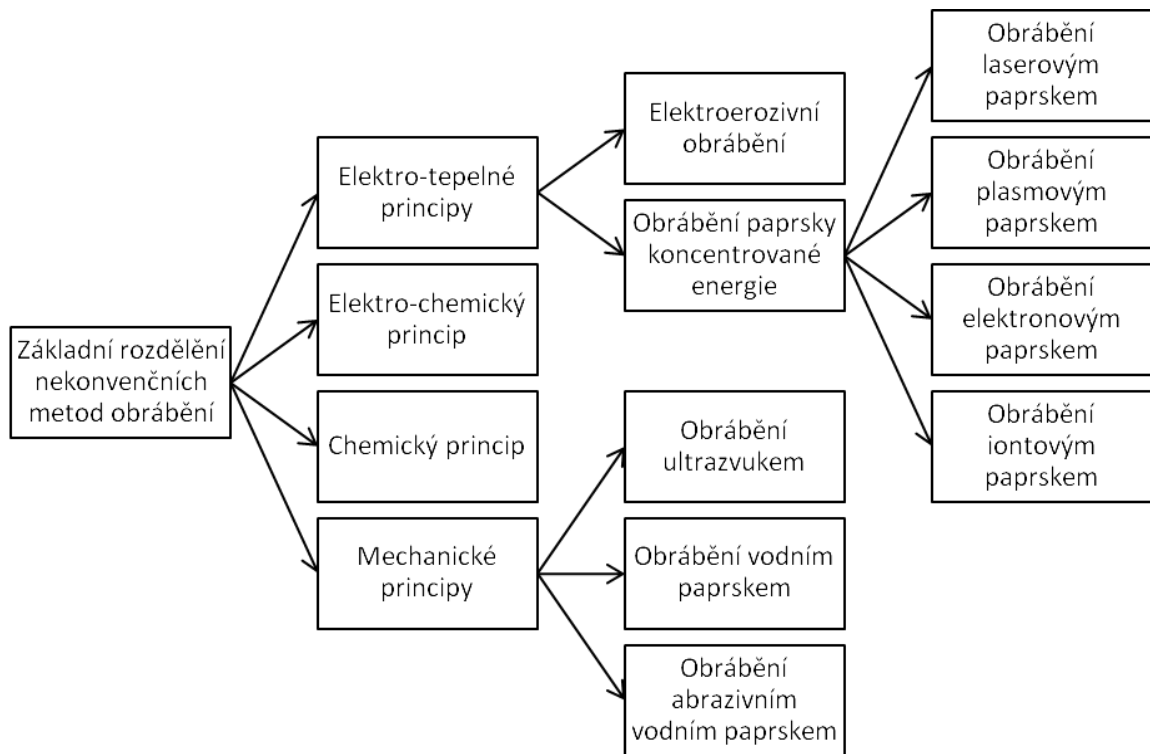
Obrábění je definováno jako technologický proces vytvářející požadovaný tvar a rozměry obráběného materiálu neboli obrobku, výrobku s užitnou hodnotou. Díky neustálému technologickému vývoji existují různé způsoby tohoto technologického procesu (Kvietková, 2015). Technologie obrábění nám nabízejí jak metody konvenční, tedy výrobní způsoby bez zvláštních požadavků na nejnovější technologie využívané již po staletí, tak metody nekonvenční, které jsou nové a netradiční.

K úběru materiálu tradičními metodami, jako jsou pásové pily, kotoučové pily, frézy atd., dochází řezným klínem řezného nástroje (zuby pilového pásu, kotouče) a vzniká tříska, vytváří tedy značnou ztrátu dřevní hmoty. Třísky, tedy odpadní produkt, který se sice dnes účelně zpracovává pro výrobu aglomerovaných materiálů, tvoří poměrně značnou část vstupního materiálu do procesu obrábění a nelze je tedy zcela opomenout. Společně s nevyhnutelným opakovaným ostřením a údržbou řezných nástrojů se tak negativně promítá do ekonomie daného způsobu obrábění.

Jak už bylo naznačeno výše, laserová technologie je označována jako nekonvenční technologie obrábění. Pojem nekonvenční označuje něco neobvyklého, originálního či možná nového. Spousta metod obrábění označovaných jako nekonvenční technologie je ovšem v praxi využívána již mnoho let. Proto by zřejmě bylo přiléhavější označení progresivní technologie, tzn. pokrokové, soustavně se vyvíjející. Neustále se tyto technologie vyvíjejí kupředu, nacházejí nové a nové využití (v obrábění dřeva, gravírování, povrchových úpravách dřeva (Kubovský a Kačík, 2014), vrtání, svařování či v chirurgii (Zahod'te skalpely. Laser, prosím!, [cit. 2019-04-07])), a rozšiřují se dále do mnoha různých oborů.

Tradiční, či chceme-li konvenční, technologie obrábění jsou založené na principu mechanického úběru materiálu, jako například u kotoučové či pásové pily. Naproti tomu nekonvenční, progresivní technologie jsou založeny na jiném principu. Úběr materiálu v takových případech tedy není prováděn mechanicky, ale spíše fyzikálně či chemicky. A to například účinkem tepla, vody nebo ultrazvuku (El-Hofy,

2005). Těchto technologií je dnes velké množství a pouze pro úplnost je zde uveden jejich přehled na Obrázku 1.



Obrázek 1 Základní rozdělení nekonvenčních metod obrábění

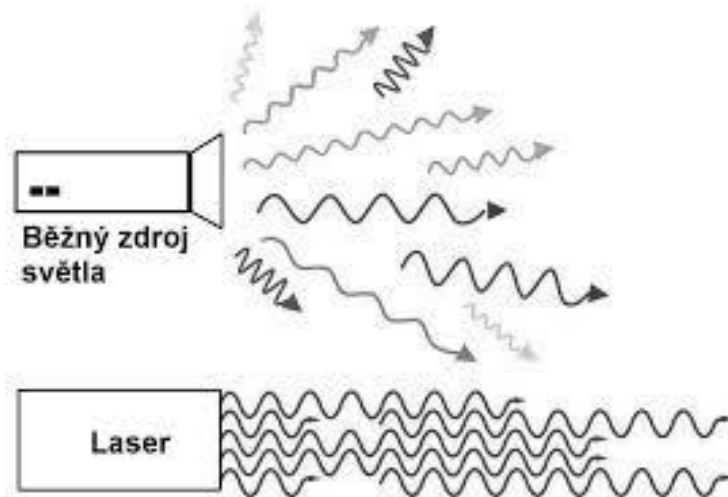
(Zdroj: vlastní)

Na základě výše uvedeného základního seznámení se s rozdělením kategorií metod obrábění se budu v následujících částech práce věnovat bližší charakteristice a souvisejícím vlastnostem vybraných metod obrábění, tedy technologii laserového paprsku a následně obdobně technologii pilového kotouče.

4 Technologie laseru

Jak jsem již výše zmínil, laser je zesílené světlo pomocí stimulované emise záření. Je to zdroj světla, který se běžně v přírodě nikde nevyskytuje. Běžný zdroj světla produkuje elektromagnetické záření o mnoha vlnových délkách, které se šíří všemi směry. Naproti tomu laser je zdroj světla:

- monochromatického (má pouze jednu vlnovou délku) a usměrněného jak lze vidět na Obrázku 2,
- je vysoce koherentní a má minimální rozbíhavost,
- má modální strukturu (v příčném průřezu vytváří paprsek buď jednoduchou stopu nebo složitější obrazce pravouhle nebo kruhově symetrické, blíže se tomuto bodu věnuje jedna z následujících kapitol) (Humár, 2005).



Obrázek 2 Zdroje světla

(Zdroj: Sadílek, 2009)

Jedná se tedy o energii elektromagnetického záření usměrněného do svazku paprsků kruhového průřezu, který je optickou čočkou soustředěn na velmi malou plochu. Intenzita této zkoncentrované energie je tak vysoká, že způsobuje porušení obrobku. Energie potřebná k rozrušení daného obrobku se samozřejmě mění v závislosti na jeho vlastnostech, jako jsou materiál obrobku, tloušťka a další (Sadílek, 2009).

4.1 Princip laseru

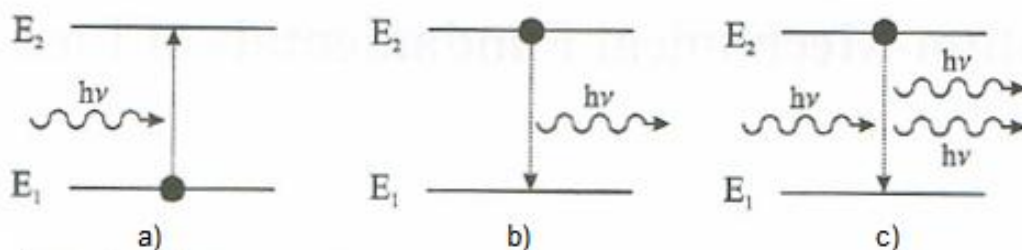
Princip laseru je možné vystihnout pomocí pojmů kvantové fyziky. Každá hmota, látka je tvořena molekulami, atomy a ionty. Ty tvoří soustavy složené z navzájem vázaných elementárních částic - protonů, neutronů a elektronů. Každá z těchto soustav částic v nehybném stavu má přesně definovanou energii. Pro tyto soustavy vázaných částic existuje více vnitřních nehybných stavů, které mají různé hodnoty energie. Tyto hodnoty energií nabývají různých hodnot a nazýváme je energetické hladiny.

Energie nehybných stavů soustav částic může nabývat pouze určitých hodnot, jsou tzv. kvantovány, a tak se používá pro molekulu, atom a iont a další společné označení kvantová soustava. Stav, jež má nejnižší hodnotu energie E_0 , je označován jako základní stav. Ostatní stavy s vyššími hodnotami energie se nazývají excitované nebo vybuzené stavy. Rozdíl mezi energií základního a excitovaného stavu označujeme jako excitační energii (Vrbová a kol., 1998).

$$\Delta E_i = E_i - E_0 \quad (1)$$

4.1.1 Stimulovaná emise záření

Pro každý laser je klíčové tzv. aktivní prostředí. Jde o látku, která je díky svým vlastnostem schopna zesílit jí procházející, vyzařované záření za pomoci stimulované emise. K tomu může docházet při vzájemném působení fotonu (kvant elektromagnetického záření) a molekuly nebo atomu. Známe tři možné primární typy těchto vzájemných působení, které jsou schematicky znázorněny na Obrázku 3 (Eichhorn, 2014).



Obrázek 3 Schéma vzájemného působení elektromagnetického záření a molekul nebo atomu

a - absorpce, b - spontánní emise, c - stimulovaná emise

(Zdroj: Eichhorn, 2014)

Představme si dvě energetické hladiny, hladinu 1 a hladinu 2 libovolné kvantové soustavy daného materiálu s hodnotami energií E_1 a E_2 , kde $E_1 < E_2$ a hladinu 1 považujeme za hladinu základního stavu, tedy s nejnižší hodnotou energie. Částice ležící na hladině 1 má snahu na této energetické hladině zůstat, dokud jí nějakým způsobem není dodána energie. Tou může být například elektromagnetické vlnění představované fotony. Pokud by byla jejich energie rovna rozdílu $E_2 - E_1$, absorbuje částice tuto energii a s konečnou pravděpodobností přejde na energetickou hladinu 2. Tento úkaz se nazývá absorpce záření (Eichhorn, 2014).

Dále uvažujme, že se částice již nachází na hladině 2, kam se mohl dostat například popsanou absorpcí záření. Vzhledem ke vztahu hodnot energetických hladin $E_1 < E_2$ má částice snahu přejít do energeticky výhodnějšího vztahu, tedy na hladinu 1 s nižší hodnotou energie. Musí proto snížit svou energii o rozdíl $E_2 - E_1$. energii může vyzářit jako elektromagnetické záření, a to se potom nazývá jako spontánní emise. Frekvence tohoto uvolněného vlnění ν je popsána vztahem

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

kde:

h - Planckova konstanta, $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ J.s (Lapšanská, 2010).

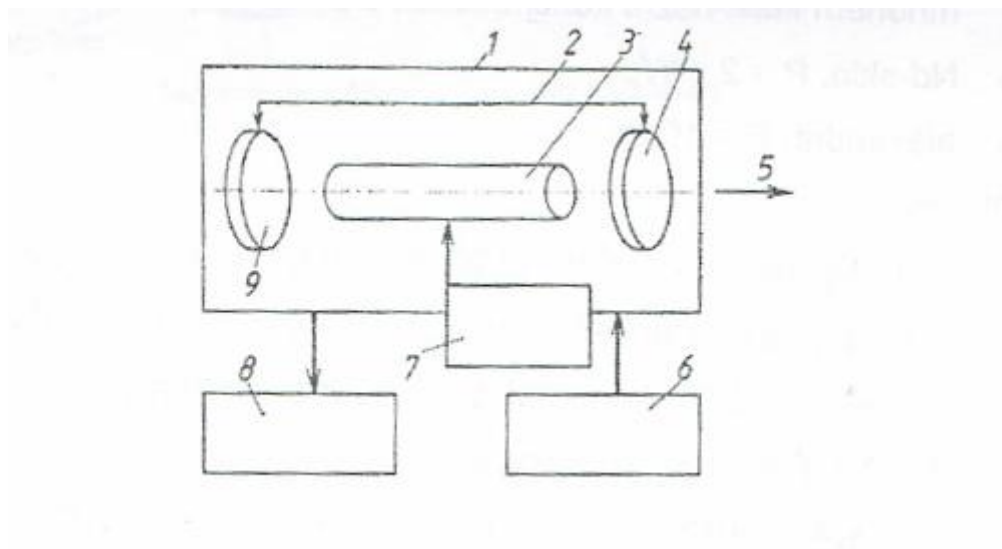
Spontánní emisi tedy vystihuje vyzáření fotonu s energií

$$h\nu = E_2 - E_1 \quad (3)$$

Pokud se atom nachází na hladině 2 a zároveň na něj dopadá elektromagnetická vlna s frekvencí ν neboli frekvencí spontánně emitované vlny, je nenulová pravděpodobnost, že dopadající vlna donutí atom přejít do stavu 1 za současné emise záření s energií $h\nu$. Dopadající a emitované vlnění mají stejný směr, jsou ve fázi, skládají se a tím dochází k zesílení původního vlnění. Došlo ke stimulované emisi záření (Lapšanská, 2010), viz Obrázek 3c. Aby mohla být zachována nepřetržitá stimulovaná emise, je předpokladem přítomnost inverzní populace. K inverzi populace dochází, pokud jsou přebytky částic na vyšších energetických hladinách.

4.1.2 Části laserového zařízení

Na následujícím Obrázku 4 je zobrazen schematický princip laserové technologie, včetně jeho součástí.



Obrázek 4 Schéma principu laserové technologie

1 - laserová hlavice, 2 - rezonátor, 3 - laserové médium, 4 - polopropustné zrcadlo, 5 - výstupní zařízení, 6 - zdroj energie buzení, 7 - budící zařízení, 8 - chladicí systém, 9 - nepropustné zrcadlo

(Zdroj: Sadílek, 2009)

Rezonátor je optická soustava dvou zrcadel, jednoho polopropustného a druhého nepropustného, mezi kterými dochází k odrazu paprsku fotonů a jeho opakovanému průchodu skrz aktivní prostředí. Aktivní prostředí napomáhá ke vzniku stimulované emise a tím k zesilování toku fotonů a výsledný zesílený paprsek fotonů opouští rezonátor průchodem skrze výstupní polopropustné zrcadlo. To, jaké průměry a zakřivení zrcadla mají, nám určuje rozdělení intenzity záření a energetickou rozbíhavost neboli divergenci paprsku (Kvietková, 2015).

Aktivní prostředí neboli laserové médium je látka vhodná svými energetickými hladinami ve vhodném nosném materiálu pro šíření záření a zároveň má schopnost odvádět vzniklé teplo. Je také určující pro délku vlny záření (Řasa a Kerečaninová, 2008).

Budící zařízení je součástí laserového zařízení, která dodává energii aktivnímu prostředí, ve kterém dochází k aktivaci neboli buzení laserového média a zajišťuje tak přebytek částic ve vyšším energetickém stavu. Způsob buzení je tedy závislý na laserovém médiu. Plynná média jsou takřka vždy buzena elektrickým výbojem pomocí stejnoměrného nebo střídavého proudu. Pevná laserová média jsou nejčastěji buzena lampami či diodami.

Při průmyslových laserech je svazek opouštějící rezonátor dále upravován systémem čoček a clon (expander), abychom zvýšili kvalitu a upravili průměr svazku, a snížili tak jeho rozbíhavost. V tomto systému čoček a clon vždy dochází k velkým energetickým ztrátám, které ovlivňují výslednou účinnost laseru. Kvalita svazku bývá ovšem v řadě uplatnění preferována před výkonem laseru.

Další soustavou zrcadel a čoček je svazek veden do pracovní hlavy laseru (laserové hlavice), případně do optického vlákna a jejich prostřednictvím k místu určení, tedy obrobku. Optické komponenty musejí být vyrobeny z materiálů, které nepohlcují generované záření. Nejčastěji je to dielektrické sklo nebo leštěné kovy (Lapšanská, 2010).

Chladicí systém slouží samozřejmě k chlazení laseru, kde se nevyužitá energie nepřemění v záření, ale v tepelnou energii. Nejčastěji se k chlazení používá voda. V chladicím okruhu se nacházejí dvě větve, ve vnitřní větvi chladicího okruhu se používá voda deionizovaná a ve druhé, vnější, obyčejná voda z vodovodní sítě. Někdy může být vnitřní okruh chlazen vzduchem (Kvietková, 2015).

4.1.3 Modulace laserového paprsku

Jak jsem již zmínil výše, jednou z důležitých vlastností pro obrábění laserem je jeho modální struktura neboli tvar paprsku v příčném průřezu, který je závislý jak na vlnové délce fotonů, tak na vzdálenosti a zakřivení zrcadel a na průměru laserové trubice. Mód laseru vymezuje jeho vhodnost pro průmyslové použití (Powell, 1993).

Tvar průřezu laserového svazku se nazývá mód a označuje se TEM (transverse electromagnetic mode). Laserový paprsek může v příčném průřezu zanechávat jednoduchou stopu (základní Gaussův mód) nebo složitější obrazce pravoúhle nebo kruhově symetrické. Je to způsobeno tím, že uvnitř laserového rezonátoru získává elektromagnetické pole generované stimulovanou emisí záření určité uspořádání neboli mód, a to v závislosti na okrajových podmínkách rezonátoru. Nejvyšší hustoty energie při dané výstupní energii laseru lze dosáhnout laserem pracujícím v základním Gaussově módu označovaného TEM_{32} . Index charakterizuje symetrii elektromagnetického pole v rovině příčného průřezu paprsku.

Jednotlivé módy se označují jako





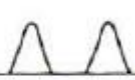













$$TEM_{m,n}$$

kde:

m - počet minim intenzity ve směru poloměru příčného řezu svazku,

n - polovina počtu minim intenzity po obvodě příčného řezu svazku (Maňková, 2000).

Ukázky některých modálních struktur jsou uvedeny na Obrázku 5.

řez A v rovině kolmé na směr paprsku	řez B kolmý na řez A	půdorys	označení TEM (použití)
1 			TEM ₀₀ Gauss (řezání)
2 			TEM ₀₁ (svařování)
3 			TEM ₂₁
4 			TEM ₃₂ (málo používané)
5 			multimód (řezání)
6 			multimód (nevhodné pro řezání)

Obrázek 5 Ukázky modální struktury laserů

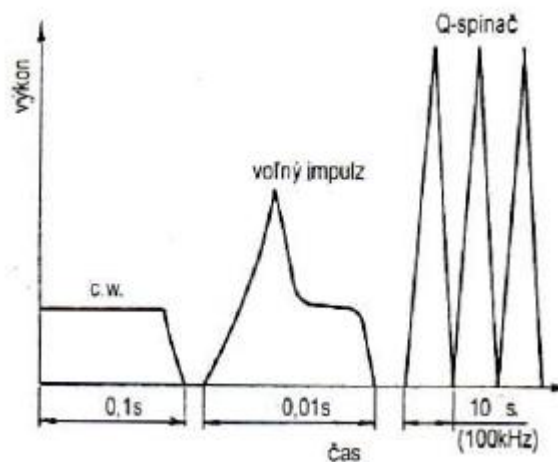
(Zdroj: Maňková, 2000)

5 Rozdělení laserů podle režimu paprsku

Průmyslové lasery lze rozdělit podle dvou základních hledisek. Tím prvním hlediskem je režim, ve kterém paprsek pracuje. Podle režimu paprsku rozlišujeme dva základní režimy paprsku, a to režim kontinuální a režim pulzní.

Pulzní režim vzniká přerušováním budícího elektrického výboje. Pulzní režim umožňuje snížení objemového ohřevu materiálu vlivem krátké doby působení laserového svazku na materiál a také provedení řady vysokorychlostních operací v důsledku rychlého zažihání a zhasínání laserového svazku.

Výstupní výkon laseru v kontinuálním režimu je ekvivalentní k jeho celkovému jmenovitému výkonu daného typu laseru. Naproti tomu pulzní laser je elektronicky modulován k emisi pulzu o několikanásobně vyšším výkonu (Maňková, 2000). Průběh energie podle režimu znázorňuje Obrázek 6.



Obrázek 6 Generovaná energie podle režimu laserového paprsku

(Zdroj: Maňková, 2000)

Máme dva základní typy pulzních režimů, a to standardní pulzní režim a režim s modulací jakosti optického rezonátoru. Standardní pulzní režim je režim s volnou generací pulzů, kdy jsou pulzy vázány na průběh pulzů budící výbojky. Takto je dosahováno poměrně dlouhých pulzů s velmi vysokým výkonem a malou opakovací frekvencí do 100 Hz.

Dalším je tedy režim s modulací jakosti optického rezonátoru (tzv. Q -spínač/Q -switched), kde režim paprsku je kontinuální a pulzy jsou vytvářeny pravidelnou změnou

vlastností rezonátoru, a to nejčastěji jeho optické propustnosti. Opakovací frekvence pulzů je až 100 kHz (Sochor, 1990).

6 Rozdělení laserů podle aktivního prostředí

Dalším ze základních hledisek pro dělení laserů je rozdělení laserů podle druhu aktivního prostředí, ve kterém dochází k efektu stimulované emise. Jedná se o plynné lasery, pevnolátkové lasery, polovodičové lasery a kapalinové lasery.

6.1 Plynné lasery

Aktivním prostředím je zde plyn nebo směs plynů. Inverze populace hladin je vytvářena mezi energetickými hladinami některé ze složek plynu, tj. atomů (atomární lasery), iontů (iontové lasery) a molekul (molekulární lasery). Většina plynných laserů funguje v kontinuálním režimu, byly vyvinuty ovšem i lasery s velmi vysokým výkonem fungující v pulzním režimu. Plynné lasery mohou být buzeny mnoha způsoby, například elektrickým výbojem, chemickou reakcí a dalšími (Vrbová a kol., 1998).

6.1.1 Atomární lasery

V případě atomárních laserů vytváří aktivní prostředí elektricky neutrální atomy, v molekulách nevázané (Vrbová a kol., 1998). Typickým představitelem atomárního laseru je helium neonový laser (He-Ne laser).

6.1.1.1 He-Ne laser

U He-Ne laseru je aktivní prostředí vytvářeno excitovanými atomy neonu. Ty jsou excitovány, vybuzeny, v kontinuálním doutnavém elektrickém výboji ve směsi plynů helia a neonu. Základem budícího procesu jsou nepružné srážky elektronů elektrického výboje s atomy neonu a helia. Energetické hladiny helia jsou nestabilní a mají dlouhou životnost, a proto jejich populace může být poměrně velká. Atomy helia tak slouží jako zásobárna budící energie pro atomy neonu v základních energetických stavech. Rychlost a účinnost buzení tak závisí především na složení směsi a tlaku plynu, podmínkou je však udržení doutnavého výboje (Vrbová a kol., 1998).

6.1.2 Iontové lasery

Iontové lasery jsou lasery, které využívají jako aktivní prostředí ionty vzácných prvků nebo ionty par kovů. Typickým znakem iontových laserů je generace záření v několika vlnových délkách ve viditelné a blízké infračervené oblasti spektra (Sochor, 1990).

6.1.2.1 Ar⁺ laser

Často používaným představitelem iontových laserů je argonový laser (Ar⁺-laser). Aktivní prostředí je zde tvořeno ionty argonu. Buzení probíhá pomocí silnoproudého elektrického výboje. Buzení nastává nepružnými srážkami elektronů s atomy a ionty argonu. Probíhá postupně tak, že nejprve ionizují atomy a vzniknuvší ionty pak v další vlně srážek znovu ionizují a tím se excitují (Vrbová a kol., 1998).

6.1.2.2 Helium-kadmiový laser

Dalším zástupcem iontových laserů je helium-kadmiový laser, který je zástupcem laseru pracujícím s ionty kovu. Je buzen elektrickým výbojem, kde se nejprve excituje a ionizuje helium. Excitované atomy helia pak dávají za vznik iontům kadmia Cd⁺. Elektrické pole, které je ve výboji, vytahuje ionty kadmia z prostoru výboje. Je tak nutné speciální konstrukcí laseru zajistit dodávku nových atomů Cd do výboje (Vrbová a kol., 1998).

6.1.3 Molekulární lasery

V porovnání s atomy a ionty mají molekuly složitější spektra energetických hladin, které se dále štěpí na vibrační podhladiny, a ty zase na rotační podhladiny. Vodíkové, dusíkové a excimerové lasery generují ultrafialové nebo viditelné záření, aktivním prostředím je molekulární vodík, respektive dusík nebo excimer, jež je nestabilní molekula, která vzniká pouze na přechodnou dobu jako důsledek vzájemného působení vybuzeného atomu nebo molekuly s atomem nebo molekulou v základním stavu (Vrbová a kol., 1998).

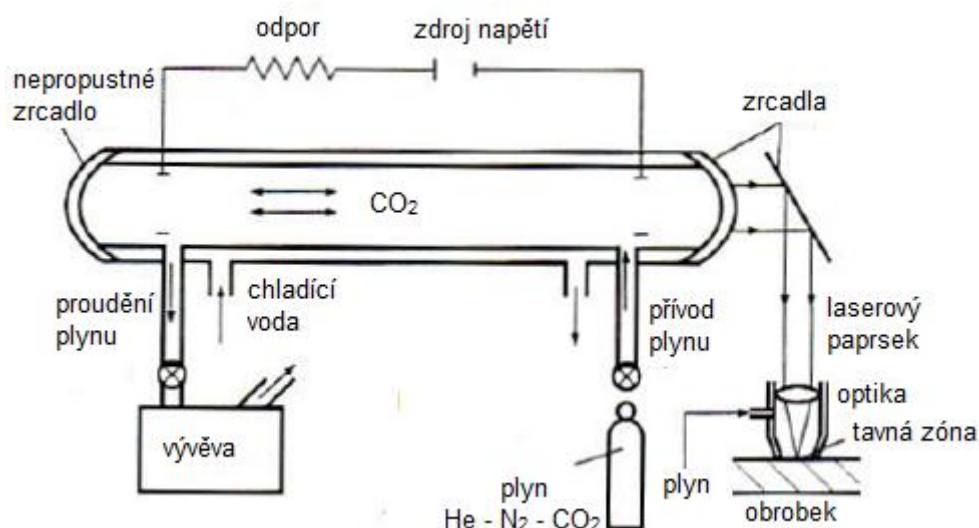
6.1.3.1 CO₂ laser

Pro nás nejvýznamnějším a zároveň nejrozšířenějším plynovým laserem je CO₂ laser, jehož aktivní prostředí tvoří molekuly oxidu uhličitého. Buzení probíhá za pomoci elektrického výboje, jež zapaluje směs plynů CO₂, N₂ a He (Vrbová a kol., 1998). Hlavní částí CO₂ laseru je laserová trubice, ve které se nachází směs plynů. Poměr obsažených plynů byl postupem doby stanoven na CO₂ : N₂ : He = 1 : 2 : 8. Energie potřebná k excitaci je vytvářena ve formě doutnavého výboje mezi elektrodami, ke kterým je přiváděno vysoké napětí z generátoru vysokého napětí. K zesilování záření využívá laser přechodů mezi vibračními hladinami oxidu uhličitého, přičemž molekuly

CO₂ vykazuje tři typy vibrací kyslíkových atomů v ose molekuly, a to symetrickou valenční, antisymetrickou valenční a deformační vibraci (Benko a kol., 2000).

Přechody mezi vibračními hladinami jsou způsobovány srážkami molekul oxidu uhličitého s molekulami dusíku. Vyzařovaná energie má vlnovou délku 10,6 μm. Aby se zachovala populační inverze na horní hladině E₂, je potřebné neustále dodávat energii pomocí doutnavého výboje a zároveň účinně odvádět dolní energetickou úroveň, což zajišťují molekuly helia, které přijatou energii odvádějí ve formě tepla. Díky relativně vysokému koeficientu tepelné vodivosti je pro tento účel helium více než vhodné.

Teplu je ze systému odváděno chladicím médiem, nejčastěji vodou, pomocí chladicího agregátu a musí být tak účinné, aby teplotu v trubici udrželo pod 400 K. Pomocí vývěvy je udržován nízký tlak plynu, který zajišťuje vznik doutnavého výboje.



Obrázek 7 Schéma CO₂ laseru

(Zdroj: Maňková, 2000)

Plyn po přechodu laserovou trubicí může být veden na obnovu a případně znovu použit v okruhu. Během procesu generování laserového záření se plyn v trubici znehodnocuje (vlivem rozkladu CO₂ na oxidu uhelnatý CO a kyslík O₂), což vede ke snížení výkonu laseru, a je proto nutné ho obměňovat (Maňková, 2000).

6.1.4 Chemické lasery

U chemických laserů je využívána energie, která je uvolňována při substitučních reakcích v dvouatomových molekulách. Podmínkou pro tyto reakce je výchozí přítomnost fluorových, chlorových nebo vodíkových atomů, tzv. radikálů. Rychlost

buzení přímo závisí na rychlosti chemické reakce. Velmi často se v chemických laserech využívá řetězových reakcí, kdy jednou zahájená chemická reakce je v aktivní směsi dále udržována následnými samovolnými reakcemi (Vrbová a kol., 1998).

6.2 Pevnolátkové lasery

Další skupinou laserů vedle početné skupiny laserů plyných jsou tzv. pevnolátkové. Aktivním prostředím této skupiny laserů jsou pevné krystalické, tedy opticky propustné, látky obohacené o příměsi vhodných iontů (Řasa a Kerečaninová, 2008). Pevná stadia v tomto případě vytvářejí pouze nosnou konstrukci aktivního prostředí. K vlastnímu optickému zesilování dochází na elektronových přechodech iontů příměsí. Jejich koncentrace je jen málokdy vyšší než 1 % (Engst a Horák, 1989).

6.2.1 Rubínový laser

Nejrozšířenějším a současně i prvním fungujícím laserem vůbec byl rubínový laser. Vlastnosti rubínu byly dobře známy z předchozího vývoje maseru, který je považován za předchůdce laseru. Rubín je v podstatě safír (monokrystal oxidu hlinitého Al_2O_3), v němž je menší část trojmocných iontů hliníku zaměněna za ionty chromu (Barcal, 1989).

6.2.2 Nd:YAG laser

Dalším pevnolátkovým laserem je Nd:YAG laser (Nd - neodym, YAG – yttrito - hlinitý granát, $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$). Yttrito – hlinitý granát vytváří nosné prostředí pro ionty Nd^{3+} . Je jedním z nejpoužívanějších pevnolátkových laserů (Benko a kol., 2000).

6.2.3 Nd:sklo laser

Dalším známým zástupcem pevnolátkových laserů je laser Nd:sklo, kde aktivní prostředí tvoří amorfní materiál - sklo, v němž jsou rozptýleny ionty Nd^{3+} . Do skla se neodym dostává při výrobě v podobě oxidu neodymitého Nd_2O_3 přibližně v 2% koncentraci. Jeho předností je mnohem snazší výroba oproti technologii výroby monokrystalů (Engst a Horák, 1989).

6.3 Polovodičové lasery

Třetí skupinou rozdělovaných laserů jsou lasery polovodičové. Aktivním prostředím polovodičových laserů jsou polovodičové materiály, ve kterých jsou aktivními částicemi nerovnovážné elektrony a díry, tj. volné nosiče náboje, které mohou

být injektovány. Oproti ostatním druhům laserů se u polovodičových laserů využívá přechodů mezi valenční a vodivostní zónou, tzv. přímé přechody.

Největší výhodou polovodičových laserů je jejich kompaktnost a velká účinnost (až 50%), za nevýhody můžeme považovat jednak rozbíhavost paprsku a jednak velkou závislost parametrů generovaného záření na teplotě aktivního polovodičového materiálu (Kvietková, 2015).

6.4 Kapalinové lasery

Poslední skupinou jsou tzv. kapalinové lasery. Aktivní prostředí kapalinových laserů tvoří roztoky organických barviv nebo speciálně připravené kapaliny (například vodní roztoky solí s aktivními ionty) obohacované ionty vzácných zemin. Ve většině případů se kapalinové lasery objevují s aktivním prostředím tvořeným organickými barvivy. Jsou to ionty organických barviv v různých kapalných rozpouštědlech, jako jsou například voda, etylalkohol, metylalkohol, toluen či glycerin. Buzení těchto laserů probíhá pomocí optického záření (Vrbová a kol., 1998).

7 Faktory ovlivňující řezání dřeva laserovým paprskem

Již běžně se v současnosti používají CO₂ lasery na obrábění nekovových materiálů. Tyto lasery dnes nabízejí řadu výhod i při řezání dřeva, překližek i dřevotřískových desek. Těmi nejvýznamnějšími jsou tenká řezná spára až 0,3 - 0,8 mm (u pilových kotoučů od 1,4 mm, dle tloušťky kotouče), absence dřevního odpadu (pilin) a minimum hlučnosti při práci (neplatí v případě, že zdroj generující paprsek není umístěn mimo pracovní prostředí). Při použití laseru také eliminujeme rozštěpené hrany obrobené plochy, které jsou časté při konvenčních způsobech řezání dřeva (Wairimu a kol., 2015).

Jako každá technologická operace, při které dochází k rozrušení původních vlastností a integrity obrobku, zanechává jak laser, tak i pilový kotouč charakteristické nerovnosti na obrobeném povrchu. Ty se projevují nejen mikroskopickými změnami, jako je drsnost obrobené plochy, ale také makroskopickými změnami jako je vlnitost, rýhy apod. (Novák a kol., 2011).

Řezání dřeva laserem je vícefaktorový proces a pro dosažení vysoké kvality a optimální efektivity procesu je nutné správně kombinovat příslušné faktory (Hernandez-Castaneda a kol., 2010). Obecně lze faktory, které ovlivňují schopnost laserů řezat dřevo, rozdělit do tří oblastí, a to vlastnosti laserového paprsku, vlastnosti strojního zařízení a vlastnosti obrobků (Barnekov a kol., 1986).

7.1 Vliv vlastností laserového paprsku

Dnešní průmyslové CO₂ lasery na řezání dřeva nabízejí rozsah výstupního výkonu laseru od méně než 100 wattů až po několik tisíc kilowattů. Dle tohoto rozsahu roste průnik paprsku materiálem s jeho rostoucím výkonem. Pro danou tloušťku materiálu lze s rostoucím výkonem dosáhnout vyšších řezných rychlostí. Vzhledem k tomu, že cena laseru je úměrná jejímu výstupnímu výkonu, je důležité pečlivě zvolit úroveň výkonu laseru na základě požadavků na rychlost řezání, tloušťky materiálu a jeho dalších vlastností.

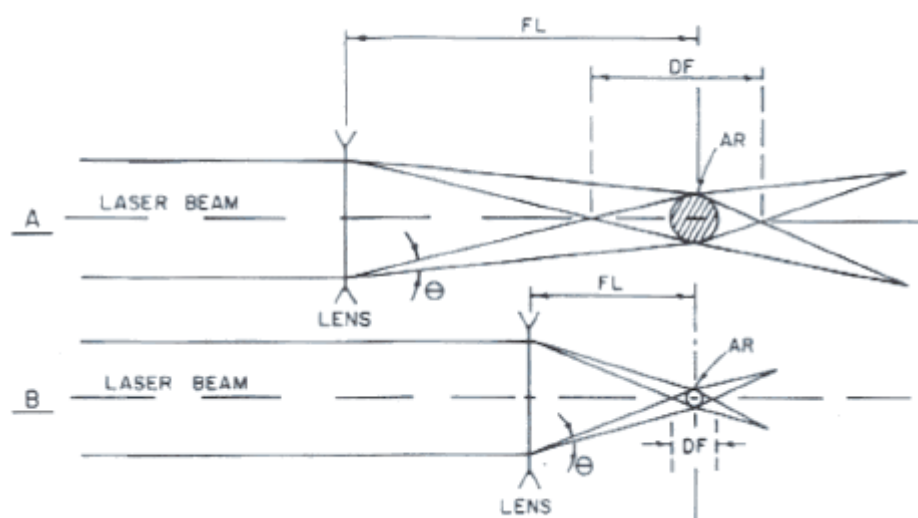
Většina laserů pro řezání dřeva je navržena pro práci v Gaussově módu (TEM₀₀). Tento typ paprsku vytváří malý ohniskový bod a generuje vysokou hustotu energie. Navíc energetický profil je stejný ve všech osách, a to je důležité u dřeva, kde řezný výkon musí být nezávislý na směru řezání.

Při řezání kovů je důležitá polarizace, jež má vliv na absorpci energie laseru, a tím i na rychlost řezání a kvalitu řezných ploch. U řezání dřeva nejsou účinky

polarizace známy. Nicméně je tu předpoklad, že může být použita ke změně tvaru paprsku pro zlepšení hladkosti řezaných ploch (Barnekov a kol., 1986).

7.2 Vliv vlastností strojního zařízení

Dalším faktorem ovlivňujícím řezání dřeva laserovým paprskem je pochopitelně strojní zařízení, které je při řezání používáno, včetně jeho vlastností. Při řezání dřeva je laserový paprsek obvykle zaměřen v optické soustavě přes jedinou čočku. Účinek ohniskové vzdálenosti čočky na velikost bodu v ohniskové zóně, a tedy i hustoty výkonu, je znázorněn na Obrázku 8.



Obrázek 8 Účinek ohniskové vzdálenosti

AR - oblast maximální energie a minimálního průřezu; DF - hloubka ostrosti v ohniskové zóně;

FL - ohnisková vzdálenost; Θ - úhel divergence

(Zdroj: Barnekov a kol., 1986)

Obrázek ukazuje, že čočka s dlouhou ohniskovou vzdáleností vytváří v ohniskové zóně větší průměr bodu soustředěného paprsku, ale zároveň je paprsek koncentrován ve větší vzdálenosti. Z toho vyplývá, že hloubka ostrosti je větší u čoček s dlouhou ohniskovou vzdáleností. Hustota výkonu je tedy dána touto plochou (AR) a výstupním výkonem laseru. Obvykle tato hustota výkonu dosahuje hodnot od 10^6 do 10^8 W/cm² (Barnekov a kol., 1986).

Hloubka ostrosti ohniska se vypočítá ze vztahu

$$e_{fok} = \frac{0,64 \cdot \pi \cdot d_{fok}^2}{4 \cdot \lambda} \quad (\text{m} \cdot 10^{-3}) \quad (4)$$

přičemž

$$d_{fok} = 4 \cdot \frac{f \cdot \lambda}{\pi \cdot D} \quad (\text{m} \cdot 10^{-3}) \quad (5)$$

kde:

d_{fok} - průměr fokusovaného svazku paprsků v ohnisku ($\text{m} \cdot 10^{-3}$),

e_{fok} - hloubka ostrosti ohniska ($\text{m} \cdot 10^{-3}$),

λ - výstupní vlnová délka záření ($\text{m} \cdot 10^{-3}$),

D - průměr paprskového svazku dopadajícího ze zrcadla na čočku ($\text{m} \cdot 10^{-3}$),

f - ohnisková vzdálenost čočky ($\text{m} \cdot 10^{-3}$) (Barcík a kol., 2013).

Umístění ohniska vzhledem k obrobku ovlivňuje také účinnost řezání. Pokud se ohnisko nachází nad obrobkem, hustota energie se zmenší, šířka řezné spáry se zvětší a může dojít ke spálení povrchu materiálu. Při umístění ohniska na povrch obrobku je hustota energie v tomto místě maximální, ovšem dále se pouze snižuje. V případě umístění ohniska do středu obrobku je hustota energie rovnoměrněji rozložena v celé tloušťce materiálu. V tomto případě je šířka řezné spáry užší a rovnoměrnější, povrch obrobeného materiálu je méně zuhelnatělý, hladší a je možné řezat větší tloušťky. Je vhodné zmínit, že při řezání tenkých materiálů není poloha ohniska rozhodující.

Při řezání dřeva je také zapotřebí použití pomocného plynu, který odvádí z místa řezu kouř a pomáhá tak regulovat a kontrolovat nadměrné hoření v místě řezu a chránit tak zaostřovací optiku. Typ plynu a jeho tlak výrazně ovlivňují hloubku průniku, rychlost posuvu a kvalitu řezu (Barnekov a kol., 1986).

7.3 Vliv vlastností materiálu obrobku

Posledním ze stanovených faktorů ovlivňujících řezání dřeva laserovým paprskem jsou vlastnosti obráběného materiálu. Schopnost laserového paprsku řezat dřevo zahrnuje pohlcování světla, přeměnu světelné energie na teplo, distribuci a rychlost přenosu tepla během procesu a rychlost odpařování.

Množství laserového světla pohlceného dřevem lze vyjádřit Lambert-Beerovým zákonem o závislosti absorpce elektromagnetického záření od vlastností materiálu, přes který záření prochází. Závisí tedy na obsahu vlhkosti dřeva, jeho chemickém složení a hustotě. Obsah vody ve dřevě snižuje absorpční koeficient dřeva oproti dřevu s nízkou vlhkostí, a proto je pro řezání vlhkého dřeva nutná větší výstupní energie laseru než u dřeva suchého.

Množství pohlceného světla během daného časového úseku určuje celkovou pohlcenou energii. Tato energie je přeměněna na teplo a vznikají zde tak vysoké teploty. Distribuci energie v obrobku lze vyjádřit jako součet energie pro ohřátí materiálu a v blízkosti oblasti odpařování energie k jejímu odpařování. Energie potřebná k odpařování materiálu tedy závisí především na druhu dřeviny, její hustotě a vlhkosti (Barnekov a kol., 1986).

8 Technologie obrábění pilovým kotoučem

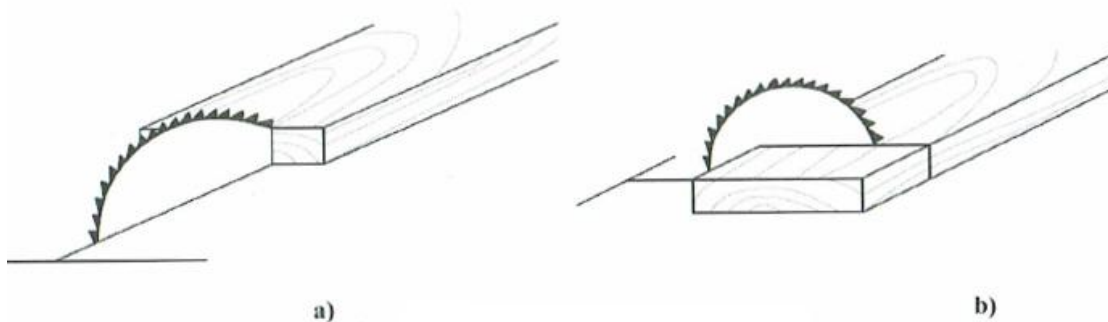
V této části se, obdobně jako u technologie laseru, budu věnovat charakteristice srovnávané technologie pilového kotouče, včetně příslušných faktorů majících vliv na řezání dřeva.

Obrábění pilovým kotoučem, nebo také kotoučovou pilou, je technologie standardní využívaná již stovky let. První kotoučové pily byly sestrojeny již v roce 1780 a používaly se na zkracování řeziva po požezu na rámových pilách. Postupným vývojem se zkonstruovaly kotouče až o průměru téměř tří metrů. Tyto velké pily se neobešly bez velké spotřeby energie, a tak smysl jejich uplatnění přišel až s dobou parních strojů (Barcík a kol, 2012).

8.1 Charakteristika pilového kotouče

Řezání pilovými kotouči patří mezi nejrozšířenější způsob obrábění dřeva (Koch, 1985), ovšem široké uplatnění nachází i v ostatních odvětvích průmyslu. Pilový kotouč je obráběcí nástroj s otáčivým pohybem řezných nástrojů, které jsou umístěny po jeho obvodu (Lisičan, 1956). Kotouč je upevněn na hřídeli, která je poháněna elektromotorem, a to buď samostatně, nebo v sestavě více kotoučů (např. rozmítací pily). Různé konstrukce pilových kotoučů umožňují řezání ve všech směrech vzhledem k průběhu dřevních vláken. Můžeme tak podle technologického hlediska kotoučové pily rozdělit na pily:

- pro podélné řezání,
- pro příčné řezání,
- pro řezání velkoplošných materiálů (Svoreň, 2002).

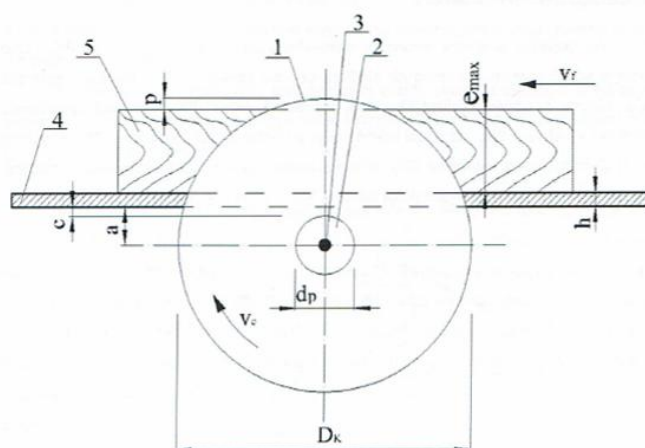


Obrázek 9 Řezání dřeva pilovými kotouči

a - podélné řezání, b - příčné řezání

(Zdroj: Kvietková, 2015)

Hlavní pracovní pohyb uskutečňují řezné klíny po obvodu kotouče, posuv provádí buď pracovní nástroj (nejčastěji u příčného dělení), nebo obrobek (u podélného dělení). Schéma stolní kotoučové pily můžeme vidět na Obrázku 10.



Obrázek 10 Stolní kotoučová pila

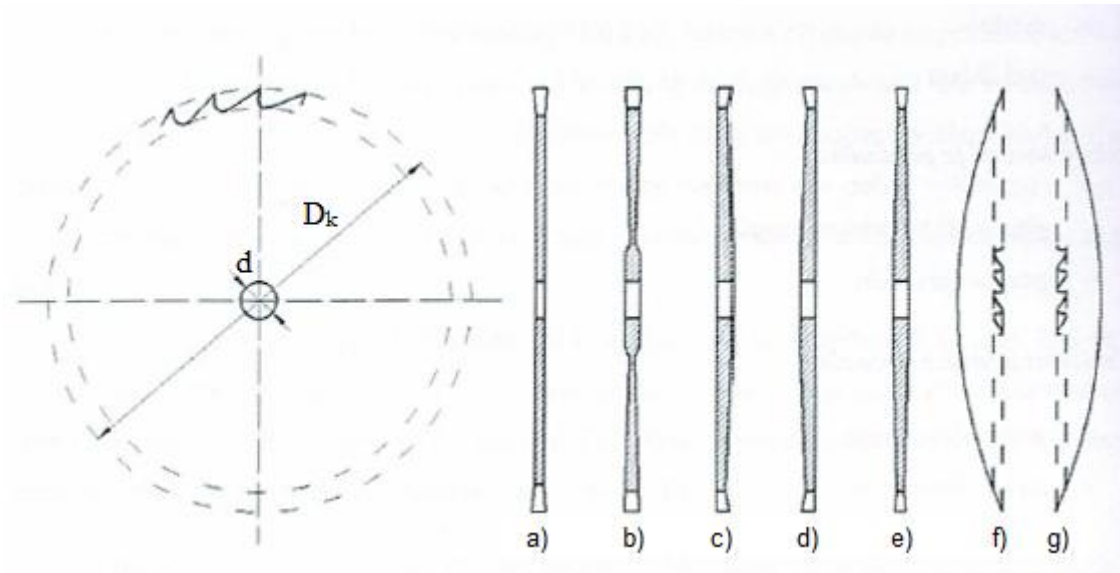
1 - pilový kotouč, 2 - upínací příruby, 3 - hřídel, 4 - pracovní stůl, 5 - obrobek, v_c - řezná rychlost, v_f - posuvná rychlost, e_{max} - maximální řezná výška, D_k - průměr kotouče, d_p - průměr upínací příruby, p - přesah kotouče na obrobek, c - vzdálenost příruby od spodní hrany stolu, h - tloušťka stolu, a - vzdálenost středu hřídele od spodní hrany stolu

(Zdroj: Barčík a kol., 2013)

Uložení pilového kotouče může být buď horní, kdy je hřídel umístěna nad pracovním stolem, nebo spodní, kdy je hřídel umístěna pod pracovním stolem.

8.2 Části pilového kotouče a jeho tvar a velikost

Pilový kotouč se skládá ze dvou částí, a to těla a ozubení. Tělo pilového kotouče je nosič pro ozubení a charakterizují ho vnější průměr D_k , průměr upínacího otvoru d , tloušťka a tvar těla, které lze vidět na Obrázku 11.



Obrázek 11 Tvary těl v příčném průřezu

a - plochý, b - podbroušený, c, d - jednostranně sbíhavé, e - oboustranně sbíhavé, f, g - vyduté

(Zdroj: Prokeš, 1965)

Průměr kotouče D by se měl volit co nejmenší pro daný způsob řezání dřeva a daný obrobek podle Prokeše (1965) z těchto důvodů:

- zmenšení úhlu přezávání dřevních vláken, kdy břit odebrává třísku blíže rovnoběžnému směru se směrem dřevních vláken (u podélného řezání), čímž se snižuje potřebný výkon,
- zmenšení tloušťky třísky, což vede ke zlepšení kvality řezné plochy,
- kotouče menších průměrů mohou být tenčí, tzn. menší šířku řezné spáry a menší ztrátu dřevní hmoty,
- kotouče menšího průměru jsou stabilnější.

Nejmenší průměr D_{min} se odvíjí od dané konstrukce stroje a způsobu použití a je dán průměrem upevňovacích přírub, řeznou výškou a nutným přesahem kotouče nad obrobek. Pro stroje s dolním uložením kotouče se vypočítá

$$D_{min} = 2(H + a + p) \text{ (mm)} \quad (6)$$

a pro stroje s horním uložením

$$D_{min} = 2(H + r + p) \text{ (mm)} \quad (7)$$

kde:

H - řezná výška (mm),

a - vzdálenost stolu od osy hřídele (mm),

r - poloměr upevňovacích přírub (mm),

p - minimální přesah kotouče nad obrobek (mm).

Tloušťka kotouče s je závislá na průměru kotouče D podle rovnice (Prokeš, 1965)

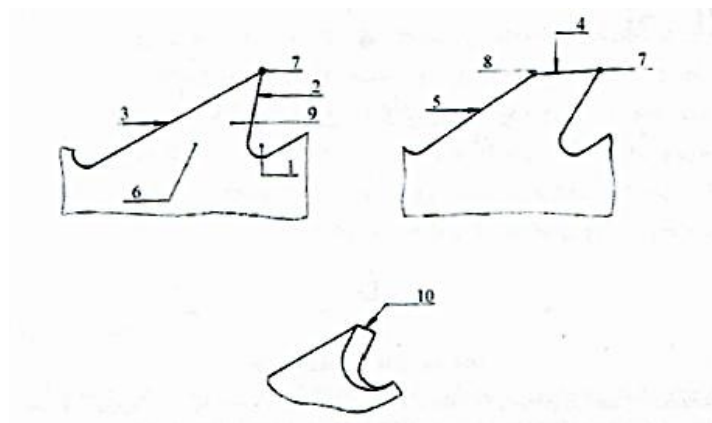
$$s = 0,07 \text{ až } 0,15 \sqrt{D} \text{ (mm)} \quad (8)$$

Nejčastěji používanými tloušťkami kotoučů jsou 1,5 až 3,5 mm. Obecně se doporučuje používat vždy menší tloušťku kotoučů. Tenčím kotoučem lze dosáhnout větší řezné rychlosti a kvalitnějšího řezu. Je třeba se však zmínit, že čím tenčí kotouč, tím je náchylnější k vibracím a vlnění a s tím souvisejícím prohříváním kotouče (Jak správně vybrat pilový kotouč, [cit. 2019-04-07]).

Ozubením se rozumí po obvodu těla umístěné řezné klíny (zuby). Charakteristikami pro ozubení je tvar zubů, typ a geometrie řezného klínu a materiál, ze kterého jsou vyrobeny břity.

8.3 Geometrie řezného klínu

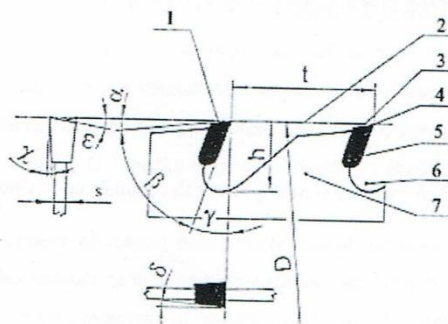
Pojmem geometrie řezného klínu rozumíme rozmístění a uložení řezného klínu na pilovém kotouči. V procesu řezání se jedná o velmi podstatný faktor. Vhodnou kombinací úhlů můžeme dosáhnout kvalitnějšího řezu, snížení opotřebení kotouče a jeho přehřívání, zabránění tvorbě trhlin a mechanických poškození pilového kotouče. Před samotnou charakteristikou jednotlivých úhlů je nutné seznámit se s uváděnými pojmy a rozměry řezného klínu, které jsou definované v normě ČSN 22 5301 a zobrazeny na Obrázku 12 a Obrázku 13.



Obrázek 12 Pojmy řezného klínu

1 - dno zubové mezery, 2 - čelo, 3 - hřbet, 4 - první hřbetová plocha (horní hřbet), 5 - druhá hřbetová plocha (dolní hřbet), 6 - pata zubu, 7 - hrot, 8 - hrana na hřbetě zubu, 9 - zub, 10 - hlavní řezná hrana (břit)

(Zdroj: Barčík a kol., 2013)



Obrázek 13 Rozměry řezného klínu

h - výška zubů, t - rozteč zubů, D - průměr kotouče, s - tloušťka kotouče, α - úhel břitu, β - úhel řezného klínu (břity), γ - úhel čela, δ - tangenciální úhel, ϵ - úhel hrotu, χ - radiální úhel

1 - SK plátek, 2 - hrotovnice, 3 - hřbet, 4 - hlavní řezná hrana, 5 - čelo, 6 - zubová mezera, 7 - zub

(Zdroj: Barčík a kol., 2013)

Velikost řezných úhlů je spolu s dalšími řeznými podmínkami jedním z rozhodujících faktorů pro výkonnost nástrojů, pro kvalitu obrobenej plochy a rozměrovou přesnost obrobku. Nesprávné zvolení řezných úhlů může snížit kvalitu obrobenej plochy, urychlit tupení ostří a tím životnost nástroje, zvýšit řezný odpor a dokonce ovlivnit životnost stroje a hospodárnost jeho provozu.

Úhel hřbetu α ovlivňuje především tření hřbetu o obráběnou plochu. Čím je úhel menší, tím větší je tření a naopak. Zmenšováním úhlu hřbetu se totiž zvětšuje styková plocha mezi hřbetem a obráběnou plochou. Úhel hřbetu má také přímý vliv na velikost řezného odporu. Standardní velikost úhlu hřbetu α bývá volena mezi 10 až 30°, za optimální lze považovat $\alpha = 15^\circ$ pro měkké i tvrdé dřeviny.

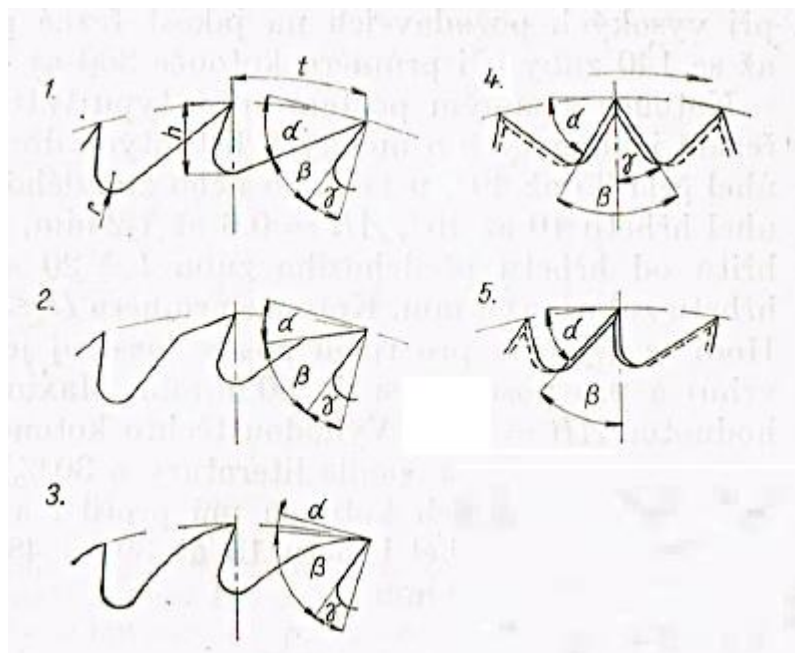
Úhel řezného klínu (břitu) β je úhel klínovité části nástroje, která vniká do obráběného materiálu při oddělování třísky a čím větší je tento úhel, tím větší je odpor materiálu pro vnikání nástroje. Chtělo by se říct, že tedy bude nejhodnější zvolit úhel co nejmenší, ovšem při zmenšení úhlu řezného klínu pod určitou hodnotu značně klesá pevnost řezného klínu a rychleji se otupuje. Volba úhlu řezného klínu však vychází především z hodnot úhlů α a γ .

Úhel čela γ ovlivňuje přímo tvorbu třísky i její velikost. To má svůj význam při průmyslovém zpracování třísek. Zvětšování úhlu čela snižuje řezný odpor. S přihlédnutím ke kritériím jako jakost řezné plochy, požadovaná tuhost zubu a trvanlivost řezného klínu se pro řezání tvrdých dřevin udává jako optimální úhel čela $\gamma = 30^\circ$ a měkkých dřevin $\gamma = 30 - 40^\circ$ (Barcík a kol., 2013).

Uváděné hodnoty úhlů mají praktické využití pouze u pilových kotoučů s vlčím ozubením či ozubením s oblým hřbetem a vyrobených z nástrojové oceli. Pro kotouče s nesouměrným trojúhelníkovým ozubením se užívají úhly $\alpha = 30^\circ$, $\beta = 40^\circ$, $\gamma = 20^\circ$ (Prokeš, 1965).

8.4 Tvary zubů

Za základní tvary zubů uvedené na Obrázku 14 pro podélné řezání jsou uváděny zuby trojúhelníkové nesouměrné, trojúhelníkové s lomeným hřbetem, tzv. vlčí zuby, a trojúhelníkové s oblým hřbetem. Pro podélné řezání jsou to pak zuby trojúhelníkové souměrné a trojúhelníkové nesouměrné, které mají šikmé ostří (Prokeš, 1965).



Obrázek 14 Tvary zubů

- 1 - trojúhelníkové zuby nesouměrné, 2 - trojúhelníkové zuby s lomeným hřbetem (vlčí),
 3 - trojúhelníkové zuby s oblým hřbetem, 4 - trojúhelníkové zuby souměrné pro příčné řezání,
 5 - trojúhelníkové zuby nesouměrné pro příčné řezání

(Zdroj: Prokeš, 1965)

8.5 Materiály pro pilové kotouče

U pilových kotoučů je třeba rozlišovat materiály nosného těla a materiály ostří. Kotouče mohou být vyrobeny celé včetně ostří z jednoho materiálu tzv. monolitní, jednodílné nástroje, nebo mohou být zuby nástroje osazeny břity například ze slinitých karbidů (SK plátky) nebo z polykrystalických diamantů (Josten a kol., 2010).

Základními materiály pro výrobu pilových kotoučů jsou:

- pásová ocel válcovaná za studena třídy 16 dle ČSN,
- nástrojová uhlíková ocel třídy 19 dle ČSN (tvrdosti 42 - 48 HRC),
- legovaná chrom - vanadová ocel.

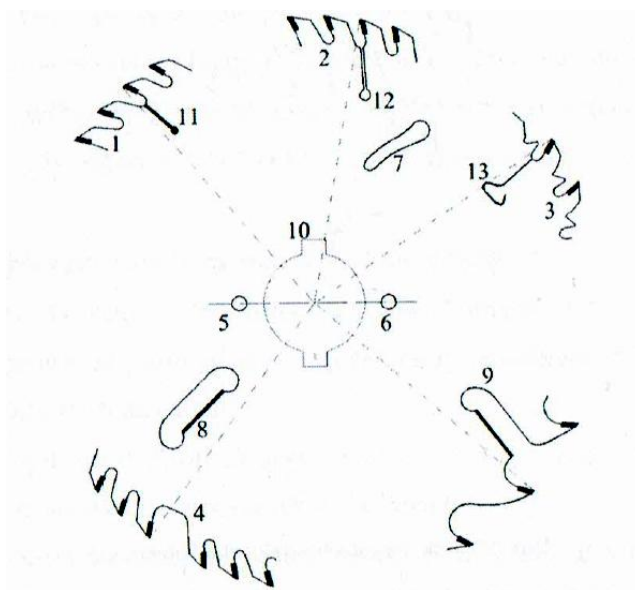
Nástrojové materiály rozdělujeme podle jejich složení na:

- nástrojové oceli - uhlíkové oceli, slitinové oceli - nízko legované, vysoko legované oceli, rychlořezné oceli,
- spékané karbidy (SK),
- stelity (ST),

- keramické materiály (KM),
- diamantové materiály (PCD) (Barcík a kol., 2013).

8.6 Úprava pilového kotouče

Těla samotných kotoučů jsou v některých případech upraveny různými způsoby například pro lepší ochlazování těla kotouče či snížení hlučnosti. Tyto prvky jsou zobrazeny na Obrázku 15.



Obrázek 15 Prvky úpravy pilových kotoučů

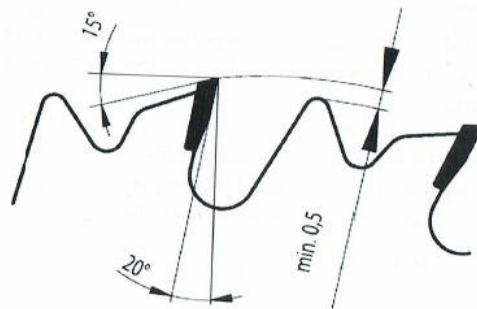
1 - zaoblený tvar zubu, 2 - zalomený tvar zubů, 3 - zuby s omezovači třísky, 4 - zubová mezera, 5,6 - boční otvory pro unášecí kolíky v přírubě, 7 - otvor pro ochlazování, 8 - čistící a stabilizační SK plátek (vnitřní), 9 - čistící a stabilizační SK plátek (vnější), 10 - upínací otvor s drážkami na pera, 11 - dilatační otvor s odvrtáním, 12 - dilatační otvor s protihlukovou úpravou

(Zdroj: Barcík a kol., 2013)

8.6.1 Omezovače třísky

Omezovače tloušťky třísky na Obrázku 16 mají některé pilové kotouče pro podélné řezání masivního dřeva, zejména ty, které jsou určeny pro stroje s ručním posuvem. Tyto omezovače mají za úkol chránit hlavní řeznou hranu proti prudkým nárazům. Řezná hrana zubu musí mít přesah nad vrcholem omezovače třísky v rozmezí

0,8 - 1,1 mm. Tento přesah je nutné zachovávat i při ostření kotoučů, z tohoto důvodu se i omezovače ubrušují (SK pilové kotouče, [cit. 2019-04-07]).



Obrázek 16 Omezovač tloušťky třísky

(Zdroj: Barcík a kol., 2013)

8.6.2 Otvory pro ochlazování

Tyto otvory (Obrázek 15/7), jak již jejich pojmenování napovídá, mají za funkci ochlazovat tělo kotouče, a to pomocí proudícího vzduchu. Mimo to také pomáhají odvádět třísky z řezné spáry, což napomáhá k udržení tuhosti a stability pilového kotouče (Barcík a kol., 2013).

8.6.3 Čistící a stabilizační prvky

Prostor mezi řeznou plochou a tělem pilového kotouče v řezné spáře se při řezání masivního dřeva větších rozměrů (především vlhkého) zanáší pilinami a dřevními vlákny. V důsledku tření těchto částic a nástroje dochází k nadměrnému zahřívání a napálení dřevních silic na tělo kotouče a může docházet k přehřívání až spálení pilového kotouče a ke ztrátě jeho tuhosti. Ke snížení tohoto jevu mohou být na těle kotouče konstrukční úpravy (Obrázek 15/4, 8, 9), jejichž funkce je odvádět třísky z prostoru řezné spáry (Barcík a kol., 2013).

8.6.4 Dilatační drážky

Funkce dilatačních drážek (Obrázek 15/12, 13) je vyrovnávat pnutí na obvodě pilového kotouče, která vznikají působením odstředivých sil, řezného odporu a zahříváním kotouče. Kruhové otvory na konci dilatační drážky mohou být vylepeny měděným páskem, který pomáhá odvádět teplo z obvodové části do těla kotouče a zároveň i snižuje hlučnost pilového kotouče při řezání (Barcík a kol., 2013).

8.6.5 Protihlukové úpravy

Snížení hlučnosti při řezání i při chodu na prázdkno se dosahuje narušením těla kotouče různými profilovými průřezy nebo v konstrukci umístěnou speciální viskoelastickou vrstvou s tlumící fólií. Tato konstrukce, kterou můžeme vidět na Obrázku 17, snižuje hlučnost chodu pilových kotoučů až o 10 dB, kdy u pilových kotoučů činí i více než 95 dB (Josten a kol., 2010).

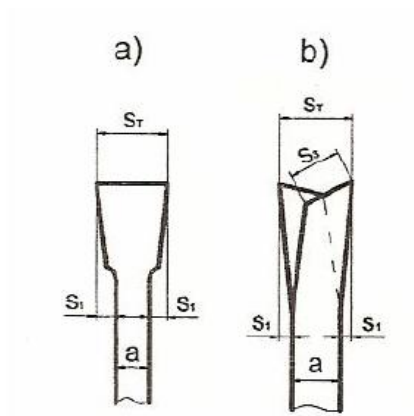


Obrázek 17 Kotouč s protihlukovou úpravou

(Zdroj: Josten a kol., 2010)

8.7 Úpravy řezného zubu

Zuby pilových kotoučů mohou být buďto pýchované, rozváděné nebo mohou mít řeznou hranu z jiného materiálu, například SK plátky, jak je zobrazeno na Obrázku 18.



Obrázek 18 Úprava zubů pilového kotouče

a - pěchovaný, b - rozváděný

(Zdroj: Javorek, 2006)

9 Faktory ovlivňující řezání dřeva pilovým kotoučem

Obecným charakteristickým znakem povrchu obrobeného řezáním pilovým kotoučem jsou půlměsícovité rýhy v celé délce řezné spáry (Siklienka a Mišura, 2005).

Na kvalitu řezné plochy obráběného materiálu má vliv mnoho činitelů, které můžeme podobně jako u laseru rozdělit na tři části, a to vlastnosti pilového kotouče, vlastnosti strojního zařízení a vlastnosti materiálu obrobku.

9.1 Vliv vlastností pilového kotouče

Pro zajištění co nejvyšší jakosti obrobeného povrchu je důležité vždy volit nejvhodnější typ kotouče pro daný způsob řezání. Těmi nejhlavnějšími činiteli jsou tvar, rozměry, počet zubů a geometrie a ostrost řezného nástroje (Kminiak, 2014).

Nesprávně zvolenými řeznými úhly lze výrazně zhoršit kvalitu obrobené plochy. Navíc nesprávná geometrie řezného nástroje pro dané řezání urychluje otupování ostří a snižuje tak životnost nástroje a samozřejmě také snižuje kvalitu řezu (Barcík a kol., 2013).

Dalšími faktory ovlivňujícími odchylky ideálního výsledného povrchu jsou řezná rychlost a posuv na zub. Řezná rychlost v_c je okamžitá rychlost uvažovaného bodu břitu vůči obrobku a je dána vztahem

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{60000} \quad (\text{m} \cdot \text{s}^{-1}) \quad (9)$$

kde:

D - průměr pilového kotouče (mm),

n - počet otáček (min^{-1}).

Doporučené řezné rychlosti jsou udávány v rozmezí 40 - 60 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, pro kotouče s již opotřebenými řeznými nástroji se rychlosti zvětšují, a to na 60 - 80 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ (Kvietková, 2015).

Při neměnných ostatních parametrech se zvýšení kvality povrchu dá dosáhnout použitím kotouče s větším množstvím zubů. Ze zvýšení počtu zubů totiž vyplývá snížení relativního posuvu na zub f_z , což se projevuje snížením hloubky rýh na obrobené ploše (Kminiak, 2014). Posuv na zub lze vyjádřit vztahem

$$f_z = \frac{v_f \cdot 1000}{n \cdot z} \quad (\text{mm}) \quad (10)$$

kde:

v_f - rychlost posuvu ($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$),

n - počet otáček (min^{-1}),

z - počet zubů pilového kotouče (Kvietková, 2015).

9.2 Vliv vlastností strojního zařízení

Lze všeobecně říci, že pro dosažení dobré kvality řezné spáry je podmínkou kontrola dosavadních řezných podmínek a správné přípravy a upnutí řezného nástroje (Nutsch, 2006).

Pro požadovanou jakost řezné plochy je tak potřeba dodržovat správné nastavení strojního zařízení. Jedním faktorem může být i správné nastavení přesahu pilového kotouče nad obrobek, jehož hodnota vždy závisí na průměru použitého kotouče.

Velmi negativním jevem, ovlivňujícím kvalitu obrobené plochy, jsou vibrace pilového kotouče. Výsledkem nežádoucího kmitání je zhoršení kvality řezné plochy, z toho vyplývající větší ztráta materiálu, dále zvýšené opotřebovávání a nadměrné zahřívání pilových kotoučů, nehledě na vyšší hlučnost. Často k tomu dochází následkem nepřesné konstrukce či chyb vznikajících při výrobě samotného kotouče. Nicméně mnohdy kmitání pilového kotouče bývá následkem přenosu kmitání jiných částí strojního zařízení například hřídele nebo ložisek (Javorek, 2006).

9.3 Vliv vlastností materiálu obrobku

Klíčovými vlastnostmi dřeva pro jeho opracovatelnost pilovým kotoučem jsou jeho tvrdost a směr řezání. Tvrdost můžeme charakterizovat jako schopnost dřeva klást odpor proti vnikání jiného tělesa, v tomto případě řezných klínů nástroje, do jeho struktury a je závislá na hustotě dřeviny a její vlhkosti. Tedy s rostoucí hustotou opracovatelnost klesá (tvrdost je vyšší) a s rostoucí vlhkostí opracovatelnost roste (tvrdost je nižší). Je tedy třeba rozlišovat řezání tvrdých dřevin a měkkých dřevin (Josten a kol., 2010).

Pro podélné řezání dřeva se používají kotouče s menším počtem zubů, a to pro lepší odvod třísky z řezu. Pro příčné řezání dřeva je naopak vhodnější kotouč s větším počtem zubů (Jak správně vybrat pilový kotouč, [cit. 2019-04-07]).

10 Metodika práce

Po teoretické analýze diskutovaných a srovnávaných technologií je nutné nyní přistoupit k části praktické, a tedy experimentálnímu zkoumání. S ohledem na hlavní cíl práce, jímž je experimentální srovnání účinku řezání dřeva laserem s řezáním dřeva pilovým kotoučem z hlediska změny kvality povrchu řezané plochy, je možné rozdělit metodiku práce do několika bodů:

1. Příprava zkušebních těles.
2. Měření.
3. Statistické zpracování dat.
4. Výsledky a diskuze.

11 Příprava zkušebních těles

11.1 Použitý materiál

Materiálem pro řezání laserem i pilovým kotoučem byl dub zimní (*Quercus petraea*) a buk lesní (*Fagus sylvatica*), které pocházejí z těžby na Vysočině v České republice. Vzorky byly rozděleny na dvě skupiny. První skupina byla řezána při obsahu vlhkosti 8%, druhá skupina při obsahu vlhkosti vyšší nad bodem nasycení vláken (BNV).

11.1.1 Charakteristika dubu

Dub je dřevina s typickou kruhovitě pórovitou stavbou dřeva se zřejmou hranicí mezi letokruhy a mezi jarním a letním přírůstkem a má vylišené jádro a běl. Výrazným znakem dubu jsou široké jarní cévy, které vytvářejí v zóně jarního dřeva patrné póry a v podélných řezech patrné rýhy. Úzké letní cévy vytvářejí v příčném řezu v zóně letního dřeva světlé radiální pásy. Na všech řezech jsou patrné dřevné paprsky, v příčném řezu jsou tvořeny viditelnými pásy kolmými na letokruhy, v radiálním řezu vytvářejí lesklá zrcátka a v tangenciálním řezu vysoké tmavší pásy (Šlezingerová a Gandelová, 1999).

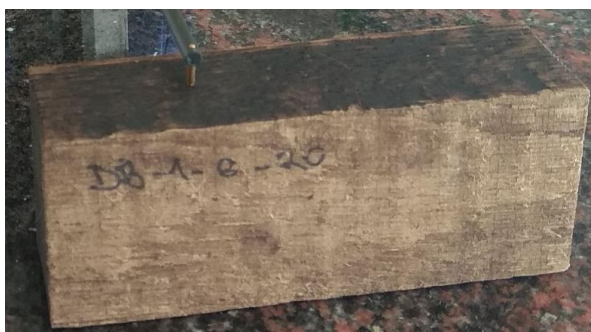
11.1.2 Charakteristika buku

Buk je dřevina s roztroušeně pórovitou stavbou dřeva. Jedná se o bělové dřevo s vyžralým dřevem. Letokruhy jsou ostře ohraničeny tmavším letním dřevem. Oproti dubu nejsou u buku bez lupy zřetelné póry cév. Dřevné paprsky jsou viditelné ve všech řezech, v příčném řezu jako tenké světlé pásy, v radiálním řezu jako i několik milimetrů vysoká zrcátka a v tangenciálním řezu jako načervenalá vřetena (Grosser, 1977).

11.2 Příprava zkušebních vzorků

Zkušební vzorky byly vyřezány laserem z řeziva na zkušební tělesa o rozměrech 110 x 25 mm. Tloušťka řeziva, a tedy ploch vzorků, které byly vystaveny působení laseru, byla 35 mm. Vznikl nám tedy soubor 80 kusů zkušebních těles, který se skládal z 20 dubových těles o obsahu vlhkosti 8%, 20 dubových těles o obsahu vlhkosti vyšší než je bod nasycení vláken (BNV), 20 bukových těles o obsahu vlhkosti 8% a 20 bukových těles o obsahu vlhkosti vyšší než je bod nasycení vláken (BNV). Pro přehlednost vzorků a jejich snadné rozeznání, a tím i zamezení jejich záměny, byly

vzorky označeny podle druhu dřeviny a vlhkosti ve formátu DD -X - W - Y (DD - druh dřeviny, X - číslo fošny, W - vlhkost při řezání, Y - pořadové číslo vzorku). Vznikla tedy tělesa s označením DB - 1 - 8 - 1 (až 20), DB - 1 - 30 - 1 (až 20), BK - 1 - 8 - 1 (až 20) a BK - 1 - 30 - 1 (až 20). Zkušební vzorek s označením můžeme vidět na Obrázku 19.



Obrázek 19 Ukázka značení zkušebních těles opracovaných laserem

(Zdroj: vlastní)

Samotné měření proběhlo na klimatizovaných vzorcích pro standardní podmínky vlhkosti ($\phi = (65 \pm 3) \%$) a teploty vzduchu prostředí ($t = (20 \pm 2)^\circ$), čemuž odpovídá rovnovážná vlhkost 12 %. Dalším krokem bylo tedy již samotné měření kvality povrchu ploch obrobených laserem.

Pro následné měření kvality povrchu ploch obrobených pilovým kotoučem byl u 20 dubových a 20 bukových těles proveden řez pilovým kotoučem s co nejmenším úběrem materiálu tělesa tak, aby byla odstraněna plocha obrobená laserem a vznikla zcela nová obrobená plocha pilovým kotoučem. Vzorek po úpravě pilovým kotoučem vidíme na Obrázku 20.



Obrázek 20 Ukázka vzorku po úpravě pilovým kotoučem

(Zdroj: vlastní)

Následně proběhlo měření kvality povrchu ploch obrobených pilovým kotoučem.

11.3 Zjištění hustoty a vlhkosti

11.3.1 Zjištění hustoty

Zjištění hustoty dřeva se provedlo podle normy ČSN 49 0108 podle rovnice

$$\rho_w = \frac{m_w}{V_w} \quad (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}) \quad (11)$$

kde:

ρ_w - hustota vzorku při dané vlhkosti w ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$),

m_w - hmotnost vzorku při dané vlhkosti w (kg),

V_w - objem vzorku při dané vlhkosti w (m^3).

11.3.2 Zjištění vlhkosti

Zjištění vlhkosti dřeva jako procentuální podíl hmotnosti vody obsažené ve dřevě při dané vlhkosti a hmotnosti dřeva ve vysušeném stavu se provedlo podle normy ČSN 49 0103 podle rovnice

$$w = \frac{m_w - m_0}{m_0} * 100 \quad (\%) \quad (12)$$

kde:

w - vlhkost vzorku (%),

m_w - hmotnost vzorku při dané vlhkosti w (kg),

m_0 - hmotnost vzorku při nulové vlhkosti w (kg).

11.4 Použité stroje

11.4.1 Laser

Pro vymanipulování zkušebních těles bylo použito průmyslové laserové zařízení BLT WoodCut od firmy Biatec Laser Technology s. r. o. (Bratislava, Slovensko). BLT WoodCut je technologie vyvinutá speciálně pro řezání vlhkého či suchého dřeva až do tloušťky 80 mm, která byla poprvé představena v roce 2017. Parametry, použité pro řezání zkušebních těles, jsou uvedeny v Tabulce 1.

Tabulka 1 Parametry řezání laserem

(Zdroj: vlastní)

Výkon laseru	Řezná rychlost	Ohnisko
5 kW	3 m.min ⁻¹	2/3 výšky tělesa

11.4.2 Formátovací pila

K řezání vzorků pilovým kotoučem byla použita formátovací kotoučová pila SCM si 300 class, viz Obrázek 21. Pila je vhodná jak pro řezání masivu, tak i pro řezání ostatních materiálů na bázi dřeva. Používaný stroj je vybaven pojezdovým pracovním stolem z hliníkové slitiny o délce 3200 mm.



Obrázek 21 Formátovací pila SCM si 300 class

(Zdroj: vlastní)

Základní charakteristické vlastnosti použité formátovací pily jsou uvedeny v Tabulce 2.

Tabulka 2 Základní vlastnosti formátovací pily SCM si 300 class

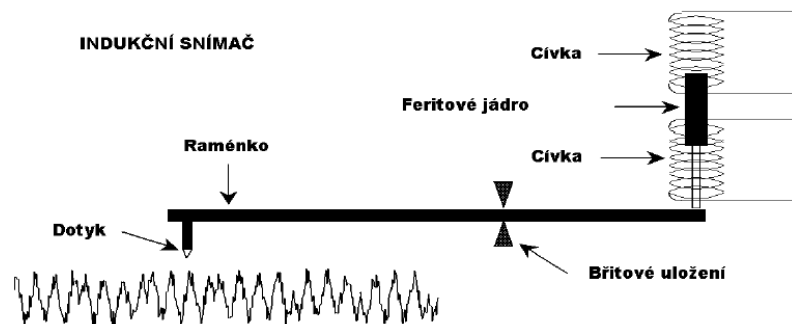
(Zdroj: vlastní)

Výkon motoru	Otáčky	Max. výška řezu	Rok výroby
5 kW	4000 ot/min	100 mm	2012

12 Měření

12.1 Kontaktní profilometr

K měření kvality povrchu byl použit kontaktní profilometr Form Talysurf 50 Intra 2 od firmy Taylor Hobson (Liecester, UK). Form Talysurf Intra představuje hardwarový a současně i softwarový nástroj pro kontaktní, induktivní měření a analýzu struktury povrchu pevných těles. Princip indukčního snímače je zobrazen na Obrázku 22.



Obrázek 22 Princip indukčního snímače

(Zdroj: Havelková a Hiklová, 2014)

Jako základní charakteristické vlastnosti profilometru lze uvést vertikální rozsah 1 mm na 16 mm rozlišení, 50 mm délku horizontálního snímání a úchytku přímosti 0,40 μm na 50 mm. Použitý kontaktní profilometr lze vidět na Obrázku 23.



Obrázek 23 Kontaktní profilometr Form Talysurf 50 Intra 2

(Zdroj: vlastní)

12.2 Sledované parametry

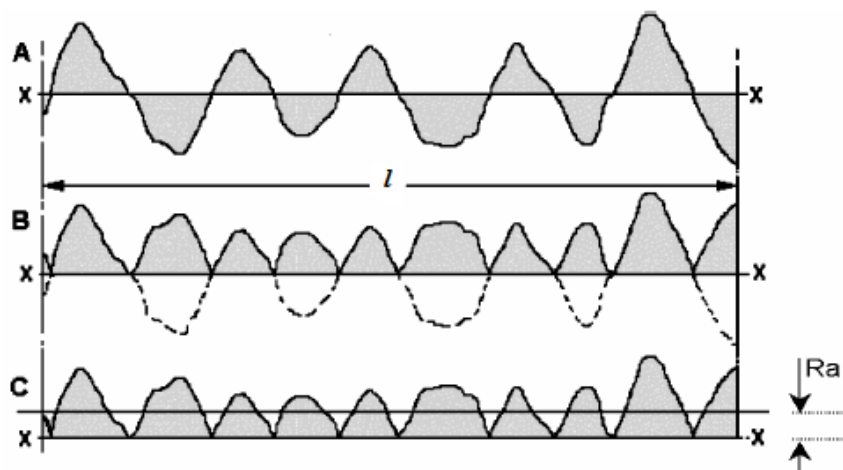
Kvalita povrchu nově vzniklých ploch při řezání laserem a pilovým kotoučem byla hodnocena pomocí dvou parametrů, a to:

- R_a – střední aritmetická úchylka posuzovaného profilu drsnosti,
- W_a – střední aritmetická úchylka posuzovaného profilu vlnitosti.

Drsnost charakterizují nejmenší nerovnosti vznikající v procesu řezání působením rezného nástroje. Řezný nástroj zanechává stopy na povrchu, které mají buď periodické uspořádání, nebo náhodný charakter. Působením odtrhávání mikročástic materiálu vznikají ještě jemnější složky struktury povrchu (Bumbálek a kol., 1989).

Vlnitost představuje větší, rozměrnější nerovnosti, které jsou většinou způsobeny kmitáním nebo deformací obrobku. Vlnitost je především přisuzována vlastnostem obráběcího stroje (například nevyváženosti nástroje, nepřesností vodících prvků či nedostatečné tuhosti (Měříte správně strukturu povrchu?, [cit. 2019-04-07])).

Parametr R_a je nejčastěji vyhodnocovaným parametrem drsnosti a je matematicky definován jako střední aritmetická úchylka profilu od středové čáry v rozsahu základní délky l . Parametr W_a se vypočítává stejně, liší se pouze v rozsahu základní délky l (Havelková a Hiklová, 2014). Obrázek 24 graficky znázorňuje princip odvození hodnoty R_a .



Obrázek 24 Princip výpočtu parametru R_a

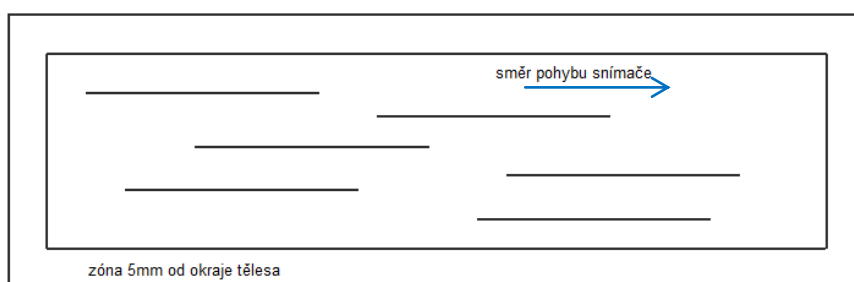
(Zdroj: Havelková a Hiklová, 2014)

12.3 Metodika měření průměrné aritmetické úchylky profilu drsnosti a vlnitosti

Měření průměrných aritmetických úchylek profilu drsnosti a vlnitosti bylo provedeno na Fakultě lesnické a dřevařské České zemědělské univerzity v Praze pomocí kontaktní metody měření kvality povrchu pomocí přístroje Form Talysurf 50 Intra 2 od firmy Taylor Hobson.

Kvalita povrchu byla měřena podle norem ČSN EN ISO 4287 (1999) a ČSN EN ISO 4288 (1999).

Každý vzorek byl podroben kontaktnímu měření na obrobené ploše laserem, respektive pilovým kotoučem. Na každém vzorku vždy proběhlo šest pokusů měření, vždy na náhodně zvoleném místě v oblasti obrobené plochy, a to vždy přibližně v minimální vzdálenosti od hrany tělesa 5 mm. Příklad měření vzorku lze vidět na Obrázku 25.



Obrázek 25 Ukázka umístění měřených oblastí na zkušebním tělese

(Zdroj: vlastní)

12.4 Nastavení profilometru

Na kontaktním profilometru Form Talysurf 50 Intra 2 bylo použito standardní raménko osazené kuželovým diamantovým hrotem s radiusem $r_{tip} = 2 \mu\text{m}$ viz Obrázek 26 a snímání bylo prováděno tahem, přístroj tedy pohyboval snímačem směrem k sobě.



Obrázek 26 Snímací raménko profilometru

(Zdroj: vlastní)

Každý vzorek byl takto změřen šestkrát. Celkem tedy proběhlo 720 pokusů měření.

Pro měření byl použit Gaussův filtr a filtr profilu λ_c (zvýrazněno v tabulce) podle Tabulky 3, která zobrazuje nastavení profilometru podle normy ČSN EN ISO 4287 (1999).

Tabulka 3 Parametry měření podle normy ČSN EN ISO 4287 (1999)

(Zdroj: ČSN EN ISO 4287 (1999))

Periodické profily	Parametry měření			
	$\lambda_c = l_c$ (mm)	l_n (mm)	l_t (mm)	r_{tip} (μm)
$0,013 < R_{Sm} \leq 0,04$	0,08	0,4	0,48	2
$0,04 < R_{Sm} \leq 0,13$	0,25	1,25	1,5	2
$0,13 < R_{Sm} \leq 0,4$	0,8	4	4,8	2 nebo 5
$0,4 < R_{Sm} \leq 1,3$	2,5	12,5	15	5
$1,3 < R_{Sm} \leq 4$	8	40	48	10

13 Statistické zpracování dat

Pro statistické vyhodnocení naměřených dat, jehož úkolem bylo vyhodnocení jednotlivých hodnot sledovaných proměnných znaků, byl využit software Microsoft Excel (Microsoft, Redmont, Washington, Spojené státy americké) a Statistica 13 (Statsoft Inc., Tulsa, Oklahoma, Spojené státy americké).

Ještě než bylo započato zpracování samotných analýz dat, bylo potřeba provést vyřazení extrémních hodnot a posouzení rozdělení četností.

Posouzení naměřených hodnot kvality povrchu zastoupených R_a a W_a bylo provedeno statistickou metodou MANOVA. Výsledky byly hodnoceny pomocí 95 % intervalu spolehlivosti, který odráží hladinu významnosti $\alpha = 0,05 = 5\%$.

Pomocí Dean-Dixonova testu bylo uskutečněno vyloučení extrémních hodnot. V prvním kroku se nejdříve výsledky seřadily vzestupně a pro minimální a maximální hodnoty se určila kritéria Q_{min} a Q_{max} pomocí následujících vzorců

$$Q_{min} = \frac{(x_2 - x_1)}{(x_n - x_1)} \quad (13)$$

a

$$Q_{max} = \frac{(x_n - x_{n-1})}{(x_n - x_1)} \quad (14)$$

V dalším kroku se vypočetlo rozpětí hodnot mezi minimální (x_1) a maximální (x_n) hodnotou. Vypočtená Q_{min} a Q_{max} se porovnávala s tabulkovou kritickou hodnotou Q_{kr} pro daný počet opakování (n) na předem zvolené hladině významnosti. Pokud byly vypočtené hodnoty Q_{min} a Q_{max} větší nebo se rovnaly kritické hodnotě Q_{kr} , byly vyřazeny ze souboru. V případě, kdy došlo k vyřazení hodnot ze souboru, bylo nezbytné testování opakovat znovu z toho důvodu, že se změnilo rozpětí mezi minimální a maximální hodnotou.

Tímto postupem Dean-Dixonova testu byly postupně vyřazeny všechny extrémní hodnoty.

Dále bylo vykonáno zjištění rozdělení četností, lépe řečeno prokázání normality zkoumaných dat. Normalita zpracovávaných dat byla provedena pomocí Shapirova-Wilkova testu v hladině významnosti $\alpha = 0,05 = 5\%$.

Statistické vyhodnocení naměřených dat bylo provedeno více-faktorovou analýzou rozptylu pomocí softwaru Statistica 13. Analýza rozptylu posuzuje účinky jednotlivých faktorů a jejich vzájemných kombinací. K posouzení účinků jednotlivých faktorů a jejich vzájemných kombinací byl využit Fischerův F-test s hladinou

významnosti $\alpha = 0,05 = 5\%$. Předpokladem F-testu je normalita pozorovaných hodnot, jež byla stanovena v předchozím testu. Na základě hladiny významnosti P určí F-test zda a v jaké míře je sledovaný faktor statisticky významný, viz Tabulka 4.

Tabulka 4 Vyhodnocení testovaných faktorů na základě hodnoty P

(Zdroj: Gaff a Gáborík, 2009)

Hodnota P	Statistická významnost faktoru
$\emptyset P < 0,05$	vliv faktoru je statisticky významný
$\emptyset P > 0,05$	vliv faktoru je statisticky nevýznamný
$\emptyset P = 0,05$	vliv faktoru se nachází na hranici statistické významnosti
$\emptyset P = 0$	faktor působí
$\emptyset P < 0,001$	vliv faktoru je statisticky velmi významný
$\emptyset 0,001 < P < 0,01$	vliv faktoru je statisticky středně významný
$\emptyset 0,01 < P < 0,05$	vliv faktoru je statisticky málo významný

14 Výsledky a diskuze

V příložené Tabulce 5 můžeme vidět průměrné hodnoty střední aritmetické úchyly profilu drsnosti Ra a průměrné hodnoty střední aritmetické úchyly profilu vlnitosti Wa.

Tabulka 5 Průměrné hodnoty drsnosti Ra, vlnitosti Wa, a hustoty pro jednotlivé sady zkušebních vzorků

(Zdroj: vlastní)

Metoda řezání	Dřevina	W (%)	Ra (μm)	Wa (μm)	Hustota (kg.m-3)	Počet vzorků
PK	DB	8	10,2 (11,28)	18,2 (20,81)	511 (2,37)	20
PK	BK	8	6,8 (14,49)	8,4 (13,61)	683 (2,26)	20
L	BK	8	5,2 (9,6)	8,5 (11,5)	667 (2,9)	20
L	DB	8	6,5 (11,1)	26,6 (11,0)	638 (4,8)	20
L	BK	> BNV	6,2 (10,9)	7,8 (12,4)	662 (3,2)	20
L	DB	> BNV	4,5 (19,0)	10,4 (14,9)	787 (3,0)	20

(Hodnoty v závorkách jsou variační koeficienty v %)

Bylo důležité si hned na začátku uvědomit, že vliv sledovaných faktorů, které působí při řezání dřeva, v našem případě jimi jsou metoda řezání, druh dřeviny a její vlhkost, nelze, lépe řečeno nemá smysl, řešit jednotlivě, neboť všechny tyto faktory působí vždy a nelze jimi působit samostatně. Proto nebyl uvažován ani řešen jejich samostatný vliv na kvalitu výsledného povrchu. Důsledkem tohoto rozhodnutí, respektive úvahy, vznikl jeden faktor, který je nazván vzájemné působení sledovaných faktorů, kdy tedy tento jeden faktor zahrnuje vzájemnou interakci několika faktorů najednou.

Hladina významnosti P byla statistickou analýzou MANOVA prokázána u vzájemného působení vybraných faktorů, že je nižší než 0,05. Zjištěnými výsledky statistické analýzy bylo tedy potvrzeno, že faktor vzájemného působení sledovaných faktorů statisticky významně ovlivňuje výslednou drsnost obrobeného povrchu laserem (Tabulka 6), stejně tak i výslednou drsnost obrobeného povrchu pilovým kotoučem (Tabulka 7).

Tabulka 6 Statistické vyhodnocení jednosměrné analýzy vzájemného působení sledovaných faktorů na hodnotu Ra na vzorcích řezaných laserem

(Zdroj: vlastní)

Řezání laserem					
Sledované faktory	Součet čtverců	Stupeň volnosti	Rozptyl	Fischerův F-test	Hladina významnosti P
Intercept	2039,681	1	2039,681	2369,004	***
Vzájemné působení sledovaných faktorů	46,850	3	15,617	18,138	***
Chyba	54,242	63	0,861		

(NS - nevýznamný, *** - statisticky významný. Hladina významnosti byla stanovena na $P < 0,05$)

Tabulka 7 Statistické vyhodnocení jednosměrné analýzy vzájemného působení sledovaných faktorů na hodnotu Ra na vzorcích řezaných pilovým kotoučem

(Zdroj: vlastní)

Řezání pilovým kotoučem					
Sledované faktory	Součet čtverců	Stupeň volnosti	Rozptyl	Fischerův F-test	Hladina významnosti P
Intercept	4351,479	1	4351,479	1521,692	***
Vzájemné působení sledovaných faktorů	179,527	1	179,527	62,78	***
Chyba	165,859	58	2,86		

(NS - nevýznamný, *** - statisticky významný. Hladina významnosti byla stanovena na $P < 0,05$)

Výsledky statistické analýzy bylo potvrzeno, že faktor vzájemného působení sledovaných faktorů taktéž statisticky významně ovlivňuje jak výslednou vlnitost povrchu obrobeného laserem (Tabulka 8), tak výslednou vlnitost povrchu obrobeného pilovým kotoučem (Tabulka 9).

Tabulka 8 Statistické vyhodnocení jednosměrné analýzy vzájemného působení sledovaných faktorů na hodnotu W_a na vzorcích řezaných laserem

(Zdroj: vlastní)

Řezání laserem					
Sledované faktory	Součet čtverců	Stupeň volnosti	Rozptyl	Fischerův F-test	Hladina významnosti P
Intercept	11567,11	1	11567,11	1176,163	***
Vzájemné působení sledovaných faktorů	3664,36	3	1221,45	124,199	***
Chyba	619,58	63	9,83		

(NS - nevýznamný, *** - statisticky významný. Hladina významnosti byla stanovena na $P < 0,05$)

Tabulka 9 Statistické vyhodnocení jednosměrné analýzy vzájemného působení sledovaných faktorů na hodnotu W_a na vzorcích řezaných pilovým kotoučem

(Zdroj: vlastní)

Řezání pilovým kotoučem					
Sledované faktory	Součet čtverců	Stupeň volnosti	Rozptyl	Fischerův F-test	Hladina významnosti P
Intercept	10585,17	1	10585,17	1160,483	***
Vzájemné působení sledovaných faktorů	1445	1	1445	158,42	***
Chyba	529,04	58	9,12		

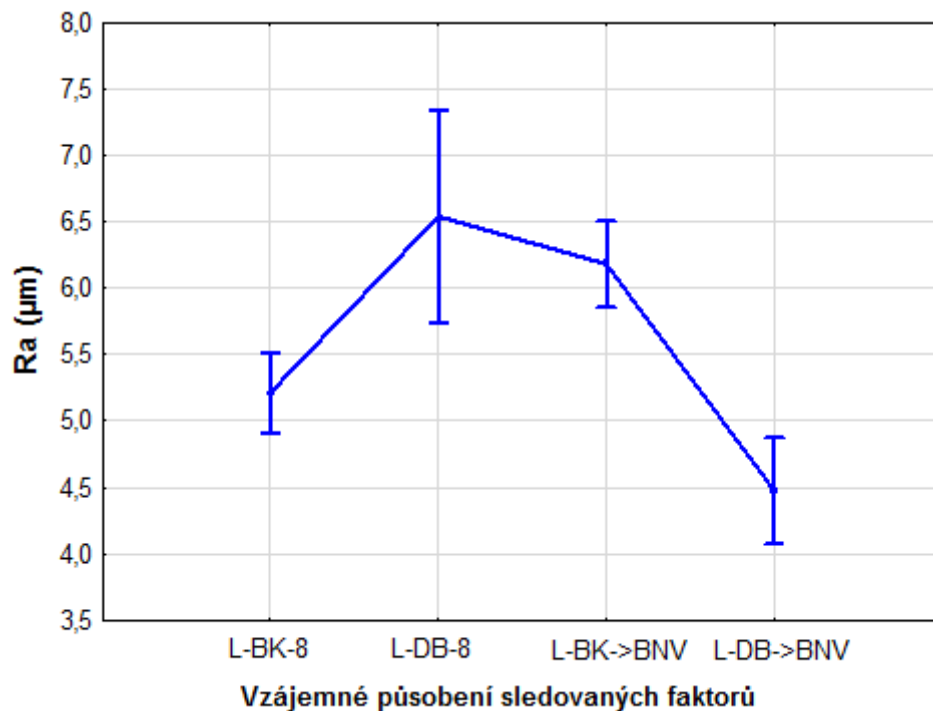
(NS - nevýznamný, *** - statisticky významný. Hladina významnosti byla stanovena na $P < 0,05$)

14.1 Vliv faktoru vzájemného působení sledovaných faktorů na hodnoty R_a

Z Obrázku 27, který znázorňuje vliv faktoru vzájemného působení sledovaných faktorů na drsnost obrobeneho povrchu, lze na první pohled vyčíst, že u metody řezání laserem působí vlhkost na obě dřeviny docela opačně. Při řezání buku vyšší obsah vlhkosti, v našem případě nad bod nasycení vláken (BNV), způsobuje zvýšenou drsnost povrchu (6,2 μm) oproti řezání při obsahu vlhkosti pouze 8 % (5,2 μm , zvýšení drsnosti přibližně o 19 %).

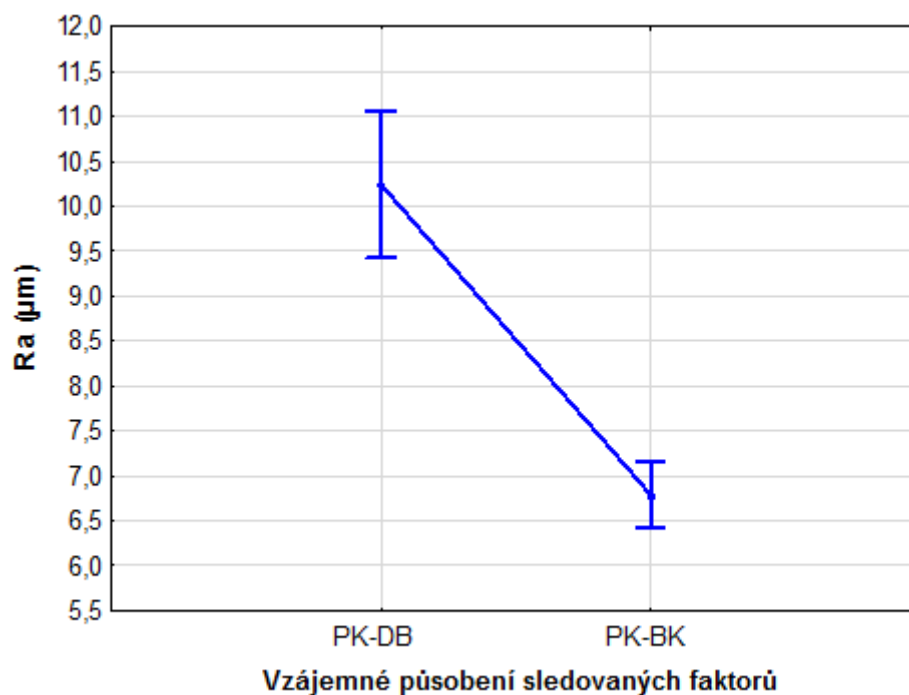
Naproti tomu u dubu můžeme sledovat účinek opačný, tedy, že vyšší obsah vlhkosti drsnost snižuje (6,5 μm), tedy kvalitu výsledného povrchu zvyšuje (4,5 μm , snížení drsnosti přibližně o 30 %). Za povšimnutí stojí také výraznější rozptyl (přibližně 1,5 μm) naměřených hodnot drsnosti u dubu s 8 % obsahem vlhkosti, který je s největší

pravděpodobností ovlivněn jeho makroskopickou stavbou, respektive výraznou pórovitostí oproti buku.



Obrázek 27 Vliv vzájemného působení sledovaných faktorů na hodnoty Ra při řezání laserem
(Zdroj: vlastní)

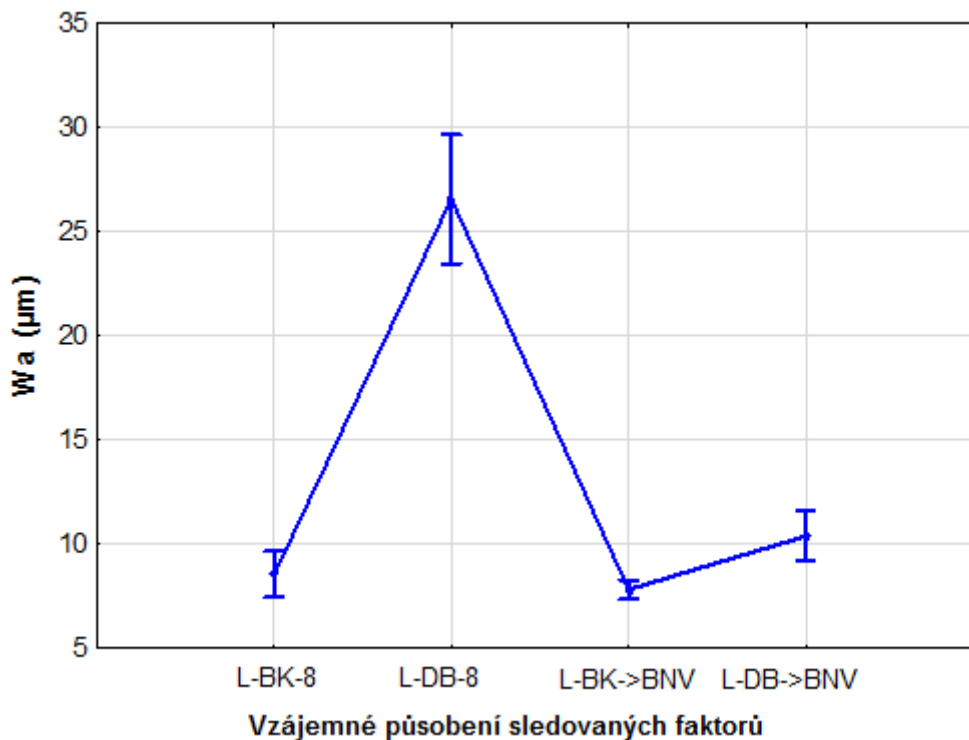
Na Obrázku 28 je patrné, že oproti naměřeným hodnotám drsnosti ploch obroběných laserem při 8 % obsahu vlhkosti, jsou naměřené hodnoty drsnosti ploch obroběných pilovým kotoučem při 8% obsahu vlhkosti vyšší. U buku jsou naměřené hodnoty drsnosti (6,8 µm) oproti laseru vyšší o přibližně 30 %, u dubu (10,2 µm) je to přibližně až o 57 %. Výraznější rozptyl naměřených hodnot drsnosti u dubových vzorků je pravděpodobně opět ze stejného důvodu, tedy jeho makroskopické struktury.



Obrázek 28 Vliv vzájemného působení sledovaných faktorů na hodnoty Ra při řezání pilovým kotoučem
(Zdroj: vlastní)

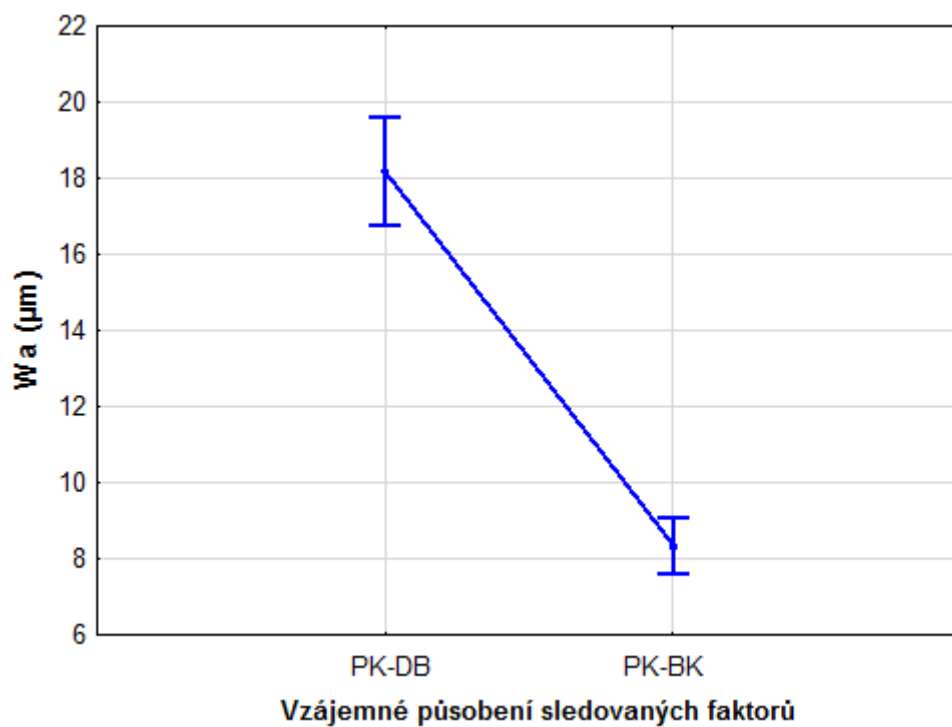
14.2 Vliv faktoru vzájemného působení sledovaných faktorů na hodnoty Wa

Z Obrázku 29, který znázorňuje vliv faktoru vzájemného působení sledovaných faktorů na vlnitost obrobeneho povrchu laserem, můžeme vyčíst, že zatímco buk dosahuje srovnatelných hodnot vlnitosti při 8 % obsahu vlhkosti (8,5 µm) a při obsahu vlhkosti nad BNV (7,8µm), rozdíl mezi naměřenými hodnotami vlnitosti u dubu při 8 % obsahu vlhkosti (26,6 µm) a při obsahu vlhkosti nad BNV (10,4 µm) činí až 60 %. Tendence větší rozptylu naměřených hodnot u dubu je přibližně stejná, jako tomu je u profilu drsnosti. Stejně tak je u dubu zachována podobná tendence horší kvality povrchu co týče vlnitosti při obrábění laserem při 8 % obsahu vlhkosti oproti obsahu vlhkosti nad BNV.



Obrázek 29 Vliv vzájemného působení sledovaných faktorů na hodnoty W_a při řezání laserem
(Zdroj: vlastní)

Při porovnání naměřených hodnot vlnitosti povrchu obroběného laserem u buku ($8,5 \mu\text{m}$) z Obrázku 29 a vlnitosti povrchu obroběného pilovým kotoučem z Obrázku 30 u buku ($8,4 \mu\text{m}$) zjistíme, že jsou naměřené hodnoty velmi podobné až shodné a není mezi nimi statisticky významný rozdíl. Naopak u dubu je při porovnání metod řezání rozdíl opět významný, v tomto případě ovšem opačně než tomu bylo u drsnosti. Zatímco naměřené hodnoty vlnitosti u plochy obroběné laserem u dubu s 8 % obsahem vlhkosti činí $26,6 \mu\text{m}$, u plochy obroběné pilovým kotoučem tak činí $18,2 \mu\text{m}$ (vlnitost nižší přibližně o 32 %).



Obrázek 30 Vliv vzájemného působení sledovaných faktorů na hodnoty W_a při řezání pilovým kotoučem
(Zdroj: vlastní)

15 Závěr

Experimentální zkoumání složitých interakcí mezi dřevem a laserovým paprskem patří mezi zásadní a významné cesty jak prozkoumat tuto problematiku co nejdříve a získat tak co nejvíce znalostí o tom, jakým způsobem na sebe dřevo a laserový paprsek působí.

Hlavním cílem mé práce bylo experimentální srovnání účinku řezání dřeva pomocí laseru s řezáním dřeva pilovým kotoučem z hlediska jejich změny kvality povrchu řezaných ploch. Toho bylo dosaženo několika dílčími cíly, které byly nezbytné pro dosažení komplexní představy a znalostí.

V první části jsme se seznámili s teoretickými principy fungování technologie laserového paprsku, jejich rozdělením podle hledisek pracovního režimu a aktivního prostředí. Na to bylo navázáno charakteristikou faktorů, které ovlivňují samotné řezání dřeva laserovou technologií. Neméně důležitou součástí teoretické analýzy bylo seznámení se s tradiční metodou obrábění pilovým kotoučem, která je v experimentální části srovnávaná právě s technologií laseru. Poznali jsme nejen principy fungování technologie pilového kotouče, ale podobně jako u laserového paprsku také charakteristiku faktorů, jež ovlivňují samotné řezání technologií pilového kotouče.

V druhé, experimentální části diplomové práce jsem si nejprve stanovil metodiku a pracovní postupy, jejichž pomocí byla provedena praktická část experimentu, ve které jsem zkoumal kvalitu povrchu řezaných ploch jak laserovým paprskem, tak pilovým kotoučem na množství 120 vzorků dubového i bukového dřeva, kontaktním profilometrem za pomoci dvou parametrů, které mimo jiné charakterizují kvalitu povrchu, a to:

- Ra – střední aritmetická úchylka posuzovaného profilu drsnosti,
- Wa – střední aritmetická úchylka posuzovaného profilu vlnitosti.

Pro vyhodnocování výsledků experimentální části diplomové práce bylo klíčové uvědomit si, že vliv jednotlivých sledovaných faktorů, kterými byly:

- druh dřeviny,
- počáteční obsah vlhkosti,
- metoda řezání,

na výslednou kvalitu povrchu řezané plochy by sice snadno šel řešit jednotlivě, ale neodpovídal by realitě, respektive by neměl podstatnou vypovídající hodnotu. V principu to znamená, že tyto faktory působí vždy. Vždy vstupuje do procesu řezání

nějaká dřevina, která má nějakou počáteční vlhkost, a vždy je použita nějaká metoda řezání. Proto byl zvolen jeden faktor, který sledoval vliv vzájemného působení těchto sledovaných faktorů.

Experimentální částí diplomové práce bylo zjištěno, že každá dřevina, zastoupená ve zkoumání, vykazovala odlišné výsledky. Při sledování střední aritmetické úchylyky profilu drsnosti vykazoval buk lepší kvalitu povrchu při počátečním obsahu vlhkosti 8 % oproti počátečnímu obsahu vlhkosti nad BNV, stejně tak oproti kvalitě povrchu po působení pilového kotouče. Naopak dub vykazoval opačnou tendenci, co se týče obsahu vlhkosti. Nejnižší naměřené hodnoty střední aritmetické úchylyky profilu drsnosti vykazoval dub při řezání laserem s počátečním obsahem vlhkosti nad BNV, a to až o třetinu oproti metodě řezání laserem s obsahem počáteční vlhkosti 8 %, a až o dvě třetiny oproti metodě pilového kotouče.

Co se týká střední aritmetické úchylyky profilu vlnitosti, tak vykazoval buk téměř shodné hodnoty bez statisticky významného rozdílu při rozdílné počáteční vlhkosti či různě použité metodě. Naopak u dubu opět velké rozdíly byly. Nejnižší vlnitost vykazoval dub při použití laserové metody s počátečním obsahem vlhkosti nad BNV. Více než dvojnásobně vyšší hodnoty byly naměřeny u laserové metody s počátečním obsahem vlhkosti 8 %, a téměř dvojnásobné při technologii pilového kotouče.

Z těchto odvozených zjištění bychom mohli vyvodit závěry, že vhodným způsobem řezání bukové řeziva se zdá být řezání laserovou technologií při počátečním obsahu vlhkosti 8 %, a u dubového řeziva taktéž laserovou technologií, ovšem při počátečním obsahu vlhkosti nad BNV. Předčila ve výsledku technologie laseru ve vlivu na změnu kvality řezaného povrchu při sledování středních aritmetických úchylyk profilu drsnosti a vlnitosti pilový kotouč? Myslím, že ano. Dá se tedy říct, že můžeme nahradit v procesech zpracování dřeva kotoučové pily laserem? Tak jednoduché to určitě není.

Dřeviny buk a dub samozřejmě nejsou jediné průmyslově zpracovávané dřevo. V úvahu je potřeba vzít důležitou vlastnost dřeva, a tou je jeho organický původ. Každá dřevina má jinou makroskopickou i mikroskopickou strukturu, a ač máme dřeviny rozdělené podle jejich podobností, každá je přeci jiná. Nelze tedy ani výsledky generalizovat tak, že výsledky buku mohou reprezentovat celou skupinu listnatých dřevin s roztroušeně pórovitou stavbou dřeva a výsledky dubu zase celou skupinu listnatých dřevin s kruhovitě pórovitou stavbou dřeva. Z tohoto pohledu by určitě bylo

vhodné zkoumání širšího spektra nejen domácích dřevin. Pojmout takovéto množství zkoumaných vzorků by obsahově nepochybně překročilo rozsah mé práce, a proto se domnívám, že by tato diplomová práce mohla sloužit jako základ či odrazový můstek pro větší zkoumání a další prozkoumání této problematiky.

Musíme mít také na paměti, že výsledné profily drsnosti a vlnitosti jsou pouze menší součástí celkové interakce, které probíhají mezi dřevem a laserovým paprskem při jeho působení na dřevo, a že zde probíhají další změny na povrchu dřeva, které se při tradičních metodách nevyskytují. Ovšem tyto nebyly předmětem mého zkoumání v rámci této diplomové práce, ale abychom mohli dělat významnější závěry, je potřeba se na celou problematiku interakcí mezi dřevem a laserovým paprskem dívat z větší perspektivy a zohlednit i výsledky dalších již dokončených studií nebo i těch budoucích, které mohou navázat i na tuto diplomovou práci.

16 Seznam použité literatury

Literární zdroje

- BARCAL, J. *Nekonvenční metody obrábění*. Praha: České vysoké učení technické, 1989, 122 s.
- BARCÍK, Š.; KVIETKOVÁ, M.; BOMBA, J.; SIKLIENKA, M. *Dřevoobráběcí nástroje - údržba a provozování: vysokoškolská učebnice*. Praha: Powerprint, 2013, 355 s. ISBN 978-80-87415-80-1.
- BARNEKOV, V.; G.; McMILLIN, C. W.; HUBER, H. A. Factors influencing laser cutting of wood. *Forest Products Journal*, 36 (1) (1986), pp. 55-58.
- BENKO, B.; FODREK, P.; KOSEČEK, M.; BIELAK, R. *Laserové technológie*. Bratislava: Vydavateľstvo Slovenskej technickej univerzity, 2000. Edícia monografií. ISBN 80-227-1425-9.
- BUMBÁLEK, B.; ODVODY, V.; OŠŤÁDAL, B. *Drsnost povrchu*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1989, 340 s.
- EICHHORN, M. *Laser physics: From principles to practical work in the lab*. New York: Springer, 2014, 171 s. ISBN 978-3-319-05127-7.
- EL-HOFY, H. *Advanced machining processes: nontraditional and hybrid machining processes*. New York: McGraw-Hill Professional, 2005. ISBN 0-07-145334-2.
- ENGST, P.; HORÁK, M. *Aplikace laserů*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1989, 208 s. Populární přednášky o fyzice - svazek 34.
- GAFF, M.; GÁBORÍK, J. *Vlastnosti povrchu dřeva modifikovaného reliéfováním*. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene. 2009. 81 s. ISBN 978-80-228-2035-6.
- 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.
- HERNANDEZ-CASTANEDA, J. C.; SEZER, H. K.; LI, L. Dual gas jet-assisted fibre laser blind cutting of dry pine wood by statistical modelling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. London: Springer-Verlag, 2010, 50(1-4), 195-206. DOI: 10.1007/s00170-009-2491-z. ISSN 0268-3768.
- JAVOREK, L. *Nástroje (I. část)*. Zvolen: Technická univerzita ve Zvolene, 2006, 171 s. ISBN 978-80-228-1714-1.
- JOSTEN, E.; REICHE, T.; WITTCHEN, B. *Dřevo a jeho obrábění*. Praha: Grada, 2010, 336 s. Průvodce truhláře. ISBN 978-80-247-2961-9.

- KMINIAK, R. Vplyv konštrukcie pilového kotúča na kvalitu vytvoreného povrchu pri priečnom pílení smrekového reziva na kapovacej pokosovej pile. *ACTA FACULTATIS XYLOLOGIAE ZVOLEN*. Zvolen: Vydavateľstvo Technickej univerzity vo Zvolene, 2014, 56(2): 87-96.
- KOCH, P. *Utilization of Hardwoods Growing on southern Pine Sites*. Volume II - Processing. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, 1985, 2542 s. Agriculture Handbook No. 605.
- KUBOVSKÝ, I.; KAČÍK, F. Colour and chemical changes of the lime wood surface due to CO₂ laser thermal modification. *Applied Surface Science*. 2014, **321**, 261-267. ISSN 01694332.
- KVIETKOVÁ, M. *Obrábění dřeva*. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, 2015, 295 s. ISBN 978-80-213-2604-0.
- LAPŠANSKÁ, H. *Laserové technologie v praxi*. Olomouc: Moravská vysoká škola Olomouc, 2010, 17 s. ISBN 978-80-87240-65-6.
- LISIČAN, J. *Rezanie dreva*. Bratislava: Slovenské vydavateľstvo technickej literatúry, 1956, 152 s.
- MAŇKOVÁ, I. *Progresívne technológie: Advanced methods of material removal*. Košice: Vienala, 2000, 275 s. ISBN 80-709-9430-4.
- NOVÁK, V.; ROUSEK, M.; KOPECKÝ, Z. Assessment of Wood Surface Quality Obtained During High Speed Milling by Use of Non-Contact Method. *DRVNA INDUSTRIJA*. 2011, 62(2), 103-115. ISSN 0012-6772.
- NUTSCH, W. *Příručka pro truhláře*. 2., přeprac. vyd. Praha: Europa-Sobotáles, 2006, 615 s. ISBN 80-867-0614-1.
- POWELL, J. *CO₂ laser cutting*. New York: Springer-Verlag, c1993. ISBN 0-387-19786-9.
- PROKEŠ, S. *Obrábění dřeva a nových hmot ze dřeva*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1965, 372 s.
- SADÍLEK, M. *Nekonvenční metody obrábění I*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2009, 152 s. ISBN 978-80-248-2107-8.
- SIKLIENKA, M.; MIŠURA, L'. Vplyv presahu pilového kotúča a rýchlosti posuvu rezný výkon. In *Transfer 2005 využívanie nových poznatkov v strojárskjej praxi*. Trenčín: GC-TECH, 2005. s 464, ISBN 80-8075-070-X.
- SOCHOR, V. *Lasery a koherentní svazky*. Praha: Academia, 1990, 196 s. Cesta k vědě č. 43 (Academia). ISBN 80-200-354-1.

- SVOREŇ, J. *Drevárské stroje. Část I.* Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2002, 169 s. ISBN 80-228-1188-2.
- ŠLEZINGEROVÁ, J.; GANDELOVÁ, L. *Stavba dřeva - cvičení.* Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 1999, 130 s. ISBN 80-715-7400-7.
- VRBOVÁ, M.; JELÍNKOVÁ, H.; GAVRILOV, P. *Úvod do laserové techniky.* Dot. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické, 1998, 233 s. ISBN 80-01-01108-9.
- WAIRIMU, G.; IKUA B. W.; KIONI, P. N. CO2 laser machining of wood, perspex and glass with and without use of assist gas. *International Journal of Scientific Research and Innovative Technology.* 2015, 2(No. 2), 128-133. ISSN 2313-3759.

Technické normy

- ČSN 22 5301. *Pilové kotouče na dřevo. Základní ustanovení.* Praha: Český normalizační institut, 1966, 12 s.
- ČSN 49 0103. *Drevo: zisťovanie vlhkosti pri fyzikálnych a mechanických skúškach.* Praha: Český normalizační institut, 1979, 8 s.
- ČSN 49 0108. *Drevo: zjisťovanie hustoty pri fyzikálnych a mechanických skúškach.* Praha: Český normalizační institut, 1993, 8 s.
- 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.

Internetové zdroje

- HUMÁR, A. *Technologie I.: Technologie obrábění - 3. část.* Brno: VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2005, 57 s. Interaktivní multimediální text pro bakalářský a magisterský studijní program. Dostupné také z: <https://docplayer.cz/13479-Technologie-i-technologie-obrabeni-3-cast.html> [cit. 2019-04-07].
- Jak správně vybrat pilový kotouč. In: *Informace o pilách, kotoučích a kotoučových nožích* [online]. [cit. 2019-04-07]. Dostupné z: <http://www.pilove-kotouce.eu/Jak-spravne-vybrat-pilovy-kotouc/>.

- Měříte správně strukturu povrchu?. In: *MM spektrum: Odborně-vzdělávací a zpravodajský portál z oblasti strojírenství a navazujících oborů* [online]. 2002 [cit. 2019-04-07]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/merite-spravne-strukturu-povrchu.html>.
- ŘASA, J.; KEREČANINOVÁ, Z. *Nekonvenční metody obrábění – 4. díl* [online]. In: . 2008 [cit. 2019-04-07]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-4-dil.html>.
- SK pilové kotouče. In: *Pilové kotouče, kotoučové pily a nože GSP Zborovice* [online]. Zborovice [cit. 2019-04-07]. Dostupné z: <http://www.gspzborovice.cz/SK-pilove-kotouce/>.
- Zahod'te skalpely. Laser, prosím!. In: *Medical Tribune CZ: Tribuna lékařů a zdravotníků* [online]. Praha, 19. 4. 2012 [cit. 2019-04-07]. Dostupné z: <https://www.tribune.cz/clanek/26388-zahodte-skalpely-laser-prosim>.