

# Podélné řezání dřeva pilovým kotoučem

Martin Kovařík

---

Bakalářská práce  
2016



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2015/2016

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Martin Kovařík**  
Osobní číslo: **T13942**  
Studijní program: **B3909 Procesní inženýrství**  
Studijní obor: **Technologická zařízení**  
Forma studia: **kombinovaná**

Téma práce: **Podélné řezání dřeva pilovým kotoučem**

Zásady pro vypracování:

- 1. Vypracujte literární rešerši na dané téma**
- 2. Určete parametry pro podélné řezání pilovým kotoučem středně tvrdého dřeva**
- 3. Navrhněte a výpočtem ověřte nástroj**

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. CSANÁDY, Etele a Endre MAGOSS. Mechanics of wood machining. 2nd ed. Berlin: Springer, 2013, 199 s. ISBN 978-3-642-29954-4.
2. PECINA, Pavel a Josef PECINA. Materiály a technologie – dřevo. 1. vyd. Brno: Masarykova univerzita, 2006, 132 s. ISBN 80-210-4013-0.
3. GENDELOVÁ, L., HORÁČEK, P. a ŠLEZINGEROVÁ, J. Nauka o dřevě. 3., nezměn. vyd. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 2009. 176 s. ISBN 978-80-7375-312-2.
4. MATOVIČ, A. Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva a materiálů na bázi dřeva. 1. vyd. Brno: Vysoká škola zemědělská v Brně, 1993. 212 s. ISBN 80-7157-086-9.
5. BARCÍK, Š. et al. Dřevobráběcí nástroje údržba a provozování. 1. vyd. Praha: Powerprint, 2013. 355 s. ISBN 978-80-87415-80-1.

Vedoucí bakalářské práce:

**Ing. Ondřej Bílek, Ph.D.**

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce:

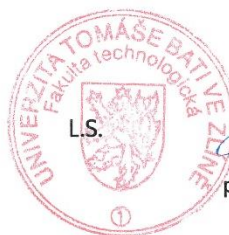
**8. ledna 2016**

Termín odevzdání bakalářské práce:

**20. května 2016**

Ve Zlíně dne 29. ledna 2016

doc. Ing. František Buňka, Ph.D.  
*děkan*



prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.  
*ředitel ústavu*

Příjmení a jméno: KOVAŘÍK MARTIN

Obor: TZ

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby<sup>1)</sup>;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3<sup>2)</sup>;
- beru na vědomí, že podle § 60<sup>3)</sup> odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60<sup>3)</sup> odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 20.5.2016

Martin Kovařík

<sup>1)</sup> zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevydělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

<sup>2)</sup> zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní dílo).

<sup>3)</sup> zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlédne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

## **ABSTRAKT**

Předkládaná bakalářská práce se zabývá určením parametrů podélného řezání dřeva pilovým kotoučem a konstrukcí příslušného nástroje. Pro určení napjatosti pilového kotouče byl zvolen výpočtový model rotujícího kotouče. Analýzou napjatosti bylo zjištěno, že maximální napětí způsobené gradientem teploty je přibližně desetkrát větší než maximální napětí vyvozené odstředivými silami. V práci byly stanoveny kritické otáčky pilového kotouče a výkon potřebný k jeho roztočení. Přínosem této práce je algoritmus pro určení výkonu potřebného k podélnému řezání dřeva pilovým kotoučem, jež umožňuje optimální návrh kotoučové pily. Dále práce předkládá ucelený návrh pilového kotouče.

Klíčová slova: Dřevo, dřevoobrábění, podélné řezání, pilový kotouč, kritické otáčky, rotující kotouč, teplotní napjatost.

## **ABSTRACT**

The submitted bachelor thesis deals with the determination of parameters of longitudinal wood cutting by circular saw blade and construction of cutting tool. A computational model was chosen to determine stress of the rotating circular saw blade. Stress analysis revealed that maximal stress caused by the temperature gradient was approximately ten times higher than the maximal stress extrapolated from centrifugal forces. In this work were determined the critical speed of the circular saw blade and the power needed to spin. The contribution of this work is the algorithm of the power required for longitudinal wood cutting wood by a circular saw blade, which allows optimal machine tool proposal. The work also presents a comprehensive engineering design of the circular saw blade.

Keywords: Wood, Wood Machining, Longitudinal Cutting, Circular Saw Blade, Critical Speed, Rotating Disk, Thermal Stresses.

Rád bych touto cestou vyjádřil dík Ing. Ondřeji Bílkovi, Ph.D. za jeho cenné připomínky, trpělivost a ochotu při vedení mé bakalářské práce.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

## OBSAH

|   |            |
|---|------------|
| <b>ÚVOD</b> .....   | <b>9</b>   |
| <b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....                                | <b>10</b>  |
| <b>1 DŘEVO JAKO KONSTRUKČNÍ MATERIÁL</b> .....                | <b>11</b>  |
| 1.1 MECHANICKÉ VLASTNOSTI DŘEVA .....                         | 12         |
| <b>2 DŘEVOOBRÁBĚNÍ</b> .....                                  | <b>30</b>  |
| 2.1 MECHANIKA ŘEZNÉHO PROCESU .....                           | 30         |
| 2.2 ŘEZÁNÍ PILOVÝMI NÁSTROJI.....                             | 33         |
| 2.3 DŘEVOOBRÁBĚCÍ NÁSTROJE.....                               | 37         |
| <b>3 SHRUTÍ TEORETICKÉ ČÁSTI A CÍLE ČÁSTI PRAKTICKÉ</b> ..... | <b>52</b>  |
| <b>II PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....                                | <b>53</b>  |
| <b>4 URČENÍ PARAMETRŮ PODÉLNÉHO ŘEZÁNÍ DŘEVA</b> .....        | <b>54</b>  |
| 4.1 VOLBA PRŮMĚRU PILOVÉHO KOTOUČE.....                       | 54         |
| 4.2 VOLBA TLOUŠŤKY PLOCHÉHO PILOVÉHO KOTOUČE.....             | 55         |
| 4.3 VOLBA PRŮMĚRU UPÍNACÍCH PŘÍRUB .....                      | 56         |
| 4.4 VOLBA PROFILU A GEOMETRIE ZUBŮ PILOVÉHO KOTOUČE .....     | 56         |
| 4.5 URČENÍ ŘEZNÉ RYCHLOSTI A OTÁČEK PILOVÉHO KOTOUČE.....     | 59         |
| 4.6 URČENÍ POSUVU NA BŘIT A RYCHLOSTI POSUVU.....             | 61         |
| 4.7 URČENÍ MĚRNÉHO ŘEZNÉHO ODPORU .....                       | 62         |
| 4.8 URČENÍ ŘEZNÉHO VÝKONU .....                               | 70         |
| 4.9 PARAMETRY PILOVÉHO KOTOUČE .....                          | 71         |
| 4.10 PARAMETRY PODÉLNÉHO ŘEZÁNÍ DŘEVA PILOVÝM KOTOUČEM .....  | 72         |
| <b>5 KONSTRUKCE PILOVÉHO KOTOUČE</b> .....                    | <b>73</b>  |
| 5.1 URČENÍ KRITICKÝCH OTÁČEK.....                             | 73         |
| 5.2 URČENÍ NAPJATOSTI .....                                   | 76         |
| 5.3 URČENÍ VÝKONU POTŘEBNÉHO K ROZTOČENÍ .....                | 96         |
| <b>ZÁVĚR</b> .....  | <b>100</b> |
| <b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY</b> .....                        | <b>101</b> |
| <b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....               | <b>104</b> |
| <b>SEZNAM OBRÁZKŮ</b> .....                                   | <b>108</b> |
| <b>SEZNAM TABULEK</b> .....                                   | <b>110</b> |
| <b>SEZNAM PŘÍLOH</b> .....                                    | <b>111</b> |



## ÚVOD

Cílem předkládané bakalářské práce je určení parametrů pro podélné řezání středně tvrdého dřeva pilovým kotoučem a návrh příslušného nástroje.

První kapitola se zabývá mechanickými vlastnostmi dřeva. Popisuje elastické konstanty pro dřevo jako ortotropní materiál. Dále podává přehled o pevnosti různých druhů dřeva. Druhá kapitola se zabývá mechanikou řezného procesu a řezáním pilovými nástroji. Pojednává se zde o geometrii, napjatosti a chvění pilového kotouče. Čtvrtá kapitola určuje parametry pro podélné řezání středně tvrdého dřeva pilovým kotoučem. Pátá kapitola se zabývá konstrukcí pilového kotouče. Určuje jeho kritické otáčky, napjatost a výkon potřebný k roztočení.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 DŘEVO JAKO KONSTRUKČNÍ MATERIÁL

Dřevo je jedním z nejstarších přírodních materiálů, který používal člověk ke svým potřebám během historického vývoje společnosti. Z hlediska základního rozdělení konstrukčních materiálů řadíme dřevo mezi nekovové přírodní organické materiály. V podobě stromů dřevo obklopovalo člověka již od dob jeho evoluce a bylo mu k dispozici, bez nutnosti jakýchkoliv znalostí o materiálu. Člověk začal využívat materiály z existenčních důvodů. Prioritní úlohy člověka k zachování svého rodu jsou: získání dostatečného množství potravy, ochrana před nepříznivými přírodními podmínkami a ochrana proti přirozeným predátorům a nepřítelům. Zlomovým okamžikem ve vývoji lidstva bylo jedno z prvních poznání člověka, kterým je využití ohně. Člověk se naučil oheň rozdělat, což vedlo k rozvoji technologického zpracování přírodních materiálů. Teplo produkované ohněm umožňovalo vypalovat hliněné nádoby a tavit kovy. Právě rozvoj metalurgických dovedností v době bronzové a později v době železné položil základ civilizaci, jak ji známe dnes. Dřevo tedy bylo využíváno člověkem jako jeden z prvních konstrukčních materiálů i jako přirozeně dostupné palivo k získání tepla a významně ovlivnilo vývoj celého lidstva. Žádný jiný rostlinný druh nemá pro lidstvo takový význam jako stromy. Dřevo je přírodní surovinou, se kterou může lidstvo při uvážlivých způsobech hospodaření v lesním hospodářství trvale počítat.

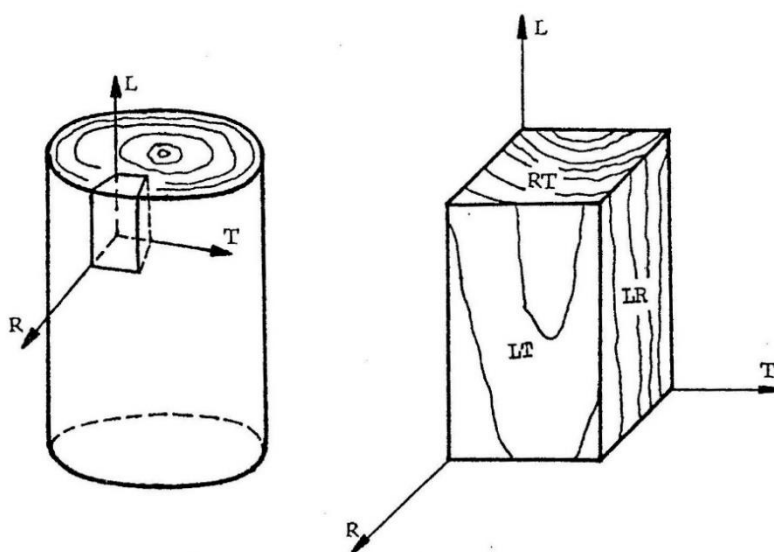
## 1.1 Mechanické vlastnosti dřeva

Dřevo je nehomogenní a anizotropní materiál organického původu. Nehomogenní (heterogenní) látky jsou složeny z několika fází. Fyzikální vlastnosti nehomogenního materiálu nejsou v celém objemu tělesa shodné. Anizotropní materiál má v různých směrech různé vlastnosti. Anizotropie dřeva se projevuje při změnách rozměrů vlivem příjmu a výdeje vody, při teplotním působení a zejména při mechanickém namáhání. Pro dřevo obecně platí několikanásobně vyšší pružnost a pevnost při namáhání ve směru vláken než ve směru kolmém na vlákna. Anizotropie dřeva je důsledkem orientace vazebných sil mezi základními chemickými sloučeninami. Anatomické elementy různého tvaru a rozměrů, tvořící dřevo, jsou vzájemně nepravidelně rozmístěny v prostorové stavbě dřeva a mají odlišný tvar a rozměry. Pro charakteristiku dřeva se používá popis struktury dřeva v následujících rovinách:

- 1) **Rovina transverzální-příčná** (kolmá na podélnou osu kmene) – **RT**.
- 2) **Rovina radiální** (rovnoběžná s osou kmene, procházející dření) – **LR**.
- 3) **Rovina tangenciální** (rovnoběžná s osou kmene, procházející tangentou k některému z letokruhů) – **LT**.

Tyto roviny jsou navzájem kolmé. Průsečnice těchto rovin jsou označovány jako směry:

- a) **Podélný** (rovnoběžný s osou kmene, ve směru vláken) – **L**.
- b) **Příčný radiální** (kolmý na osu kmene a na letokruhy, procházející dření) – **R**.
- c) **Příčný tangenciální** (kolmý na osu kmene, ve směru tangenty k některému z letokruhů) – **T**.



Obr. 1. Roviny a směry pružné symetrie dřeva [1]

Rozdílný charakter struktury a anatomické stavby dřeva v jednotlivých vzájemně kolmých směrech se projevuje také jeho rozdílnými vlastnostmi v těchto směrech. Materiály, mající symetrii jako krystalický rombový (kosočtverečný) systém, řadíme k materiálům ortogonálně anizotropním, zkráceně ortotropním. Dřevo se mezi ortotropní materiály řadí za podmínek, že se zanedbává změna pružných vlastností po výšce kmene, po průměru kmene a zakřivení letokruhů je malé – zanedbatelné. Při zkoumání vlastností dřeva je třeba respektovat jednotlivé roviny (směry). Proto se u všech vlastností dřeva uvádí směr, pro který byla daná vlastnost zjištěna. [1, 2, 4, 6]

Dřevo je biologicky rostlým nehomogenním materiálem. Nehomogenita je patrná již na submikroskopické a mikroskopické úrovni. Na těchto úrovních odpovídají vlastnosti dřeva jeho stavbě. Na úrovni makroskopické dochází vlivem sdružování anatomických elementů do pletiv s odlišnou stavbou ke značné variabilitě vlastností dřeva. Na pevnost dřeva nemá zásadní vliv šířka letokruhů, ale zpravidla podíl letního dřeva, plnicí převážně mechanickou funkci. Nehomogenita je zapříčiněna též přítomností vad dřeva. Důsledkem nehomogenity je značná proměnlivost vlastností dřeva.

Podstatné anatomické parametry na jednotlivých úrovních stavby dřeva:

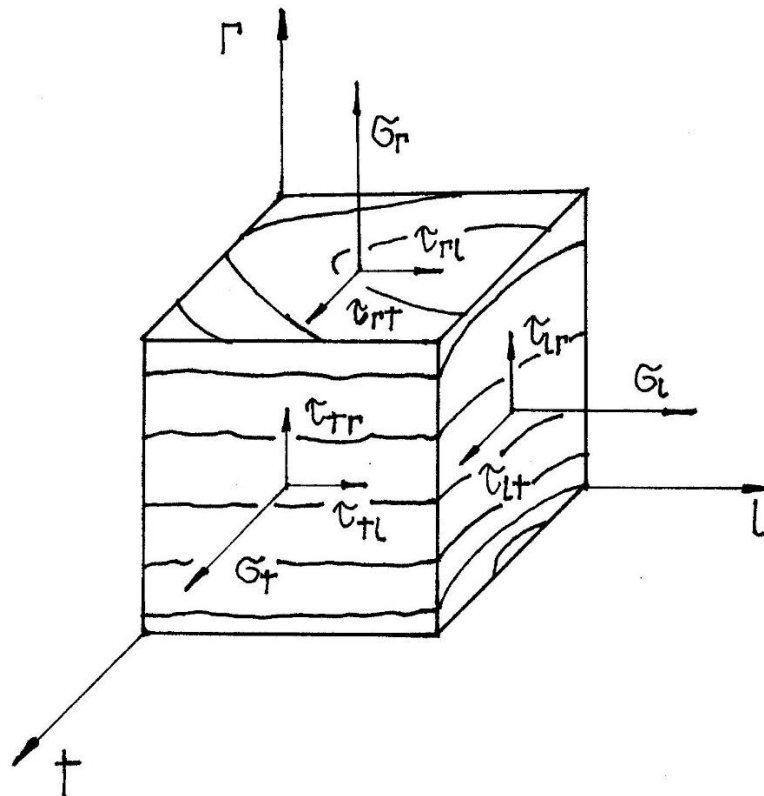
- Makroskopická – anatomický směr, odklon vláken, šířka letokruhu, uspořádání cév, jádro a běl, jarní a letní dřevo, reakční dřevo, dřeňové paprsky.
- Mikroskopická – zastoupení cév, struktura buněčné stěny, pryskyřičné kanálky, vrstevnatost dřeňových paprsků, stavba pletiv.
- Submikroskopická – fibrilární struktura a orientace, stavba mikrolamel, lignifikace buněčné stěny, vrstevnatost buněčné stěny.

Póry (lumeny buněk a mezibuněčné prostory) vytvářejí ve dřevě propojený kapilární systém, mnohdy zcela zaplnitelný tekutinou, a často převyšující objem buněčných stěn. Dřevo je porézním materiálem, impregnovatelným v závislosti na pórovitosti.

Dřevo je hygroskopický materiál (schopný pohlcovat a udržovat vlhkost vzduchu). Vodu i jiné kapaliny a plyny je dřevo schopno z okolního prostředí přijímat nebo odevzdávat ve skupenství kapalném nebo plynném, a tím měnit svoji vlhkost podle vlhkosti okolního prostředí. Adsorpce vodních par probíhá do meze, kdy se ve dřevě nachází maximální množství vázané vody. Tato mezní hodnota se stanovuje na základě určení meze nasycení buněčných stěn nebo meze hygroskopicity. [1, 2, 4, 5]

## Napětí a deformace

Při hodnocení mechanických vlastností dřeva uvažujeme pro zjednodušení dřevo jako ortotropní materiál a zavádíme tři kolmé osy symetrie: podélnou –  $l$ , příčnou radiální –  $r$  a příčnou tangenciální –  $t$ .



Obr. 2. Složky napětí ve třech navzájem kolmých rovinách

K získání představy o rozložení vnitřních sil v průřezu určíme intenzitu vnitřních sil, kterou nazýváme napětí. Napětí  $\sigma$ , které vzniká od složky vnitřní síly, která působí ve směru normály k elementární ploše, nazýváme normálové napětí. Napětí  $\tau$ , které vzniká od složky vnitřní síly, která působí v elementární ploše, nazýváme smykové napětí. Normálová napětí jsou označena jedním indexem podle osy, se kterou jsou rovnoběžná, smyková napětí jsou označena dvěma indexy. První index u složek smykových napětí označuje směr normály roviny, v níž smykové napětí působí, a druhý index označuje osu, se kterou je smykové napětí rovnoběžné. Napjatost (stav napětí) v bodě tělesa jednoznačně charakterizuje devět složek napětí: tři složky normálových napětí  $\sigma_l, \sigma_r, \sigma_t$  a šest složek smykových napětí  $\tau_{lr}, \tau_{rl}, \tau_{rt}, \tau_{tr}, \tau_{tl}, \tau_{lt}$ . Devět složek napětí uspořádaných do matice se nazývá tenzor napětí

$$[\sigma] = \begin{bmatrix} \sigma_l & \tau_{lr} & \tau_{lt} \\ \tau_{rl} & \sigma_r & \tau_{rt} \\ \tau_{tl} & \tau_{tr} & \sigma_t \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Moment síly působící na těleso musí být nulový. Musí tedy platit zákon o sdruženosti smykových napětí, říkájící že pokud ve dvou na sebe kolmých rovinách působí smyková napětí, jsou pak tyto smyková napětí stejně velká a tenzor napětí je symetrický. Index označuje směr osy, k níž jsou složky smykových napětí kolmé

$$\tau_{lr} = \tau_{rl} = \tau_t,$$

$$\tau_{rt} = \tau_{tr} = \tau_l,$$

$$\tau_{tl} = \tau_{lt} = \tau_r.$$

Vlivem zatížení dochází u každého tělesa k jeho přetvoření. Přetvořením tělesa se obecně změní poloha jeho jednotlivých bodů. Dochází tedy ke změně délky v jednotlivých směrech. Poměr změny délky k původní délce udává poměrné prodloužení  $\varepsilon$ . Přetvoření v tělese charakterizuje též změna kolmosti dvou původně kolmých směrů. Tato změna pravého úhlu se nazývá zkos  $\gamma = 2\varepsilon$ . Tak jako složky napětí, můžeme i složky deformace uspořádat do matice, nazývané tenzor deformace

$$[\varepsilon] = \begin{bmatrix} \varepsilon_l & \varepsilon_{lr} & \varepsilon_{lt} \\ \varepsilon_{rl} & \varepsilon_r & \varepsilon_{rt} \\ \varepsilon_{tl} & \varepsilon_{tr} & \varepsilon_t \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Tenzor deformace je stejně jako tenzor napětí symetrický

$$\varepsilon_{lr} = \varepsilon_{rl} = \varepsilon_t,$$

$$\varepsilon_{rt} = \varepsilon_{tr} = \varepsilon_l,$$

$$\varepsilon_{tl} = \varepsilon_{lt} = \varepsilon_r.$$

Lineární závislost mezi napětím a poměrnou deformací vyjadřuje Hookeův zákon

$$\sigma = E\varepsilon \text{ [MPa]}. \quad (3)$$

$\sigma$  – normálové napětí [MPa],

$E$  – konstanta úměrnosti nazývaná Youngův modul (modul pružnosti v tahu) [MPa],

$\varepsilon$  – poměrná (relativní) deformace [1].

Obdobně platí lineární závislost mezi napětím smykovým a zkošem

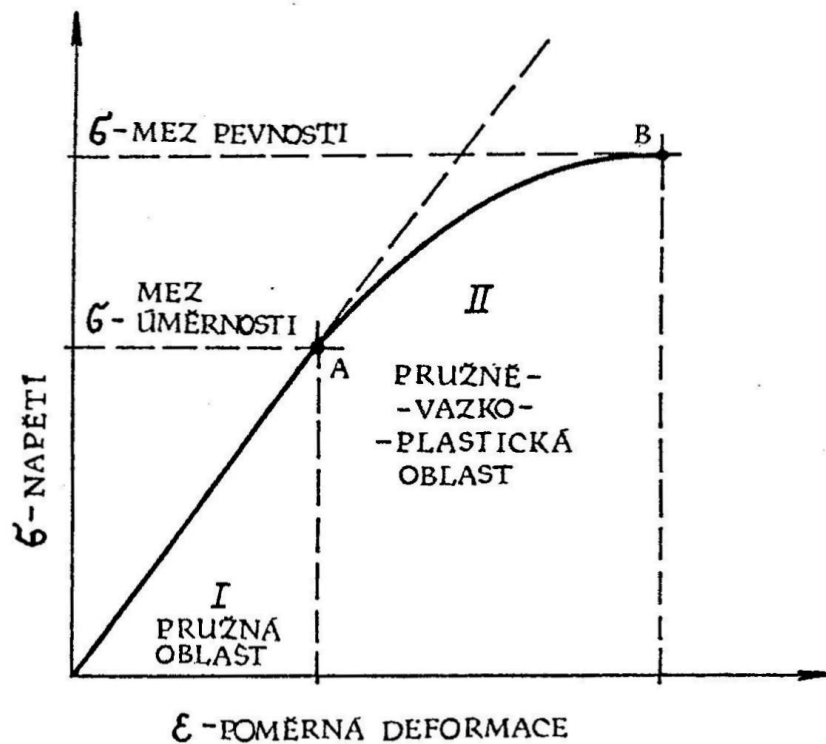
$$\tau = G\gamma \text{ [MPa]}. \quad (4)$$

$\tau$  – smykové napětí [MPa],

$G$  – modul pružnosti ve smyku [MPa],

$\gamma$  – zkos [1].

Modul pružnosti v tahu určíme pomocí normalizované zkoušky tahem. Znázornění závislosti mezi napětím a poměrnou deformací se provádí pomocí pracovního diagramu.



Obr. 3. Obecný tvar pracovního diagramu pro dřevo [1]

Obecný tvar pracovního diagramu pro dřevo neplatí pro pevnost v tlaku kolmo na vlákna. Závislost mezi napětím a poměrnou deformací je lineární do hodnoty, která se nazývá mez úměrnosti. Při napětích nepřevyšujících hodnotu meze úměrnosti se materiál nachází v oblasti pružných (elastických) deformací a po odlehčení nejsou deformace trvalé a materiál se vrací do původního stavu. Překročí-li hodnota napětí mez úměrnosti, materiál se dostane do oblasti plastických deformací, kde jsou deformace po odlehčení trvalé neboli plastické. Nad mezí úměrnosti není poměrná deformace přímo úměrná napětí a deformační čára nabývá charakteru křivky. Při dosažení hodnoty napětí, kterou nazýváme mezí



pevnosti, dochází u dřeva k roztržení bez lokálního zúžení průřezu. Modul pružnosti v tahu je dán sklonem přímky vyjadřující lineární závislost mezi napětím a poměrnou deformací. Čím je přímka strmější, tím je modul pružnosti v tahu větší a materiál tužší

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \text{ [MPa]}.$$

Čím je modul pružnosti v tahu větší, tím menší je poměrná deformace

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \text{ [1]}.$$

V mezích pružné deformace se mění působíště vnitřních a vnějších sil, čímž tyto síly konají práci. Tato práce se nazývá deformační prací (odtud pracovní diagram).

### Moduly pružnosti

Moduly pružnosti se pro dřevo zjišťují v tahu, tlaku a statickém ohybu. S ohledem na anizotropii dřeva se moduly pružnosti v tahu a tlaku stanovují ve směru vláken  $E_l$  a kolmo na vlákna v radiálním  $E_r$  a tangenciálním  $E_t$  směru. Dřevěné těleso zatížené ohybovým momentem charakterizuje modul pružnosti ve statickém ohybu  $E_{oh}$ , který se udává ve směru kolmém na vlákna a zkouší se prakticky jen v tangenciálním směru.

Průměrná hodnota modulu pružnosti pro dřevo v tahu a tlaku ve směru vláken se udává (10 000 až 12 000) MPa, napříč vláken (500 až 1 000) MPa. Napříč vláken může být až 25krát menší, přičemž v radiálním směru je přibližně o (20 až 50) % vyšší než v tangenciálním směru. Se stoupající vlhkostí až do meze hygroskopicity modul pružnosti klesá.

Tab. 1. Moduly pružnosti v tlaku, tahu a statickém ohybu [1]

| druh dřeva | modul pružnosti (MPa) při |       |       |       |       |       |                 |
|------------|---------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------------|
|            | tlaku                     |       |       | tahu  |       |       | statickém ohybu |
|            | $E_l$                     | $E_r$ | $E_t$ | $E_l$ | $E_r$ | $E_t$ | $E_{oh}$        |
| borovice   | 12300                     | 700   | 580   | 12300 | 590   | 510   | 12800           |
| smrk       | 14800                     | 670   | 440   | 14900 | 700   | 500   | 11200           |
| bříza      | 16400                     | 680   | 530   | 18700 | 680   | 500   | 15700           |
| dub        | 14600                     | 1370  | 990   | 14600 | 1180  | 910   | 15700           |

### Poissonova čísla

Příčné poměrné deformace ve směrech kolmých na působící sílu jsou přímo úměrné poměrné deformaci ve směru působení síly. Záporný poměr příčné poměrné deformace ku podélné poměrné deformaci vyjadřuje Poissonovo číslo

$$\nu_{ij} = -\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_j} [1]; \quad ij = l, r, t. \quad (5)$$

$\nu_{ij}$  – Poissonovo číslo [1],

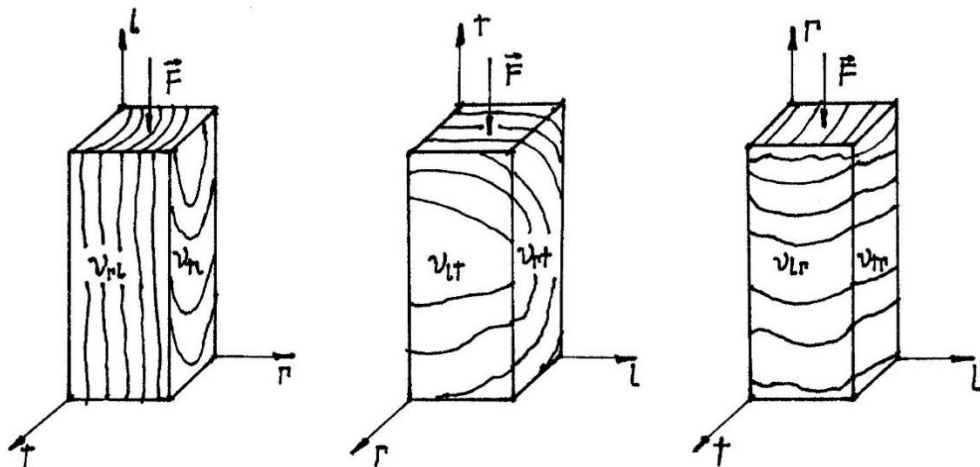
$ij$  – indexy značící směr (podélný, radiální, tangenciální),  $i \neq j$ ,

index  $i$  označuje směr příčné deformace, index  $j$  označuje směr působení síly,

$\varepsilon_i$  – příčná poměrná deformace [1],

$\varepsilon_j$  – podélná poměrná deformace [1].

Poissonovo číslo nazýváme také koeficientem příčné deformace nebo Poissonovým poměrem. Poissonova čísla se stanovují pomocí tenzometrů, kterými se měří podélné a příčné deformace. Pro dřevo stanovujeme s ohledem na tři roviny pružné symetrie šest Poissonových čísel  $\nu_{rl}, \nu_{tl}, \nu_{lr}, \nu_{tr}, \nu_{lt}$  a  $\nu_{rt}$ .



Obr. 4. Zkušební tělesa pro stanovení Poissonových čísel

U izotropních materiálů se Poissonovo číslo pohybuje v mezích  $0 < \nu \leq 0,5$ . U dřeva jako anizotropního materiálu mohou dosahovat některá Poissonova čísla hodnot větších než 0,5.

Tab. 2. Poissonova čísla vybraných druhů dřeva [1]

| druh dřeva | Poissonova čísla |            |            |            |            |            |
|------------|------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
|            | $\mu_{rl}$       | $\mu_{tl}$ | $\mu_{lr}$ | $\mu_{tr}$ | $\mu_{lt}$ | $\mu_{rt}$ |
| borovice   | 0,490            | 0,410      | 0,030      | 0,790      | 0,037      | 0,380      |
| smrk       | 0,440            | 0,411      | 0,017      | 0,480      | 0,031      | 0,250      |
| ďub        | 0,430            | 0,410      | 0,070      | 0,830      | 0,090      | 0,340      |
| bříza      | 0,580            | 0,450      | 0,043      | 0,810      | 0,040      | 0,490      |

### Moduly pružnosti ve smyku

Modulem pružnosti ve smyku se rozumí koeficient úměrnosti mezi smykovým napětím a příslušným zkosem. Chování dřeva popisují tři moduly pružnosti ve smyku:  $G_{rt}$  v rovině transverzálně-příčné,  $G_{rl}$  v rovině radiální a  $G_{tl}$  v rovině tangenciální.

### Statická pevnost dřeva

Statická pevnost dřeva charakterizuje odolnost dřeva proti plastickým deformacím při statickém zatěžování. Pevnost dřeva se vyjadřuje napětím na mezi pevnosti  $\sigma_p$ , kdy dochází k porušení soudržnosti tělesa. Protože pevnost dřeva nelze určit teoretickým výpočtem, zjišťuje se pomocí zkoušek, při kterých se sleduje napětí v okamžiku porušení tělesa. Jedinou výjimkou je pevnost dřeva v tlaku napříč vláken, protože zde konečného porušení tělesa nelze dosáhnout, definujeme ji proto jako konvenční pevnost. Se stoupající vlhkostí až do meze hygroskopicity se pevnost dřeva snižuje. Pevnost klesá také se stoupající teplotou. Se stoupající hustotou dřeva se obvykle lineárně zvyšuje i pevnost.

### Pevnost dřeva v tlaku

S ohledem na směr působící síly k orientaci vláken a letokruhům dřeva rozlišujeme:

- Pevnost v tlaku ve směru vláken  $\sigma_{d||}$ .
- Pevnost v tlaku napříč vláken – ve směru radiálním  $\sigma_{d\perp r}$ .
- Pevnost v tlaku napříč vláken – ve směru tangenciálním  $\sigma_{d\perp t}$ .

### Pevnost dřeva v tlaku ve směru vláken

Pevnost dřeva v tlaku ve směru vláken je z praktického hlediska velmi důležitou vlastností dřeva. Průměrná hodnota meze pevnosti v tlaku ve směru vláken u dřev s 12% absolutní vlhkostí je přibližně 50 MPa, přičemž variační koeficient má hodnotu přibližně 18 %. Jehličnaté dřeviny mají v důsledku pravidelnější stavby dřeva oproti listnatým dřevinám vyšší mez úměrnosti  $\sigma_u$ . [1, 2, 4]

Tab. 3. Hodnoty meze pevnosti v tlaku ve směru vláken [1]

| druh dřeva | mez pevnosti (MPa)<br>při vlhkosti (%) |           | druh dřeva | mez pevnosti (MPa)<br>při vlhkosti (%) |           |
|------------|--|-----------|------------|--|-----------|
|            | 12                                     | 30 a více |            | 12                                     | 30 a více |
| modřín     | 64,5                                   | 25,5      | đub        | 57,5                                   | 30,4      |
| borovice   | 48,5                                   | 21,0      | buk        | 55,5                                   | 26,0      |
| smrk       | 44,4                                   | 19,5      | ořešák     | 55,0                                   | 24,0      |
| limba      | 42,0                                   | 18,5      | břıza      | 55,0                                   | 22,5      |
| akát       | 75,5                                   | 41,5      | jíl m vaz  | 48,0                                   | 25,0      |
| habr       | 60,0                                   | 26,5      | lípa       | 45,0                                   | 24,0      |
| javor klen | 59,5                                   | 28,0      | olše       | 44,0                                   | 23,5      |
| jasan      | 59,0                                   | 32,5      | osika      | 42,5                                   | 19,0      |
| hruška     | 58,5                                   | 26,5      | topol      | 39,0                                   | 18,0      |

### Pevnost dřeva v tlaku napříč vláken

Při působení tlaku napříč vláken jsou možné dva průběhy závislosti deformace na napětí. Deformace dvoufázová a třífázová. Dvoufázová křivka deformace je charakteristická při tlaku v tangenciálním směru. Třífázová křivka deformace je typická při tlaku ve směru radiálním. Při působení tlaku napříč vláken nedochází ve většině případů k celkovému porušení tělesa. Stanovuje se proto konvenční mez pevnosti, která je mezní hodnotou pro pevnost dřeva v tlaku napříč vláken. Tato mezní hodnota se také označuje jako mez otláčení. Hodnoty konvenční meze pevnosti dřeva v tlaku napříč vláken na celou plochu a v tlaku napříč vláken na část délky se liší. Hodnoty konvenční meze pevnosti dřeva v tlaku napříč vláken na část délky jsou v průměru o (20 až 25) % vyšší než hodnoty konvenční meze pevnosti dřeva v tlaku napříč vláken na celou plochu. Konvenční mez pevnosti při zatížení napříč vláken je průměrně 10krát menší než mez pevnosti při tlaku ve směru vláken, přičemž variační koeficient má hodnotu přibližně 28 %. Vlhkost, teplota a hustota dřeva mají na pevnost dřeva v tlaku napříč vláken podobný vliv jako na pevnost v tlaku ve směru vláken.

Tab. 4. Průměrné hodnoty konvenční meze pevnosti v tlaku napříč vláken [1]

| druh dřeva | konvenční mez pevnosti (MPa) |           |                                |           |   |           |                                |           |
|------------|------------------------------|-----------|--------------------------------|-----------|---|-----------|--------------------------------|-----------|
|            | tlak napříč vláken ve směru  |           |                                |           | tlak napříč vláken na část délky ve směru |           |                                |           |
|            | radiálním při vlhkosti (%)   |           | tangenciálním při vlhkosti (%) |           | radiálním při vlhkosti (%)                |           | tangenciálním při vlhkosti (%) |           |
|            | 12                           | 30 a více | 12                             | 30 a více | 12  | 30 a více | 12                             | 30 a více |
| modřín     | 4,5                          | 2,7       | 6,1                            | 2,5       | 6,2                                       | 3,7       | 9,5                            | 3,9       |
| borovice   | 5,2                          | 3,1       | 7,6                            | 3,1       | -   | -         | -                              | -         |
| jedle      | 2,2                          | 1,3       | 2,4                            | 1,0       | 2,5                                       | 1,5       | 3,4                            | 1,4       |
| habr       | 6,7                          | 4,0       | 6,2                            | 3,7       | 13,7                                      | 8,2       | 11,7                           | 7,0       |
| jasan      | -                            | -         | -                              | -         | 8,7                                       | 5,2       | 11,0                           | 6,6       |
| đub        | -                            | -         | -                              | -         | 9,4                                       | 5,6       | 5,5                            | 3,3       |
| buk        | 6,2                          | 3,7       | 6,5                            | 3,9       | 11,7                                      | 7,0       | 11,2                           | 6,7       |
| jilm vaz   | 5,8                          | 3,5       | 4,8                            | 2,9       | 11,3                                      | 6,8       | 11,3                           | 6,8       |
| lípa       | 5,7                          | 3,4       | 5,2                            | 3,1       | 10,0                                      | 6,0       | 10,2                           | 6,1       |
| olše       | 7,0                          | 4,2       | 3,8                            | 2,3       | 8,4                                       | 5,0       | 5,5                            | 3,3       |
| osika      | 5,5                          | 3,3       | 3,5                            | 2,1       | 6,5                                       | 3,9       | 4,8                            | 2,9       |

### Pevnost dřeva v tahu

Obdobně jako u tlaku rozlišujeme:

- Pevnost v tahu ve směru vláken  $\sigma_{t||}$ .
- Pevnost v tahu napříč vláken – ve směru radiálním  $\sigma_{t\perp r}$ .
- Pevnost v tahu napříč vláken – ve směru tangenciálním  $\sigma_{t\perp t}$ .

### Pevnost dřeva v tahu ve směru vláken

Pevnost dřeva v tahu ve směru vláken dosahuje nejvyšších hodnot ze všech druhů zatížení. Průměrná udávaná hodnota pevnosti v tahu ve směru vláken je pro naše dřeviny přibližně 120 MPa. Deformace v tahu ve směru vláken se projevuje určitým prodloužením tělesa, až v konečné fázi dojde k roztržení pletiva. U dřeva s vyšší pevností je roztržená část vláknitá nebo třískovitá, u dřeva s menší pevností je schodovitá až téměř hladká. Při zatížení v tahu ve směru vláken se dřevo chová jako křehký materiál.

Tab. 5. Hodnoty meze pevnosti v tahu ve směru vláken [1]

| druh dřeva | mez pevnosti (MPa)<br>při vlhkosti (%) |           | druh dřeva | mez pevnosti (MPa)<br>při vlhkosti (%) |           |
|------------|--|-----------|------------|--|-----------|
|            | 12                                     | 30 a více |            | 12                                     | 30 a více |
| modřín     | 125                                    | 96        | jasan      | 145                                    | 109       |
| borovice   | 103                                    | 79        | habr       | 141                                    | 106       |
| smrk       | 103                                    | 79        | osika      | 125                                    | 94        |
| limba      | 90                                     | 69        | buk        | 123                                    | 92        |
| jedle sib. | 67                                     | 51        | lípa       | 121                                    | 91        |
| akát       | 176                                    | 109       | olše       | 101                                    | 76        |
| bříza      | 168                                    | 126       | topol      | 91                                     | 68        |

### Pevnost dřeva v tahu napříč vláken

Pevnost dřeva v tahu napříč vláken je několikanásobně menší, než ve směru vláken. Mez pevnosti v radiálním směru je větší než v tangenciálním směru, přičemž větší rozdíl vykazují dřeva listnáčů než dřeva jehličnanů. Listnáče mají pevnost v tahu napříč vláken větší než jehličnany. Mez pevnosti při zatížení napříč vláken je průměrně 20krát menší než mez pevnosti při tahu ve směru vláken, přičemž variační koeficient má hodnotu přibližně 25 %. Vlhkost, teplota a hustota dřeva mají na pevnost dřeva v tahu napříč vláken podobný vliv jako na pevnost v tahu ve směru vláken.

Tab. 6. Hodnoty meze pevnosti v tahu napříč vláken [1]

| druh dřeva | mez pevnosti v tahu napříč vláken (MPa) ve směru |                         | druh dřeva | mez pevnosti v tahu napříč vláken (MPa) ve směru |                         |
|------------|--|-------------------------|------------|--|-------------------------|
|            | radiálním při w=12%                              | tangenciálním při w=12% |            | radiálním při w=12%                              | tangenciálním při w=12% |
| modřín     | 5,6  | 5,2                     | habr       | 13,3   | 8,4                     |
| borovice   | 5,4  | 3,5                     | javor klen | 13,3   | 9,2                     |
| smrk       | 5,0  | 3,2                     | buk        | 12,5   | 8,5                     |
| límba      | 4,2  | 2,8                     | bříza      | 11,1   | 6,5                     |
| jedle      | 4,0  | 2,9                     | lípa       | 8,3  | 5,0                     |
| jasan      | 9,0  | 4,2                     | olše       | 7,2  | 5,9                     |
| řebřina    | 8,0  | 6,5                     | osika      | 7,1  | 4,6                     |

### Pevnost dřeva v ohybu

U dřeva rozlišujeme dvě pevnosti v ohybu s ohledem na průběh vláken:

- Pevnost v ohybu, kdy vlákna probíhají rovnoběžně s podélnou osou tělesa a síla působí napříč vláken v radiálním nebo tangenciálním směru.
- Pevnost v ohybu, kdy vlákna probíhají kolmo na podélnou osu tělesa a příčný řez je orientován ve směru působící síly nebo kolmo k působící síle.

Zpravidla se sleduje a používá pevnost dřeva v ohybu napříč vláken. Vlákna zkušebního tělesa probíhají rovnoběžně s podélnou osou tělesa. Při zkoušení dřeva se orientují zkušební tělesa obvykle tak, aby zatížení působilo napříč vláken v tangenciálním směru (tangenciální ohyb). Větší rozdíly mezi pevnosti dřeva v ohybu v radiálním a tangenciálním směru byly zjištěny jen u dřeva jehličnatých dřevin [mez pevnosti je o (10 až 12) % větší než v radiálním směru]. U listnatých dřevin jsou hodnoty meze pevnosti dřeva při statickém ohybu v obou směrech prakticky stejné [rozdíly maximálně (2 až 4) %]. Mez pevnosti dřeva v ohybu (napříč vláken) je průměrně (90 až 100) MPa, přičemž variační koeficient má hodnotu přibližně 16 %. Hodnoty ohybové pevnosti dřeva leží mezi hodnotami tahové a tlakové pevnosti dřeva ve směru vláken. Pevnost v ohybu, kdy vlákna probíhají kolmo na podélnou osu tělesa, se prakticky nevyskytuje. Hodnoty meze pevnosti jsou v tomto případě velmi nízké. Pevnost v ohybu se do vlhkosti přibližně (5 až 8) % zvyšuje. Po dosažení této hranice vlhkosti a dalším zvyšováním vlhkosti až do meze hygroskopicity pevnost v ohybu klesá.

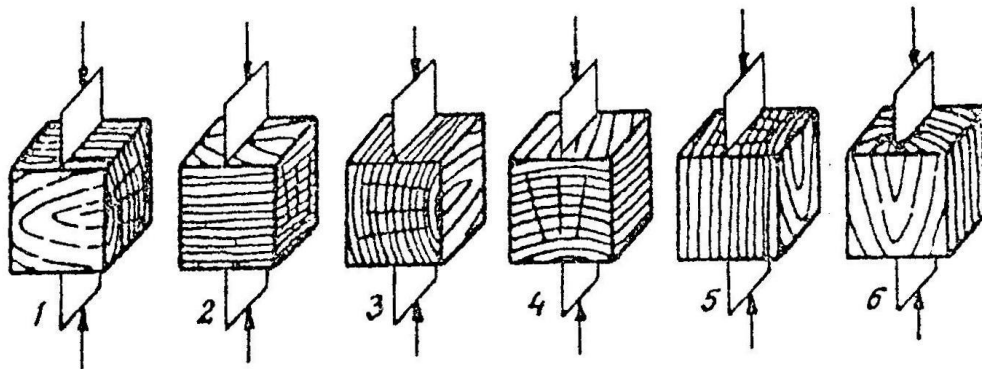
Tab. 7. Hodnoty meze pevnosti v ohybu [1]

| druh dřeva | mez pevnosti v ohybu (MPa) při vlhkosti dřeva (%) |           | druh dřeva | mez pevnosti v ohybu (MPa) při vlhkosti dřeva (%) |            |
|------------|---|-----------|------------|---|------------|
|            | 12  | 30 a více |            | 12  | 30 a více  |
|            | modřín  | 111,5     |            | 61,5  | ořešák vl. |
| borovice   | 86,0  | 49,5      | bříza      | 109,5   | 59,5       |
| smrk       | 79,5  | 44,0      | buk        | 108,5   | 64,5       |
| limba      | 73,5  | 42,5      | ďub        | 107,5   | 68,0       |
| jedle sib. | 68,5  | 40,5      | jilm vaz   | 95,5  | 59,0       |
| akát       | 158,0   | 97,5      | lípa       | 88,0  | 54,0       |
| habr       | 137,0   | 73,5      | olše       | 80,5  | 49,5       |
| jasan      | 123,0   | 74,5      | osika      | 78,0  | 45,5       |
| javor klen | 120,0   | 77,5      | topol      | 69,0  | 40,5       |
| hruška     | 110,5   | 63,5      |            |   |            |

### Pevnost dřeva ve smyku

U dřeva rozlišujeme následující druhy pevnosti ve smyku:

- Smyková pevnost ve směru vláken v radiální rovině a tangenciální rovině.
- Smyková pevnost napříč vláken v radiální a tangenciální rovině.
- Smyková pevnost napříč vláken v příčné rovině v radiálním a tangenciálním směru.



Obr. 5. Příklady působení smyku na dřevo [1]

- napříč vláken v tangenciálním směru, 2 – napříč vláken v radiálním směru, 3 – napříč vláken v tangenciální rovině, 4 – napříč vláken v radiální rovině, 5 – ve směru vláken v tangenciální rovině, 6 – ve směru vláken v radiální rovině



**Pevnost dřeva ve smyku ve směru vláken**

Pevnost dřeva ve smyku ve směru vláken je v tangenciální rovině o (10 až 30) % vyšší než v rovině radiální. Tento rozdíl je vyšší u dřeva listnáčů. Dřevo jehličnanů má v obou rovinách pevnost ve smyku ve směru vláken přibližně stejnou.

Tab. 8. Hodnoty meze pevnosti ve smyku ve směru vláken [1]

| druh dřeva | mez pevnosti ve smyku (MPa) ve směru vláken<br>v rovině |           |                                  |           |
|------------|---|-----------|----------------------------------|-----------|
|            | radiální<br>při vlhkosti (%)                            |           | tangenciální<br>při vlhkosti (%) |           |
|            | 12  | 30 a více | 12                               | 30 a více |
| modřín     | 9,9   | 6,3       | 9,4                              | 5,8       |
| borovice   | 7,5   | 4,4       | 7,3                              | 4,5       |
| smrk       | 6,9   | 4,1       | 6,8                              | 4,4       |
| limba      | 6,6   | 4,0       | 7,0                              | 4,3       |
| jedle      | 6,4   | 4,5       | 6,5                              | 4,2       |
| habr       | 15,6  | 8,8       | 19,4                             | 10,6      |
| jasan      | 13,9  | 9,4       | 13,4                             | 8,7       |
| javor klen | 12,4  | 8,8       | 14,2                             | 9,8       |
| buk        | 11,6  | 7,0       | 14,5                             | 8,9       |
| ořešák vl. | 11,0  | 5,9       | 11,6                             | 6,1       |
| đub        | 10,2  | 7,6       | 12,2                             | 9,0       |
| břıza      | 9,3   | 5,0       | 11,2                             | 5,9       |
| řılm vaz   | 9,1   | 6,5       | 10,2                             | 7,3       |
| hruška     | 8,9   | 5,6       | 14,2                             | 8,1       |
| lípa       | 8,6   | 5,6       | 8,1                              | 5,0       |
| olše       | 8,1   | 5,2       | 10,0                             | 6,3       |
| osika      | 6,3   | 3,6       | 8,6                              | 5,0       |
| topol      | 6,1   | 3,4       | 7,2                              | 4,2       |

### Pevnost dřeva ve smyku napříč vláken

Pevnost dřeva ve smyku napříč vláken je přibližně 2krát menší než pevnost ve smyku ve směru vláken. Mezi pevnostmi ve smyku napříč v tangenciální a radiální rovině jsou malé rozdíly.

Tab. 9. Hodnoty meze pevnosti ve smyku napříč vláken [1]

| druh dřeva | směr         | mez pevnosti ve smyku napříč vláken<br>(střih) v příčné rovině<br>(MPa) |      |        |
|------------|--------------|---|------|--------|
|            |              | min.  | max. | průměr |
| buk        | radiální     | 41,2  | 65,1 | 52,3   |
|            | tangenciální | 37,0  | 64,2 | 47,1   |
| topol      | radiální     | 20,5  | 34,2 | 31,1   |
|            | tangenciální | 14,6  | 27,8 | 20,5   |
| smrk       | radiální     | 25,5  | 44,8 | 31,8   |
|            | tangenciální | 25,3  | 38,7 | 34,4   |

### Pevnost dřeva ve smyku napříč vláken v příčné rovině

Pevnost dřeva ve smyku napříč vláken v příčné rovině je přibližně 4krát větší než pevnost ve smyku ve směru vláken.

Tab. 10. Hodnoty meze pevnosti ve smyku napříč vláken v příčné rovině [1]

| druh dřeva | rovina       | pevnost ve smyku napříč vláken<br>(MPa) |      |        |
|------------|--------------|---|------|--------|
|            |              | min.                                    | max. | průměr |
| buk        | radiální     | 5,9                                     | 11,6 | 7,7    |
|            | tangenciální | 6,3                                     | 9,7  | 7,6    |
| smrk       | radiální     | 2,4                                     | 5,5  | 3,3    |
|            | tangenciální | 1,4                                     | 4,8  | 2,8    |
| topol      | radiální     | 2,6                                     | 5,5  | 3,5    |
|            | tangenciální | 2,6                                     | 5,6  | 3,8    |

### Statická tvrdost dřeva

Statická tvrdost dřeva má význam při opracování dřeva a v případech, kdy se dřevo opotřebovává odíráním. Statická tvrdost dřeva je na čelních plochách vyšší než na plochách podélných. U dřeva jehličnanů činí tento rozdíl 40 %, u dřeva listnáčů 30 %. U většiny druhů dřev jsou hodnoty statické tvrdosti na radiálních a tangenciálních plochách podobné. U některých listnatých dřev je radiální tvrdost o něco vyšší než tangenciální. Se stoupající hustotou dřeva stoupá statická tvrdost dřeva. Čím je vlhkost dřeva do meze hygroskopicity vyšší, tím jsou hodnoty tvrdosti dřeva nižší. Na základě zjištěných údajů statické tvrdosti na čelních plochách se mohou dřeva dělit na:

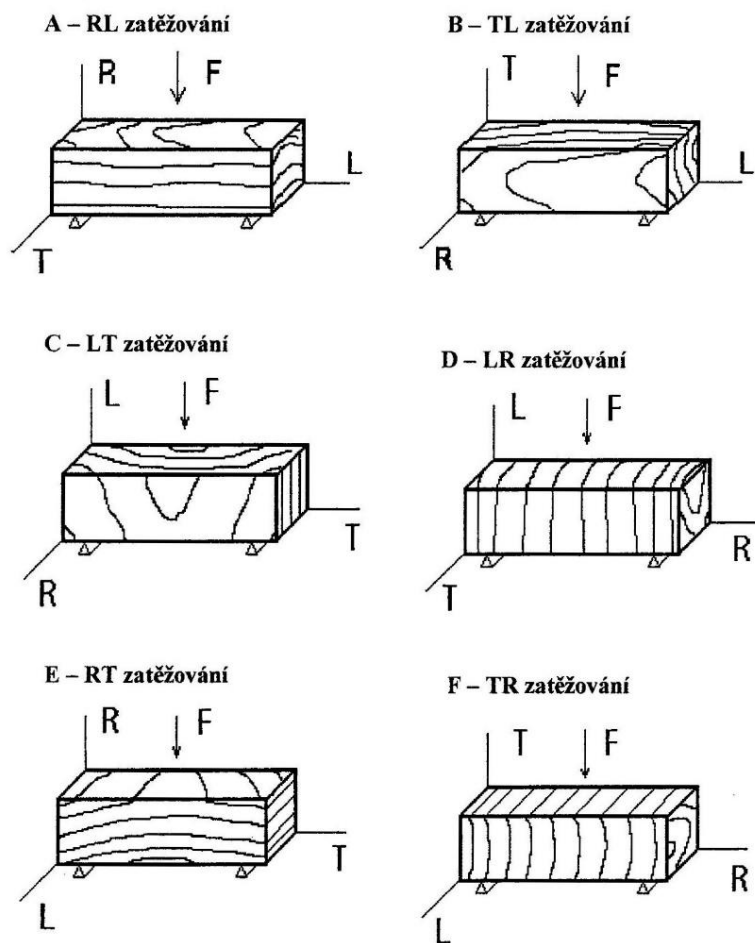
- Měkká dřeva (do 40) MPa.
- Středně tvrdá dřeva (40 až 80) MPa.
- Tvrdá dřeva (80 až 100) MPa.
- Velmi tvrdá dřeva (100 až 150) MPa.
- Super tvrdá dřeva (nad 150) MPa.

Tab. 11. Hodnoty statické tvrdosti [1]

| druh<br>dřeva | tvrdost dřeva v MPa na ploše |           |                           |           |                           |           |
|---------------|------------------------------|-----------|---------------------------|-----------|---------------------------|-----------|
|               | čelní                        |           | radiální                  |           | tangenciální              |           |
|               | při vlhkosti<br>dřeva (%)    |           | při vlhkosti<br>dřeva (%) |           | při vlhkosti<br>dřeva (%) |           |
|               | 12                           | 30 a více | 12                        | 30 a více | 12                        | 30 a více |
| modřín        | 43,5                         | 20,5      | 29,0                      | 13,5      | 29,0                      | 14,0      |
| borovice      | 28,5                         | 13,5      | 24,0                      | 11,0      | 25,0                      | 11,5      |
| jedle         | 28,0                         | 13,0      | 17,0                      | 8,0       | -                         | -         |
| smrk          | 26,0                         | 12,0      | 18,0                      | 8,5       | 18,0                      | 8,5       |
| límba         | 22,0                         | 10,5      | -                         | -         | -                         | -         |
| akát          | 97,0                         | 57,7      | 68,0                      | 40,5      | 78,0                      | 46,5      |
| habr          | 90,5                         | 54,0      | 77,0                      | 45,5      | 78,5                      | 47,0      |
| jasan         | 80,0                         | 48,0      | 59,0                      | 35,0      | 67,0                      | 39,5      |
| hruška        | 79,0                         | 47,0      | 59,5                      | 35,0      | 60,5                      | 36,0      |
| javor         |                              |           |                           |           |                           |           |
| klen          | 76,0                         | 45,0      | 55,5                      | 33,0      | 59,0                      | 35,0      |
| đub           | 67,5                         | 40,0      | 56,0                      | 33,5      | 49,0                      | 29,0      |
| buk           | 61,0                         | 36,5      | 43,5                      | 25,5      | 44,5                      | 26,5      |
| jilm vaz      | 56,0                         | 33,5      | 42,5                      | 25,5      | 42,5                      | 25,0      |
| břıza         | 46,5                         | 27,5      | 37,0                      | 22,0      | 33,0                      | 19,5      |
| olše          | 40,0                         | 24,0      | 27,5                      | 16,0      | 28,0                      | 17,0      |
| osika         | 26,5                         | 15,5      | 19,0                      | 11,5      | 20,5                      | 12,0      |
| topol         | 26,5                         | 15,5      | 18,5                      | 11,5      | -                         | -         |
| lípa          | 26,0                         | 15,5      | 17,5                      | 10,0      | 18,0                      | 10,5      |

### Rázová houževnatost dřeva

Významnou roli při rázové houževnatosti i v rámci jednoho druhu dřeva hraje počet letokruhů, zastoupení jarního a letního dřeva a vlhkost dřeva. Vzorky jsou označovány pomocí kombinace směrů zatěžovací síly a orientace vzorků pomocí zkratk dvou významných rovin. První písmeno v dvoupísmenné zkratce značí směr zatěžovací síly  $F$  a druhé písmeno označuje směr delší osy tělesa (směr mezi oběma podporami).



Obr. 6. Kombinace různých orientací vzorků a zatěžovacích sil [9]

Průměrná maximální síla  $F$  v orientacích LR, TR, LT, RT je obecně (5 až 7)krát nižší než v orientacích RL, TL. Rozdíl v hodnotách energie absorbované vzorkem  $W$  mezi orientacemi RL, TL a orientacemi LR, TR, LT, RT je mnohem vyšší, než v případě síly  $F$ . Hodnoty  $W$  jsou nižší (30 až 40)krát. U dřev s vysokou houževnatostí se setkáváme s lomem třískovitým, nepravidelným a výrazně vláknitým. Můžeme také pozorovat, že na tlakové straně tělesa nedochází k porušení vláken. Dřevo s průměrnými vlastnostmi vytváří

především na tahové straně krátký vláknitý lom. Dřevo křehké má potom typickou schodovitou nebo tupou, případně rovnou a relativně hladkou lomovou plochu. [1, 4, 9]

Tab. 12. Hodnoty rázové houževnatosti [9]

| Druh dřeva | Směr zatěžování | Počet vzorků | F[N]  | $v_x$ [%] | W[N.mm] | $v_x$ [%] |
|------------|-----------------|--------------|-------|-----------|---------|-----------|
| Bříza      | RL              | 10           | 2411  | 13,5      | 7146    | 13,8      |
| Bříza      | TL              | 21           | 2343  | 10,2      | 7877    | 9,7       |
| Bříza      | LR              | 8            | 397   | 31,4      | 141     | 23,4      |
| Bříza      | TR              | 7            | 386   | 6,9       | 221     | 17,9      |
| Bříza      | LT              | 7            | 307   | 6,9       | 127     | 7,6       |
| Bříza      | RT              | 8            | 279   | 7,5       | 145,4   | 28,3      |
| Modřín     | RL              | 15           | 1671  | 14,3      | 5055    | 33,9      |
| Modřín     | TL              | 14           | 1529  | 16,9      | 3724    | 29,3      |
| Modřín     | LR              | 8            | 400   | 16,5      | 116     | 22,9      |
| Modřín     | TR              | 7            | 320   | 22        | 271     | 41,7      |
| Modřín     | LT              | 8            | 162   | 10        | 141     | 57        |
| Modřín     | RT              | 7            | 174   | 7,5       | 192     | 50        |
| Lípa       | RL              | 21           | 1078  | 27,8      | 2714    | 38,7      |
| Lípa       | TL              | 20           | 913   | 21,9      | 2610    | 40,9      |
| Lípa       | LR              | 8            | 159   | 9,3       | 133     | 8,8       |
| Lípa       | TR              | 7            | 153   | 5,9       | 408     | 8,9       |
| Dub        | RL              | 17           | 1996  | 17        | 3037    | 32,4      |
| Dub        | TL              | 15           | 1831  | 11,5      | 3253    | 19,1      |
| Dub        | LR              | 8            | 450   | 12,2      | 124     | 16,8      |
| Dub        | TR              | 7            | 381,9 | 15,9      | 161,9   | 22,6      |
| Dub        | LT              | 8            | 342,1 | 13,6      | 103     | 24        |
| Dub        | RT              | 7            | 308   | 12,7      | 116     | 22,7      |
| Borovice   | RL              | 15           | 1797  | 5,3       | 6708    | 19,8      |
| Borovice   | TL              | 15           | 2092  | 13,3      | 4600    | 17,9      |
| Borovice   | LR              | 7            | 285   | 13        | 78      | 15,8      |
| Borovice   | TR              | 8            | 234   | 13,5      | 98,3    | 13,2      |
| Borovice   | LT              | 7            | 127   | 13,9      | 47      | 29,7      |
| Borovice   | RT              | 7            | 134   | 12,6      | 67      | 25,4      |
| Smrk       | RL              | 15           | 1359  | 10,8      | 4030    | 42,9      |
| Smrk       | TL              | 15           | 1888  | 8,2       | 7067    | 18,7      |
| Smrk       | LR              | 8            | 155,8 | 13,9      | 37      | 20        |
| Smrk       | TR              | 7            | 127   | 7,9       | 249     | 54,4      |
| Smrk       | LT              | 7            | 134   | 16,4      | 190     | 66        |
| Smrk       | RT              | 8            | 150   | 24,9      | 160     | 76,5      |

## 2 DŘEVOOBRÁBĚNÍ

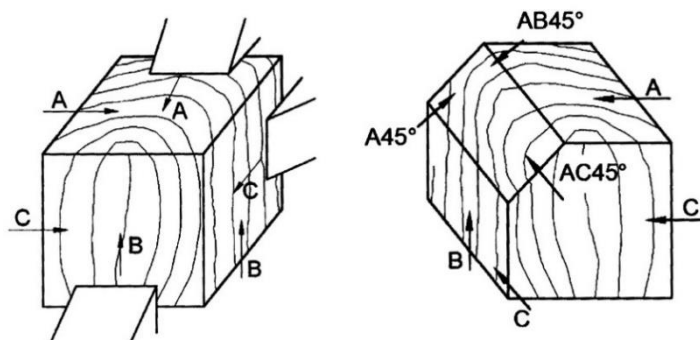
Dřevoobrábění je technologický proces, spadající do mechanické technologie zpracování dřeva, jímž vytváříme požadovaný geometrický tvar dřevěného obrobku v předepsaných rozměrech a v požadované jakosti obrobených ploch beze změny chemického složení zpracovávaného materiálu. Podle způsobu obrábění dělíme dřevoobrábění na:

- Obrábění s porušením vazby dřevních vláken (dělení) – nástroj vniká do materiálu, odděluje jeho větší nebo menší části a narušuje vzájemnou vazbu dřevních vláken.
- Obrábění bez porušení vazby dřevních vláken – materiál je plasticky deformován bez narušení vzájemné vazby dřevních vláken. [3, 10]

### 2.1 Mechanika řezného procesu

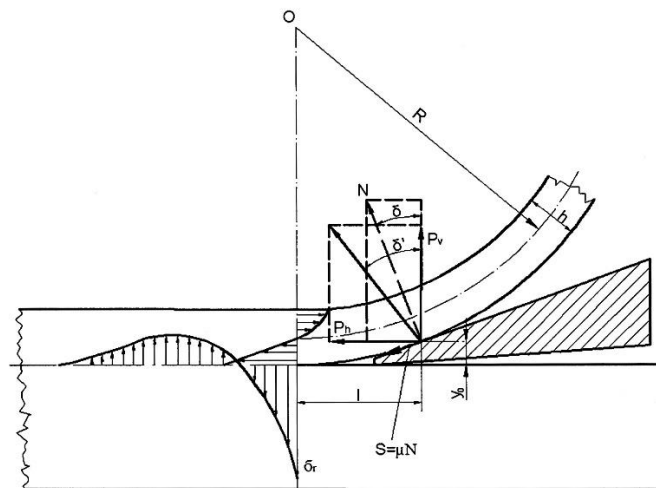
Vzhledem k anizotropii dřeva je nutné vždy definovat směr pohybu břitu nástroje vzhledem ke směru dřevních vláken. Vliv směru dřevních vláken vzhledem ke směru řezného pohybu se značně uplatňuje v hodnotách řezného odporu. Při vnikání nástroje do dřeva rozhoduje také délka a pevnost jednotlivých vláken. Lehká dřeva s dlouhými tenkými vlákny kladou při vnikání klínu větší odpor, než dřeva s vlákny krátkými. Obrábění dřeva ovlivňují nejvíce tyto jeho vlastnosti: hustota, vlhkost, tepelná vodivost, tvrdost, pevnost, dělitelnost, štípatelnost, tvárnost a obrobiteľnosť.

Obrobiteľnosť je souhrn vlastností, charakterizující vztah obráběné hmoty k obráběcímu nástroji. Obrobiteľnosť může být souhrnně vyjádřena dosažitelným výkonem při obrábění, řeznými odpory, jakostí obrobené plochy, rozměrovou a tvarovou přesností. [10, 12, 13]



Obr. 7. Hlavní směry řezání [13]

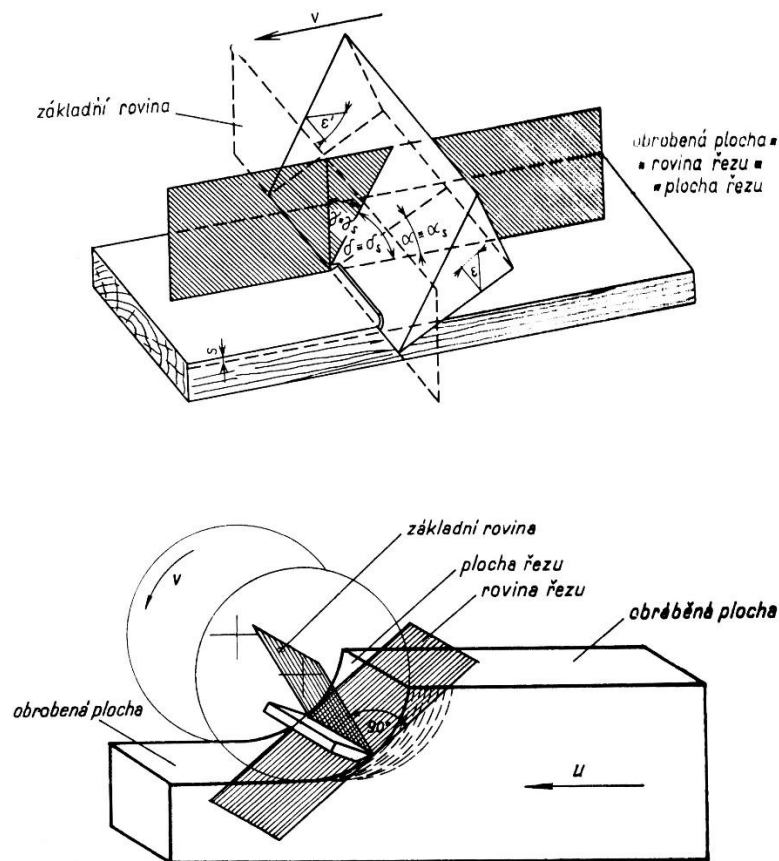
Při prvním styku břitu nástroje s obrobkem se hmota obrobku nejprve deformuje a po překročení určitého napětí v těsném okolí břitu nastává oddělování hmoty obrobku. Řada pokusů potvrdila předpoklad, že se tříška deformuje na povrchu nástroje v určitém poloměru. Při oddělování třísky břitem nástroje klade materiál obrobku odpor, který nazýváme řezným odporem. Sílu, kterou musíme působit na nástroj, abychom řezný odpor překonali, nazýváme řeznou silou. Řezný odpor je reakcí na řeznou sílu a má proto stejnou velikost. Obvykle uvažujeme celkovou řeznou sílu, skládající se z jednotlivých složek. Normálovou sílu působící na čelo nástroje lze rozložit na horizontální a vertikální složku. Tříška klouže po čele nástroje, čímž vzniká třecí síla. Výsledná řezná síla je výslednicí jednotlivých složek a vykazuje sklon ke směru pohybu. [10, 13]



Obr. 8. Silové poměry při oddělování třísky [13]

Nástroj a obrobek se proti sobě pohybují určitou relativní rychlostí tak, že je v klidu nástroj a pohybuje se obrobek, nebo je v klidu obrobek a pohybuje se nástroj. Nejčastěji však vykonávají pohyb obrobek i nástroj. Tento relativní pohyb mezi obrobkem a nástrojem se nazývá řezný pohyb. Dráha řezného pohybu může být přímočará nebo má tvar cykloidy, sinusoidy, šroubovice nebo tvar obecný. Ve většině případů se obrobek i nástroj pohybují proti sobě a řezný pohyb je zpravidla výslednicí hlavního řezného pohybu a posuvu.

Při procesu obrábění rozeznáváme tyto plochy: obráběnou plochu, ze které budeme snímat třísku nebo řadu třísek, obrobenou plochu, která vznikne na obrobku po sejmutí třísky nebo řady třísek, plochu řezu, která vznikne na obrobku relativním pohybem břitu a obráběného materiálu a je vytvořena drahami řezného pohybu jednotlivých bodů břitu, rovinu řezu, která je tečná k ploše řezu v místě styku břitu s plochou řezu. Základní rovina je rovina kolmá k rovině řezu, procházející břitem.



Obr. 9. Hlavní plochy při obrábění [10]

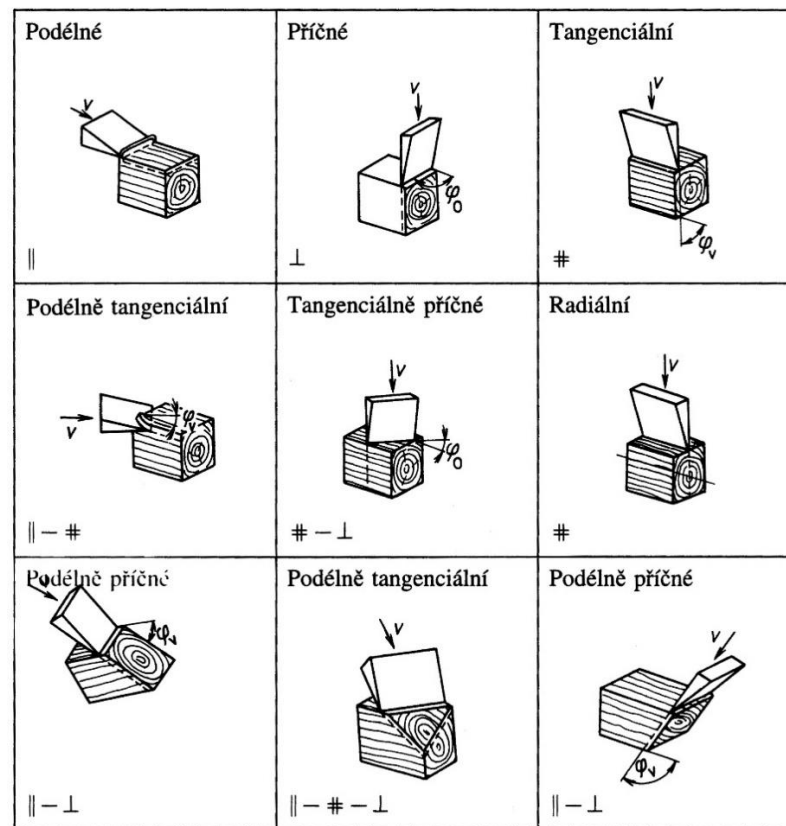
Během řezání dochází k postupné změně mikrogeometrie břitu, kdy nástroj ztrácí schopnost řezat. Tento děj se nazývá otupování. Otupování je způsobeno oddělováním částecek břitu. Nejvýrazněji se otupení břitu projeví růstem řezné síly, obtížným posuvem, nekvalitní, otačenou obrobenou plochou a pálením obrobku. Čím menší je poloměr zaoblení břitu, tím více se místo dělení dřeva přibližuje rovině obrobené plochy a tím je obrábění snazší a obrobená plocha kvalitnější.

Přesností obrábění rozumíme stupeň přiblížení geometrických hodnot obrobeného výrobku k hodnotám požadovaným.

Na přesnost obrábění mají vliv:

- Obráběcí stroj (přesnost jednotlivých částí, seřízení stroje, typ stroje).
- Obráběcí nástroj (jeho tvar, upnutí, opotřebení, tuhost).
- Pomocné stroje a zařízení (vedení, podávací zařízení, upínací zařízení).
- Pracovní postup, vlastnosti obrobku, velikost přídatku na obrábění, rychlost posuvu, řezná rychlost, tloušťka vrstvy odebíraná nástrojem. [10]

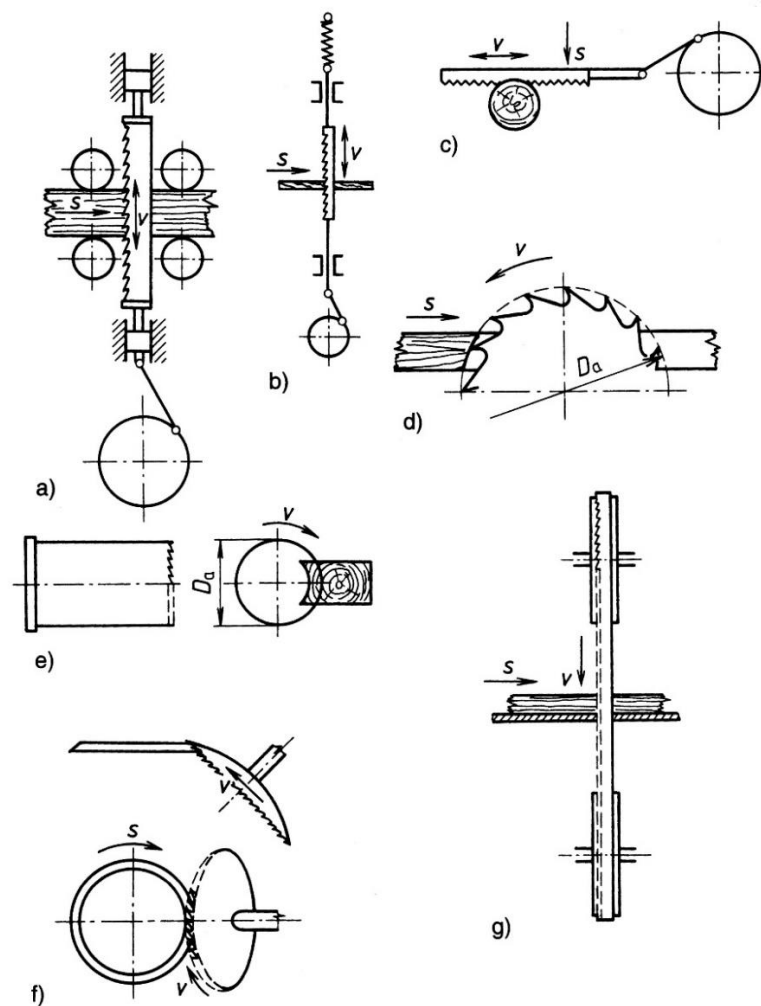




Obr. 10. Základní směry řezání [12]

## 2.2 Řezání pilovými nástroji

Řezání pilami je nejrozšířenější druh obrábění. Používá se k dělení obrobku na menší části a k přiřezávání obrobku na žádaný tvar. Řezání je operace, při níž nástroj, jehož činná část je opatřena zuby, odebrává z obrobku materiál ve tvaru třísky. Nástroj (pilový list, pilový pás, pilový řetěz, pilový kotouč) můžeme označit společným názvem pila. Ozubení, které je vlastní funkční částí nástroje, musí nejen oddělit třísku, ale také ji odstranit z řezné spáry a přitom zajistit potřebnou výkonnost nástroje a vyhovující jakost obrobené plochy. Podle druhu stroje koná nástroj pohyb přímočarý vratný (rámové pily), přímočarý nepřetržitý (pásově pily, řetězové pily), kruhový (kotoučové pily) nebo pohyb křivkový (dlabací pily). Obrobek je do řezu posouván přímočarým nepřetržitým pohybem (u všech druhů strojů) nebo pohybem přerušovaným (u některých typů rámových pil). Řezná rychlost může být konstantní, případně je během pracovního zdvihu různá. Dráha řezného pohybu břitu vůči obrobku může být přímočará (u pásových pil) nebo zakřivená (u ostatních pil). Geometrie ozubení (především úhel čela hlavního a bočního břitu) musí být přizpůsobena směru dřevních vláken a musíme proto rozlišovat ozubení pro řezání podélné (rozřezávací) a řezání příčné (přeřezávací). [10, 11, 12]



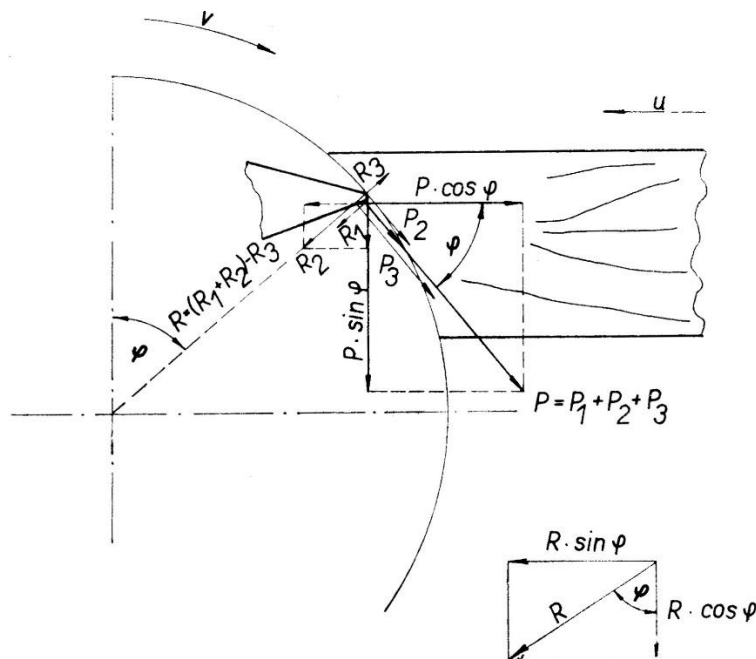
Obr. 11. Kinematické schéma jednotlivých způsobů řezání pilami [12]

**a)** rámovou pilou, **b)** vyřezávací pilou, **c)** zkracovací pilou, **d)** kotoučovou pilou, **e)** válcovou pilou, **f)** vydutým kotoučem, **g)** pásovou pilou

### Řezání pilovými kotouči

Řezání pilovým kotoučem je nejrozšířenější způsob obrábění vůbec. Různé konstrukce kotoučů umožňují řezání ve všech směrech vzhledem k průběhu dřevních vláken. Nejčastější je však řezání podélné (hlavní břity jsou kolmé ke směru vláken) a řezání příčné (hlavní břity, pokud jsou rovnoběžné s osou otáčení, oddělují dřevní hmotu ve směru tangenciálním až radiálním). Do řezu se posouvá buď obrobek (podélné řezání), nebo nástroj (některé případy příčného řezání). Pilovým kotoučem se obvykle rozřezává obrobek na menší části (pily omítací, rozmítací, zkracovací) a upravuje se jeho tvar (pily univerzální).

Břity pilového kotouče se pohybují konstantní řeznou rychlostí po kruhové dráze. Při řezání se skládá rotační pohyb pilového kotouče s přímočarým pohybem obrobku, takže řezná dráha v obrobku tvoří cykloиду. Řezná rychlost je však v porovnání s rychlostí posuvu velká, takže můžeme úsek řezné dráhy břitu v obrobku považovat za kruhový oblouk, aniž bychom se dopustili větší chyby. [10, 11, 12]



Obr. 12. Působení řezných sil na zub pilového kotouče [10]

### Řezání pásovými pilami

Při řezání pásovou pilou je mezi dvěma kotouči, z nichž jeden je hnací a druhý hnaný, napnut pilový pás, který se pohybuje konstantní řeznou rychlostí. Obrobek se do řezu posouvá rovněž konstantní rychlostí, takže tloušťka třísky se během záběru nemění. Řezací část listu bývá nejčastěji v poloze svislé (vertikální pásové pily), může však být také v poloze vodorovné (horizontální pásové pily) nebo šikmé. [10, 11, 12]

### Řezání rámovými pilami

Při řezání rámovou pilou jsou pilové listy upnuty v rámu, jehož přímočarý vratný pohyb je odvozen od klikového mechanismu. U vertikálních rámových pil se listy pohybují ve svislé rovině, u horizontálních rámových pil je list upnut ve vodorovné rovině. U vertikálních rámových pil je řezané dřevo posouváno podávacím mechanismem pomocí válců plynule nebo přerušovaně, kolmo ke směru pohybu pilových listů. U horizontálních rámových pil je dřevo upnuto na vozících, které se pohybují stejnou rychlostí. [10, 12]

### **Řezání vyřezávacími pilami**

Při řezání vyřezávací pilou (dekupírkou, lupínkovou pilou) se vyřezávají křivkové tvary v deskách. Pilový list se provleče otvorem vyvrtaným v desce. Stabilitu listu zajišťuje napínací šroubová pružina umístěná v horním vedení pilového listu. [10]

### **Řezání řetězovými pilami**

Řetězové pily se zpravidla používají k příčnému řezání při přerézávání kmenů, popřípadě k příčnému až podélnému řezání. Nástrojem je pilový řetěz, obvykle nekonečný, který je veden v drážce vodicí lišty a napnut mezi hnacím a hnaným řetězovým kolem. [10, 12]

### 2.3 Dřevoobráběcí nástroje

Základem správného návrhu a používání nástroje je znalost všech zákonitostí a souvislostí procesu daného obrábění. Každý druh obrábění vyžaduje odlišný druh nástroje. Při určování rozměrů nástroje se vychází z rozměrů a tvaru užitkové třísky, dále z řezné rychlosti a rozměrů těch částí stroje, které mají přímý vztah k třísce a nástroji. Pracovní části nástroje jsou voleny tak, aby řezná hrana snadno vnikala do materiálu (malý řezný odpor), aby se správně tvořila a lehce odváděla užitková a odpadová tříska, aby ostří bylo trvanlivé a aby se co nejméně zahřívalo. Podmínky tvoření třísky (řezná rychlost a posuv do řezu) se volí podle žádaného výkonu nástroje a jakosti obráběné plochy. Směrodatný je potom posuv na řeznou hranu (zub) a střední tloušťka třísky. Volbou správných řezných podmínek spolu se zvýšením přesnosti práce nástroje a správnou údržbou nástroje lze zvýšit jakost obrobeného povrchu a přesnost obrobku.

Požadavky na dřevoobráběcí nástroje:

- 1) Kvalita obrobku (tvarová, rozměrová a povrchová přesnost).
- 2) Vysoká produktivita práce.
- 3) Bezpečnost práce s nástrojem.
- 4) Tvarová stálost profilu řezné hrany (trvanlivost ostří), chemická odolnost.
- 5) Jednoduchost výroby nástroje (vyloučení ruční práce) a jednoduchost konstrukce nástroje i k obrábění složitějších profilů ve dřevě.
- 6) Jednoduchá údržba nástroje, lehká demontáž a montáž do stroje.
- 7) Životnost nástroje.
- 8) Příznivá cena.

Rozměrová a tvarová přesnost obrobku je ovlivněna:

- a) Přesností nastavení a pohybu nástroje.
- b) Dostatečnou tuhostí nástroje i po jeho zahřátí (zvláště důležité u nástrojů pilových, vrtacích a dlabacích).
- c) Stavem otupení řezné hrany: s rostoucím otupením nástroje se jeho teplota při obrábění zvyšuje, čímž se kromě ztráty tvrdosti řezné hrany snižuje i tuhost celého nástroje.
- d) Změnou rozměrů nástroje při ostření.

Tvarová stálost profilu řezné hrany po opakovaném ostření a její trvanlivost je podmíněna:

- A. Správným určením tvaru řezného prvku.
- B. Určením broušené plochy.

Nepřesná příprava nástroje, jeho nepřesné upnutí spolu s chybně volenými řeznými podmínkami a špatným stavem stroje jsou příčinou značných provozních ztrát, které se projevují:

1. Nízkými posuvy a zvýšením procenta ztrátových časů.
2. Zvětšenou spotřebou nástrojů a rychlejším opotřebením strojů.
3. Zvýšenou spotřebou energie a ztížením práce při ručním posuvu obrobku.
4. Nepřesností rozměrů obrobku, zhoršenou jakostí obrobeného povrchu, nižším využitím dřevní hmoty (široké řezné spáry, velké přídavky na obrábění a zmetkovitost).

Dobře připravený nástroj je jednou z nejdůležitějších podmínek na výkonnost strojů a jakost výrobků. Pro správnou funkci nástroje je nutné věnovat pozornost jeho ostření, vyvažování, čištění a úpravě předpětí.

Rozdělení dřevoobráběcích nástrojů odpovídá základnímu rozdělení operací mechanické technologie dřeva. [10, 11, 14, 15]

### **Nástrojové materiály**

Oceli používané na výrobu nástrojů k obrábění dřeva patří převážně mezi oceli nástrojové. Nekladou-li se na nástroje zvýšené požadavky, mohou být vyrobeny z nástrojové oceli uhlíkové nebo nízkolegované. Tam, kde nástroje pracují ve ztížených podmínkách a při větších rychlostech, kdy se břit nástroje nadměrně zahřívá, a dále tam, kde se požaduje zvýšená trvanlivost břitu proti opotřebení a tím i zvýšená životnost nástrojů, volí se oceli vysokolegované. Pro obrábění dřevotřískových a dřevovláknitých desek (a jiných aglomerovaných materiálů) se používají nástroje, jejichž řezné hrany jsou tvořeny břitovými destičkami ze slinutých karbidů (SK).

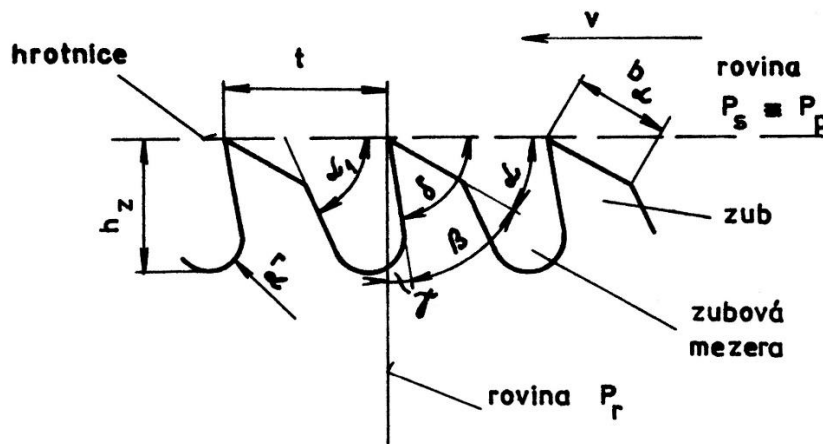
Nástrojové oceli pro obrábění dřeva můžeme rozdělit do tří skupin:

- a) Nástrojové uhlíkové oceli.
- b) Nástrojové legované oceli.
- c) Rychlořezné oceli.

Podle způsobu namáhání nástrojů je požadováno, aby nástrojové materiály měly především dostatečně vysokou řezivost a trvanlivost, dostatečně vysokou tvrdost a potřebnou odolnost proti opotřebení a proti popouštění. Nástrojové materiály musí být dostatečně houževnaté, zvláště u nástrojů složitých tvarů a nástrojů pracujících přerušovaným řezem (rázově namáhaných). Z hlediska tepelného zpracování je požadována minimální a rovnoměrná změna rozměrů. U rozměrnějších nástrojů mají používané oceli vykazovat také dostatečně velkou prokalitelnost. [10, 14, 15]

## Pily

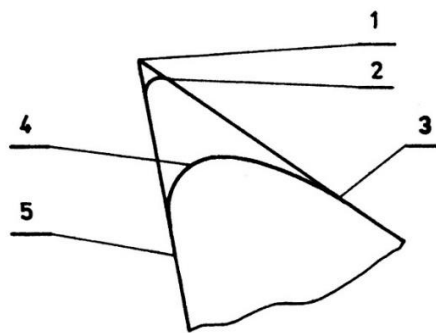
Pily jsou nástroje opatřené zuby různého tvaru. Mezi pily patří: pilové listy, pilové pásy, pilové řetězy a pilové kotouče.



Obr. 13. Řezné úhly a nástrojové roviny [14]

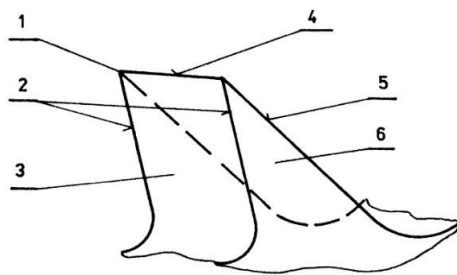
$v$  – směr hlavního řezného pohybu

Břit je klínovitá část nástroje vnikající do obrobku a odebírající třísku. Hlavní břit je tvořen čelem a hlavním hřbetem nástroje. Vedlejší břit je tvořen čelem a vedlejším hřbetem nástroje. Přejížděcí plochu mezi čelem a hlavním hřbetem nazýváme hlavním ostřím. Přejížděcí plochu mezi čelem a vedlejším hřbetem nazýváme vedlejším ostřím. Průsečnice rovin čela a hřbetu tvoří teoretické ostří. Skutečné ostří po naostření nástroje se odchyluje od teoretického ostří tím více, čím větší byl záběr při ostření nástroje a čím horší byly podmínky ostření. Ostří otupených nástrojů je tvořeno válcovou nebo jinou plochou. Skutečné ostří po naostření je většinou tvořeno tzv. jehlou. Jehla snižuje trvanlivost břitu, a proto je nutné ostření dokončovat při co nejmenším záběru broušícího kotouče. Čelo nástroje je plocha, po které odchází odřezávaná tříska při svém pohybu z místa oddělování. Hřbet nástroje je plocha, která je přikloněna k obrobenému povrchu (ploše řezu). [10, 14]



Obr. 14. Funkční část nástroje [14]

1 – teoretické ostří, 2 – skutečné ostří,  
3 – hřbet, 4 – otupené ostří, 5 – čelo



Obr. 15. Funkční část nástroje [14]

1 – špička, 2 – vedlejší ostří, 3 – čelo,  
4 – hlavní ostří, 5 – hlavní hřbet, 6 –  
vedlejší hřbet

### Rozvádění a pěchování zubů

Rozvádění a pěchování představují základní operace na pilách, pomocí nichž rozšiřujeme šířku řezné spáry. Zabraňujeme tak tření nosných částí nástroje, jeho následnému zahřívání a zabíhání při řezání.

### Rozvádění

Funkční část pilového nástroje musí být širší než vlastní nosná část nástroje, aby se mohl pohybovat v řezaném materiálu a aby se třením o stěny řezné spáry příliš nezahříval. Rozvádění je střídavé vyhnutí zubů do stran z roviny pilového nástroje. Při použití příliš malého rozvodu se pilový nástroj zahřívá, ztrácí tuhost a zabíhá. Při rozvodu příliš velkém vznikají větší ztráty materiálu, zvyšuje se drsnost řezné plochy a spotřeba energie při řezání.



Velikost rozvodu závisí na:

- a) Druhu dřeva – pro měkké, vláknité dřevo je nutný větší rozvod.
- b) Vlhkosti dřeva – vlhké dřevo při stejném rozvodu svírá nástroj více než dřevo suché.
- c) Přesnosti upnutí nástroje – pokud není nástroj rovnoběžný se směrem posuvu, je třeba volit větší rozvod.
- d) Přesnosti vedení obrobku – při nepřesném vedení je nutný větší rozvod.
- e) Rovinnosti nástroje – nástroje s většími odchylkami rovinnosti vyžadují větší rozvod.
- f) Stavu dřeva – při řezání zmrzlého dřeva je možno použít menšího rozvodu než při řezání téhož druhu dřeva vlhkého, nezmrzlého.
- g) Směru řezání – při příčném řezání je třeba volit menší rozvod než při řezání podélném.
- h) Rozměrech nástroje – u širokých pilových pásů nebo pilových kotoučů velkých průměrů volíme rozvod větší.

Velikost rozvodu na jednu stranu nesmí být větší, než je polovina tloušťky nástroje, aby zub nebyl příliš namáhán. Rozvádí se pouze horní třetina zubu, protože při hlubokém rozvádění se zmenšuje přesnost rozvodu a je namáhána pata zubu.

Rozvod musí být stejný na obou stranách pily, jinak nástroj zabíhá na stranu většího rozvodu. Nepřesný rozvod snižuje jakost řezné plochy, zhoršuje výkonnost nástroje a zmenšuje přesnost výrobku, protože zuby nejsou rovnoměrně zatíženy.

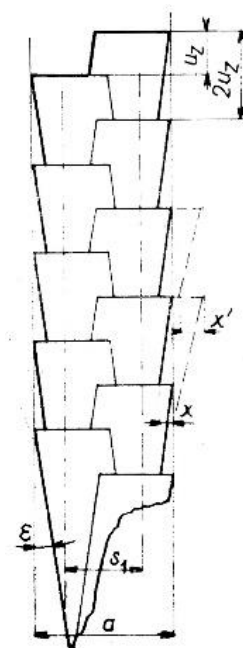
### **Pěchování**

Pěchování je stejnosměrné rozšíření každého zubu na obě strany. Účelem pěchování je rozšíření řezné hrany. Pěchovaný pilový nástroj je dokonalejším nástrojem než nástroj se zuby rozvedenými.

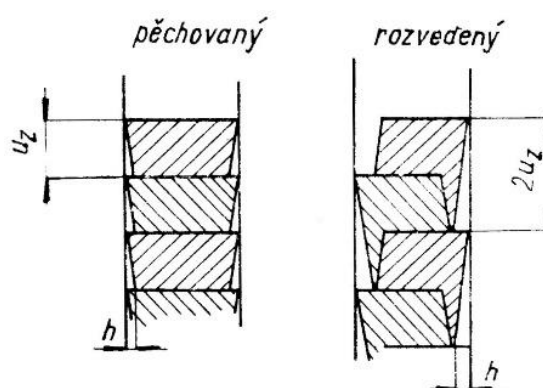
Výhody pěchování oproti rozvádění:

- a) Větší stabilita nástroje – rovnoměrné namáhání zubů.
- b) Velikost rozšíření pěchovaného zubu se během řezání mezi dvěma ostřeními nezmenšuje, jako je tomu u zubů rozvedených.
- c) Pěchovaný zub odebírá za stejných podmínek poloviční tloušťku třísky u stěn řezné spáry v porovnání se zubem rozvedeným.

Nástroj s pěchovanými zuby umožňuje řezat s větší roztečí zubů, a tím zvětšit zubové mezery při větších posuvech. [10, 14, 15]



Obr. 16. Rozvedené zuby [10]



Obr. 17. Pěchované a rozvedené zuby [10]

### **Pilové listy**

Pilové listy jsou mnohobřité nástroje určené k přímočarému řezání na rámových pilách. Pilové listy jsou opatřeny lištami (při upínání se zasouvají do závěsů) nebo přinýtovanými závěsy. Vyrábějí se z nástrojové oceli v tloušťkách (1,1 až 2,5) mm. Tloušťka závisí především na délce listu, na velikosti posuvů a na technické úrovni provozu. Většinou se používají listy o tloušťce (1,8 až 2,2) mm. U pilových listů se nejčastěji používají přímé (trojúhelníkové) zuby. Pro větší tuhost a větší kapacitu mezery zubu se doporučuje ozubení vlčí, polovlčí a se zaobleným hřbetem. Důležitou vlastností pilového listu je jeho statická a dynamická tuhost. Tuhost pilového listu je schopnost odolávat bočním silám působícím při řezání tak, aby nebylo překročeno přípustné vychýlení listu a tudíž ani stanovená rozměrová a tvarová úchylka výrobku. Pro zvýšení tuhosti se pilové listy válcují nebo vyklepávají, čímž se do těla pilového listu zanesou vnitřní pnutí (předpětí). Toto vnitřní pnutí se do pilového listu zanáší zcela záměrně, neboť bez něho by byl pilový list poddajný a řezání by bylo velmi nepřesné, stěny řezu by nebyly rovnoběžné a měly by nepřipustně zvlněný povrch. [10, 11, 12, 15]

### **Pilové pásy**

Pilové pásy jsou nekonečné (konce jsou spojeny) mnohobřité nástroje určené k přímočarému řezání na pásových pilách. Rozměry a geometrie pilových pásů se řídí druhem použitého stroje. U truhlářských pilových pásů určuje šířku pásu nejmenší poloměr, kterým se materiál vyřezává v obrobku. Tloušťka pilových pásů je menší než tloušťka pilových listů, protože u tlustšího pásu by byl materiál nástroje při ohybu příliš namáhán. Pilový pás musí být mezi kotouči napnut vhodnou silou, aby měl potřebnou tuhost a správně se pohyboval po pásovnicích. Při malém napnutí pilový pás padá z pásovnic, při velkém napnutí dochází k trhání pilových pásů v místě spoje nebo na dně zubové mezery. Vlivem napínací síly vzniká v pilovém pásu tahové napětí. Ohybem pásu na poloměr kotouče vzniká v pásu ohybové napětí, které je značně větší než tahové napětí způsobené napínací silou. [10, 15]

### **Pilové řetězy**

Pilové řetězy se skládají z jednotlivých článků s pracovními břity, navzájem spojených nýty. Pilové řetězy se dělí na tradiční, hoblovací a kombinované.

**Tradiční řetězy** mají tři typy zubů. Předřezávací zuby, přeřezávají dřevní vlákna, vytvářejí rýhy v rozích dna řezné spáry a současně se podílejí na vytváření bočních stěn řezné spáry.

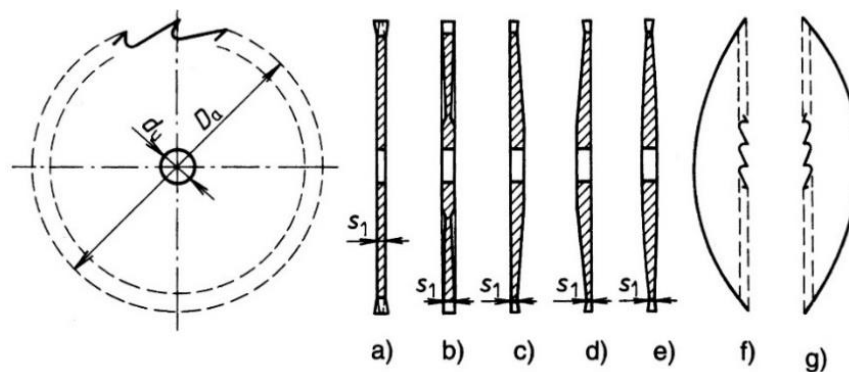
Jsou ostřeny zásadně šikmo z čela i hřbetu. Řezací (čisticí) zuby jsou nižší než zuby předřezávací. Podle podmínek mohou plnit funkci jak předřezávacích, tak vyklizovacích zubů. Vyklizovací zuby snímají podstatnou část třísky, která byla po stranách oddělena předřezávacími zuby, a odstraňují ji z řezné spáry. Řetězy mohou být dvouřadé nebo třířadé. U dvouřadého řetězu jsou vždy dva články spojeny jedním nýtem. Nevýhodou tohoto řetězu je, že jednotlivé články jsou namáhány krouticím momentem. Výhodou je užší řezná spára a menší potřebný výkon motoru. U třířadého řetězu spojuje nýt současně tři články. Tyto řetězy jsou pevnější, protože nýty jsou souměrně namáhány. Jednotlivé články jsou tenčí než u řetězu dvouřadého.

**Hoblovací řetězy** mají pouze jeden typ zubů. Hoblovací zuby jsou pravoúhle zahnutého tvaru a bývají většinou umístěny v krajních řadách. Tloušťku třísky určuje omezovač třísky umístěný na témže článku vždy před zubem, který současně vyklízí třísky z řezné spáry. Vodorovný břit řeže ve směru tangenciálním až radiálním (uvažujeme-li přeřezávání kulatiny), boční břit řeže ve směru příčném až příčně tangenciálním. Hoblovací zub sám předřezává, protože boční břit přichází s dřevními vlákny do styku dříve než břit horizontální vlivem šikmého ostření. Tříska má tvar na bocích zaobleného pásku. U tohoto typu řetězu nezávisí výkonnost na tlaku posuvu, nýbrž na vzdálenosti omezovače třísky od břítu. Tvar zubu způsobuje, že je nástroj při oddělování třísky vtahován do řezu. Výkonnost pily s hoblovacím řetězem téměř nezávisí na směru dřevních vláken. Výhodou hoblovacího ozubení je také snadné ostření z důvodu nižšího počtu zubů.

**Kombinované řetězy** jsou opatřeny předřezávacími i hoblovacími zuby. [10, 12, 15]

### Pilové kotouče

Pilové kotouče jsou mnohobřité nástroje, na jejichž obvodu jsou vytvořeny zuby. Podle tvaru kotouče v příčném průřezu rozeznáváme kotouče ploché, podbroušené, sbíhavé (na levé nebo pravé straně, popřípadě oboustranně), vyduté (vlevo nebo vpravo). Sbíhavost nebo vydutost se určuje ve směru posuvu obrobku proti ozubení. Podle směru řezání vzhledem k průběhu dřevních vláken se používají kotouče buď pro příčné, nebo pro podélné řezání. Liší se profilem ozubení a způsobem ostření.



Obr. 18. Druhy pilových kotoučů [12]

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

Průměr pilového kotouče má být co nejmenší. Důvody jsou následující:

- Zmenší se úhel přerézávání vláken a při podélném řezání břit odebírá třísku více ve směru rovnoběžném s dřevními vlákny, čímž se sníží výkon potřebný k řezání.
- Zmenší se tloušťka odebírané třísky, zlepší se tedy i jakost řezné plochy.
- Kotouče menšího průměru mohou mít menší rozšíření vlastní funkční části (rozvod, přechování) a mohou být tenčí.
- Kotouče menšího průměru jsou stabilnější.
- Hladina hluku je nižší.
- Čím menší je průměr kotouče, tím vyšší jsou dynamické rezonanční kmitočty a kritické otáčky kotouče.
- Kotouče menšího průměru se snadněji ostří. [10, 11, 12, 15]

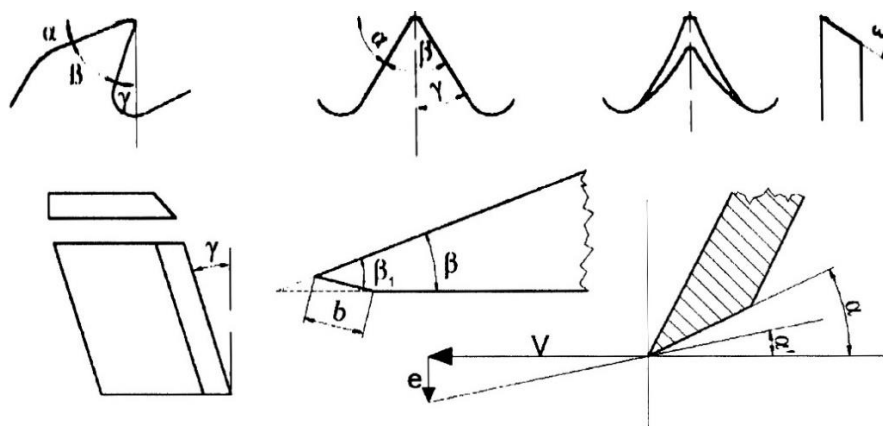
### Geometrie pilového kotouče

**Úhel hřbetu  $\alpha$**  má vliv především na tření hřbetu o obráběnou plochu. Čím je úhel hřbetu menší, tím větší je tření a naopak, protože zmenšováním úhlu hřbetu se styčná plocha mezi hřbetem a obráběnou plochou zvětšuje. Tato styčná plocha se zvětšuje během otupování břitu. Zaoblená plocha otupeného břitu totiž neoddelí materiál při oddělování třísky v rovině procházející nejnižším bodem řezné hrany, ale v rovině ležící výše. Úhel hřbetu má přímý vliv na velikost řezného odporu, a tím i na výslednou práci řezání. Úhel hřbetu je standardně volen v rozsahu (10 až 30)°. Za optimální můžeme považovat úhel hřbetu 15°, a to pro řezání měkkého i tvrdého dřeva.

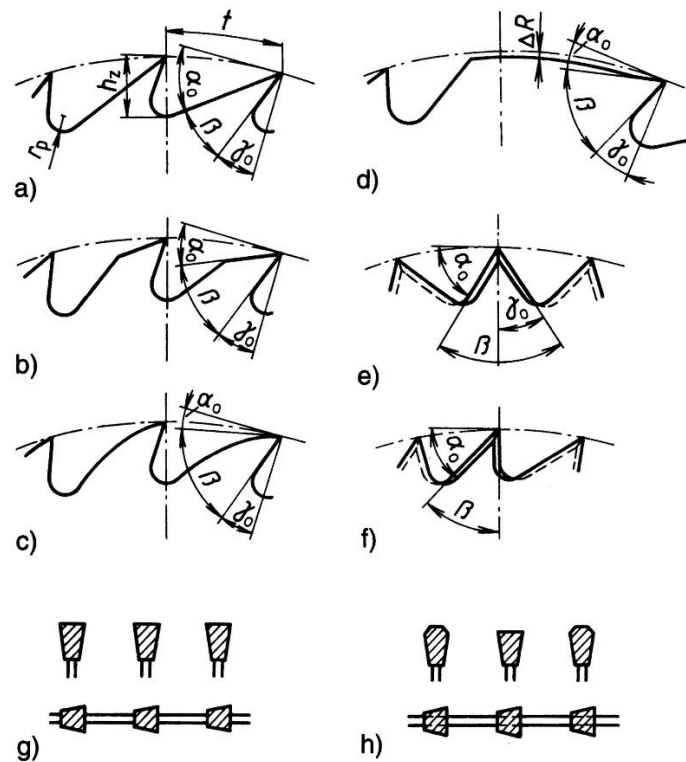
**Úhel břitu  $\beta$**  je úhel klínovité části nástroje, která vniká do obráběného materiálu při oddělování třísky. Čím je úhel břitu větší, tím větší je odpor obráběného materiálu proti vnikání nástroje. Při volbě úhlu břitu se vychází především z hodnot úhlů hřbetu a čela.

**Úhel čela  $\gamma$**  přímo ovlivňuje tvorbu třísky a její velikost. Se zvětšováním úhlu čela měrný řezný odpor klesá. Optimální hodnota závisí na druhu obráběného materiálu, směru dřevních vláken, velikosti posuvu na zub a tloušťce odebírané třísky. Při volbě úhlu čela je nutno přihlídnout k požadované tuhosti zubu, trvanlivosti břitu a jakosti řezné plochy. Za optimální se považuje úhel čela 30° při řezání tvrdého dřeva a (35 až 40)° při řezání dřeva měkkého.

Všeobecně platí zásada, že u nástrojů na obrábění materiálů měkkých a snadno obrobitelných se volí větší úhly hřbetu i čela. Naopak u nástrojů na obrábění tvrdých materiálů se volí oba úhly menší. U pilových kotoučů malých řezných průměrů (bez ohledu na druh obráběného materiálu), je nutno používat větších úhlů hřbetu, aby nástroj při řezání nedřel a nepálil. [3, 10, 13, 14, 15, 16, 17]

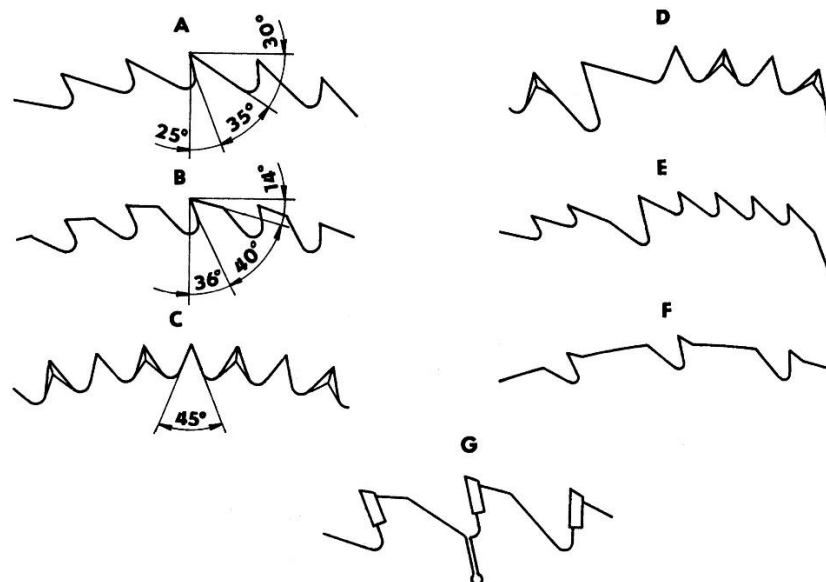


Obr. 19. Charakteristické úhly dřevobráběcích nástrojů [13]



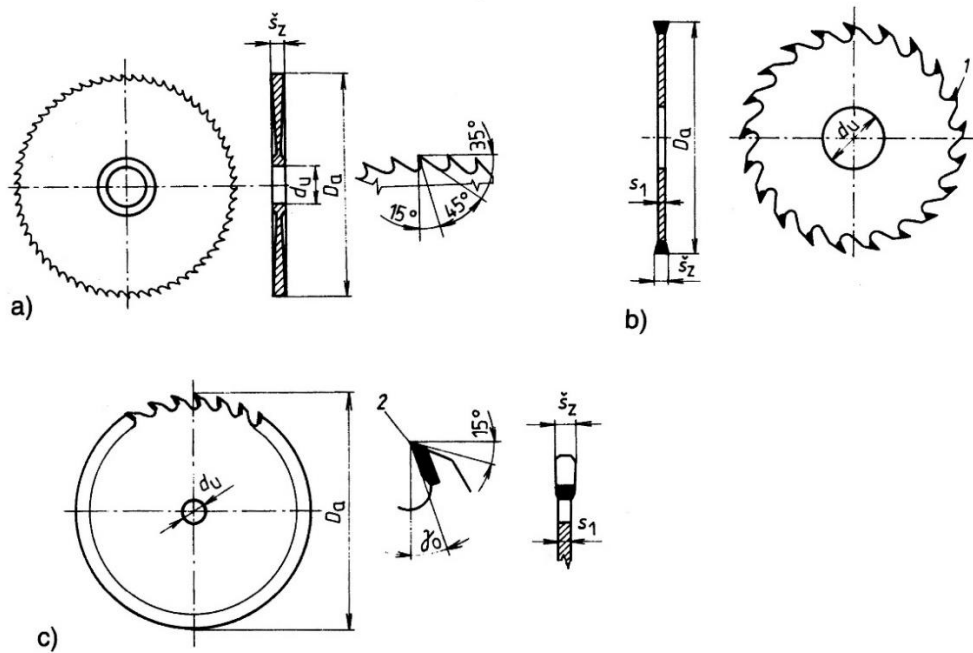
Obr. 20. Tvary zubů pilových kotoučů [12]

a), b), c), d) celistvé pro řezání podélné e), f) celistvé pro řezání příčné, g), h) s pájenými břitovými destičkami ze slinutých karbidů



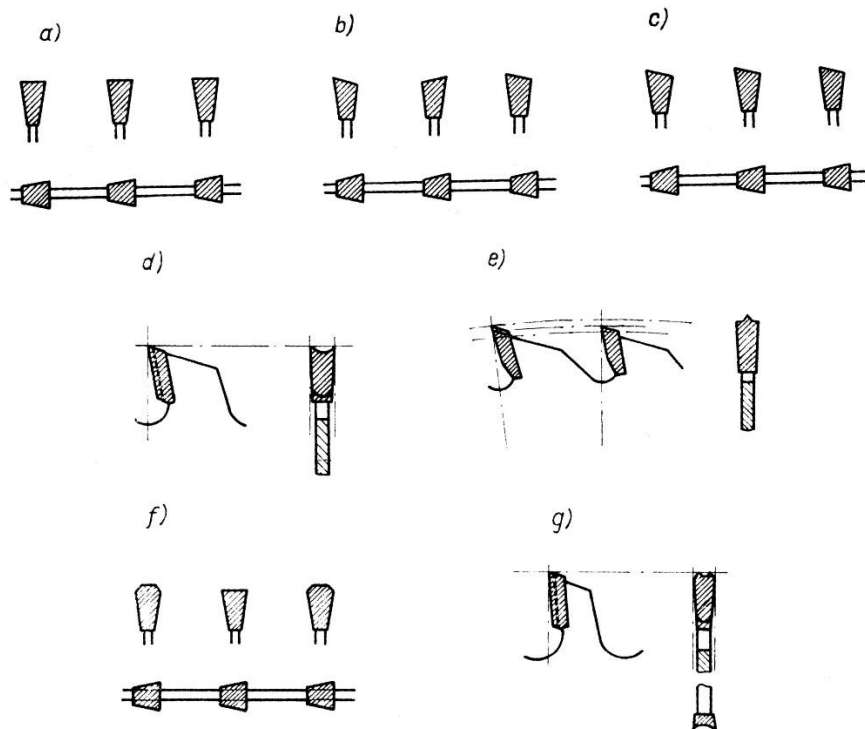
Obr. 21. Tvary zubů pilových kotoučů [11]

A – trojúhelníkové zuby nesouměrné, B – vlčí zuby, C – trojúhelníkové zuby souměrné, D – hladicí zuby na přerézávání, E – hladicí zuby na rozřezávání, F – s malým počtem zubů, G – zuby s břitovými destičkami ze slinutých karbidů



Obr. 22. Pilové kotouče podle provedení břitů [12]






a) celistvý, b) s navařenými břity ze stelitu, c) s pájenými břitovými destičkami ze SK



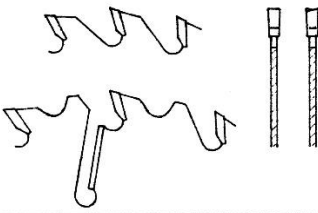
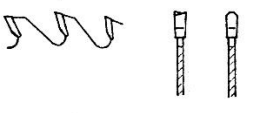

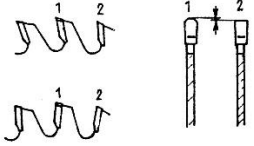
Obr. 23. Konstrukce břitových destiček ze SK pájených na pilové kotouče [10]

a) ostřené rovně, b) ostřené střídavě šikmo ze hřbetu, c) ostřené jednostranně šikmo ze hřbetu, d) dutě broušené z čela, e) střechovitě broušené, f) trapézové rovně broušené střídající se s ostřeními rovně, g) trapézové dutě broušené z čela



| Druh řezání    | Provedení zubů   | Počet zubů     |
|----------------|--|----------------|
| Podélné řezání |   | 40<br>60<br>80 |
| Poúšlné řezání |   | 40<br>80       |
| Příčné řezání  |   | 60<br>120      |
| Příčné řezání  |   | 80<br>120      |
| Příčné řezání  |  | 80             |

Obr. 24. Tvary zubů pilových kotoučů [16]

| Určeno k řezání                           | Provedení zubů   | Roztež zubů (mm)     |
|---|--|----------------------|
| Rostlé dřevo<br>tvrdé<br>měkké<br>laťovky |  | 20<br>26<br>40<br>55 |
| Aglomerované materiály                    |  | 11<br>13<br>16       |
| Plastické hmoty<br>Elektroizolační mater. |  | 11<br>13<br>16       |
| Neželezné materiály<br>plechy<br>profily  |  | 11<br>13<br>16       |

Obr. 25. Tvary zubů pilových kotoučů [16]

Některé pilové kotouče jsou vybaveny omezovači třísek ve tvaru zářezů. Jejich funkcí je zlepšit vedení a chlazení kotouče, snížit tření mezi kotoučem a obrobkem, zajišťovat původní pnutí kotouče a začistit řezné spáry. [10, 12]

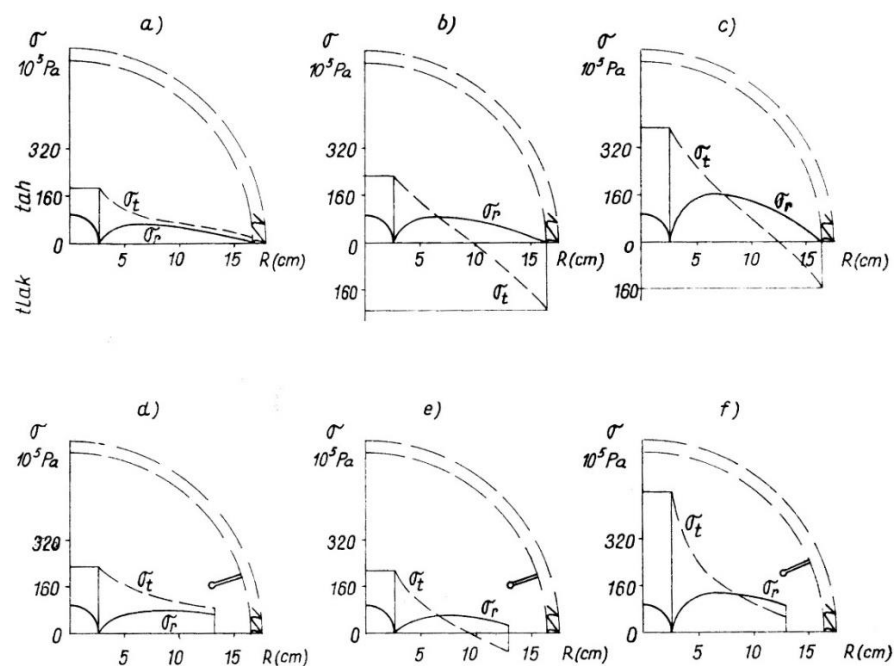


Obr. 26. Příklad provedení omezovače třísek [12]

1 – pájená břitová destička ze SK, 2 – omezovač třísek ze SK, 3 – tělo pilového kotouče

### Napjatost pilového kotouče

Pilový kotouč je těleso, jehož jeden rozměr – tloušťka – je zanedbatelný oproti dvěma zbývajícím. Potom lze zanedbat složky napětí ve směru normály ke střední ploše kotouče a předpokládat, že napjatost pilového kotouče je pouze dvouosá. V pilovém kotouči vznikají při otáčení radiální  $\sigma_r$  a obvodová  $\sigma_\varphi$  napětí. Každý element kotouče je ve stavu dvouosé napjatosti. Takovouto napjatost označujeme jako napjatost rovinnou (dvouosou, membránovou). Napětí vznikají působením odstředivých sil a vlivem gradientu teploty. Při odebírání třísky a třením nástroje o obrobek vzniká teplo, které se z větší části odvádí třískami, obrobkem a okolním vzduchem a z menší části zahřívá pilový kotouč. Nepříznivý vliv výsledného napětí v tlaku v obvodové části kotouče, vyvolaného gradientem teploty, je nutno vyloučit úpravou vnitřního pnutí, a to vyklepáváním střední části kotouče nebo válcováním. Tím vznikne ve střední části kotouče napětí v tlaku a v okrajové části napětí v tahu. Působením odstředivých sil při pracovních otáčkách se v okrajové části kotouče napětí v tahu ještě zvýší a i při roztažení materiálu kotouče účinkem teplotních dilatací zůstává kotouč stabilní. Zatímco velmi tenké kotouče ztrácejí tuhost již při malém gradientu teploty, tlustší kotouče stejných průměrů mohou být vystaveny většímu gradientu teploty. Nepříznivé obvodové napětí se eliminuje dilatačními drážkami, které přerušují radiálním směrem okrajovou část kotouče, takže v ní nevzniká napětí v tlaku a kotouč se nemusí vyklepávat k úpravě vnitřního pnutí (pokud se ovšem nezahřívá z jiných příčin i část kotouče pod drážkami). Tuhost kotouče lze zvýšit také uspořádáním otvorů různého tvaru ve středové části kotouče. [8, 10, 13, 15]



Obr. 27. Rozložení napětí v pilovém kotouči [10]

a), d) napětí vlivem odstředivých sil, b), e) napětí vlivem gradientu teploty, c), f) superpozice obou napětí

### Chvění pilového kotouče

Při otáčení pilového kotouče dochází při určitém počtu otáček k rezonanci. Kotouč kmitá v určité dynamické rezonanční frekvenci, která je podstatně vyšší než frekvence otáček za jednotku času. Rezanční frekvence je vyvolána impulsy, které jsou způsobeny výchylkami kotouče, nevyvážeností rotující hmoty, prouděním vzduchu mezi ozubením a nepřesností ložisek stroje. Protože zdroje těchto impulsů nelze nikdy zcela vyloučit, dochází při otáčení kotouče vždy k rezonančnímu chvění při různých dynamických rezonančních frekvencích. Při otáčení kotouče se statický rezonanční kmitočet zvyšuje vlivem odstředivých sil. Chvění probíhá při otáčení kotouče po jeho obvodu ve dvou protiběžných směrech, obdobně jako při statickém chvění. Vlny ve směru otáčení kotouče nazýváme vlny běžící vpřed, vlny proti směru otáčení kotouče nazýváme vlny běžící vzad. Jestliže se rychlost vlny běžící vzad rovná rychlosti otáčení kotouče, vzniknou vlny v prostoru nehybné (stojaté vlny), kotouč je labilní a k jeho vychýlení stačí velmi malá síla, takže řezání je vyloučeno a hrozí nebezpečí roztržení kotouče. Proto se tato rychlost dozadu běžící vlny nazývá rychlostí kritickou. Počet otáček, při němž k tomuto jevu dojde, se nazývá otáčkami kritickými. [10, 13]

### **3 SHRNU TÍ TEORETICKÉ ČÁSTI A CÍLE ČÁSTI PRAKTICKÉ**

V teoretické části práce byl podán přehled o mechanických vlastnostech dřeva, mechanice řezného procesu a řezání pilovými nástroji. Dále byly popsány pilové kotouče.

Cílem praktické části práce je určení parametrů pro podélné řezání středně tvrdého dřeva pilovým kotoučem a konstrukce pilového kotouče včetně určení jeho kritických otáček, napjatosti a výkonu potřebného k roztočení.

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 4 URČENÍ PARAMETRŮ PODÉLNÉHO ŘEZÁNÍ DŘEVA

### Požadované parametry podélného řezání dřeva pilovým kotoučem

Řezná výška  $h = 40$  [mm].

Řezání středně tvrdého dřeva s ručním posuvem do místa řezu.

#### 4.1 Volba průměru pilového kotouče

Pro stroje s osou pilového kotouče umístěnou pod pracovním stolem se udává vztah

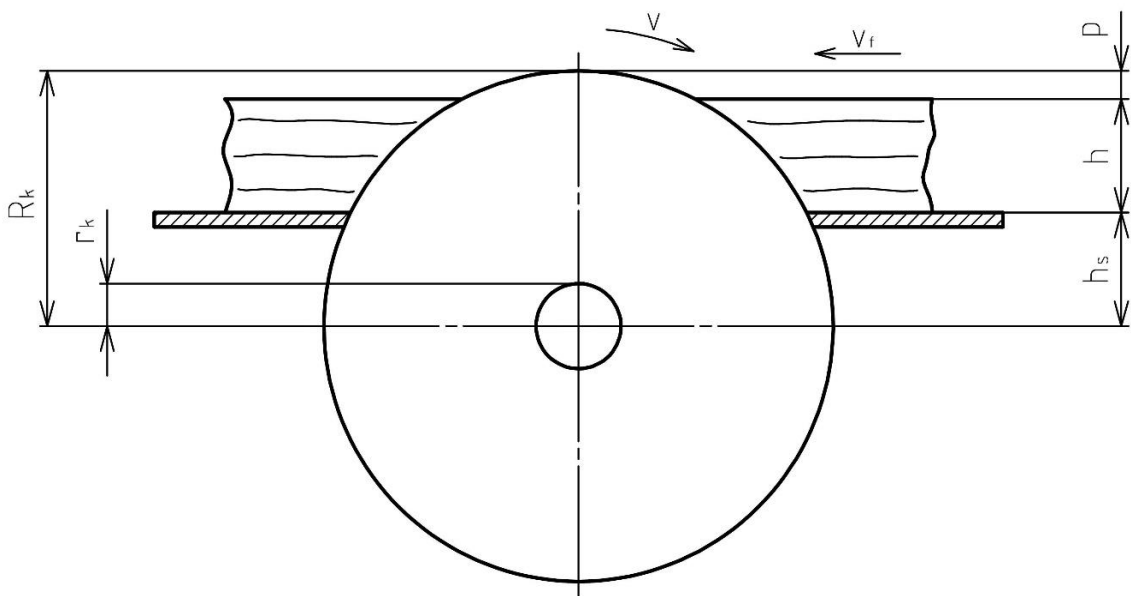
$$D_{\min} = 2(h + h_s + p) \text{ [mm]}. \quad (6)$$

$D_{\min}$  - minimální průměr pilového kotouče [mm],

$h$  - řezná výška [mm],

$h_s$  - vzdálenost horní hrany pracovního stolu od osy otáčení pilového kotouče [mm],

$p$  - minimální přesah pilového kotouče nad obrobkem [mm].



Obr. 28. Podélné řezání dřeva pilovým kotoučem [10]

Požadovaná řezná výška  $h = 40$  [mm], z konstrukčních důvodů volíme  $h_s = 40$  [mm], minimální přesah volíme  $p = 10$  [mm]. Po dosazení do (1) dostaneme

$$D_{\min} = 2(40 + 40 + 10) \text{ [mm]},$$

$$D_{\min} = 180 \text{ [mm]}.$$

Přesah  $p$  pilového kotouče nad obrobkem neovlivňuje celkovou řeznou sílu. Přesah  $p$  se volí v závislosti na průměru pilového kotouče  $D_k$ .

Jelikož pro hodnoty  $D_k$  do 200 [mm] není přesah  $p$  uveden, a se vzrůstajícím průměrem pilového kotouče  $D_k$  vzrůstá doporučený přesah  $p$ , volíme přesah  $p$  z nejbližšího uvedeného rozmezí pro průměr kotouče

$$D_k \text{ (200 až 300) [mm]},$$

$$p \text{ (5 až 10) [mm]}.$$

Zvolený přesah  $p$  ve výpočtu  $D_{\min}$  vyhovuje. Volíme tedy průměr pilového kotouče

$$D_k = 180 \text{ [mm]}.$$

## 4.2 Volba tloušťky plochého pilového kotouče

Pilový kotouč volíme plochý. Závislost tloušťky plochého pilového kotouče  $s$  na průměru  $D_k$  udává vztah

$$s = (0,07 \text{ až } 0,15)\sqrt{D_k} \text{ [mm]}. \quad (7)$$

Uvažujeme střední hodnotu intervalu (0,07 až 0,15), tedy

$$\frac{(0,07 + 0,15)}{2} = 0,11 \text{ [1]}.$$

Tloušťka plochého pilového kotouče je potom

$$s = 0,11\sqrt{D_k} \text{ [mm]},$$

po dosazení průměru pilového kotouče  $D_k$  obdržíme

$$s = 0,11\sqrt{180} \text{ [mm]},$$

$$s \doteq 1,4758 \text{ [mm]},$$

volíme tloušťku plochého pilového kotouče

$$s = 1,5 \text{ [mm]}.$$

### 4.3 Volba průměru upínacích přírub

Pro určení průměru upínacích přírub  $D_p$  se uvádí empirický vztah

$$D_p = 5\sqrt{D_k} \text{ [mm]}. \quad (8)$$

$D_p$  – průměr upínacích přírub pilového kotouče [mm].

Po dosazení dostaneme

$$D_p = 5\sqrt{180} \text{ [mm]},$$

$$D_p \doteq 67,08 \text{ [mm]},$$

volíme průměr upínacích přírub pilového kotouče

$$D_p = 70 \text{ [mm]}.$$

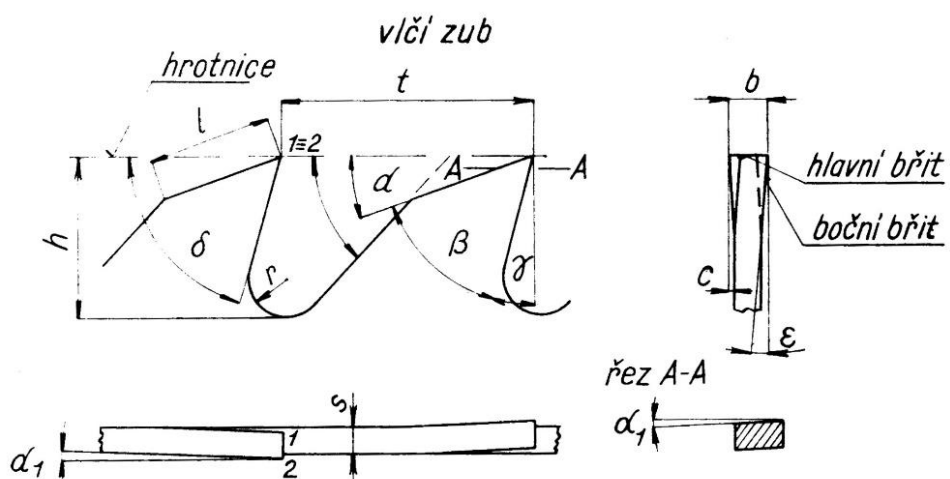
### 4.4 Volba profilu a geometrie zubů pilového kotouče

Volíme vlčí profil ozubení, vhodný pro podélné řezání s následující geometrií zubu:

$$\alpha = 15 [^\circ],$$

$$\beta = 40 [^\circ],$$

$$\gamma = 35 [^\circ].$$



Obr. 29. Vlčí profil ozubení [10]

Zuby volíme pýchované.



S přihlédnutím k potřebné tuhosti zubu při jeho namáhání ve směru kolmo k ploše pilového kotouče se volí rozteč zubů k tloušťce pilového kotouče:

$$t = (10 \text{ až } 15)s \text{ [mm]}. \quad (9)$$

Uvažujeme střední hodnotu intervalu (10 až 15), tedy

$$\frac{(10 + 15)}{2} = 12,5 \text{ [1]}.$$

Rozteč zubů pilového kotouče je potom

$$t = 12,5s \text{ [mm]},$$

po dosažení tloušťky pilového kotouče s obdržíme

$$t = 12,5 \cdot 1,5 \text{ [mm]},$$

$$t = 18,75 \text{ [mm]}.$$

Počet zubů pilového kotouče je dán vztahem

$$z = \frac{\pi D_k}{t} \text{ [1]}. \quad (10)$$

Po dosažení dostaneme

$$z = \frac{\pi 180}{18,75} \text{ [1]},$$

$$z \doteq 30,159 \text{ [1]},$$

volíme počet zubů pilového kotouče

$$z = 30 \text{ [1]}.$$

Rozteč zubů pilového kotouče  $t$  pro  $z = 30$  [1] je potom

$$t = \frac{\pi D_k}{z} \text{ [mm]}. \quad (11)$$

Po dosažení obdržíme

$$t = \frac{\pi 180}{30} \text{ [mm]},$$

$$t \doteq 18,85 \text{ [mm]}.$$

Rozteč zubů pilového kotouče  $t$  musí ležet v intervalu (10 až 15)s, tedy

$$t \in [10s, 15s] \text{ [mm]},$$

$$t \in [10 \cdot 1,5; 15 \cdot 1,5] \text{ [mm]},$$

$$18,85 \in [15; 22,5] \text{ [mm]}.$$

rozteč zubů pilového kotouče  $t = 18,85$  [mm] vyhovuje.

Volíme rozteč zubů pilového kotouče

$$t = 18,85 \text{ [mm]}.$$

Výška zubů  $h_z$  se u vlčího profilu ozubení volí

$$h_z = (0,4 \text{ až } 0,7)t \text{ [mm]}. \quad (12)$$

Uvažujeme střední hodnotu intervalu (0,4 až 0,7), tedy

$$\frac{(0,4 + 0,7)}{2} = 0,55 \text{ [1]}.$$

Výška zubů vlčího profilu ozubení je potom

$$h_z = 0,55t \text{ [mm]},$$

po dosazení rozteče zubů pilového kotouče  $t$  dostaneme

$$h_z = 0,55 \cdot 18,85 \text{ [mm]},$$

$$h_z = 10,3675 \text{ [mm]},$$

volíme výšku zubů vlčího profilu ozubení pilového kotouče

$$h_z = 10 \text{ [mm]}.$$

Poloměr zaoblení mezery  $r$  se u vlčího profilu ozubení volí

$$r = (0,1 \text{ až } 0,2)t \text{ [mm]}. \quad (13)$$

Uvažujeme střední hodnotu intervalu (0,1 až 0,2), tedy

$$\frac{(0,1 + 0,2)}{2} = 0,15 \text{ [1]}.$$

Poloměr zaoblení mezery vlčího ozubení je potom

$$r = 0,15t \text{ [mm]},$$

po dosazení rozteče zubů pilového kotouče  $t$  obdržíme

$$r = 0,15 \cdot 18,85 \text{ [mm]},$$

$$r = 2,8275 \text{ [mm]},$$

volíme poloměr zaoblení mezery zubů vlčího profilu ozubení pilového kotouče

$$r = 3 \text{ [mm]}.$$

Délka hřbetní hrany  $l_h$  vlčího profilu ozubení se volí

$$l_h = (0,5 \text{ až } 0,6)t \text{ [mm]}. \quad (14)$$

Uvažujeme střední hodnotu intervalu (0,5 až 0,6), tedy

$$\frac{(0,5 + 0,6)}{2} = 0,55 \text{ [1]}.$$

Délka hřbetní hrany vlčího profilu ozubení je potom

$$l_h = 0,55t \text{ [mm]},$$

po dosazení rozteče zubů pilového kotouče  $t$  dostaneme

$$l_h = 0,55 \cdot 18,85 \text{ [mm]},$$

$$l_h = 10,3675 \text{ [mm]},$$

volíme délku hřbetní hrany vlčího profilu ozubení pilového kotouče

$$l_h = 10 \text{ [mm]}.$$

Upínací průměr pilového kotouče  $d_k$  volíme

$$d_k = 30 \text{ [mm]}.$$

#### 4.5 Určení řezné rychlosti a otáček pilového kotouče

Se zvyšující se řeznou rychlostí dochází k růstu řezných sil, rychlejšímu otupování břitu a růstu hladiny hluku. Zvyšováním řezné rychlosti se pilový kotouč přibližuje nejnižším kritickým otáčkám, což je důležité zejména u tenkých pilových kotoučů. U kotoučových pil s ručním posuvem do místa řezu se volí řezná rychlost v intervalu (35 až 45)  $[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$ .

Volíme řeznou rychlost v intervalu

$$v \in [35, 45] \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}\text{]}.$$

Uvažujeme střední hodnotu intervalu, tedy

$$\frac{(35 + 45)}{2} = 40 \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}\text{]}.$$

Řezná (obvodová) rychlost

$$v = \omega R_k [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]. \quad (15)$$

Poloměr pilového kotouče

$$R_k = \frac{D_k}{2} [\text{mm}]. \quad (16)$$

Po dosazení obdržíme

$$R_k = \frac{180}{2} [\text{mm}],$$

$$R_k = 90 [\text{mm}],$$

$$R_k = 0,09 [\text{m}].$$

Úhlová rychlost

$$\omega = 2\pi n [\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}]. \quad (17)$$

Řezná rychlost po dosazení úhlové rychlosti je dána vztahem

$$v = 2\pi n R_k [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}].$$

Otáčky pilového kotouče při řezné rychlosti  $v = 40 [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$  jsou vyjádřeny vztahem

$$n = \frac{v}{2\pi R_k} [\text{s}^{-1}],$$

$$n = \frac{40}{2\pi \cdot 0,09} [\text{s}^{-1}],$$

$$n \doteq 70,74 [\text{s}^{-1}],$$

$$n = 70,74 \cdot 60 [\text{min}^{-1}],$$

$$n = 4\,244,4 [\text{min}^{-1}],$$

volíme otáčky pilového kotouče

$$n = 4\,200 [\text{min}^{-1}].$$

Převědeme  $n [\text{min}^{-1}]$  na  $n [\text{s}^{-1}]$

$$n = 4\,200 [\text{min}^{-1}],$$

$$n = \frac{4\,200}{60} [\text{s}^{-1}],$$

$$n = 70 \text{ [s}^{-1}\text{]},$$

a dosadíme do vztahu pro určení nové řezné rychlosti

$$v = 2\pi n R_k \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}\text{]},$$

$$v = 2\pi 70 \cdot 0,09 \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}\text{]},$$

$$v \doteq 39,58 \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}\text{]}.$$

Řezná rychlost pilového kotouče  $v$  musí ležet v intervalu

$$v \in [35, 45] \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}\text{]},$$

$$39,58 \in [35, 45] \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}\text{]},$$

řezná rychlost  $v = 39,58 \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}\text{]}$  vyhovuje.

Volíme otáčky pilového kotouče

$$n = 4\,200 \text{ [min}^{-1}\text{]}.$$

#### 4.6 Určení posuvu na břit a rychlosti posuvu

Při podélném řezání středně tvrdých dřevin se doporučuje posuv na břit nejvýše  $f_z = 0,5 \text{ [mm]}$ . Při příčném řezání měkkého dřeva se doporučuje posuv na břit v rozsahu  $f_z = (0,075 \text{ až } 0,1) \text{ [mm]}$ , u středně tvrdého dřeva hodnoty přibližně poloviční. S rostoucím posuvem na břit se zvětšuje drsnost povrchu a roste řezná síla. S klesajícím posuvem na břit se rychleji otupuje nástroj. Pro ruční posuv materiálu do místa řezu se volí menší posuv na břit. S rostoucí tvrdostí dřeva se rovněž volí menší posuv na břit. S ohledem na vysokou jakost řezné plochy a s přihlédnutím k nehomogenitě a anizotropii dřeva volíme posuv na břit

$$f_z = 0,05 \text{ [mm]},$$

$$f_z = 0,000\,05 \text{ [m]}.$$

Rychlost posuvu obrobku do místa řezu  $v_f$  se určí ze vztahu

$$v_f = f_z n z \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}\text{]}. \quad (18)$$

Po dosazení dostaneme

$$v_f = 0,000\,05 \cdot 70 \cdot 30 \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}\text{]},$$

$$v_f = 0,105 \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}\text{]}.$$

#### 4.7 Určení měrného řezného odporu

Břit pilového kotouče odebrává již na začátku záběru třísku určité minimální tloušťky

$$a_{\min} = f_z \sin \varphi_1 \text{ [mm]}, \quad (19)$$

a na konci záběru třísku maximální tloušťky

$$a_{\max} = f_z \sin \varphi_2 \text{ [mm]}. \quad (20)$$

Střední tloušťka třísky je potom

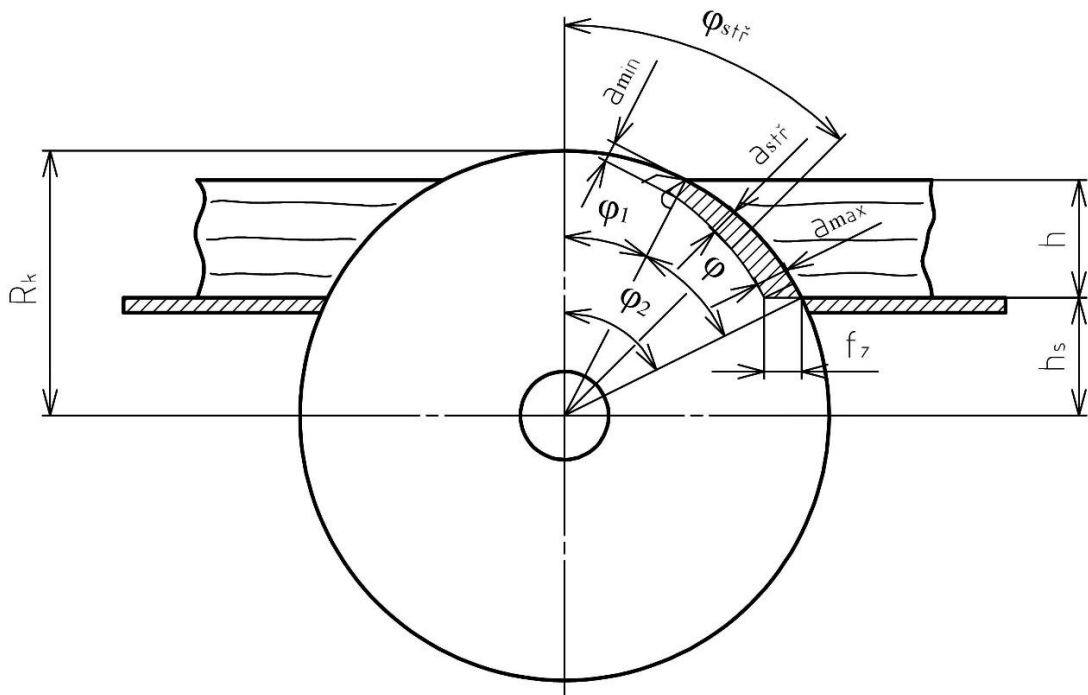
$$a_{\text{stř}} = f_z \sin \varphi_{\text{stř}} \text{ [mm]}. \quad (21)$$

Úhel  $\varphi_1$  zjistíme ze vztahu

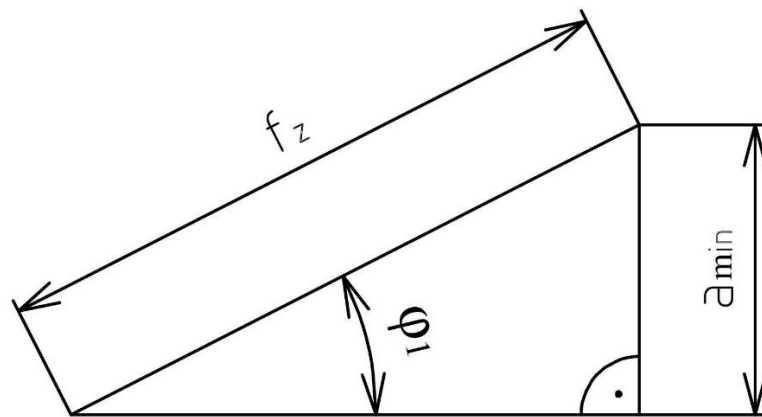
$$\cos \varphi_1 = \frac{h + h_s}{R_k}. \quad (22)$$

Úhel  $\varphi_2$  zjistíme ze vztahu

$$\cos \varphi_2 = \frac{h_s}{R_k}. \quad (23)$$



Obr. 30. Způsob oddělování třísky pilovým kotoučem



Obr. 31. Určení tloušťky třísky

Za předpokladu, že směr dřevních vláken je rovnoběžný se směrem posuvu, je střední úhel styku dán vztahem

$$\varphi_{\text{stř}} = \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2} [^\circ]. \quad (24)$$

Po dosazení obdržíme

$$\cos \varphi_1 = \frac{40 + 40}{90},$$

$$\cos \varphi_1 = 0,8,$$

$$\varphi_1 \doteq 27^\circ 15' 58''.$$

$$\cos \varphi_2 = \frac{40}{90},$$

$$\cos \varphi_2 = 0,4,$$

$$\varphi_2 \doteq 63^\circ 36' 44''.$$

$$\varphi_{\text{stř}} = \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2},$$

$$\varphi_{\text{stř}} = \frac{27^\circ 15' 58'' + 63^\circ 36' 44''}{2},$$

$$\varphi_{\text{stř}} = \frac{90^\circ 52' 42''}{2},$$

$$\varphi_{\text{stř}} = 45^{\circ} 26' 21''.$$

$$a_{\text{min}} = f_z \sin \varphi_1 \text{ [mm]},$$

$$a_{\text{min}} = 0,05 \sin 27^{\circ} 15' 58'' \text{ [mm]},$$

$$a_{\text{min}} \doteq 0,023 \text{ [mm]}.$$

$$a_{\text{max}} = f_z \sin \varphi_2 \text{ [mm]},$$

$$a_{\text{max}} = 0,05 \sin 63^{\circ} 36' 44'' \text{ [mm]},$$

$$a_{\text{max}} \doteq 0,045 \text{ [mm]}.$$

$$a_{\text{stř}} = f_z \sin \varphi_{\text{stř}} \text{ [mm]},$$

$$a_{\text{stř}} = 0,05 \sin 45^{\circ} 26' 21'' \text{ [mm]},$$

$$a_{\text{stř}} \doteq 0,036 \text{ [mm]}.$$

Středový úhel  $\varphi$  (úhel délky záběru), kterému přísluší délka třísky  $l$  je dán vztahem

$$\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 \text{ [}^{\circ}\text{]}. \quad (25)$$

Po dosazení dostaneme

$$\varphi = 63^{\circ} 36' 44'' - 27^{\circ} 15' 58'',$$

$$\varphi = 36^{\circ} 20' 46''.$$

Délka třísky  $l$  je potom dána vztahem

$$l = \frac{\pi D_k \varphi}{360} \text{ [mm]}. \quad (26)$$

Po dosazení obdržíme

$$l = \frac{\pi 180 \cdot 36^{\circ} 20' 46''}{360} \text{ [mm]},$$

$$l \doteq 57,1 \text{ [mm]}.$$

Počet zubů, které jsou současně v záběru, je dán vztahem



$$z_z = \frac{\pi D_k \varphi}{360 t} [1]. \quad (27)$$

Po dosazení dostaneme

$$z_z = \frac{\pi 180 \cdot 36^\circ 20' 46''}{360 \cdot 18,85} [1],$$

$$z_z \doteq 3 [1].$$

Zvětšení poloměru zaoblení břitu při řezání po čase  $t_{\dot{\gamma}}$  [min] vyjadřuje vztah

$$\Delta q = q - q_0 [\mu\text{m}]. \quad (28)$$

Volíme

$$t_{\dot{\gamma}} = 120 [\text{min}],$$

$\Delta q$  – zvětšení poloměru zaoblení břitu při řezání po čase  $t_{\dot{\gamma}}$  [ $\mu\text{m}$ ],

$q$  – poloměr zaoblení otupeného břitu po čase  $t_{\dot{\gamma}}$  [ $\mu\text{m}$ ],

$q_0$  – poloměr zaoblení ostrého břitu (před použitím nástroje) [ $\mu\text{m}$ ].

Pro pily se udává  $q_0 = 6$  až  $10$  [ $\mu\text{m}$ ], volíme

$$q_0 = 10 [\mu\text{m}].$$

Zvětšení poloměru zaoblení břitu při řezání udává vztah

$$\Delta q = \frac{\theta l n t_{\dot{\gamma}}}{1\,000} [\mu\text{m}]. \quad (29)$$

$\theta$  – koeficient vyjadřující zvětšení poloměru zaoblení břitu při řezné dráze dlouhé  $1$  m [1],

volíme  $\theta$  pro pilové kotouče z nástrojové oceli, řezající středně tvrdé dřevo

$$\theta = 0,001\,3 [1].$$

Po dosazení do (29) obdržíme

$$\Delta q = \frac{0,001\,3 \cdot 57,1 \cdot 4\,200 \cdot 120}{1\,000} [\mu\text{m}],$$

$$\Delta q = 37,411\,92 [\mu\text{m}].$$

Koeficient otupení je dán vztahem

$$a_q = 1 + \frac{0,2\Delta q}{q_0} [1]. \quad (30)$$

Po dosazení dostaneme

$$a_q = 1 + \frac{0,2 \cdot 37,411\ 92}{10} [1],$$

$$a_q = 1,748\ 238\ 4 [1].$$

Měrný řezný odpor  $K_m [10\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}]$  při podélném řezání dřeva pilovými kotouči a střední tloušťce třísky

$$a_{\text{stř}} < 0,1 [\text{mm}],$$

$$0,036 < 0,1 [\text{mm}],$$

je pro přechované zuby dán vztahem

$$K_m = k_m + \frac{(a_q - 0,8)p_m}{a_{\text{stř}}} + \frac{k_t h}{b} [10\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}]. \quad (31)$$

Koeficient  $k_m$  je dán vztahem

$$k_m = A\delta + Bv + V_m [10\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}]. \quad (32)$$

Při řezných rychlostech menších než  $v = 70 [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$  se používá pro určení koeficientu  $k_m$  namísto řezné rychlosti  $v$  výraz  $90 - v$ .

$$v < 70 [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}],$$

$$39,58 < 70 [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}],$$

Ve vztahu (32) použijeme namísto řezné rychlosti  $v$  výraz  $90 - v$ .

Úhel řezu  $\delta$  je dán součtem úhlu hřbetu  $\alpha$  a úhlu břitu  $\beta$

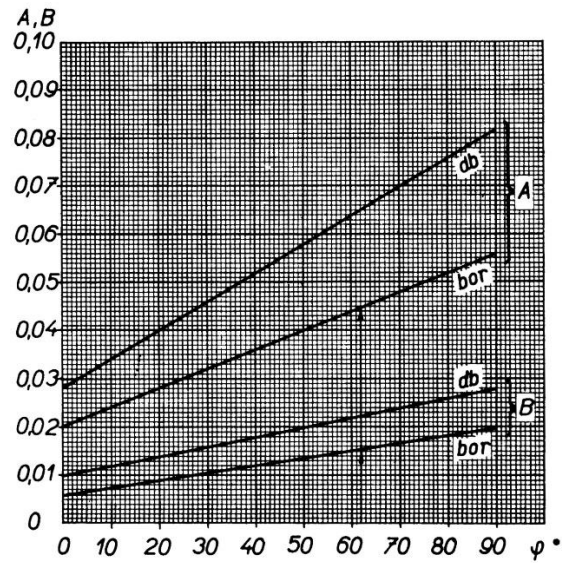
$$\delta = \alpha + \beta [^\circ]. \quad (33)$$

Po dosazení obdržíme

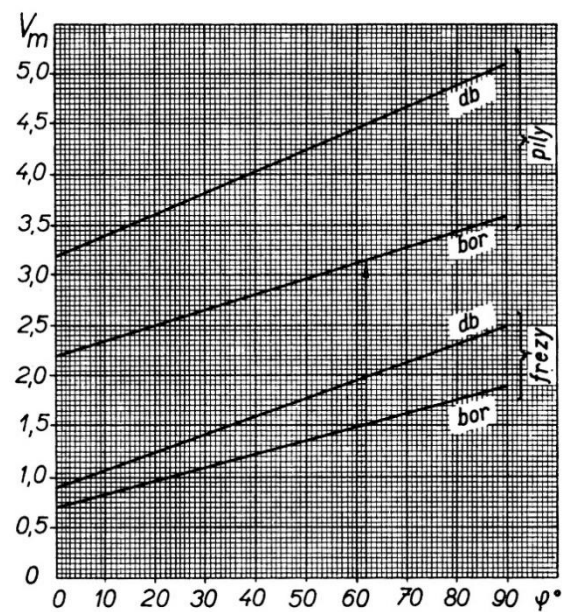
$$\delta = 15 + 40 [^\circ],$$

$$\delta = 55 [^\circ].$$

Hodnoty  $A, B, V_m$  zjistíme z následujících nomogramů:



Obr. 32. Nomogram pro zjištění hodnot  $A, B$  [10]



Obr. 33. Nomogram pro zjištění hodnoty  $V_m$  [10]

Hodnoty určíme pro úhel  $\varphi_{stř} = 45^\circ 26' 21''$ .

Hodnotu  $A$  volíme pro dubové dřev (db)

$$A = 0,055 [10\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}].$$

Hodnotu  $B$  volíme pro dubové dřev (db)

$$B = 0,019 [10\text{N} \cdot \text{mm}^{-2} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}].$$

Hodnotu  $V_m$  volíme pro dubové dřevo (db)

$$V_m = 4,15 [10\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}].$$

Upravený vztah (32) má tvar

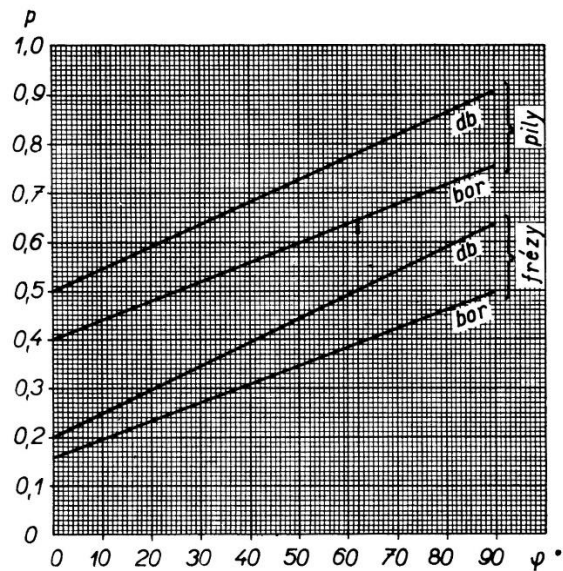
$$k_m = A\delta + B(90 - v) + V_m [10\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}],$$

po dosazení hodnot dostaneme

$$k_m = 0,055 \cdot 55 + 0,019(90 - 39,58) + 4,15 [10\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}],$$

$$k_m = 8,132\ 98 [10\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}].$$

Hodnotu  $p_m$  zjistíme z následujícího nomogramu:



Obr. 34. Nomogram pro zjištění hodnoty  $p_m$  [10]

Hodnotu  $p_m$  volíme pro dubové dřevo (db)

$$p_m = 0,7 [10\text{N} \cdot \text{mm}^{-1}].$$

Koeficient  $k_t$  [ $10\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$ ] vyjadřuje sílu potřebnou k překonání tření pilového kotouče na ploše 1 [ $\text{mm}^2$ ] řezné spáry. Pro pilové kotouče s pýchovanými zuby nabývá hodnot

$$k_t = (0,058 \text{ až } 0,06) [10\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}]. \quad (34)$$

Volíme střední hodnotu intervalu (0,058 až 0,06), tedy

$$k_t = \frac{(0,058 + 0,06)}{2} [10\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}],$$

$$k_t = 0,059 [10\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}].$$

Šířka řezné spáry  $b$  je dána šířkou břitu po rozpěchování zubu. Pro pilové kotouče  $D_k < 800$  [mm] se doporučuje hodnota rozšíření břitu nad tloušťku pilového kotouče na jednu stranu

$$c = (0,4 \text{ až } 0,7) [\text{mm}]. \quad (35)$$

Uvažujeme střední hodnotu intervalu (0,4 až 0,7), tedy

$$c = \frac{(0,4 + 0,7)}{2} [\text{mm}],$$

$$c = 0,55 [\text{mm}],$$

volíme

$$c = 0,55 [\text{mm}].$$

Šířka řezné spáry  $b$  je potom

$$b = s + 2c [\text{mm}],$$

$$b = 1,5 + 2 \cdot 0,55 [\text{mm}],$$

$$b = 2,6 [\text{mm}].$$

Po dosazení do (31) obdržíme

$$K_m = 8,132 \, 98 + \frac{(1,748 \, 238 \, 4 - 0,8)0,7}{0,036} + \frac{0,059 \cdot 40}{2,6} [10\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}],$$

$$K_m \doteq 27,479 [10\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}],$$

$$K_m = 274,79 [\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}].$$

#### 4.8 Určení řezného výkonu

Známe-li měrný řezný odpor  $K_m$  [ $\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$ ], pak řezný výkon  $P$  [W] potřebný k řezání bude

$$P = K_m b h v_f \text{ [W]}. \quad (36)$$

Po dosazení dostaneme

$$P = 274,79 \cdot 2,6 \cdot 40 \cdot 0,105 \text{ [W]},$$

$$P \doteq 3\,000 \text{ [W]}.$$

Celková řezná síla  $F_{\dot{\gamma}}$  [N] potom bude

$$F_{\dot{\gamma}} = \frac{P}{v} \text{ [N]}. \quad (37)$$

Po dosazení obdržíme

$$F_{\dot{\gamma}} = \frac{3\,000}{39,58} \text{ [N]},$$

$$F_{\dot{\gamma}} \doteq 76 \text{ [N]}.$$

[10]

#### 4.9 Parametry pilového kotouče

Na základě předchozích výpočtů jsme obdrželi následující parametry pilového kotouče potřebné k jeho konstrukci.

Průměr pilového kotouče  $D_k = 180$  [mm].

Upínací průměr pilového kotouče  $d_k = 30$  [mm].

Tloušťka pilového kotouče  $s = 1,5$  [mm].

Šířka břitu pilového kotouče  $b = 2,6$  [mm].

Úhel hřbetu  $\alpha = 15$  [°].

Úhel břitu  $\beta = 40$  [°].

Úhel čela  $\gamma = 35$  [°].

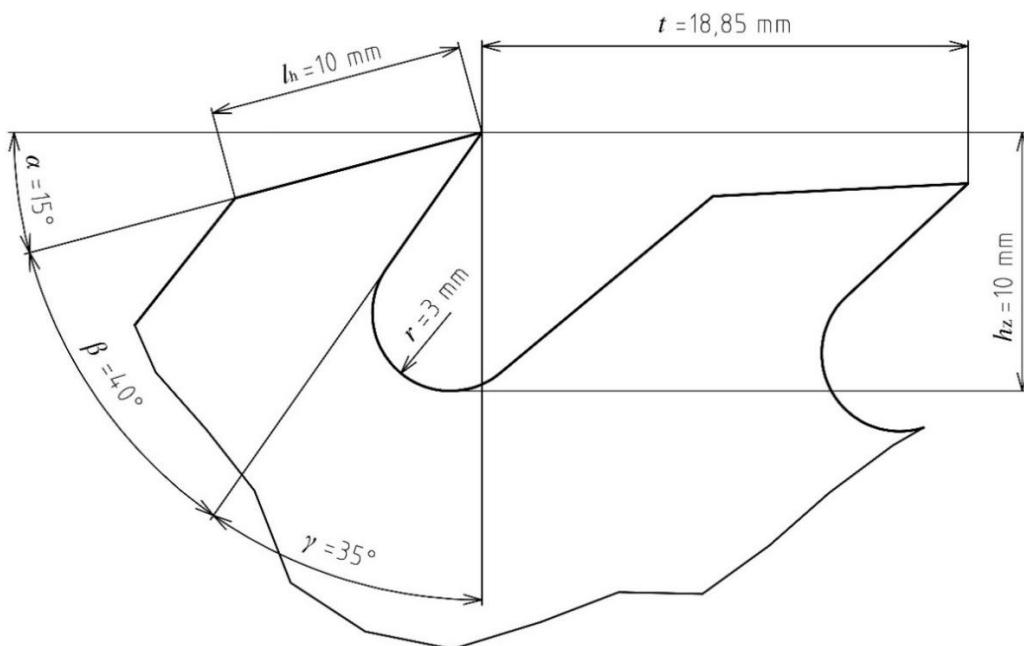
Počet zubů pilového kotouče  $z = 30$  [1].

Rozteč zubů pilového kotouče  $t = 18,85$  [mm].

Výška vlčího profilu ozubení pilového kotouče  $h_z = 10$  [mm].

Poloměr zaoblení mezery zubů vlčího profilu ozubení pilového kotouče  $r = 3$  [mm].

Délka hřbetní hrany vlčího profilu ozubení pilového kotouče  $l_h = 10$  [mm].



Obr. 35. Ozubení pilového kotouče

#### 4.10 Parametry podélného řezání dřeva pilovým kotoučem

Podélné řezání dřeva pilovým kotoučem středně tvrdého dřeva s ručním posuvem do místa řezu má následující parametry.

Maximální řezná výška  $h = 40$  [mm].

Maximální rychlost posuvu obrobku do místa řezu  $v_f = 6,3$  [m · min<sup>-1</sup>].

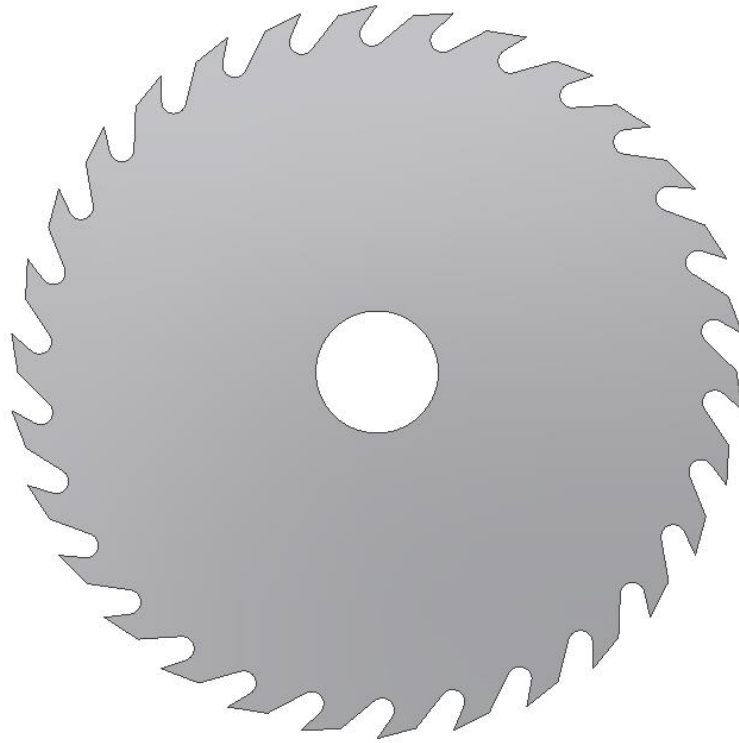
Otáčky pilového kotouče  $n = 4\,200$  [min<sup>-1</sup>].

Řezný výkon  $P = 3\,000$  [W].



## 5 KONSTRUKCE PILOVÉHO KOTOUČE

Pomocí vypočtených parametrů jsme v programu Autodesk Inventor vytvořili model pilového kotouče.



Obr. 36. Pilový kotouč

### 5.1 Určení kritických otáček

Při výpočtu uvažujeme plný kotouč konstantní tloušťky bez ozubení o vnějším průměru  $D_k = 2R_k$  [cm].

Statický rezonanční kmitočet  $f_{st}$  [Hz] udává vztah

$$f_{st} = \frac{\alpha_a}{2\pi R_k^2} \sqrt{\frac{g_n D}{\rho s}} \text{ [Hz]}. \quad (38)$$

$f_{st}$  – statický rezonanční kmitočet [Hz],

$\alpha_a$  – koeficient závislý na tvaru desky, způsobu upnutí a tvaru chvění [1],

$R_k$  – poloměr pilového kotouče [cm],

$g_n$  – normální tíhové zrychlení [ $\text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$ ],

$\rho$  – hustota materiálu pilového kotouče [ $\text{kg} \cdot \text{cm}^{-3}$ ],

$s$  – tloušťka pilového kotouče [cm],

kde  $D$  je ohybová tuhost

$$D = \frac{Es^3}{12(1-\nu^2)} \text{ [N} \cdot \text{m]},$$

$E$  – Youngův modul [Pa],

$\nu$  – Poissonův poměr [1].

Uvažujeme kruhovou desku nezatíženou odporem vzduchu s  $m = 2$  [1] uzlovými průměry obrazce chvění a  $k = 0$  [1] uzlovými kružnicemi. Timošenko udává pro tento případ hodnotu

$$\alpha_a = 5,251 \text{ [1]}.$$

Pro homogenní a izotropní ocelový kotouč uvažujeme

$$\rho = 7\,850 \text{ [kg} \cdot \text{m}^{-3}\text{]},$$

$$E = 210\,000 \text{ [MPa]},$$

$$\nu = 0,3 \text{ [1]}.$$

Stanovená hodnota normálního tíhového zrychlení je

$$g_n = 9,806\,65 \text{ [m} \cdot \text{s}^{-2}\text{]},$$

$$g_n = 9,806\,65 \cdot 100 \text{ [cm} \cdot \text{s}^{-2}\text{]},$$

$$g_n = 980,665 \text{ [cm} \cdot \text{s}^{-2}\text{]}.$$

Po dosazení do vztahu pro výpočet ohybové tuhosti  $D$  obdržíme

$$D = \frac{210\,000\,000\,000 \cdot 0,001\,5^3}{12(1-0,3^2)} \text{ [N} \cdot \text{m]},$$

$$D \doteq 64,9 \text{ [N} \cdot \text{m]}.$$

Po dosazení do (33) dostaneme

$$f_{st} = \frac{5,251}{2\pi 9^2} \sqrt{\frac{980,665 \cdot 64,9}{0,007\,85 \cdot 0,15}} \text{ [Hz]},$$

$$f_{st} \doteq 75,86 \text{ [Hz]}.$$

Při otáčení kotouče se statický rezonanční kmitočet  $f_{st}$  [Hz] zvyšuje vlivem odstředivých sil. Určíme proto dynamický rezonanční kmitočet  $f_{dyn}$  [Hz], který je dán vztahem

$$f_{dyn} = \sqrt{f_{st}^2 + Mn^2} \text{ [Hz]}. \quad (39)$$

Hodnota  $M$  je dána vztahem

$$M = \frac{1 - \nu}{4} m^2 + \frac{3 + \nu}{4} m \text{ [1]}.$$

Po dosazení do vztahu pro výpočet  $M$  obdržíme

$$M = \frac{1 - 0,3}{4} 2^2 + \frac{3 + 0,3}{4} 2 \text{ [1]},$$

$$M = 2,35 \text{ [1]}.$$

Po dosazení do (39) dostaneme

$$f_{dyn} = \sqrt{75,86^2 + 2,35 \cdot 70^2} \text{ [Hz]},$$

$$f_{dyn} \doteq 131,4 \text{ [Hz]}.$$

Kritické otáčky pilového kotouče jsou dány vztahem

$$n_{kr} = \frac{f_{dyn}}{\sqrt{m^2 - M}} \text{ [s}^{-1}\text{]}. \quad (40)$$

Po dosazení obdržíme

$$n_{kr} = \frac{131,4}{\sqrt{2^2 - 2,35}} \text{ [s}^{-1}\text{]},$$

$$n_{kr} \doteq 102 \text{ [s}^{-1}\text{]},$$

$$n_{kr} = 102 \cdot 60 \text{ [min}^{-1}\text{]},$$

$$n_{kr} = 6\,120 \text{ [min}^{-1}\text{]}.$$

Otáčky pilového kotouče  $n$  musí být menší než kritické otáčky  $n_{kr}$

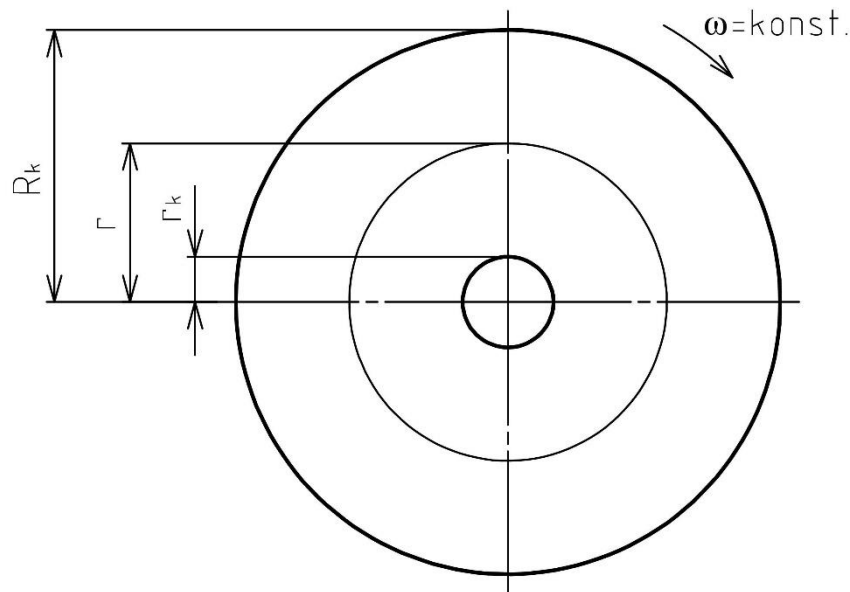
$$n < n_{kr} \text{ [min}^{-1}\text{]},$$

$$4\,200 < 6\,120 \text{ [min}^{-1}\text{]},$$

otáčky pilového kotouče  $n = 4\,200 \text{ [min}^{-1}\text{]}$  vyhovují.

[8, 10, 18, 19, 20]

## 5.2 Určení napjatosti



Obr. 37. Rotující kotouč

Pro určení napjatosti pilového kotouče volíme výpočtový model rotujícího kotouče.

Při výpočtu vycházíme z teorie rotujících tenkých kotoučů stálé tloušťky.

Předpokládáme, že napjatost kotouče je pouze dvouosá.

Při výpočtu uvažujeme kotouč konstantní tloušťky bez ozubení o vnějším průměru  $D_k = 2R_k$  [m], s otvorem o průměru  $d_k = 2r_k$  [m]. Předpokládáme, že kotouč rotuje konstantní úhlovou rychlostí  $\omega$  [ $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$ ]. Dobu rozběhu, dobu doběhu a změnu otáček za provozu zanedbáváme. Dále zanedbáváme řezné síly působící na kotouč.

$$R_k = 0,09 \text{ [m]},$$

$$r_k = 0,015 \text{ [m]}.$$

Pro homogenní a izotropní ocelový kotouč uvažujeme

$$\rho = 7\,850 \text{ [kg} \cdot \text{m}^{-3}\text{]},$$

$$E = 210\,000 \text{ [MPa]},$$

$$\nu = 0,3 \text{ [1]}.$$

**Napjatost rotujícího kotouče vlivem odstředivých sil**

Na element kotouče rotujícího konstantní úhlovou rychlostí  $\omega$  [rad · s<sup>-1</sup>] působí elementární odstředivá síla

$$dF_o = dmr\omega^2. \quad (41)$$

Hmotnost elementu je

$$dm = \rho dV.$$

Objem elementu je

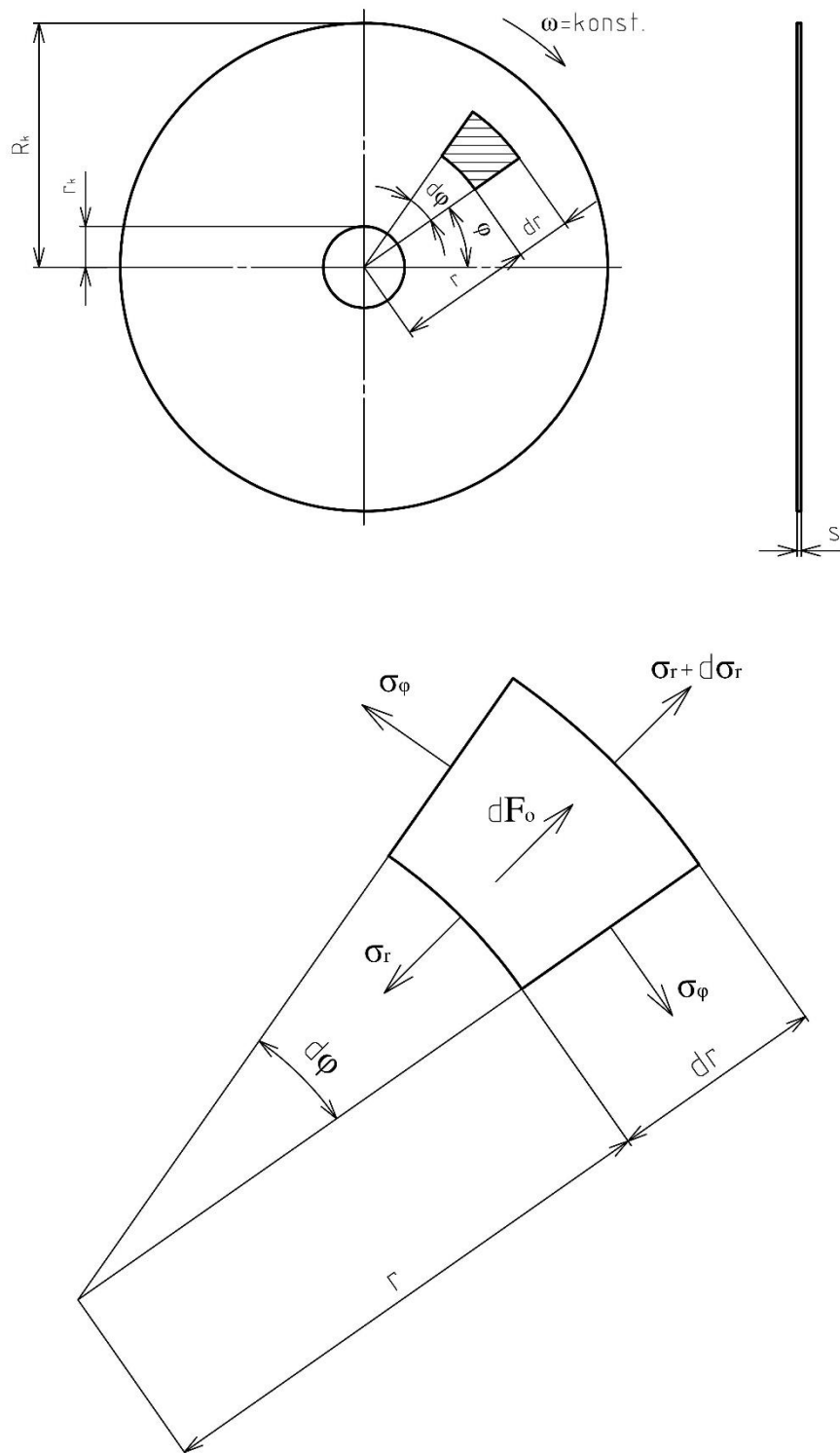
$$dV = rd\varphi drs.$$

Po dosazení do (36) dostaneme

$$dF_o = \rho rd\varphi drsr\omega^2,$$

a po úpravě

$$dF_o = \rho r^2 d\varphi drs\omega^2.$$



Obr. 38. Schéma pro určení rovnice rovnováhy elementu rotujícího kotouče

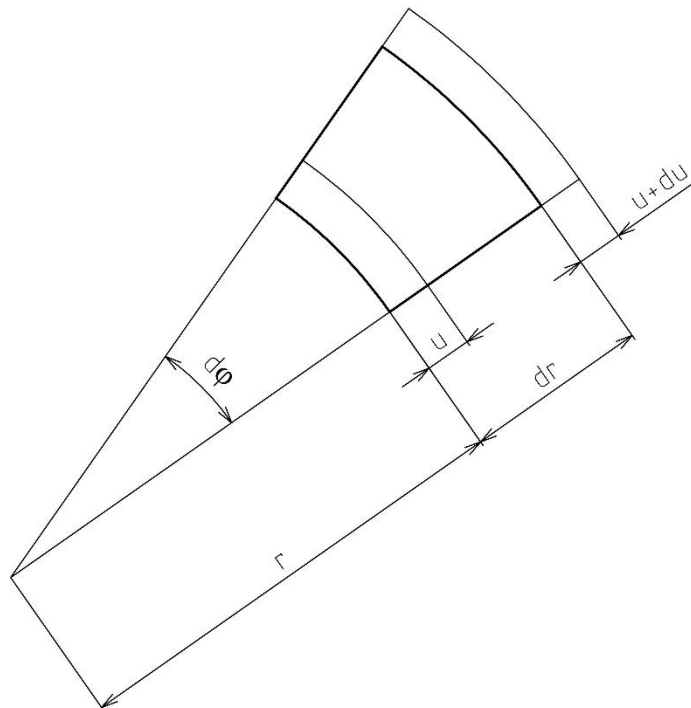
Rovnice rovnováhy sil působících na element v radiálním směru má tvar

$$(\sigma_r + d\sigma_r)s(r + dr)d\phi - \sigma_r s r d\phi + \rho r^2 d\phi dr s \omega^2 - \sigma_\phi s dr d\phi = 0.$$

Po úpravách a zanedbání nekonečně malých veličin vyššího řádu má Navierova rovnice rovnováhy elementu rotujícího kotouče v polárních souřadnicích tvar

$$\frac{d}{dr}(r\sigma_r) - \sigma_\varphi + \rho\omega^2 r^2 = 0. \quad (42)$$

Deformace elementu popisují Cauchyho geometricko-deformační rovnice vyjadřující závislost mezi poměrnými deformacemi (prodlouženími) v radiálním a obvodovém směru a posuvem  $u = u(r)$  v radiálním směru.



Obr. 39. Deformace elementu kotouče v polárních souřadnicích

Poměrné prodloužení v radiálním směru je

$$\varepsilon_r = \frac{(dr - u + u + du) - dr}{dr} = \frac{du}{dr}. \quad (43)$$

Poměrné prodloužení v obvodovém směru je

$$\varepsilon_\varphi = \frac{(r + u)d\varphi - rd\varphi}{rd\varphi} = \frac{u}{r}. \quad (44)$$

Použitím Hookeova zákona dostaneme fyzikální rovnice vyjadřující vztahy mezi složkami napjatosti a deformace.

Poměrná deformace v radiálním směru je

$$\varepsilon_r = \frac{1}{E}(\sigma_r - \nu\sigma_\varphi). \quad (45)$$

Poměrná deformace v obvodovém směru je

$$\varepsilon_\varphi = \frac{1}{E}(\sigma_\varphi - \nu\sigma_r). \quad (46)$$

Zavedeme substituci

$$r\sigma_r = F$$

a rovnici rovnováhy (42) zapíšeme v následujícím tvaru:

$$\sigma_\varphi = \frac{dF}{dr} + \rho\omega^2 r^2. \quad (47)$$

Z rovnic (43) a (44), obdržíme rovnici kompatibility, jež je deformační podmínkou pro poměrná prodloužení a zajišťuje zachování spojitosti tělesa

$$\varepsilon_\varphi - \varepsilon_r + r \frac{d\varepsilon_\varphi}{dr} = 0. \quad (48)$$

Dosazením rovnic (45) a (44) a použitím rovnice (47) získáme rovnici

$$r^2 \frac{d^2 F}{dr^2} + r \frac{dF}{dr} - F + (3 + \nu)\rho\omega^2 r^3 = 0. \quad (49)$$

Obecné řešení rovnice (49) je

$$F = C_1 r + C_2 \frac{1}{r} - \frac{3 + \nu}{8} \rho\omega^2 r^3. \quad (50)$$

Dosazením rovnice (47) obdržíme pro napětí obecné vztahy:

$$\begin{aligned} \sigma_r &= C_1 + C_2 \frac{1}{r^2} - \frac{3 + \nu}{8} \rho\omega^2 r^2, \\ \sigma_\varphi &= C_1 - C_2 \frac{1}{r^2} - \frac{1 + 3\nu}{8} \rho\omega^2 r^2. \end{aligned} \quad (51)$$

Integrační konstanty  $C_1$  a  $C_2$  určíme z daných okrajových podmínek.

V případě kotouče o vnějším poloměru  $R_k$  s kruhovým otvorem o poloměru  $r_k$  ve středu kotouče, získáme integrační konstanty z okrajových podmínek na vnitřním a vnějším poloměru. Pokud na těchto poloměrech nepůsobí žádné zatížení, dostaneme okrajové podmínky

$$(\sigma_r)_{r=r_k} = 0,$$



$$(\sigma_r)_{r=R_k} = 0,$$

z nichž zjistíme že

$$C_1 = \frac{3 + \nu}{8} \rho \omega^2 (R_k^2 + r_k^2),$$

$$C_2 = -\frac{3 + \nu}{8} \rho \omega^2 r_k^2 R_k^2.$$

Dosazením do (51) obdržíme

$$\sigma_r = \frac{3 + \nu}{8} \rho \omega^2 \left( R_k^2 + r_k^2 - \frac{r_k^2 R_k^2}{r^2} - r^2 \right), \quad (52)$$

$$\sigma_\varphi = \frac{3 + \nu}{8} \rho \omega^2 \left( R_k^2 + r_k^2 + \frac{r_k^2 R_k^2}{r^2} - \frac{1 + 3\nu}{3 + \nu} r^2 \right).$$

Dosazením hodnot dostaneme

$$\sigma_r = \frac{3 + 0,3}{8} 7\,850 (2\pi 70)^2 \left( 0,09^2 + 0,015^2 - \frac{0,015^2 0,09^2}{r^2} - r^2 \right),$$

$$\sigma_\varphi = \frac{3 + 0,3}{8} 7\,850 (2\pi 70)^2 \left( 0,09^2 + 0,015^2 + \frac{0,015^2 0,09^2}{r^2} - \frac{1 + 3 \cdot 0,3}{3 + 0,3} r^2 \right).$$

Radiální napětí na vnitřním obvodu v místě  $r = r_k$  je po dosazení

$$\sigma_r(r_k) = \frac{3 + 0,3}{8} 7\,850 (2\pi 70)^2 \left( 0,09^2 + 0,015^2 - \frac{0,015^2 0,09^2}{0,015^2} - 0,015^2 \right),$$

$$\sigma_r(r_k) = 0 \text{ [Pa]}.$$

Obvodové napětí na vnitřním obvodu v místě  $r = r_k$  je po dosazení

$$\sigma_\varphi(r_k) = \frac{3 + 0,3}{8} 7\,850 (2\pi 70)^2 \left( 0,09^2 + 0,015^2 + \frac{0,015^2 0,09^2}{0,015^2} - \frac{1 + 3 \cdot 0,3}{3 + 0,3} 0,015^2 \right),$$

$$\sigma_\varphi(r_k) \doteq 10\,288\,547 \text{ [Pa]},$$

$$\sigma_\varphi(r_k) \doteq 10 \text{ [MPa]}.$$

Radiální napětí na vnějším obvodu v místě  $r = R_k$  je po dosazení

$$\sigma_r(R_k) = \frac{3 + 0,3}{8} 7\,850 (2\pi 70)^2 \left( 0,09^2 + 0,015^2 - \frac{0,015^2 0,09^2}{0,09^2} - 0,09^2 \right),$$

$$\sigma_r(R_k) = 0 \text{ [Pa]}.$$

Obvodové napětí na vnějším obvodu v místě  $r = R_k$  je po dosazení

$$\sigma_\varphi(R_k) = \frac{3 + 0,3}{8} 7\,850(2\pi 70)^2 \left( 0,09^2 + 0,015^2 + \frac{0,015^2 0,09^2}{0,09^2} - \frac{1 + 3 \cdot 0,3}{3 + 0,3} 0,09^2 \right),$$

$$\sigma_\varphi(R_k) \doteq 5\,332\,029 \text{ [Pa]},$$

$$\sigma_\varphi(R_k) \doteq 5 \text{ [MPa]}.$$

Maximální radiální napětí  $\sigma_r$  nalézáme v místě  $r = \sqrt{r_k R_k}$ , kde

$$(\sigma_r)_{\max} = \frac{3 + \nu}{8} \rho \omega^2 (R_k - r_k)^2. \quad (53)$$

Po dosazení obdržíme

$$r = \sqrt{0,015 \cdot 0,09},$$

$$r \doteq 0,036\,7 \text{ [m]}.$$

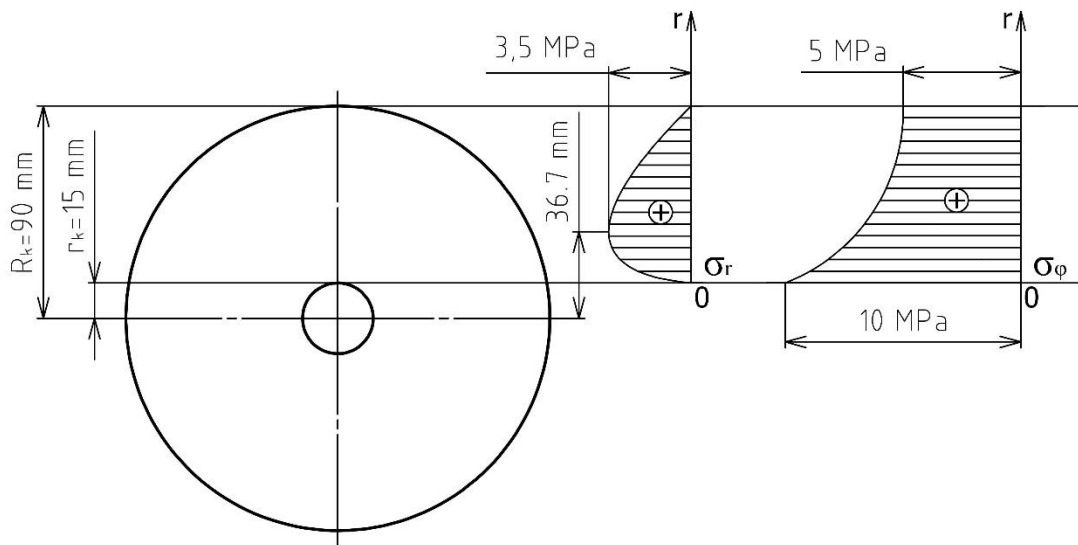
$$(\sigma_r)_{\max} = \frac{3 + \nu}{8} 7\,850(2\pi 70)^2 (0,09 - 0,015)^2,$$

$$(\sigma_r)_{\max} \doteq 3\,523\,481 \text{ [Pa]},$$

$$(\sigma_r)_{\max} \doteq 3,5 \text{ [MPa]}.$$

Maximální obvodové napětí  $\sigma_\varphi$  je v místě  $r = r_k$ , kde

$$(\sigma_\varphi)_{\max} = \frac{3 + \nu}{4} \rho \omega^2 \left( R_k^2 + \frac{1 - \nu}{3 + \nu} r_k^2 \right). \quad (54)$$



Obr. 40. Napjatost rotujícího kotouče vlivem odstředivých sil

Změna poloměru  $\Delta r(r)$  rotujícího kotouče se určí z následujícího vztahu:

$$\varepsilon_\varphi = \frac{\Delta(2\pi r)}{2\pi r},$$

$$\varepsilon_\varphi = \frac{\Delta r}{r},$$

$$\Delta r = \varepsilon_\varphi r,$$

$$\Delta r = \frac{r}{E} (\sigma_\varphi - \nu \sigma_r). \quad (55)$$

Změna vnitřního poloměru v místě  $r = r_k$  je po dosazení

$$\Delta r(r_k) = \frac{r_k}{E} (\sigma_\varphi(r_k) - \nu \sigma_r(r_k)),$$

$$\Delta r(r_k) = \frac{15}{210\,000} (10 - 0,3 \cdot 0),$$

$$\Delta r(r_k) \doteq 0,000\,7 \text{ [mm]}.$$

Změna vnějšího poloměru v místě  $r = R_k$  je po dosazení

$$\Delta r(R_k) = \frac{R_k}{E} (\sigma_\varphi(R_k) - \nu \sigma_r(R_k)),$$

$$\Delta r(R_k) = \frac{90}{210\,000} (5 - 0,3 \cdot 0),$$

$$\Delta r(R_k) \doteq 0,002 \text{ [mm]}.$$

Změna tloušťky  $\Delta s(r)$  rotujícího kotouče se určí z následujícího vztahu:

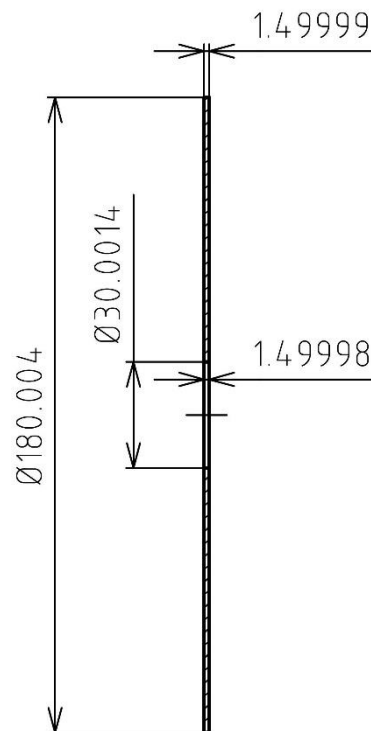
$$\begin{aligned}\varepsilon_s &= \frac{1}{E} (-\nu\sigma_r - \nu\sigma_\varphi), \\ \varepsilon_s &= \frac{d(\Delta s)}{ds}, \\ d(\Delta s) &= \varepsilon_s ds, \\ \Delta s &= \int_{-\frac{s}{2}}^{\frac{s}{2}} \varepsilon_s ds, \\ \Delta s &= \frac{1}{E} (-\nu\sigma_r - \nu\sigma_\varphi) \int_{-\frac{s}{2}}^{\frac{s}{2}} ds, \\ \Delta s &= -\frac{\nu}{E} (\sigma_r + \sigma_\varphi) [s]_{-\frac{s}{2}}^{\frac{s}{2}}, \\ \Delta s &= -\frac{\nu s}{E} (\sigma_r + \sigma_\varphi).\end{aligned}\tag{56}$$

Změna tloušťky na vnitřním obvodu v místě  $r = r_k$  je po dosazení

$$\begin{aligned}\Delta s(r_k) &= -\frac{\nu s}{E} (\sigma_r(r_k) + \sigma_\varphi(r_k)), \\ \Delta s(r_k) &= -\frac{0,3 \cdot 1,5}{210\,000} (0 + 10), \\ \Delta s(r_k) &\doteq -0,000\,02 \text{ [mm]}.\end{aligned}$$

Změna tloušťky na vnějším obvodu v místě  $r = R_k$  je po dosazení

$$\begin{aligned}\Delta s(R_k) &= -\frac{\nu s}{E} (\sigma_r(R_k) + \sigma_\varphi(R_k)), \\ \Delta s(R_k) &= -\frac{0,3 \cdot 1,5}{210\,000} (0 + 5), \\ \Delta s(R_k) &\doteq -0,000\,01 \text{ [mm]}.\end{aligned}$$



*Obr. 41. Změna rozměrů rotujícího kotouče vlivem odstředivých sil*

[8, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33]

**Teplotní napjatost kotouče**

Rozložení teploty předpokládáme osově souměrné a  $T = T(r)$ . Dále předpokládáme konstantní (na teplotě nezávislou) hodnotu koeficientu lineární teplotní roztažnosti  $\alpha_l$  [ $K^{-1}$ ].

$t_{r_k}$  – teplota kotouče na vnitřním obvodu [ $^{\circ}C$ ],

$t_{R_k}$  – teplota kotouče na vnějším obvodu [ $^{\circ}C$ ],

$\Delta T$  – nárůst teploty materiálu kotouče [K],

$\alpha_l$  – koeficient lineární teplotní roztažnosti materiálu kotouče [ $K^{-1}$ ].

Pro ocelový kotouč uvažujeme

$$\alpha_l = 0,000\ 012 \text{ [K}^{-1}\text{]}.$$

Uvažujeme teplotu kotouče na vnitřním obvodu v místě  $r = r_k$

$$t_{r_k} = 20 \text{ [}^{\circ}C\text{]},$$

$$T_{r_k} = 20 + 273,15 \text{ [K]},$$

$$T_{r_k} = 293,15 \text{ [K]}.$$

Při odebrání třísky vzniká vlivem tření čela zubu o obrobek teplo. Kotouč se v místě  $r = R_k$  zahřívá za normálních řezných podmínek přibližně na  $60 \text{ [}^{\circ}C\text{]}$ , volíme

$$t_{R_k} = 60 \text{ [}^{\circ}C\text{]},$$

$$T_{R_k} = 60 + 273,15 \text{ [K]},$$

$$T_{R_k} = 333,15 \text{ [K]}.$$

Nárůst teploty materiálu kotouče určíme ze vztahu

$$\Delta T = T_{R_k} - T_{r_k} \text{ [K]}. \quad (57)$$

Po dosazení dostaneme

$$\Delta T = 333,15 - 293,15 \text{ [K]},$$

$$\Delta T = 40 \text{ [K]}.$$

Cauchyho geometricko-deformační rovnice se rozšíří o člen představující deformaci vlivem změny teploty.

Poměrná teplotní deformace v radiálním směru je

$$\varepsilon_r^T = \frac{1}{E}(\sigma_r^T - \nu\sigma_\varphi^T) + \alpha_l\Delta T. \quad (58)$$

Poměrná teplotní deformace v obvodovém směru je

$$\varepsilon_\varphi^T = \frac{1}{E}(\sigma_\varphi^T - \nu\sigma_r^T) + \alpha_l\Delta T. \quad (59)$$

Pro napětí obdržíme obecné vztahy:

$$\begin{aligned} \sigma_r^T &= C_3 \frac{1}{r^2} + C_4 \frac{2}{r_k^2} + C_5 \frac{1}{r_k^2} \left(1 + 2\ln \frac{r}{r_k}\right), \\ \sigma_\varphi^T &= -C_3 \frac{1}{r^2} + C_4 \frac{2}{r_k^2} + C_5 \frac{1}{r_k^2} \left(3 + 2\ln \frac{r}{r_k}\right). \end{aligned} \quad (60)$$

Předpokládáme rozdělení tepla ve tvaru

$$T(r) = T_i \ln \frac{r}{r_k} + T_{r_k}. \quad (61)$$

Konstantu rozdělení tepla  $T_i$  určíme z teploty v místě  $T(R_k) = 333,15$  [K], po dosazení obdržíme

$$\begin{aligned} T(R_k) &= T_i \ln \frac{R_k}{r_k} + T_{r_k}, \\ 333,15 &= T_i \ln \frac{0,09}{0,015} + 293,15, \\ 333,15 - 293,15 &= T_i \ln \frac{0,09}{0,015}, \\ 40 &= T_i \ln \frac{0,09}{0,015}, \end{aligned}$$

$$T_i = 22,324\ 425\ 06 \text{ [K]}.$$

Integrační konstanty  $C_3$ ,  $C_4$  a  $C_5$  určíme z daných okrajových podmínek.

V případě kotouče o vnějším poloměru  $R_k$  s kruhovým otvorem o poloměru  $r_k$  ve středu kotouče, získáme integrační konstanty z okrajových podmínek na vnitřním a vnějším poloměru. Pokud na těchto poloměrech nepůsobí žádné zatížení, obdržíme okrajové podmínky

$$(\sigma_r^T)_{r=r_k} = 0,$$

$$(\sigma_r^T)_{r=R_k} = 0,$$

z nichž zjistíme že

$$C_3 = -\frac{\alpha_l ET_i r_k^2 R_k^2}{2(R_k^2 - r_k^2)} \ln \frac{R_k}{r_k},$$

$$C_4 = \frac{\alpha_l ET_i r_k^2}{8(R_k^2 - r_k^2)} \left[ \left( 1 + 2 \ln \frac{R_k}{r_k} \right) R_k^2 - r_k^2 \right],$$

$$C_5 = -\frac{\alpha_l ET_i r_k^2}{4}.$$

Dosazením do (60) dostaneme

$$\sigma_r^T = \frac{\alpha_l ET_i}{2(1-\nu)} \left[ -\ln \frac{r}{r_k} + \frac{R_k^2}{R_k^2 - r_k^2} \left( 1 - \frac{r_k^2}{r^2} \right) \ln \frac{R_k}{r_k} \right], \quad (62)$$

$$\sigma_\varphi^T = \frac{\alpha_l ET_i}{2(1-\nu)} \left[ -1 - \ln \frac{r}{r_k} + \frac{R_k^2}{R_k^2 - r_k^2} \left( 1 + \frac{r_k^2}{r^2} \right) \ln \frac{R_k}{r_k} \right].$$

Dosazením hodnot obdržíme

$$\sigma_r^T = \frac{0,000\ 012 \cdot 210\ 000 \cdot 22,324\ 425\ 06}{2(1-0,3)}.$$

$$\left[ -\ln \frac{r}{0,015} + \frac{0,09^2}{0,09^2 - 0,015^2} \left( 1 - \frac{0,015^2}{r^2} \right) \ln \frac{0,09}{0,015} \right],$$

$$\sigma_\varphi^T = \frac{0,000\ 012 \cdot 210\ 000 \cdot 22,324\ 425\ 06}{2(1-0,3)}.$$

$$\left[ -1 - \ln \frac{r}{0,015} + \frac{0,09^2}{0,09^2 - 0,015^2} \left( 1 + \frac{0,015^2}{r^2} \right) \ln \frac{0,09}{0,015} \right].$$

Radiální napětí na vnitřním obvodu v místě  $r = r_k$  je po dosazení

$$\sigma_r^T(r_k) = \frac{0,000\ 012 \cdot 210\ 000 \cdot 22,324\ 425\ 06}{2(1-0,3)}.$$

$$\left[ -\ln \frac{0,015}{0,015} + \frac{0,09^2}{0,09^2 - 0,015^2} \left( 1 - \frac{0,015^2}{0,015^2} \right) \ln \frac{0,09}{0,015} \right],$$



$$\sigma_r^T(r_k) = 0 \text{ [MPa]}.$$

Obvodové napětí na vnitřním obvodu v místě  $r = r_k$  je po dosazení

$$\sigma_\varphi^T(r_k) = \frac{0,000\ 012 \cdot 210\ 000 \cdot 22,324\ 425\ 06}{2(1 - 0,3)} \cdot \left[ -1 - \ln \frac{0,015}{0,015} + \frac{0,09^2}{0,09^2 - 0,015^2} \left( 1 + \frac{0,015^2}{0,015^2} \right) \ln \frac{0,09}{0,015} \right],$$

$$\sigma_\varphi^T(r_k) \doteq 108 \text{ [MPa]}.$$

Radiální napětí na vnějším obvodu v místě  $r = R_k$  je po dosazení

$$\sigma_r^T(R_k) = \frac{0,000\ 012 \cdot 210\ 000 \cdot 22,324\ 425\ 06}{2(1 - 0,3)} \cdot \left[ -\ln \frac{0,09}{0,015} + \frac{0,09^2}{0,09^2 - 0,015^2} \left( 1 - \frac{0,015^2}{0,09^2} \right) \ln \frac{0,09}{0,015} \right],$$

$$\sigma_r^T(R_k) = 0 \text{ [MPa]}.$$

Obvodové napětí na vnějším obvodu v místě  $r = R_k$  je po dosazení

$$\sigma_\varphi^T(R_k) = \frac{0,000\ 012 \cdot 210\ 000 \cdot 22,324\ 425\ 06}{2(1 - 0,3)} \cdot \left[ -1 - \ln \frac{0,09}{0,015} + \frac{0,09^2}{0,09^2 - 0,015^2} \left( 1 + \frac{0,015^2}{0,09^2} \right) \ln \frac{0,09}{0,015} \right],$$

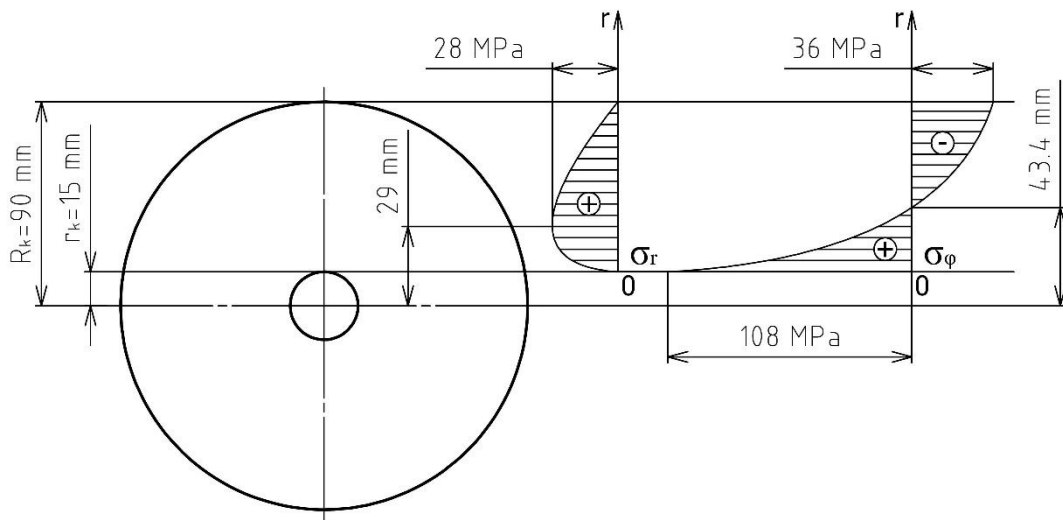
$$\sigma_\varphi^T(R_k) \doteq -36 \text{ [MPa]}.$$

Maximální radiální napětí  $\sigma_r^T$  nalézáme v místě  $r \doteq 0,029$  [m], kde

$$\sigma_r^T(0,029) \doteq 28 \text{ [MPa]}.$$

Minimální obvodové napětí  $\sigma_\varphi^T$  nalézáme v místě  $r \doteq 0,0434$  [m], kde

$$\sigma_\varphi^T(0,0434) \doteq 0 \text{ [MPa]}.$$



Obr. 42. Teplotní napjatost kotouče

Změna poloměru  $\Delta r(r)$  kotouče se určí z následujícího vztahu:

$$\varepsilon_{\varphi}^T = \frac{\Delta(2\pi r)}{2\pi r},$$

$$\varepsilon_{\varphi}^T = \frac{\Delta r}{r},$$

$$\Delta r = \varepsilon_{\varphi}^T r,$$

$$\Delta r = \left[ \frac{1}{E} (\sigma_{\varphi}^T - \nu \sigma_r^T) + \alpha_l \Delta T \right] r. \quad (63)$$

Změna vnitřního poloměru v místě  $r = r_k$  je po dosazení

$$\Delta r(r_k) = \left[ \frac{1}{E} (\sigma_{\varphi}^T(r_k) - \nu \sigma_r^T(r_k)) + \alpha_l \Delta T \right] r_k,$$

$$\Delta r(r_k) = \left[ \frac{1}{210\,000} (108 - 0,3 \cdot 0) + 0,000\,012 \cdot 40 \right] 15,$$

$$\Delta r(r_k) \doteq 0,015 \text{ [mm]}.$$

Změna vnějšího poloměru v místě  $r = R_k$  je po dosazení

$$\Delta r(R_k) = \left[ \frac{1}{E} (\sigma_{\varphi}^T(R_k) - \nu \sigma_r^T(R_k)) + \alpha_l \Delta T \right] R_k,$$

$$\Delta r(R_k) = \left[ \frac{1}{E} (-36 - 0,3 \cdot 0) + 0,000\,012 \cdot 40 \right] 90,$$

$$\Delta r(R_k) \doteq 0,028 \text{ [mm]}.$$

Změna tloušťky  $\Delta s(r)$  kotouče se určí z následujícího vztahu:

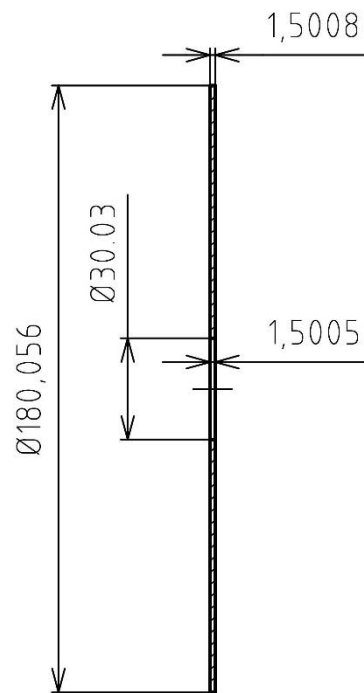
$$\begin{aligned}\varepsilon_s^T &= \frac{1}{E}(-\nu\sigma_r^T - \nu\sigma_\varphi^T) + \alpha_l\Delta T, \\ \varepsilon_s^T &= \frac{d(\Delta s)}{ds}, \\ d(\Delta s) &= \varepsilon_s^T ds, \\ \Delta s &= \int_{-\frac{s}{2}}^{\frac{s}{2}} \varepsilon_s^T ds, \\ \Delta s &= \left[ \frac{1}{E}(-\nu\sigma_r^T - \nu\sigma_\varphi^T) + \alpha_l\Delta T \right] \int_{-\frac{s}{2}}^{\frac{s}{2}} ds, \\ \Delta s &= \left[ -\frac{\nu}{E}(\sigma_r^T + \sigma_\varphi^T) + \alpha_l\Delta T \right] [s]_{-\frac{s}{2}}^{\frac{s}{2}}, \\ \Delta s &= \left[ -\frac{\nu}{E}(\sigma_r^T + \sigma_\varphi^T) + \alpha_l\Delta T \right] s.\end{aligned}\tag{64}$$

Změna tloušťky na vnitřním obvodu v místě  $r = r_k$  je po dosazení

$$\begin{aligned}\Delta s(r_k) &= \left[ -\frac{\nu}{E}(\sigma_r^T(r_k) + \sigma_\varphi^T(r_k)) + \alpha_l\Delta T \right] s, \\ \Delta s(r_k) &= \left[ -\frac{0,3}{210\,000}(0 + 108) + 0,000\,012 \cdot 40 \right] 1,5, \\ \Delta s(r_k) &\doteq 0,000\,5 \text{ [mm]}.\end{aligned}$$

Změna tloušťky na vnějším obvodu v místě  $r = R_k$  je po dosazení

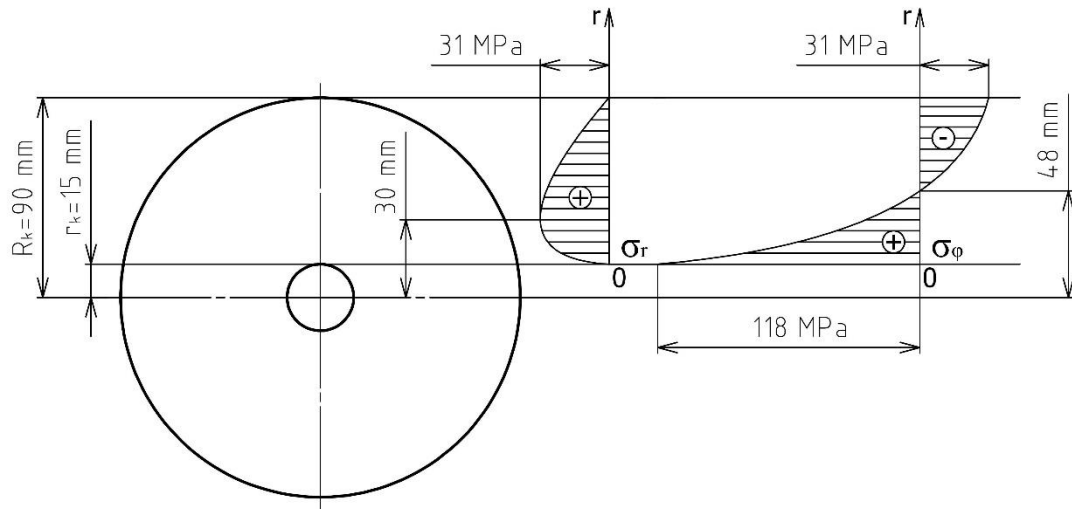
$$\begin{aligned}\Delta s(R_k) &= \left[ -\frac{\nu}{E}(\sigma_r^T(R_k) + \sigma_\varphi^T(R_k)) + \alpha_l\Delta T \right] s, \\ \Delta s(R_k) &= \left[ -\frac{0,3}{210\,000}(0 - 36) + 0,000\,012 \cdot 40 \right] 1,5, \\ \Delta s(R_k) &\doteq 0,000\,8 \text{ [mm]}.\end{aligned}$$



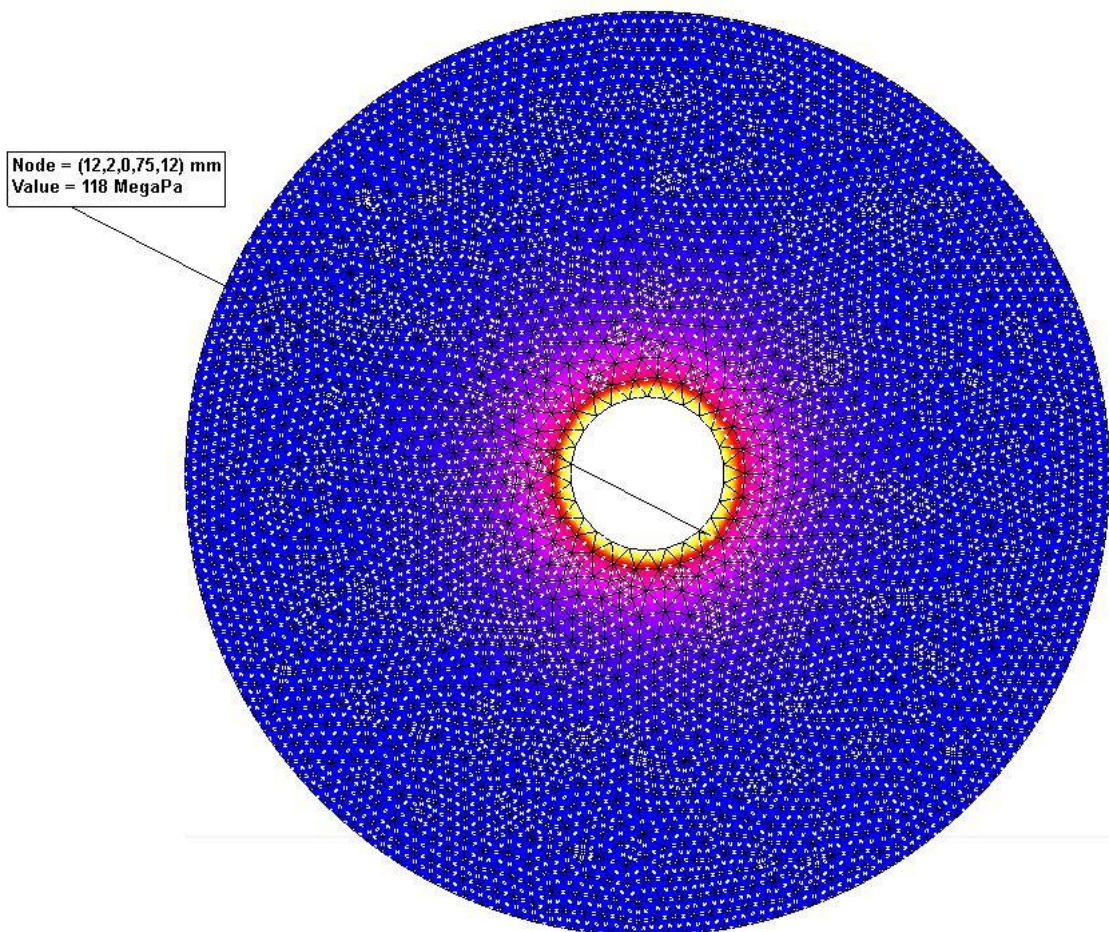
Obr. 43. Změna rozměrů kotouče vlivem teplotní napjatosti

**Celková napjatost rotujícího kotouče**

Celkovou napjatost rotujícího kotouče po zahřátí určíme prostým součtem teplotní napjatosti způsobené gradientem teploty a napjatosti vyvozené odstředivými silami.



Obr. 44. Celková napjatost rotujícího kotouče



Obr. 45. Celková napjatost rotujícího kotouče v programu NX Nastran

Maximální napětí nalézáme na vnitřním obvodu v místě  $r = r_k$ . Protože zde působí pouze obvodové složky napětí  $\sigma_\varphi(r_k)$  a  $\sigma_\varphi^T(r_k)$ , jedná se o napjatost jednoosou. Výsledné napětí  $\sigma_v(r_k)$  dostaneme prostým součtem obou obvodových složek napětí

$$\sigma_v(r_k) = \sigma_\varphi(r_k) + \sigma_\varphi^T(r_k) \text{ [MPa]},$$

$$\sigma_v(r_k) = 10 + 108 \text{ [MPa]},$$

$$\sigma_v(r_k) = 118 \text{ [MPa]}.$$

Správnost výsledků jsme ověřili pomocí metody konečných prvků v programu NX Nastran. Srovnávací napětí dle hypotézy HMM nabývá v jednotlivých uzlových bodech v blízkosti vnitřního obvodu kotouče hodnot blízkých 118 MPa. Výsledek tedy můžeme považovat za správný.

Materiálem kotouče volíme válcovanou ocel 1.2003, jež má dle materiálových listů mez kluzu v tahu

$$\sigma_{kt} = 700 \text{ [MPa]}.$$

Součinitel bezpečnosti vůči mezi kluzu je dán vztahem

$$k_K = \frac{\sigma_{kt}}{\sigma_v(r_k)} \text{ [1]}, \quad (65)$$

a volí se v intervalu

$$k_K = (1,5 \text{ až } 2) \text{ [1]}.$$

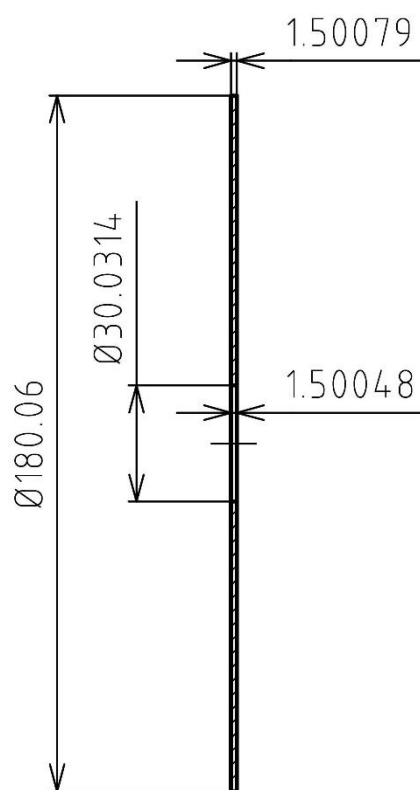
Po dosazení dostaneme

$$k_K = \frac{700}{118} \text{ [1]},$$

$$k_K \doteq 6 \text{ [1]}.$$

Součinitel bezpečnosti vyhovuje.

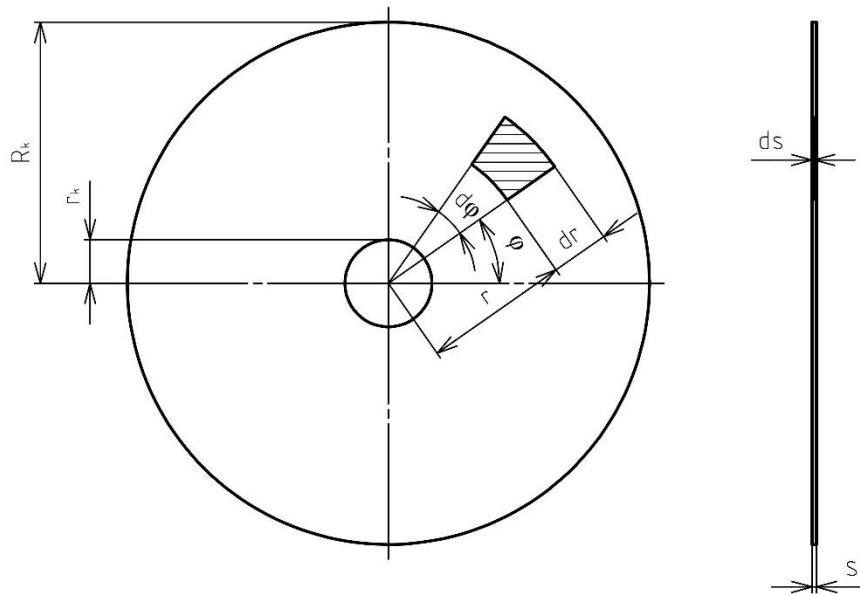
Celková změna rozměrů rotujícího kotouče po zahřátí je superpozicí změn rozměrů způsobených gradientem teploty a změn rozměrů vyvozených odstředivými silami.



*Obr. 46. Celková změna rozměrů rotujícího kotouče*

[7, 20, 22, 25, 30, 33, 34, 35, 36, 37]

### 5.3 Určení výkonu potřebného k roztočení



Obr. 47. Schéma pro výpočet momentu setrvačnosti kotouče

Objem elementu kotouče je dán vztahem

$$dV_k = r d\varphi dr ds \text{ [m}^3\text{]}. \quad (66)$$

Integrací (66) obdržíme

$$\int dV_k = \int_0^{2\pi} r d\varphi \int_{r_k}^{R_k} dr \int_0^s ds,$$

$$V_k = [\varphi]_0^{2\pi} [s]_0^s \int_{r_k}^{R_k} r dr,$$

$$V_k = 2\pi s \left[ \frac{r^2}{2} \right]_{r_k}^{R_k},$$

$$V_k = \pi s (R_k^2 - r_k^2).$$

Po dosazení dostaneme

$$V_k = \pi 0,0015 (0,09^2 - 0,015^2) \text{ [m}^3\text{]},$$

$$V_k \doteq 0,000037 \text{ [m}^3\text{]}.$$

Celková hmotnost kotouče je potom



$$m_k = \rho V_k \text{ [kg]}. \quad (67)$$

Po dosazení obdržíme

$$m_k = 7\,850 \cdot 0,000\,037 \text{ [kg]},$$

$$m_k \doteq 0,29 \text{ [kg]}.$$

Moment setrvačnosti homogenního tělesa je dán vztahem

$$I = \int_{(m)} r^2 dm \text{ [kg} \cdot \text{m}^2\text{]}. \quad (68)$$

Při výpočtu momentu setrvačnosti kotouče vyjdeme z prosté úměry

$$\frac{dm}{m_k} = \frac{dS_k}{S_k}. \quad (69)$$

Obsah plochy elementu kotouče je dán vztahem

$$dS_k = r d\varphi dr \text{ [m}^2\text{]}. \quad (70)$$

Integrací (70) obdržíme

$$\int dS_k = \int_0^{2\pi} r d\varphi \int_{r_k}^{R_k} dr,$$

$$S_k = [\varphi]_0^{2\pi} \int_{r_k}^{R_k} r dr,$$

$$S_k = 2\pi \left[ \frac{r^2}{2} \right]_{r_k}^{R_k},$$

$$S_k = \pi(R_k^2 - r_k^2).$$

Dosazením do (69) dostaneme

$$\frac{dm}{m_k} = \frac{r d\varphi dr}{\pi(R_k^2 - r_k^2)},$$

$$dm = \frac{m_k r d\varphi dr}{\pi(R_k^2 - r_k^2)}.$$

Po dosazení do (68) obdržíme

$$I = \int_{(m)} r^2 \frac{m_k r d\varphi dr}{\pi(R_k^2 - r_k^2)},$$

$$I = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_{r_k}^{R_k} r^3 dr \frac{m_k}{\pi(R_k^2 - r_k^2)},$$

$$I = [\varphi]_0^{2\pi} \left[ \frac{r^4}{4} \right]_{r_k}^{R_k} \frac{m_k}{\pi(R_k^2 - r_k^2)},$$

$$I = 2\pi \frac{1}{4} (R_k^4 - r_k^4) \frac{m_k}{\pi(R_k^2 - r_k^2)},$$

$$I = \frac{1}{2} m_k \frac{(R_k^2 - r_k^2)(R_k^2 + r_k^2)}{(R_k^2 - r_k^2)},$$

$$I = \frac{1}{2} m_k (R_k^2 + r_k^2) \text{ [kg} \cdot \text{m}^2\text{]}.$$

Po dosazení dostaneme

$$I = \frac{1}{2} \cdot 0,29 (0,09^2 + 0,015^2) \text{ [kg} \cdot \text{m}^2\text{]},$$

$$I \doteq 0,001\,21 \text{ [kg} \cdot \text{m}^2\text{]}.$$

Práce je rovna změně kinetické energie

$$A_k = \Delta E_k \text{ [J]}. \quad (71)$$

Změnu kinetické energie vyjadřuje vztah

$$\Delta E_k = E_{k_k} - E_{k_p} \text{ [J]}. \quad (72)$$

Kinetická energie rotujícího tělesa je dána vztahem

$$E_{k_k} = \frac{1}{2} I \omega^2 \text{ [J]}. \quad (73)$$

Při nulové počáteční úhlové rychlosti kotouče, kdy  $E_{k_p} = 0$  [J] obdržíme po dosazení

$$\Delta E_k = \frac{1}{2} I \omega^2 - 0 \text{ [J]},$$

$$\Delta E_k = \frac{1}{2} I \omega^2 \text{ [J]}.$$

Po úpravě podle (71) obdržíme

$$A_k = \frac{1}{2} I \omega^2 \text{ [J]},$$

a po dosazení dostaneme

$$A_k = \frac{1}{2} \cdot 0,001 \, 21 (2\pi 70)^2 \text{ [J]},$$

$$A_k \doteq 117 \text{ [J]}.$$

Výkon je dán vztahem

$$P_k = \frac{A_k}{t_k} \text{ [W]}. \quad (74)$$

Jestliže požadujeme dosažení úhlové rychlosti  $\omega$  za čas

$$t_k = 1 \text{ [s]},$$

výkon potřebný k dosažení úhlové rychlosti kotouče  $\omega$  za čas  $t_k$  je po dosazení

$$P_k = \frac{117}{1} \text{ [W]},$$

$$P_k = 117 \text{ [W]}.$$

[37, 38, 39]

## ZÁVĚR

Předložená bakalářská práce vznikla za účelem optimalizace návrhu kotoučových pil a bezpečné konstrukce pilových kotoučů. Tento text je tedy určen především konstruktérům kotoučových pil a pilových kotoučů.

V práci byly určeny všechny parametry pilového kotouče nutné pro jeho konstrukci. Dále byly určeny parametry pro podélné řezání středně tvrdého dřeva pilovým kotoučem včetně výkonu potřebného k řezání.

Výpočtem byly stanoveny kritické otáčky, při kterých hrozí nebezpečí roztržení pilového kotouče. Zde je nutno podotknout, že idealizovaný výpočet kritických otáček není přesný. Na kritické otáčky má vliv celá řada faktorů, a proto se jejich přesnější hodnoty pro konkrétní kotouče stanovují experimentálně. Nelze tedy absolutizovat význam teoretických výpočtů bez jejich konfrontace se skutečností a bez jejich správné fyzikální interpretace. Zkoušky však ukazují, že skutečné hodnoty kritických otáček bývají vyšší, než vypočtené. Výpočet tedy můžeme považovat za dostatečně bezpečný.

Dále byla provedena pevnostní kontrola pilového kotouče. Pro určení napjatosti pilového kotouče byl zvolen výpočtový model rotujícího kotouče, doplněný o zatížení gradientem teploty. Analýzou napjatosti bylo zjištěno, že maximální napětí způsobené gradientem teploty je přibližně desetkrát větší než maximální napětí vyvozené odstředivými silami. Tato maximální napětí jsou obvodová a působí na vnitřním obvodu kotouče. Teplotní napjatost pilového kotouče tedy nelze z důvodu její dominance nad napjatostí, jež je vyvozena odstředivými silami v žádném případě zanedbávat.

Řezání dřeva je vzhledem k jeho nehomogenitě a anizotropii operací, kdy je nemožné přesně stanovit řezné podmínky. Řezné podmínky závisí na směru řezání, druhu dřeva, jeho stavbě, vlhkosti a teplotě (zmrzlé dřevo). Každý z těchto činitelů vyžaduje specifické řezné podmínky a profil ozubení pilového kotouče. Pro správné řezání dřeva je nezbytná dobrá připravenost pilového kotouče.

Pilové kotouče se opatřují dilatačními a odhlučňovacími drážkami, což má spolu s jejich válcováním vliv na celkovou napjatost a kritické otáčky. Dále se kombinují různé profily ozubení s omezovači třisek pro dosažení optimálních řezných podmínek. Problematika řezání dřeva pilovým kotoučem stále nabízí prostor pro další vývoj. Je autorovým přáním, aby tato práce byla pro čtenáře přínosem k tvůrčí technické činnosti.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] MATOVIČ, A. *Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva a materiálů na bázi dřeva*. 1. vyd. Brno: Vysoká škola zemědělská v Brně, 1993. 212 s. ISBN 80-7157-086-9.
- [2] GENDELOVÁ, L., HORÁČEK, P. a ŠLEZINGEROVÁ, J. *Nauka o dřevě*. 3., nezměn. vyd. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 2009. 176 s. ISBN 978-80-7375-312-2.
- [3] PECINA, P. a PECINA, J. *Materiály a technologie-dřevo*. 1. vyd. Brno: Masarykova univerzita, 2006. 132 s. ISBN 80-210-4013-0.
- [4] MATOVIČ, A. *Nauka o dřevě*. 1. vyd. Brno: Vysoká škola zemědělská v Brně, 1977. 159 s.
- [5] HORÁČEK, P. *Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva I. 2.*, přeprac. vyd. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 2008. 124 s. ISBN 978-80-7375-169-2.
- [6] FEYNMAN, R., LEIGHTON, R. a SANDS, M. *Feynmanovy přednášky z fyziky – revidované vydání – 2. díl*. Přel. I. Štoll 2. vyd. Praha: Fragment, 2013. 806 s. Přel. z: *Lectures on Physics 2*. ISBN 978-80-253-1643-6.
- [7] HÁJEK, E., REIF, P. a VALENTA, F. *Pružnost a pevnost I*. 1. vyd. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1988. 429 s.
- [8] ŠUBA, O. *Mechanické chování těles*. 4. vyd. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2009. 103 s. ISBN 978-80-7318-792-7.
- [9] KŘIVÁNEK, I. a BUCHAR, J. *Deformace a lom dřeva při rázovém zatěžování*. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 2001. 48 s. ISBN 80-7157-501-1.
- [10] PROKEŠ, S. *Obrábění dřeva a nových hmot ze dřeva*. 2., přeprac. vyd. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1978. 583 s.
- [11] JANÍČEK, F. *Strojnictví – Stroje a zařízení pro zpracování dřeva*. 2., uprav. vyd. Praha: Sobotáles, 2000. 377 s. ISBN 80-85920-69-7.
- [12] ŘASA, J. a GABRIEL, V. *Strojírenská technologie 3 – 1. díl, Metody, stroje a nástroje pro obrábění*. 2. vyd. Praha: Scientia, 2005. 256 s. ISBN 80-7183-337-1.

- [13] CSANÁDY, E. a MAGOSS, E. *Mechanics of Wood Machining*. 2nd ed. Berlin: Springer, 2013. 199 s. ISBN 978-3-642-29954-4.
- [14] PROKEŠ, S. *Údržba dřevoobráběcích nástrojů*. 1. vyd. Praha: Brázda, 1991. 233 s. ISBN 80-209-0191-4.
- [15] BARCÍK, Š. et al. *Dřevoobráběcí nástroje-údržba a provozování*. 1. vyd. Praha: Powerprint, 2013. 355 s. ISBN 978-80-87415-80-1.
- [16] *Nástroje na obrábění dřeva a nových hmot*. 1. vyd. Ústí nad Labem: Dům techniky ČSVTS Ústí nad Labem, 1987. 117 s.
- [17] KVASNIČKA, I. et al. *Obráběcí nástroje*. 1. vyd. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1998. 98 s. ISBN 80-01-01755-9.
- [18] TIMOSHENKO, S. *Vibration Problems in Engineering*. 2nd ed. New York: D. Van Nostrand Company, 1937. 470 s.
- [19] ŠREJTR, J. *Statika*. 2., přeprac. vyd. Praha: SNTL, 1963. 231 s.
- [20] HÖSCHL, C. *Pružnost a pevnost ve strojnictví*. 1. vyd. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1971. 375 s.
- [21] STODOLA, A. *Dampf- und Gas-Turbinen*. 6th ed. Berlin: Springer, 1924. 1138 s.
- [22] TIMOSHENKO, S. a GOODIER, J. *Theory of Elasticity*. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 1951. 506 s.
- [23] MICHALEC, J. et al. *Pružnost a pevnost II*. 2. vyd. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. 215 s. ISBN 80-01-02375-3.
- [24] HÖSCHL, C. *Pružnost a pevnost II*. 1. vyd. Liberec: Vysoká škola strojní a textilní v Liberci, 1992. 182 s. ISBN 80-7083-104-9.
- [25] LENERT, J. *Pružnost a pevnost II*. 2. vyd. Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2009. 173 s. ISBN 978-80-248-1959-4.
- [26] SERENSEN, S., KOGAJEV, V. a ŠNEJDEROVIČ, R. *Únosnost a pevnostní výpočty strojních součástí*. Přel. I. Nedbal. a M. Svoboda. 1. vyd. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1967. 630 s. Přel. z: *Nesuščaja sposobnost' i rasčety detalej mašin na pročnost'*.
- [27] JONES, R. *Deformation Theory of Plasticity*. 1st ed. Blacksburg: Bull Ridge Publishing, 2009. 622 s. ISBN 978-0-9787223-1-9.

- [28] BIEZENO, C. a GRAMMEL, R. *Technische Dynamik: Zweiter Band Dampfmaschinen und Brennkraftmaschinen*. 2nd ed. Berlin: Springer, 1953. 464 s.
- [29] PEŠINA, E., REIF, P. a VALENTA, F. *Sbírka příkladů z pružnosti a pevnosti*. 1. vyd. Praha: SNTL – Státní nakladatelství technické literatury, 1964. 494 s.
- [30] BAŽANT, Z., NEDOMA, A. a SPÁLA, K. *Nauka o pružnosti a pevnosti*. 3., oprav. a dopl. vyd. Praha: Česká matice technická, 1944. 507 s.
- [31] NĚMEC, J. *Nauka o tuhosti a pevnosti materiálu*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1963. 232 s.
- [32] SHIGLEY, J., MISCHKE, CH. a BUDYNAS, R. *Konstruování strojních součástí*. Přel. M. Hartl, M. Vlk, et al. 1. vyd. Brno: VUTIUM, 2010. 1159 s. Přel. z: *Mechanical Engineering Design*. ISBN 978-80-214-2629-0.
- [33] LICHTÁG, J. *Pilový kotouč v procesu podélného rozřezávání dřeva*. Disertační práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 1999. 20 s. ISBN 80-214-1554-1.
- [34] HETNARSKI, R. a ESLAMI, R. *Thermal Stresses – Advanced Theory and Applications*. 1st ed. Dordrecht: Springer Netherlands, 2009. 560 s. ISBN 978-1-4020-9246-6.
- [35] MICHALEC, J. et al. *Pružnost a pevnost I*. 2. vyd. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. 320 s. ISBN 80-01-02359-1.
- [36] HÖSCHL, C. *Pružnost a pevnost I*. 1. vyd. Liberec: Vysoká škola strojní a textilní v Liberci, 1992. 203 s. ISBN 80-7083-087-5.
- [37] HALLIDAY, D., RESNICK, R. a WALKER, J. *Fyzika*. Přel. M. Černý, P. Dub, et al. 2., přeprac. vyd. Brno: VUTIUM, 2013. 1248 s. Přel. z: *Fundamentals of Physics*. ISBN 978-80-214-4123-1.
- [38] DOSTÁL, J. a JANÁČEK, Z. *Fyzika*. 2. vyd. Zlín: Univerzita Tomáše Bati, 2003. 265 s. ISBN 80-7318-115-0.
- [39] FEYNMAN, R., LEIGHTON, R. a SANDS, M. *Feynmanovy přednášky z fyziky – revidované vydání – 1. díl*. Přel. I. Štoll. 2. vyd. Praha: Fragment, 2013. 732 s. Přel. z: *Lectures on Physics I*. ISBN 978-80-253-1642-9.

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

|            |  |
|------------|--|
| $h$        | Řezná výška.   |
| $D_{\min}$ | Minimální průměr pilového kotouče.                                       |
| $h_s$      | Vzdálenost horní hrany pracovního stolu od osy otáčení pilového kotouče. |
| $p$        | Minimální přesah pilového kotouče nad obrobkem.                          |
| $D_k$      | Průměr pilového kotouče.   |
| $s$        | Tloušťka pilového kotouče.   |
| $D_p$      | Průměr upínacích přírub pilového kotouče.                                |
| $\alpha$   | Úhel hřbetu.   |
| $\beta$    | Úhel břitu.  |
| $\gamma$   | Úhel čela.   |
| $t$        | Rozteč zubů pilového kotouče.  |
| $z$        | Počet zubů pilového kotouče.   |
| $h_z$      | Výška vlčího profilu ozubení pilového kotouče.                           |
| $r$        | Poloměr zaoblení mezery zubů vlčího profilu ozubení pilového kotouče.    |
| $l_h$      | Délka hřbetní hrany vlčího profilu ozubení pilového kotouče.             |
| $d_k$      | Upínací průměr pilového kotouče.   |
| $v$        | Řezná rychlost.  |
| $\omega$   | Úhlová rychlost.   |
| $n$        | Otáčky pilového kotouče.   |
| $R_k$      | Poloměr pilového kotouče.  |
| $f_z$      | Posuv na břit.   |
| $v_f$      | Rychlost posuvu obrobku do místa řezu.                                   |
| $a_{\min}$ | Minimální tloušťka třísky.   |
| $a_{\max}$ | Maximální tloušťka třísky.   |



|                 |  |
|-----------------|--|
| $a_{stř}$       | Střední tloušťka třísky.                                       |
| $\varphi_{stř}$ | Střední úhel styku.  |
| $\varphi$       | Středový úhel.   |
| $l$             | Délka třísky.  |
| $z_z$           | Počet zubů v záběru.   |
| $t_{ř}$         | Čas řezání.  |
| $\Delta q$      | Zvětšení poloměru zaoblení břitu.                              |
| $q$             | Poloměr zaoblení otupeného břitu.                              |
| $q_0$           | Poloměr zaoblení ostrého břitu.                                |
| $\theta$        | Koeficient zvětšení poloměru zaoblení břitu.                   |
| $a_q$           | Koeficient otupení.  |
| $K_m$           | Měrný řezný odpor.   |
| $k_m$           | Koeficient pro výpočet měrného řezného odporu.                 |
| $p_m$           | Koeficient pro výpočet měrného řezného odporu.                 |
| $k_t$           | Koeficient pro výpočet měrného řezného odporu.                 |
| $b$             | Šířka břitu pilového kotouče.                                  |
| $A$             | Koeficient pro výpočet měrného řezného odporu.                 |
| $\delta$        | Úhel řezu.   |
| $B$             | Koeficient pro výpočet měrného řezného odporu.                 |
| $V_m$           | Koeficient pro výpočet měrného řezného odporu.                 |
| $c$             | Rozšíření břitu nad tloušťku pilového kotouče na jednu stranu. |
| $P$             | Řezný výkon.   |
| $F_{ř}$         | Celková řezná síla.  |
| $f_{st}$        | Statický rezonanční kmitočet.                                  |
| $\alpha_a$      | Koeficient pro výpočet statického rezonančního kmitočtu.       |

|                         |   |
|-------------------------|---|
| $g_n$                   | Normální tíhové zrychlení.                                  |
| $\rho$                  | Hustota materiálu pilového kotouče.                         |
| $D$                     | Ohybová tuhost.   |
| $E$                     | Youngův modul.  |
| $\nu$                   | Poissonův poměr.  |
| $m$                     | Počet uzlových průměrů obrazce chvění.                      |
| $k$                     | Počet uzlových kružnic.                                     |
| $f_{\text{dyn}}$        | Dynamický rezonanční kmitočet.                              |
| $M$                     | Koeficient pro výpočet dynamického rezonančního kmitočtu.   |
| $n_{\text{kr}}$         | Kritické otáčky pilového kotouče.                           |
| $r_k$                   | Poloměr upínacího průměru pilového kotouče.                 |
| $F_o$                   | Odstředivá síla.  |
| $\sigma_r$              | Radiální napětí v polárních souřadnicích.                   |
| $\sigma_\varphi$        | Obvodové napětí v polárních souřadnicích.                   |
| $\varepsilon_r$         | Poměrná deformace v radiálním směru.                        |
| $\varepsilon_\varphi$   | Poměrná deformace v obvodovém směru.                        |
| $\varepsilon_s$         | Poměrná deformace tloušťky.                                 |
| $\alpha_l$              | Koeficient lineární teplotní roztažnosti materiálu kotouče. |
| $t_{r_k}$               | Teplota kotouče na vnitřním obvodu.                         |
| $t_{R_k}$               | Teplota kotouče na vnějším obvodu.                          |
| $\Delta T$              | Nárůst teploty materiálu kotouče.                           |
| $\sigma_r^T$            | Radiální teplotní napětí v polárních souřadnicích.          |
| $\sigma_\varphi^T$      | Obvodové teplotní napětí v polárních souřadnicích.          |
| $\varepsilon_r^T$       | Poměrná teplotní deformace v radiálním směru.               |
| $\varepsilon_\varphi^T$ | Poměrná teplotní deformace v obvodovém směru.               |

---

|                   |   |
|-------------------|---|
| $T_i$             | Konstanta rozdělení tepla.  |
| $\varepsilon_s^T$ | Poměrná teplotní deformace tloušťky.                              |
| $\sigma_v(r_k)$   | Výsledné napětí.  |
| $\sigma_{Kt}$     | Mez kluzu v tahu.   |
| $k_K$             | Součinitel bezpečnosti vůči mezi kluzu.                           |
| $V_k$             | Objem kotouče.  |
| $m_k$             | Hmotnost kotouče.   |
| $S_k$             | Plocha kotouče.   |
| $I$               | Moment setrvačnosti kotouče.                                      |
| $A_k$             | Práce konaná rotujícím kotoučem.                                  |
| $\Delta E_k$      | Změna kinetické energie.  |
| $E_{kK}$          | Kinetická energie koncová.  |
| $E_{kp}$          | Kinetická energie počáteční.                                      |
| $P_k$             | Výkon potřebný k roztočení kotouče.                               |
| $t_k$             | Čas, za který má být dosažena požadovaná úhlová rychlost kotouče. |

## SEZNAM OBRÁZKŮ

|   |    |
|---|----|
| <i>Obr. 1. Roviny a směry pružné symetrie dřeva [1]</i> .....                             | 12 |
| <i>Obr. 2. Složky napětí ve třech navzájem kolmých rovinách</i> .....                     | 14 |
| <i>Obr. 3. Obecný tvar pracovního diagramu pro dřevo [1]</i> .....                        | 16 |
| <i>Obr. 4. Zkušební tělesa pro stanovení Poissonových čísel</i> .....                     | 18 |
| <i>Obr. 5. Příklady působení smyku na dřevo [1]</i> .....                                 | 24 |
| <i>Obr. 6. Kombinace různých orientací vzorků a zatěžovacích sil [9]</i> .....            | 28 |
| <i>Obr. 7. Hlavní směry řezání [13]</i> .....   | 30 |
| <i>Obr. 8. Silové poměry při oddělování třísky [13]</i> .....                             | 31 |
| <i>Obr. 9. Hlavní plochy při obrábění [10]</i> .....                                      | 32 |
| <i>Obr. 10. Základní směry řezání [12]</i> .....  | 33 |
| <i>Obr. 11. Kinematické schéma jednotlivých způsobů řezání pilami [12]</i> .....          | 34 |
| <i>Obr. 12. Působení řezných sil na zub pilového kotouče [10]</i> .....                   | 35 |
| <i>Obr. 13. Řezné úhly a nástrojové roviny [14]</i> .....                                 | 39 |
| <i>Obr. 14. Funkční část nástroje [14]</i> .....  | 40 |
| <i>Obr. 15. Funkční část nástroje [14]</i> .....  | 40 |
| <i>Obr. 16. Rozvedené zuby [10]</i> .....   | 42 |
| <i>Obr. 17. Pěchované a rozvedené zuby [10]</i> .....                                     | 42 |
| <i>Obr. 18. Druhy pilových kotoučů [12]</i> .....   | 45 |
| <i>Obr. 19. Charakteristické úhly dřevoobráběcích nástrojů [13]</i> .....                 | 46 |
| <i>Obr. 20. Tvary zubů pilových kotoučů [12]</i> .....                                    | 47 |
| <i>Obr. 21. Tvary zubů pilových kotoučů [11]</i> .....                                    | 47 |
| <i>Obr. 22. Pilové kotouče podle provedení břitů [12]</i> .....                           | 48 |
| <i>Obr. 23. Konstrukce břitových destiček ze SK pájených na pilové kotouče [10]</i> ..... | 48 |
| <i>Obr. 24. Tvary zubů pilových kotoučů [16]</i> .....                                    | 49 |
| <i>Obr. 25. Tvary zubů pilových kotoučů [16]</i> .....                                    | 49 |
| <i>Obr. 26. Příklad provedení omezovače třísek [12]</i> .....                             | 50 |
| <i>Obr. 27. Rozložení napětí v pilovém kotouči [10]</i> .....                             | 51 |
| <i>Obr. 28. Podélné řezání dřeva pilovým kotoučem [10]</i> .....                          | 54 |
| <i>Obr. 29. Vlčí profil ozubení [10]</i> .....  | 56 |
| <i>Obr. 30. Způsob oddělování třísky pilovým kotoučem</i> .....                           | 62 |
| <i>Obr. 31. Určení tloušťky třísky</i> .....  | 63 |
| <i>Obr. 32. Nomogram pro zjištění hodnot A, B [10]</i> .....                              | 67 |

|   |    |
|---|----|
| <i>Obr. 33. Nomogram pro zjištění hodnoty <math>V_m</math> [10]</i> .....             | 67 |
| <i>Obr. 34. Nomogram pro zjištění hodnoty <math>p_m</math> [10]</i> .....             | 68 |
| <i>Obr. 35. Ozubení pilového kotouče</i> .....  | 71 |
| <i>Obr. 36. Pilový kotouč</i> .....   | 73 |
| <i>Obr. 37. Rotující kotouč</i> .....   | 76 |
| <i>Obr. 38. Schéma pro určení rovnice rovnováhy elementu rotujícího kotouče</i> ..... | 78 |
| <i>Obr. 39. Deformace elementu kotouče v polárních souřadnicích</i> .....             | 79 |
| <i>Obr. 40. Napjatost rotujícího kotouče vlivem odstředivých sil</i> .....            | 83 |
| <i>Obr. 41. Změna rozměrů rotujícího kotouče vlivem odstředivých sil</i> .....        | 85 |
| <i>Obr. 42. Teplotní napjatost kotouče</i> .....                                      | 90 |
| <i>Obr. 43. Změna rozměrů kotouče vlivem teplotní napjatosti</i> .....                | 92 |
| <i>Obr. 44. Celková napjatost rotujícího kotouče</i> .....                            | 93 |
| <i>Obr. 45. Celková napjatost rotujícího kotouče v programu NX Nastran</i> .....      | 93 |
| <i>Obr. 46. Celková změna rozměrů rotujícího kotouče</i> .....                        | 95 |
| <i>Obr. 47. Schéma pro výpočet momentu setrvačnosti kotouče</i> .....                 | 96 |

**SEZNAM TABULEK**

|  |    |
|--|----|
| <i>Tab. 1. Moduly pružnosti v tlaku, tahu a statickém ohybu [1].....</i>               | 17 |
| <i>Tab. 2. Poissonova čísla vybraných druhů dřeva [1] .....</i>                        | 19 |
| <i>Tab. 3. Hodnoty meze pevnosti v tlaku ve směru vláken [1].....</i>                  | 20 |
| <i>Tab. 4. Průměrné hodnoty konvenční meze pevnosti v tlaku napříč vláken [1].....</i> | 21 |
| <i>Tab. 5. Hodnoty meze pevnosti v tahu ve směru vláken [1].....</i>                   | 22 |
| <i>Tab. 6. Hodnoty meze pevnosti v tahu napříč vláken [1].....</i>                     | 23 |
| <i>Tab. 7. Hodnoty meze pevnosti v ohybu [1] .....</i>                                 | 24 |
| <i>Tab. 8. Hodnoty meze pevnosti ve smyku ve směru vláken [1] .....</i>                | 25 |
| <i>Tab. 9. Hodnoty meze pevnosti ve smyku napříč vláken [1].....</i>                   | 26 |
| <i>Tab. 10. Hodnoty meze pevnosti ve smyku napříč vláken v příčné rovině [1].....</i>  | 26 |
| <i>Tab. 11. Hodnoty statické tvrdosti [1] .....</i>                                    | 27 |
| <i>Tab. 12. Hodnoty rázové houževnatosti [9] .....</i>                                 | 29 |

## SEZNAM PŘÍLOH

P I Výrobní výkres pilového kotouče