ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

FAKULTA LESNICKÁ A DŘEVAŘSKÁ

KATEDRA ZPRACOVÁNÍ DŘEVA A BIOMATERIÁLŮ

DISERTAČNÍ PRÁCE

2019 **Ing. Jiří KUBŠ**

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

FAKULTA LESNICKÁ A DŘEVAŘSKÁ

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů

TERMICKY MODIFIKOVANÉ DŘEVO (THERMOWOOD®) VLIV NEZÁVISLÝCH PARAMETRŮ (TECHNICKO-TECHNOLOGICKÝCH) NA ZÁVISLÉ PARAMETRY (ENERGETICKÉ A KVALITATIVNÍ) PŘI ROVINNÉM FRÉZOVÁNÍ

DISERTAČNÍ PRÁCE

Autor: Ing. Jiří Kubš

Školitel: doc. Ing. Milan Gaff, PhD.

2019

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem disertační práci na téma **„Termicky modifikované dřevo (Thermowood®) vliv nezávislých parametrů (technicko-technologických) na závislé parametry (energetické a kvalitativní) při rovinném frézování“** vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací a doporučení školitele. Souhlasím se zveřejněním disertační práce dle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách v platném znění, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Podpis autora práce

V Praze dne: 29. 07. 2019 …..…….…….....

Poděkování

Chtěl bych poděkovat vedoucímu disertační práce panu doc. Ing. Milanu Gaffovi, PhD. za vstřícný přístup a poskytnutí rad a doporučení, ze kterých jsem čerpal při zpracování práce.

Abstrakt

Nárůst požadavků na výrobu stále náročnějších a složitějších produktů vyžaduje vývoj dokonalejších, novějších a energeticky úspornějších technologií výroby a materiálů. S tím souvisí také větší využití dřeva např. pro termickou modifikaci tak, aby i místní dřeviny dosáhli jiných požadovaných vlastností. Poznatky o interakci různých faktorů, jakou jsou například energetická náročnost při obrábění v porovnáním s obrobeným povrchem, nejsou v současnosti příliš prozkoumané.

Disertační práce je zaměřena na termicky modifikované dřevo vyrobené při teplotě termické modifikace 160, 180 a 210 °C. Zástupci dřevin byly vybrány domácí smrk ztepilý *(Picea abies* L.*)* a dub letní *(Quercus robur* F.*).* Po termické modifikaci se vyhodnotili změny v chemickém složení při každé teplotě termické modifikace a jak chemické složení ovlivňuje spotřebu elektrické energie. Dále se zkušební vzorky za pomoci měření okamžité spotřeby elektrického příkonu opracovali rovinným frézováním při různých nastaveních podávací rychlosti 4, 8, 11 m/min, řezné rychlosti 20, 30, 40 m/s a úhlu řezného čela nástroje 15, 20, 25°. Dále se na vzorcích pomocí kontaktní a bezkontaktní metody měření kvality opracovaného povrchu zjišťovalo, jak nastavené parametry rovinného frézovaní ovlivňují kvalitu opracovaného povrchu daných dřevin.

Z výsledků disertační práce je patrné, že termická modifikace obou dřevin ve všech měřených teplotních stupních výrazně ovlivňuje chemické složení dřeva. Co se týká vlivu chemického složení na spotřebu elektrické energie při rovinném frézování, tak závislost se neprokázala. Největší vliv na spotřebu ze všech testovaných parametrů má řezná rychlost, kde se zvyšující se řeznou rychlostí, zvyšuje také řezný příkon stroje. Pokud se zaměříme pouze na kvalitu opracovaného povrchu, tak největší vliv má posuvná rychlost, která se se zvyšující posuvnou rychlostí klesá u obou dřevin. Výsledky měření kontaktního a bezkontaktního (laserového měření) se ukázali dosti odlišné, ale vykazovali stejné trendy. Hlavní důvod realizace této práce je ovšem interakcí všech faktorů stanovit optimální technologické nastavení pří rovinném frézování. Při rovinném frézování smrku ztepilého je optimální nastavení řezné rychlosti na 20 m/s, úhel čela 25°, posuvná rychlost 4 m/min a opracování termicky nemodifikovaného smrku, u dubu letního se ukázalo optimální nastavení řezné rychlosti 20 m/s, úhel čela 20°, posuvná rychlost 4 m/min a opracování termicky modifikovaného dubu na teplotu 180 °C.

Klíčová slova: Rovinné frézování, Thermowood, řezný příkon, energetická náročnost při frézování, chemické složení, drsnost, vlnitost.

Abstrakt v anglickém jazyce

The increasing demand for increasingly sophisticated and complex products requires the development of improved, newer and more energy-efficient production technologies and materials. This is also associated with greater use of wood, for example, for thermal modification, so that the local woody species achieve other desired properties.

The dissertation thesis is focused on thermally modified wood produced at the temperature modification of 160, 180 and 210°C. Representatives of the tree species were selected domestic spruce *(Picea abies* L.*)* and oak *(Quercus robur* F.*).* After the thermal modification, changes in the chemical composition at each thermal modification temperature and how the chemical composition affects cutting power were evaluated. In addition, the test specimens were machined by plane milling at various feed rate of 4, 8, 11 m/min, cutting speed of 20, 30, 40 m/s, and cutting face angle of 15, 20, 25° by measuring instantaneous cutting power. Furthermore, the samples using the contact and non-contact (laser) method for measuring the quality of the machined surface were examined how the set parameters of planar milling affect the quality of the machined surface of the wood species.

The results of the dissertation work show that the thermal modification of both wood types in all measured temperature stages significantly affects the chemical composition of wood. Regarding the influence of chemic composition on the power consumption during milling, the dependence was not proved. The greatest influence on the consumption of all tested parameters is the cutting speed, where the increasing cutting speed also increases the cutting power of the machine. If we focus only on the quality of the machined surface, the biggest influence is the feed rate, which decreases with both trees as the feed rate increases. Contact and non-contact (laser) measurements showed quite different results but showed the same trends. The main reason for this work is, however, the interaction of all factors to determine the optimal technological setting for face milling. For flat milling of spruce, the optimum cutting speed setting is 20 m/s, the rake angle is 25°, the sliding speed is 4 m/min and the thermally unmodified spruce is processed. the oak showed optimal setting of cutting speed 20 m /s, rake angle 20°, sliding speed 4 m/min and treatment of thermally modified oak to 180°C.

Keywords: Surface milling, Thermowood, cutting power, chemical composition, roughness, waviness.

Obsah

Seznam ilustrací 9
Seznam tabulek 15
Seznam použitých zkratek a značek 18
Úvod 19
1 Cíle práce 21
2 Rozbor problematiky 22
2.1 Termická modifikace dřeva 23
2.1.1 Technologie výroby termicky modifikovaného dřeva 25
2.1.2 Vliv termické modifikace dřeva na fyzikální a mechanické vlastnosti 30
2.1.3 Trvanlivost tepelně modifikovaného dřeva 34
2.1.4 Klasifikace a použití tepelně modifikovaného dřeva 38
2.2 Rovinné frézování 42
2.2.1 Teorie frézování 42
2.2.2 Nejběžnější druhy frézování dle polohy osy otáčení nástroje a tvaru ploch, které při frézování přímo opisují břity nástroje: 44
2.2.3 Kinematika procesu frézování 46
2.2.4 Tvar a rozměr třísky 47
2.2.5 Úhlová geometrie břitu 50
2.3 Měření energetické náročnosti procesu frézování 51
2.3.1 Řezný výkon stroje 51
2.3.2 Empiricko-statistický výpočet řezné síly a spotřeby energie 52
2.4 Kvalita řezného procesu 54
2.4.1 Kvalita frézovaného povrchu 54
2.4.2 Průměrné aritmetické úchylky profilu drsnosti a vlnitosti 57
2.5 Faktory ovlivňující spotřebu elektrické energie a kvalitu opracovaného povrchu 61
2.5.1 Řezná rychlost 61
2.5.2 Řezný úhel čela frézovacího nástroje 61
2.5.3 Posuvná rychlost 62
2.5.4 Druh dřeviny, termická modifikace při dané teplotě 62
2.6 Specifikace vybraných domácích dřevin 63
2.6.1 Smrk 63
2.6.2 Dub 64

3 Metodika měření 65
3.1 Výběr a příprava zkušebních vzorků 65
3.2 Termická modifikace vzorků 66
3.3 Rovinné frézování vzorků 70
3.4 Zařízení na měření řezného příkonu frézovacího stroje 74
3.5 Chemická analýza 78
3.6 Optimální kombinace obrábění pomocí analýzy hodnot 79
4 Výsledky a vyhodnocení 81
4.1 Chemické změny složení termicky modifikovaných dřevin a vliv těchto změn na spotřebu elektrické energie 81
4.2 Vliv vybraných faktorů rovinného, válcového frézování na řezný příkon 88
4.3 Vyhodnocení energetické náročnosti při rovinném frézování v závislosti na posuvu na zub f_z 97
4.4 Vliv vybraných faktorů na kvalitu obrobeného povrchu měřenou kontaktní a bezkontaktní (laserovou) metodou 99
4.4.1 Výsledky a porovnání kontaktní a bezkontaktní metody měření drsnosti a vlnitosti smrku ztepilého *(Picea abies* L.*)* a dubu letního *(Quercus robur* F.*)* 99
4.5 Vyhodnocení kvality opracovaného povrchu z hlediska posuvu na zub f_z 110
4.6 Stanovení optimálního nastavení technicko-technologických parametrů při rovinném frézování 135
5 Přínos pro vědu a praxi 138
5.1 Přínos pro vědu 138
5.2 Přínos pro praxi 139
6 Závěr 141
7 Seznam použité literatury 143
8 Přílohy 155

Seznam ilustrací

Obr. 1. Výroba Thermowoodu v letech 2001–2018 [127] 22
Obr. 2. Oblasti výroby Thermowoodu v letech 2001–2018 [127]..... 23
Obr. 3. Podíl modifikovaných dřevin Thermowoodu v letech 2001–2018 [127]..... 27
Obr. 4. Schéma výroby termicky modifikovaného dřeva Thermowood® [79]..... 28
Obr. 5. Barevné změny tepelně upraveného dřeva [128] 32
Obr. 6. Podíl výroby Thermo-S a Thermo-D Thermowoodu v letech 2001–2018 [127]..... 40
Obr. 7. Příklad využití Thermowoodu jako materiál pro vnitřní vybavení saun [129] .. 41
Obr. 8. Příklad využití Thermowoodu jako obklady pláště budov [130] 41
Obr. 9. Hlavní druhy frézování..... 43
Obr. 10. Způsoby frézování podle polohy osy otáčení a podle tvaru plochy, které opisují břity nástroje 45
Obr. 11. Profil odfrézované třísky válcovou frézou [4]..... 47
Obr. 12. Teoretický výpočet tloušťky a délky odfrézované třísky [6]..... 48
Obr. 13. Úhlová geometrie řezného nástroje [86] 50
Obr. 14. Geometrické charakteristiky (STN ISO 4287-1)..... 55
Obr. 15. Profil povrchu ofrézovaného dvěmi noži s rozdílným poloměrem řezání [66] 57
Obr. 16. Profil skutečného povrchu [39] 57
Obr. 17. Složky profillu povrchu[39] 60
Obr. 18. Detail úhlů řezného nože osazeného na frézovací hlavě [5] 62
Obr. 19. Příčný, podélný a tangenciální řez dřeva smrku pichlavého (*Picea abies* L.) [106]..... 63
Obr. 20. Příčný, podélný a tangenciální řez dřeva dubu (*Quercus*) [106]..... 64
Obr. 21. Příprava a přeměřování vzorků ve školní laboratoři České zemědělské univerzity v Praze (dub letní teplota termické modifikace 180 °C) 66
Obr. 22. Termo komora České zemědělské univerzity v Praze, která je umístěna v Kostelci nad Černými lesy..... 67
Obr. 23. Naplněná termo komora zkušebními vzorky smrku určenými k termické modifikaci 68
Obr. 24. Grafický průběh termické modifikace smrku ztepilého *(Picea abies* L.*)*..... 69
Obr. 25. Grafický průběh termické modifikace dubu letního *(Quercus robur* F.*)* 69
Obr. 26. Část vzorků po termické modifikaci..... 70

Obr. 27. Ukázka jednovřetenové spodní frézky typu FVS 71
Obr. 28. Pohled na podávací zařízení STEFF 2034 72
Obr. 29. Ukázka frézovací hlavy [131] 73
Obr. 30. Používaný přístroj METREL Power Q plus MI2392 75
Obr. 31. Schéma zapojení METREL Power Q plus MI2392 75
Obr. 32. Používaný přístroj pro kontaktní metodu měření FORMTALYSURF 50 Intra 2 (TaylorHobson) 77
Obr. 33. Používaný přístroj pro bezkontaktní (laserovou) metodu měření LEXT 3D measuring laser microscope OLS4100 (Olympus) 78
Obr. 34. Schéma metodiky výrobního procesu 80
Obr. 35. Změny (%) extraktivních látek při různých stupních termické modifikace 85
Obr. 36. Změny (%) ligninu při různých stupních termické modifikace 85
Obr. 37. Změny (%) holocelulózy při různých stupních termické modifikace 85
Obr. 38. Změny (%) celulózy při různých stupních termické modifikace 85
Obr. 39. Změny hemicelulózy při různých stupních termické modifikace 86
Obr. 40. Poměrové změny příkonu stroje P v závislosti na chemickém složení smrku ztepilého *(Picea abies L.)* 87
Obr. 41. Poměrové změny příkonu stroje P v závislosti na chemickém složení dubu letního *(Quercus robur F.)* 88
Obr. 42. Vliv řezné rychlosti na řezný příkon 90
Obr. 43. Vliv úhlu řezného čela na řezný příkon 90
Obr. 44. Vliv posuvné rychlosti na řezný příkon 90
Obr. 45. Vliv teploty termické modifikace na řezný příkon 90
Obr. 46. Čtyř faktorová analýza řezného příkonu nemodifikovaného smrku 91
Obr. 47. Čtyř faktorová analýza řezného příkonu termicky modifikovaného smrku na 160 °C 92
Obr. 48. Čtyř faktorová analýza řezného příkonu termicky modifikovaného smrku na 180 °C 92
Obr. 49. Čtyř faktorová analýza řezného příkonu termicky modifikovaného smrku na 210 °C 93
Obr. 50. Čtyř faktorová analýza řezného příkonu nemodifikovaného dubu 93
Obr. 51. Čtyř faktorová analýza řezného příkonu termicky modifikovaného dubu na 160 °C 94

Obr. 52. Čtyř faktorová analýza řezného příkonu termicky modifikovaného dubu na 180 °C 94
Obr. 53. Čtyř faktorová analýza řezného příkonu termicky modifikovaného dubu na 210 °C 95
Obr. 54. Závislost řezného příkonu na posuvu na zub, smrk ztepilý (*Picea abies* L.) ... 99
Obr. 55. Závislost řezného příkonu na posuvu na zub, dub letní (*Quercus robur* F.) 99
Obr. 56. Závislost vlnitosti a drsnosti povrchu na řezné rychlosti Smrk ztepilý (kontaktní metoda) 100
Obr. 57. Závislost vlnitosti a drsnosti povrchu na řezné rychlosti Smrk ztepilý (laserová metoda) 100
Obr. 58. Závislost vlnitosti a drsnosti povrchu na řezné rychlosti Dub letní (kontaktní metoda) 102
Obr. 59. Závislost vlnitosti a drsnosti povrchu na řezné rychlosti Dub letní (laserová metoda) 102
Obr. 60. Závislost vlnitosti a drsnosti povrchu na úhlu řezného čela. Smrk ztepilý (kontaktní metoda) 103
Obr. 61. Závislost vlnitosti a drsnosti povrchu na úhlu řezného čela. Smrk ztepilý (laserová metoda) 103
Obr. 62. Závislost vlnitosti a drsnosti povrchu na úhlu řezného čela. Dub letní (kontaktní metoda) 104
Obr. 63. Závislost vlnitosti a drsnosti povrchu na úhlu řezného čela. Dub letní (laserová metoda) 104
Obr. 64. Závislost vlnitosti a drsnosti povrchu na posuvné rychlosti. Smrk ztepilý (kontaktní metoda) 105
Obr. 65. Závislost vlnitosti a drsnosti povrchu na posuvné rychlosti. Smrk ztepilý (laserová metoda) 105
Obr. 66. Závislost vlnitosti a drsnosti povrchu na posuvné rychlosti. Dub letní (kontaktní metoda) 107
Obr. 67. Závislost vlnitosti a drsnosti povrchu na posuvné rychlosti. Dub letní (laserová metoda) 107
Obr. 68. Závislost vlnitosti a drsnosti povrchu na teplotě termické modifikace. Smrk ztepilý (kontaktní metoda) 108
Obr. 69. Závislost vlnitosti a drsnosti povrchu na teplotě termické modifikace. Smrk ztepilý (laserová metoda) 108

Obr. 70. Závislost vlnitosti a drsnosti povrchu na teplotě termické modifikace. Dub letní (kontaktní metoda) 110
Obr. 71. Závislost vlnitosti a drsnosti povrchu na teplotě termické modifikace. Dub letní (laserová metoda) 110
Obr. 72. Závislost vlnitosti a drsnosti povrchu na posuvu na zub, Smrk ztepilý (kontaktní metoda) 112
Obr. 73. Závislost vlnitosti a drsnosti povrchu na posuvu na zub, Smrk ztepilý (laserová metoda) 112
Obr. 74. Závislost vlnitosti a drsnosti povrchu na posuvu na zub, dub letní (kontaktní metoda) 114
Obr. 75. Závislost vlnitosti a drsnosti povrchu na posuvu na zub, dub letní (laserová metoda) 114
Obr. 76. Čtyř faktorová analýza vlnitosti *Wa* nemodifikovaného smrku (kontaktní metoda) 115
Obr. 77. Čtyř faktorová analýza vlnitosti *Wa* termicky modifikovaného smrku na 160 °C (kontaktní metoda) 115
Obr. 78. Čtyř faktorová analýza vlnitosti *Wa* termicky modifikovaného smrku na 180 °C (kontaktní metoda) 116
Obr. 79. Čtyř faktorová analýza vlnitosti *Wa* termicky modifikovaného smrku na 210 °C (kontaktní metoda) 116
Obr. 80. Čtyř faktorová analýza drsnosti *Ra* nemodifikovaného smrku (kontaktní metoda) 117
Obr. 81. Čtyř faktorová analýza drsnosti *Ra* termicky modifikovaného smrku na 160 °C (kontaktní metoda) 117
Obr. 82. Čtyř faktorová analýza drsnosti *Ra* termicky modifikovaného smrku na 180 °C (kontaktní metoda) 118
Obr. 83. Čtyř faktorová analýza drsnosti *Ra* termicky modifikovaného smrku na 210 °C (kontaktní metoda) 118
Obr. 84. Čtyř faktorová analýza vlnitosti *Wa* nemodifikovaného dubu (kontaktní metoda) 119
Obr. 85. Čtyř faktorová analýza vlnitosti *Wa* termicky modifikovaného dubu na 160 °C (kontaktní metoda) 119
Obr. 86. Čtyř faktorová analýza vlnitosti *Wa* termicky modifikovaného dubu na 180 °C (kontaktní metoda) 120

Obr. 87. Čtyř faktorová analýza vlnitosti *Wa* termicky modifikovaného dubu na 210 °C (kontaktní metoda)..... 120
Obr. 88. Čtyř faktorová analýza drsnosti *Ra* nemodifikovaného dubu (kontaktní metoda) 121
Obr. 89. Čtyř faktorová analýza drsnosti *Ra* termicky modifikovaného dubu na 160 °C (kontaktní metoda)..... 121
Obr. 90. Čtyř faktorová analýza drsnosti *Ra* termicky modifikovaného dubu na 180 °C (kontaktní metoda)..... 122
Obr. 91. Čtyř faktorová analýza drsnosti *Ra* termicky modifikovaného dubu na 210 °C (kontaktní metoda)..... 122
Obr. 92. Čtyř faktorová analýza vlnitosti *Wa* nemodifikovaného smrku (laserová metoda) 123
Obr. 93. Čtyř faktorová analýza vlnitosti *Wa* termicky modifikovaného smrku na 160 °C (laserová metoda) 123
Obr. 94. Čtyř faktorová analýza vlnitosti *Wa* termicky modifikovaného smrku na 180 °C (laserová metoda) 124
Obr. 95. Čtyř faktorová analýza vlnitosti *Wa* termicky modifikovaného smrku na 210 °C (laserová metoda) 124
Obr. 96. Čtyř faktorová analýza drsnosti *Ra* nemodifikovaného smrku (laserová metoda) 125
Obr. 97. Čtyř faktorová analýza drsnosti *Ra* termicky modifikovaného smrku na 160 °C (laserová metoda) 125
Obr. 98. Čtyř faktorová analýza drsnosti *Ra* termicky modifikovaného smrku na 180 °C (laserová metoda) 126
Obr. 99. Čtyř faktorová analýza drsnosti *Ra* termicky modifikovaného smrku na 210 °C (laserová metoda) 126
Obr. 100. Čtyř faktorová analýza drsnosti *Wa* nemodifikovaného dubu (laserová metoda) 127
Obr. 101. Čtyř faktorová analýza drsnosti *Wa* termicky modifikovaného dubu na 160 °C (laserová metoda) 127
Obr. 102. Čtyř faktorová analýza drsnosti *Wa* termicky modifikovaného dubu na 180 °C (laserová metoda) 128
Obr. 103. Čtyř faktorová analýza drsnosti *Wa* termicky modifikovaného dubu na 210 °C (laserová metoda) 128

Obr. 104. Čtyř faktorová analýza drsnosti *Ra* nemodifikovaného dubu (laserová metoda) 129
Obr. 105. Čtyř faktorová analýza drsnosti *Ra* termicky modifikovaného dubu na 160 °C (laserová metoda) 129
Obr. 106. Čtyř faktorová analýza drsnosti *Ra* termicky modifikovaného dubu na 180 °C (laserová metoda) 130
Obr. 107. Čtyř faktorová analýza drsnosti *Ra* termicky modifikovaného dubu na 210 °C (laserová metoda) 130
Obr. 108. Schéma vlivu všech vybraných faktorů procesu rovinného frézovaní na výsledný produkt 140

Seznam tabulek

Tab. 1. Změny základních vlastností termicky upraveného dřeva 39
Tab. 2. Příklady použití termicky upraveného dřeva ThermoWood® 39
Tab. 3. Parametry kvality povrchu podle normy ČSN EN ISO 4287 [39] 59
Tab. 4. Schéma připravených vzorků smrku ztepilého *(Picea abies* L.*)* a dubu letního *(Quercus robur* F.*)* k termické modifikaci 65
Tab. 5. Technické parametry termokomory 67
Tab. 6. Průběh času termické modifikace smrku ztepilého *(Picea abies* L.*)* 68
Tab. 7. Průběh času termické modifikace dubu letního *(Quercus robur* F.*)* 68
Tab. 8. Průměrná hustota obou dřevin zkušebních vzorků smrku ztepilého *(Picea abies* L.*)* 69
Tab. 9. Průměrná hustota obou dřevin zkušebních vzorků dubu letního *(Quercus robur* F.*)* 69
Tab. 10. Technické údaje použité jedno vřetenové frézky 71
Tab. 11. Technické údaje podávacího zařízení STEEF 72
Tab. 12. Technická specifikace nástroje (frézy) 72
Tab. 13. Přepočty posuvu na zub, maximální a střední tloušťky třísky 74
Tab. 14. Schéma vzorků a jejich následný výzkum odběru elektrické energie při rovinném frézování a změnách úhlu čela, řezné rychlosti a rychlosti posuvu. 76
Tab. 15. Tabulka podmínek měření drsnosti a vlnitosti [39] 78
Tab. 16. Chemická analýza termicky neupraveného a modifikovaného smrku ztepilého *(Picea abies* L.*)* a dubu letního *(Quercus robur* F.*)* 81
Tab. 17. Statistické vyhodnocení vlivu teploty termické modifikace na změny chemického složení smrku *(Picea abies L.)* 82
Tab. 18. Statistické vyhodnocení vlivu teploty termické modifikace na změny chemického složení dubu (*Quercus robur* F.) 84
Tab. 19. Spearmanova korelace energetické náročnosti při obrábění smrku ztepilého *(Picea abies L.)* v závislosti na chemickém složení 86
Tab. 20. Spearmanova korelace energetické náročnosti při obrábění dubu letního *(Quercus robur F.)* v závislosti na chemickém složení 87
Tab. 21. Statistické vyhodnocení vlivu vybraných faktorů na řezný příkon smrku ztepilého *(Picea abies* L.*)* 89

Tab. 22. Statistické vyhodnocení vlivu vybraných faktorů na řezný příkon dubu letního *(Quercus robur F.)* ... 89
Tab. 23. Optimální a nejhorší varianta nastavení včetně přepočtu na cenu elektřiny smrk ztepilý (*Picea abies* L.) ... 96
Tab. 24. Optimální a nejhorší varianta nastavení včetně přepočtu na cenu elektřiny dub letní (*Quercus Robur* F.) ... 97
Tab. 25. Statistické vyhodnocení vlivu vybraných faktorů na Energetickou náročnost (smrk ztepilý) ... 97
Tab. 26. Statistické vyhodnocení vlivu vybraných faktorů na Energetickou náročnost (Dub) ... 98
Tab. 27. Vysvětlující tabulka k obr. 54. a 55. ... 98
Tab. 28. Statistické vyhodnocení vlivu vybraných faktorů na kvalitu obrobeného povrchu měřenou kontaktní metodou (smrk ztepilý) ... 101
Tab. 29. Statistické vyhodnocení vlivu vybraných faktorů na kvalitu obrobeného povrchu měřenou laserovou metodou (smrk ztepilý) ... 103
Tab. 30. Statistické vyhodnocení vlivu vybraných faktorů na kvalitu obrobeného povrchu měřenou kontaktní metodou (dub letní) ... 106
Tab. 31. Statistické vyhodnocení vlivu vybraných faktorů na kvalitu obrobeného povrchu měřenou laserovou metodou (dub letní) ... 109
Tab. 32. Statistické vyhodnocení vlivu posuvu na zub na kvalitu opracovaného povrchu – kontaktní metoda (smrk ztepilý) ... 111
Tab. 33. Statistické vyhodnocení vlivu posuvu na zub na kvalitu opracovaného povrchu – laserová metoda (smrk ztepilý) ... 111
Tab. 34. Vysvětlující tabulka k obr. 72, 73, 74. a 75. ... 112
Tab. 35. Statistické vyhodnocení vlivu posuvu na zub na kvalitu opracovaného povrchu – kontaktní metoda (dub letní) ... 113
Tab. 36. Statistické vyhodnocení vlivu posuvu na zub na kvalitu opracovaného povrchu – laserová metoda (dub letní) ... 113
Tab. 37. Spearmanova korelace parametrů obrábění, termické modifikace a chemického složení smrku ztepilého *(Picea abies* L.*)* ... 132
Tab. 38. Spearmanova korelace parametrů obrábění, termické modifikace a chemického složení dubu letního *(Quercus robur* F.*)* ... 133
Tab. 39. Optimální nastavení parametrů frézování podle analýzy hodnot smrku ztepilého *(Picea abies* L.*)* ... 135

Tab. 40. Optimální nastavení parametrů frézování podle analýzy hodnot dubu letního *(Quercus robur* F.*)* 136
Tab. 41. Průměrné hodnoty sledovaných charakteristik kvality povrchu, smrk..... 155
Tab. 42. Průměrné hodnoty sledovaných charakteristik kvality povrchu, dub letní 158
Tab. 43. Optimální nastavení technických parametrů frézování z hlediska drsnosti, vlnitosti a spotřeby elektrické energie, smrk ztepilý 161
Tab. 44. Optimálních nastavení technických parametrů frézování z hlediska drsnosti, vlnitosti a spotřeby elektrické energie, dub letní 164

Seznam použitých zkratek a značek

β_{mod}	koeficient objemového nabobtnání modifikovaného dřeva
β_{rost}	koeficient objemového nabobtnání rostlého dřeva
f_z	posuv dílce připadající na jeden zub (mm)
ω	úhlová rychlost (°/s)
v_c	řezná rychlost (m/s)
D	průměr řezné kružnice (mm)
e	výška řezu (mm)
l	délka kruhového oblouku (mm)
N	frekvence otáčení nástroje (1/min)
v_{ef}	relativní (indikovaná) rychlost řezného klína (m/s)
ψ	středový úhel natočení řezné hrany rotujícího nástroje (°)
R	poloměr řezné kružnice (mm)
h_{str}	střední tloušťka třísky (mm)
x	vyčnívání řezné hrany z tělesa nástroje (mm)
γ	řezný úhel čela (°)
δ	řezný úhel (°)
β	úhel řezného klínu (°)
α	úhel hřbetu (°)
η_C	celková účinnost dřevoobráběcího stroje
UVN	účinnost vůči nabobtnání
h_{max}	maximální tloušťka třísky (mm)
In	délka měření
Ir	délka základny
L	délka třísky (mm)
H_d	hloubka řezu (mm)
P_P	řezný příkon (W)
P_c	řezný výkon (W)
z	počet zubů (řezných klínů) na nástroji (kus)
U	napětí (V)
RS_m	střední hodnota vzdálenosti drážek prvků drsnosti
λc	mezní vlnová délka
λf	vlnový filtr

Úvod

Dnešní moderní civilizace klade čím dál více důraz na obnovitelnost a zpracování přírodních surovin. Jedním z nejvíce využívaných materiálů je i dřevo, které je nejen obnovitelné, dobře opracovatelné, ale i estetické. S touto problematikou je úzce spjata i potřeba měnit fyzikálně mechanické vlastnosti již stávajících druhů dřevin. To částečně umožňuje tzv. termická modifikace dřeva, kterou upravujeme dřevo bez jakýchkoliv dalších chemikálií a termicky modifikované dřevo tím získává lepší odolnost vůči povětrnostním vlivům, barevným změnám a biologickým škůdcům. [79] Tato termická úprava v základní podobě je známa sice již několik desítek let, avšak díky rozvoji technologií a výzkumu vlastností takto upraveného dřeva je stále více využívaná. Navzdory tomu, že je tento proces výroby dnes široce využíván, stále chybí podrobné znalosti o vlivu tepelné úpravy na kvalitu povrchu dřeva a vlivu termické modifikace na spotřebu elektrické energie při rovinném frézování a na změny v chemickém složení dřeva. Zejména pak chybí poznatky o interakci všech uvedených faktorů. Tato práce přináší a ozřejmuje poznatky o vzájemné interakci s důrazem na dosáhnutí optimálních parametrů výroby. [4]

Obecně je elektrická energie v současné době největším hnacím motorem dnešní moderní civilizace, je hybnou silou sociálního pokroku a ekonomického růstu většiny zemí. Téměř veškerá lidská činnost je závislá na elektrické energii. Celosvětová spotřeba meziročně vzrůstá přibližně o 1–2 %, v roce 2016 vzrostla meziročně o 0,9 % na 10 373,3 TWh [36]. Nelze předpokládat, že by se podařilo tento trend v dlouhodobém měřítku zvrátit, je ale v zájmu celé společnosti, aby toto tempo bylo co nejpomalejší, minimálně menší než rychlost, s jakou jsou nasazovány obnovitelné zdroje energie.

Rovinné frézování patří mezi nejzákladnější druh třískotvorného obrábění při zpracování dřeva, kde cyklickým pohybem frézovací nožové hlavy dochází k odběru vrstvy dřeva, a tím i ke změně jeho tvaru a rozměrů [102, 59]. Ideálním výsledkem frézování je taková kvalita ofrézovaného povrchu dřeva, která je potřebná pro další zpracování. Rovinné frézování je proces důležitý pro dřevo a materiály na bázi dřeva, kdy je výsledná kvalita povrchu nezbytná pro povrchovou úpravu a konečný vzhled výrobků [80]. Při frézování je důležité optimální nastavení technických parametrů stroje a nástrojů tak, aby bylo dosaženo požadované kvality opracování při udržení nízkých nákladů.

Všeobecně kvalita ofrézovaného povrchu záleží na vlastnostech dřeva (zejména druh dřeviny a stupeň termické modifikace), parametrech při frézování (velikost úběru materiálu, směr frézování, řezná, podávací rychlost a úhel řezného čela) [107, 69, 18, 84]. Při rovinném frézování je důležité vědět, k jakému použití bude výrobek určen a jaké bude jeho další zpracování, dle toho musí být zvolen i požadovaný stupeň opracování. V minulosti se kvalita povrchu měřila pouze pomocí smyslů, nyní již díky výrobě kvalitnějších produktů je zapotřebí využít sofistikovanější metody, kde se dá zaznamenat kvalitu obrobených povrchů pomocí kontaktních nebo bezkontaktních profilometrů [19, 34].

Tato práce se zaměřuje na tři základní oblasti, které významně ovlivňují ekonomiku výroby a kvalitu tepelně modifikovaného dřeva. První část se zabývá hodnocením vlivu teploty tepelné úpravy (160, 180, 210 °C) na změny chemické struktury dřeva ve srovnání s tepelně neupraveným dřevem. Druhá část se zabývá vlivem obráběcích parametrů, jako je řezná rychlost (20, 30, 40 m/s), posuv (4, 8, 11 m/min) a úhel čela (15, 20, 25°) na spotřebu elektrické energie během rovinného frézování. A třetí část je orientována opět na vliv parametrů obrábění v závislosti na vybrané parametry kvality povrchu (drsnost, vlnitost). Tato třetí část je kvůli přesnějším výsledkům rozdělena na dva odlišné způsoby měření. V závěru byla vyhodnocena interakce mezi technicko-technologickým nastavením rovinného frézování, spotřebou elektrické energie, termické modifikace, a to vše pro 2 druhy dřevin, a to pro smrk ztepilý *(Pocea abies* L.*)* a dub letní *(Quercus robur* F.*).* Lze konstatovat, že přidaná hodnota tohoto výzkumu spočívá především v určení optimální kombinace parametrů rovinného frézování, při které se dosáhne nejkvalitnějšího opracovaného povrchu a nejnižší spotřebou energie, s ohledem na vnitřní vlastnosti studovaných druhů a stupeň termické modifikace.

.

1 Cíle práce

Hlavním cílem disertační práce je zjištění interakci teploty termické modifikace v chemické struktuře dřeva a zjištění optimálního technicko – technologického nastavení rovinného frézování interakcí termické modifikace, spotřeby elektrické energie a kvality opracovaného povrchu domácích dřevin smrku ztepilého *(Picea abies* L.*)* a dubu letního *(Quercus robur* F.*).*

Na základě výsledků výzkumu zjistit interakci mezi hlavními faktory:

1) Obráběný materiál smrk ztepilý *(Picea abies* L.*)* a dub letní *(Quercus robur* F.*)*

2) Závislost teploty termické modifikace 160,180 a 210°C.

3) Podávací rychlosti (4, 8 a 11 m/min).

4) Řezné rychlosti (20, 30 a 40 m/s).

5) Úhlu řezného čela nástroje (15, 20, 25°)

na sledované parametry:

1) Změny v chemické struktuře obou dřevin během všech stupňů termické modifikace a vliv chemického složení na řezný příkon při rovinném frézování.

2) Množství odebírané energie (příkonu stroje) při rovinném, podélném frézování.

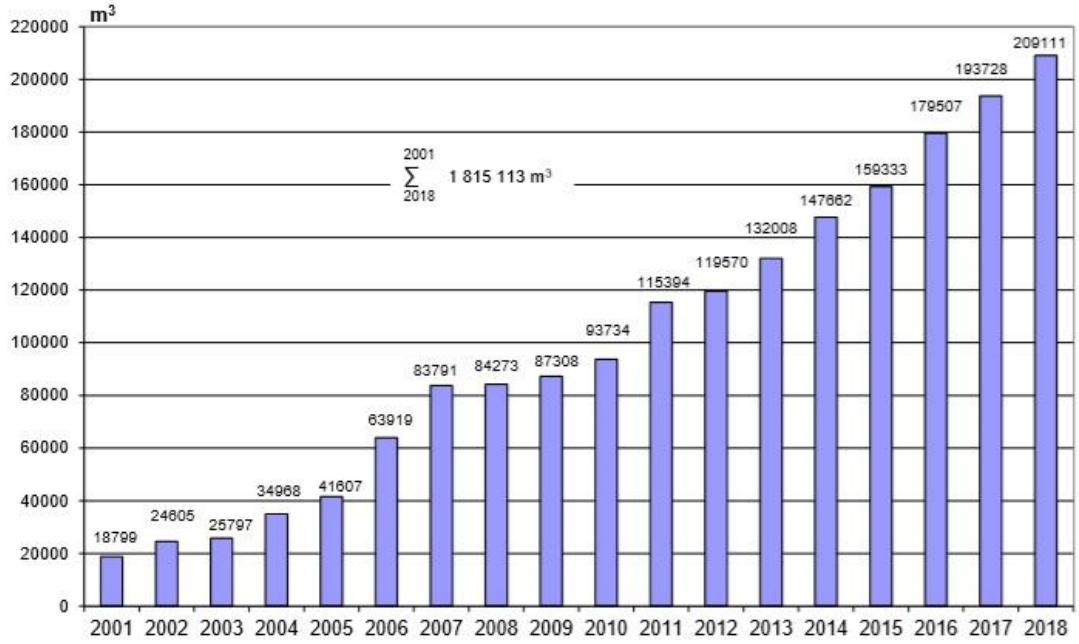
3) Kvalita námi opracovaného povrchu, která byla vyhodnocena pomocí údajů o drsnosti, vlnitosti povrchu a posuvu na zub.

   Pro větší přesnost a zjištění rozdílu, byly hodnoty drsnosti a vlnitosti naměřeny dvěma nezávislými metodami měření (metodou kontaktní a bezkontaktní).

4) Vzájemná interakce uvedených parametrů a stanovení optimálních parametrů při rovinném frézování.

2 Rozbor problematiky

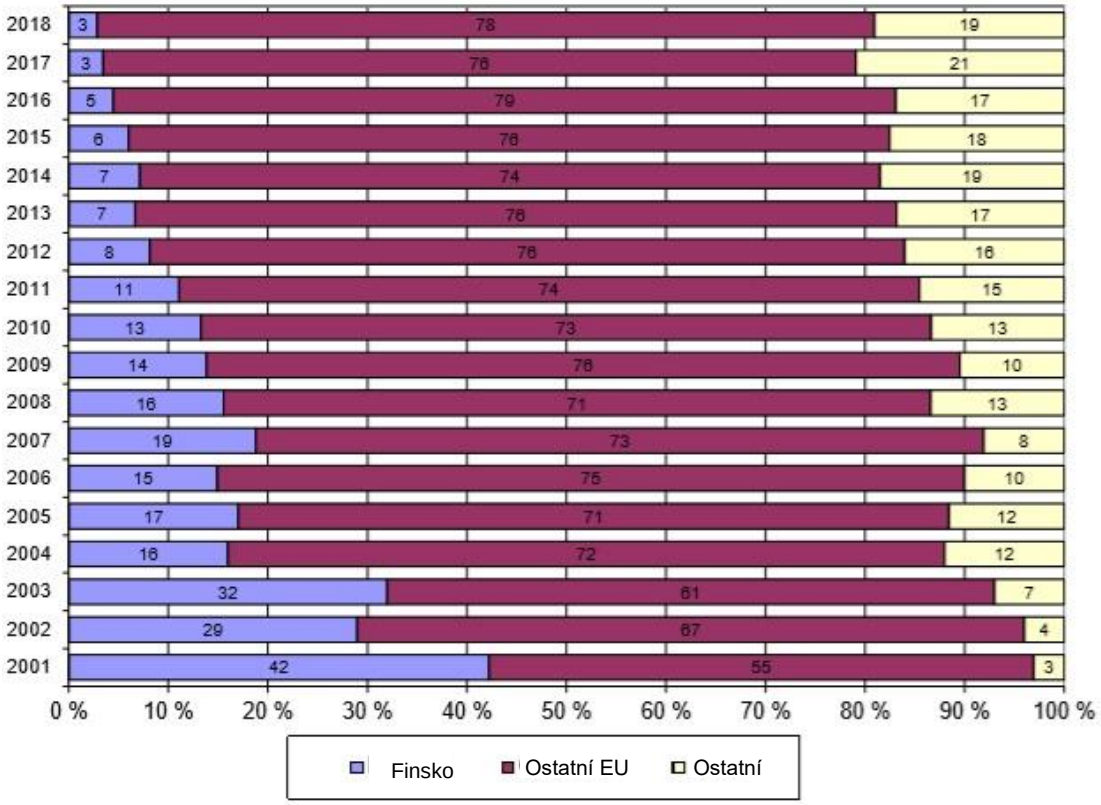
Jedním ze základních bodů disertační práce je pochopit vlastní proces výroby termicky modifikovaného dřeva, důvody produkce a vliv této modifikace na fyzikálně mechanické vlastnosti dřeva. V současnosti se tento způsob úpravy dřeva stále rozšiřuje zejména pro svoji ekologičnost během životnosti produktu a využití i ostatní druhů dřevin na výrobky, na které doposud nemohly být použity. Největší produkce termicky modifikovaného dřeva je v Evropě a ve Finsku, kde původně patentovaný výrobek pod názvem Thermowood vznikl. Výroba tohoto modifikovaného dřeva se ovšem nyní enormně rozšiřuje i do jiných zemích Evropy a celého světa. Z obr. 1. je patrné, jak velký je nárůst výroby termicky modifikovaného dřeva.



Obr. 1. Výroba Thermowoodu v letech 2001–2018 [127]

2.1 Termická modifikace dřeva

Termicky modifikované dřevo nazýváme „termodřevo“. Průmyslově vyráběné již téměř 15 let. Výrobu tepelně modifikovaného dřeva zavedlo více států západní Evropy jako odezvu na měnící se legislativu chemické ochrany dřeva. Prvním státem výroby bylo Finsko s výrobky prodávanými pod názvem Thermowood, které se později začaly vyrábět i v Holandsku, Rakousku, Německu a Francii [25].



Obr. 2. Oblasti výroby Thermowoodu v letech 2001–2018 [127]

Termická modifikace dřeva je způsob, kdy upravujeme vlastnosti dřeva za působení vysokých teplot, tuhle modifikaci používali již naši předkové. Ti opalovali odedávna konce plotových tyčí tak, aby zvýšili jejich přirozenou trvanlivost. Tento samotný proces termické modifikace dřeva, jak jej známe v dnešní době, byl popsán již ve 20. letech minulého století. Jeho náročnost ovšem neumožňovala plné a bezproblémové technologické zvládnutí výroby [117]. Hlavním cílem průmyslové termické modifikace je upravit domácí a dostupné dřeviny v kvalitní dřevařský produkt, který bude mít širší využití díky částečně změněným vlastnostem [25].

Lidstvo dřevo záměrně vystavuje zvýšené teplotě při různých technologických operacích, např. při umělém sušení, paření a vaření v rozmezí teplot 50–140 °C [8].

Při teplotách 110–130 °C, respektive i o něco vyšším teplotám je dřevo vystavené po dobu lisování při výrobě dřevěných kompozitů (dřevotřískové, dřevovláknité, překližované a jiné materiály). Jsou to však zvýšené teploty pouze do 150 °C, někdy ovšem krátkodobě i nad 150 °C, které ve většině případů nevyvolávají zjevnější změny v jeho chemické struktuře a tím nevedou ani k žádným významnějším trvalým zásahům do jeho vlastností. Odlišná situace nastává tehdy, pokud je dřevo dlouhodoběji vystaveno teplotám nad 150 °C [8].

Odlišnou skupinou technologických operací s dřevní hmotou jsou termické modifikace rostlého dřeva při velmi vysokých teplotách 150–260 °C, kdy se záměrně mění jeho chemická struktura. Modifikované dřevo se při této úpravě stává hydrofóbnější a současně i odolnější vůči biologickým škůdcům [25].

Hlavním cílem termických modifikací rostlého dřeva je vytvořit takový materiál, který by vyváženě splňoval následující kritéria [79]:

- vyšší rozměrová stabilita modifikovaného dřeva,
- vyšší odolnost vůči dřevokazným houbám, dřevo zbarvujícím houbám a plísním,
- nižší hygroskopicita,
- zachování, případně i zlepšení mechanických vlastností jako je pevnost, tuhost a tvrdost,
- zlepšení estetické stránky – barva, menší podíl trhlin, lesk, textura a jiné,
- vyšší odolnost vůči napadení dřevokazným hmyzem.

Požadavky na sníženou hygroskopicitu, zlepšenou rozměrovou stabilitu a zlepšenou odolnost vůči biologickým škůdcům se dají zajistit technologií výroby termicky modifikovaného dřeva. Všechny tyto technologické postupy výroby vedou ovšem ke snížení jeho rázové houževnatosti, k poklesu pevnosti v tahu, ohybu a k barevnému zbarvení od nažloutlých až do tmavých, hnědých odstínů. Zajímavá je také přitom skutečnost, že jeho modul pružnosti se mění pouze zanedbatelně a někdy dokonce pozvolně narůstá. Obecně ovšem platí, že stupeň úpravy tepelně modifikovaného dřeva závisí na konkrétních podmínkách jeho výroby. V zásadě lze říci, že všechny tepelné úpravy dřeva teplotami nad 100 °C, především v rozmezí 150–170 °C, způsobují určité změny v jeho chemické stavbě, přičemž se tyto změny následně odrážejí i ve změně jeho fyzikálně – mechanických vlastností [6].

Hlavní podstata termické modifikace dřeva spočívá v záměrných zásazích do jeho chemické struktury [79]:

- blokací hydroxylových –OH funkčních skupin dřeva (tato změna vede k poklesu hygroskopicity a zlepšení stability rozměrů dřeva),
- síťovou polykondenzační reakcí v lignino sacharidické matrici dřeva (tato modifikace vede také k poklesu hygroskopicity a vzniku látek, které chrání dřevo proti napadení biologickými škůdci),
- změny ve struktuře hemicelulóz a některých extrahovatelných látek ve dřevě [61],
- tvorba stálých nevyluhovatelných degradačních zplodin z ligninosacharidické matrice dřeva i extrahovatelných látek, které dokáží blokovat aktivní působení hub, hmyzu i jiných organizmů napadajících dřevo.

Abychom dosáhli těchto požadovaných vlastností a změny v chemické struktuře dřeva, je nutné dodržet stanovené technologické postupy při výrobě termicky modifikovaného dřeva popsané v následující podkapitole.

2.1.1 Technologie výroby termicky modifikovaného dřeva

Při výrobě termicky modifikovaného dřeva se nepoužívají žádné toxické chemikálie, ale pouze teplo (respektive vodní pára nebo rostlinné oleje), což je ekologicky přijatelnější z pohledu výroby i využití tohoto dřevního materiálu [115]. Thermowood se vyznačuje zvýšenou trvanlivostí ve vnitřních i venkovních podmínkách v porovnání s rostlým dřevem. Vyrábí se z méně trvanlivých druhů dřeva, nejčastěji smrk, borovice, buk, jasan, bříza, osika, dub, ale i jiné [117].

Termickou modifikací dřeva rozumíme záměrný technologický proces, při kterém se mění jeho vnitřní chemická struktura vlivem zvýšené teploty 150–260 °C, s cíleným dopadem na zlepšení jeho vlastností, zejména odolnosti vůči vodě a biologickým škůdcům. Přitom však nesmí dojít k výraznému zhoršení fyzikálně – mechanických vlastností použitého dřeva. Termické úpravě můžeme podrobit jak suché, tak mokré dřevo [2]. Ve výrobě termicky modifikovaného dřeva se tepelná energie dodává z elektrických topných těles, nebo z tepelných olejových zásobníků [114]. Plyny, které

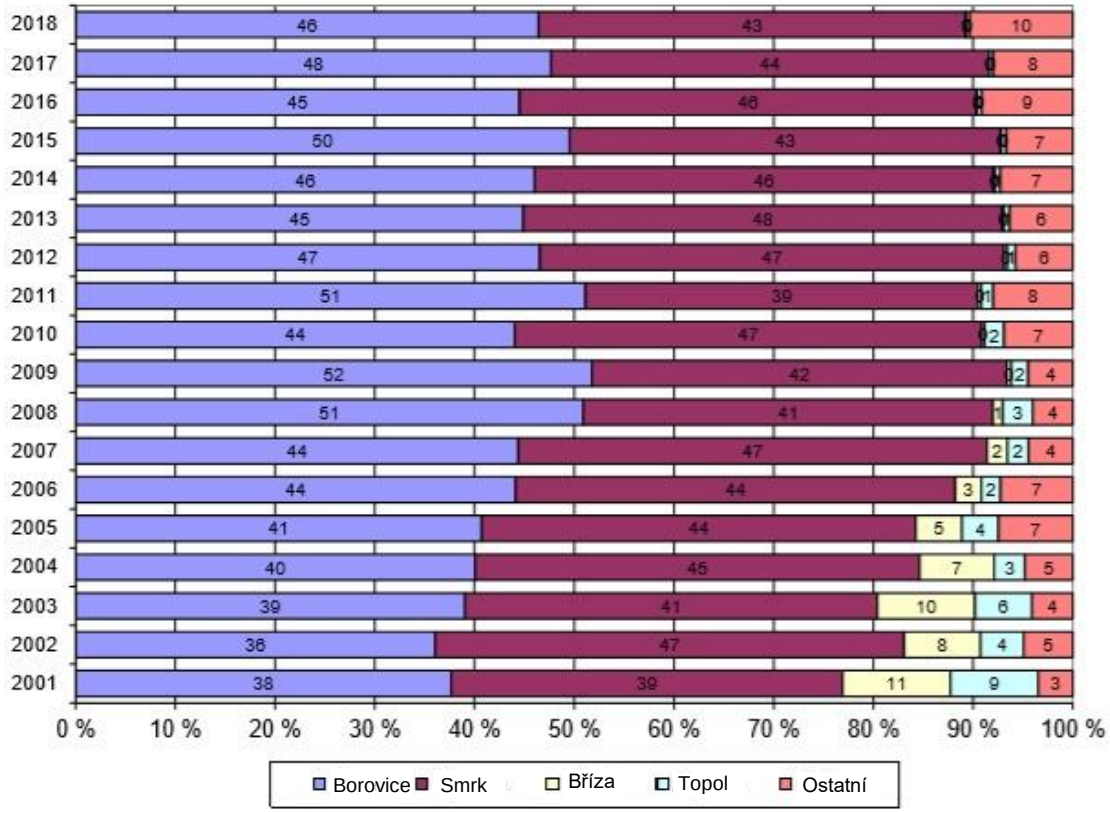
unikají ze dřeva v technologickém procesu výroby Thermowoodu je možné využít také na energetické účely spalováním a vytápěním pece případně výrobu elektrické energie, čímž se souběžně zabezpečuje i ekologická stránka tohoto výrobního procesu.

Thermowood se může vyrábět více technologiemi. V Evropě se dnes používají tyto [79]:

- příprava v ochranné atmosféře vzduchu (Thermowood®),
- příprava v ochranném prostředí vodní páry (Plato®Wood),
- příprava v prostředí inertních plynů (RetificatedWood),
- příprava v horných olejích (OHT-Wood, RoyalWood).

Veškeré procesy tepelné modifikace dřeva jsou patentově chráněné (např. EP0018446, 1982; EP0759137, 1995; EP0623433, 1994; EP0612595, 1994; US5678324, 1997). Avšak stále se hledají nové technologie. Každý technologický proces se musí optimalizovat pro přesný druh jehličnatého nebo listnatého dřeva [24]. V Evropě se nyní každoročně vyrobí přibližně 200 tisíc m^3 Thermowoodu, a to hlavně ve Finsku, Holandsku, Německu, Rakousku, Francii a Estonsku.

Nejčastěji se termicky modifikují místní dřeviny, které mají nižší fyzikálně-mechanické vlastnosti potřebné pro daný účel použití. V obr. 3. je zobrazen podíl dřevin používajících se k termické modifikaci [11].



Obr. 3. Podíl modifikovaných dřevin Thermowoodu v letech 2001–2018 [127]

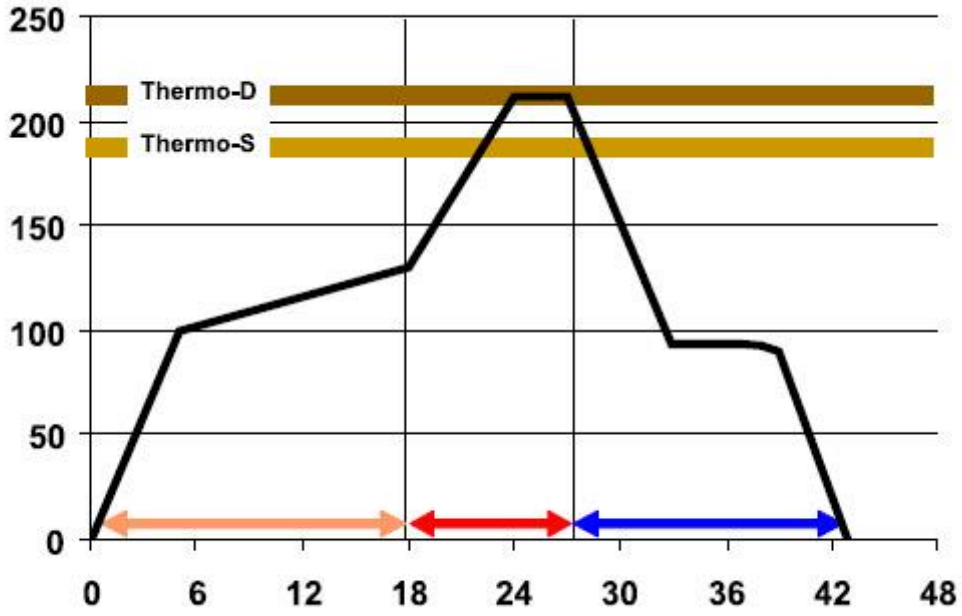
Výroba Thermowoodu připravovaného v atmosféře vzduchu Thermowood®

Výrobní proces se skládá z následujících etap (viz obr. 4.) [79]:

1) Ohřev a sušení – v této etapě se teplota v sušárně rychle zvyšuje na cca 100 °C za podpory působení vodní páry. Poté se sníží stoupání a zvyšuje se až na úroveň 130 °C. Sušícím médiem je horký vzduch nebo horká pára. Po celou dobu této etapy se dřevo vysouší až přibližně na nulovou hodnotu vlhkosti [33];

2) Termická modifikace – ve druhé fázi se teplota zvyšuje na úroveň 185 až 230 °C na dobu 2–3 hodin. Výška této teploty a dobou působení jsou dány požadavky na klasifikační třídu výrobků Thermowoodu (Thermo-S nebo Thermo-D) [33];

3) Chlazení a klimatizace – v poslední třetí fázi se tepelně modifikované dřevo postupně ochlazuje na teplotu 80–90 °C a vlhkostně se stabilizuje tak, aby jeho konečná vlhkost byla na úrovni běžných 4–7 % [33].



Obr. 4. Schéma výroby termicky modifikovaného dřeva Thermowood® [79]

Výroba termicky modifikovaného dřeva připravovaného v prostředí vodní páry (Plato® Wood)

Tento druh termicky modifikovaného dřeva je vyráběn při poměrně nízké teplotě v prostředí horké vodní páry a za zvýšeného tlaku podle patentovaného PLATO procesu z Holandska (Providing Lasting Advancced Timber Option) [74].

Tato PLATO technologie se skládá ze čtyř fází realizovaných při normálním i zvýšeném tlaku a celková doba procesu závisí především na druhu modifikovaného dřeva, jeho tloušťky a celkovém tvaru [72, 74]:

1) Hydrotermolýza – První fází je hydrotermická úprava čerstvého nebo usušeného dřeva při teplotách 150–190 °C a zvýšeném tlaku 0,6–1 MPa, v čase 4–5 hodin. Proudící hornou vodní párou (při úpravě vysušeného dřeva) nebo horkým vzduchem (při úpravě mokrého dřeva). Tato fáze se vykonává v tlakové nádobě, vlhkost suchého dřeva se příliš

nemění a zůstává v oblasti okolo 14–20 %. V chemické struktuře modifikovaného dřeva dochází ke změnám, a to částečným odbouráním hemicelulóz při tvorbě aldehydů a organických kyselin s aktivací ligninu. Celulóza zůstává víceméně nezměněná [9];

2) Sušení – Následuje etapa sušení dřeva, kdy se aktivované dřevo suší v klasické sušárně po dobu cca 3–5 dní, v případě potřeby déle až do 3 týdnů na vlhkost 8 až 10 % [9];

3) Vytvrzování – Třetí fází této výroby je stabilizace dřeva, tzn. jeho vytvrzení po dobu 12 až 16 hodin při teplotě 150–190 °C a při stálém atmosférickém tlaku 0,1 MPa, ovšem za omezeného přístupu vzduchu. Aktivované makromolekuly ligninu modifikovaného dřeva se vzájemně zesíťují za pomoci rozkladných produktů hemicelulóz (aldehydů a organických kyselin). Auto kondenzací ligninu se jeho aromatická jádra spojují např. methylenovými vazbami. Vlhkost dřeva při tomto jevu klesá až pod 1 % [9];

4) Kondenzování – Konečnou fází je opětovné zvlhčení dřeva v sušárně na hodnotu 4–6 %. Tato fáze může trvat až 3 dny [9].

Výroba termicky modifikovaného dřeva připravovaného v prostředí inertních plynů (RetificatedWood)

Rektifikované dřevo se vyrábí v inertním ochranném prostředí dusíku, při poměrně vysokých teplotách, a to až 260 °C, dle licenčního Rektifikačního procesu (NOW – New Option Wood, Francie) [78].

Princip výroby rektifikačního dřeva je založený na postupném zvyšování teploty dřeva do rozmezí 210–260 °C, avšak v inertním ochranném plynu dusíku, přičemž podíl kyslíku musí být menší než 2 %. Takto modifikované dřevo se při tomto procesu mírně pyrolyzuje, avšak termooxidační reakce ve dřevě probíhají pouze v menší míře, čímž se stále zachovává i jeho pevnost. Před tímto rektifikačním procesem výroby je potřeba dřevo předsušit, a to na vlhkost 12 % [9].

Výroba termicky modifikovaného dřeva připravovaného v olejích (OHT-Wood)

OHT-Wood se vyrábí v horkých rostlinných olejích podle licencovaného OHT procesu (OHT – Oil Heat Treatment, Menz Holz, Německo)

OHT technologie modifikace dřeva se odehrává v impregnačních kotlích – za pomoci horkých rostlinných olejů. Teplota nosného média bývá většinou v oblasti od 200 do 220 °C. Ve dřevě se po dobu výroby nachází jen menší množství kyslíku, čímž se v něm omezují i nežádoucí termooxidační procesy dřeva. Horký olej vniká do dřeva a postupně ho zahřívá. Ve středu modifikovaného materiálu je nutné udržovat teplotu 180–200 °C po dobu 2–4 hodin. Spotřeba oleje na výrobu bývá 20–60 kg/m^3 dřeva. Nejvíce používaný je lněný olej, který umožňuje rychlý a pozvolný přenos tepla k buňkám dřeva a omezuje v nich kyslík [9].

Royal proces (Royale procese, Osmose) patří také k technologiím na výrobu termicky modifikovaného dřeva v prostředí olejů, ale při podstatně nižší teplotě. Tepelná úprava dřeva těmito oleji se vykonává za sníženého tlaku a při poměrně nízké teplotě (jen 60–90 °C). Tato Royale technologie se používala spíše dříve a jen na sušení dřeva. Použitý olej nevniká do buněčných stěn modifikovaného dřeva a po ukončení výrobního procesu se ze speciálního impregnačního kotle odsává vakuem. Tento proces se ale dnes používá již jen vzácně [6].

2.1.2 Vliv termické modifikace dřeva na fyzikální a mechanické vlastnosti

Při výrobě Thermowoodu je především důležité to, jak se změní jeho hygroskopicita, rozměrová stabilita, hustota a barva dřeva. Důležité jsou také i změny jeho tepelně izolačních vlastností a zajímavé jsou i jeho změny akustických vlastností [74, 42, 43].

Hygroskopicita

Vlivem působení tepla při modifikaci, se hygroskopicita dřeva snižuje [57]. Tato schopnost je velmi důležitá vlastnost dřeva, která ovlivňuje i jeho další vlastnosti, především rozměrovou stálost a odolnost proti napadení biologickými škůdci [29, 51]. Hygroskopicita dřeva je v podstatě jeho vlastnost přijímat a odevzdávat vodu do okolního prostředí při definované rovnovážné vlhkosti a teplotě okolního vzduchu [113]. Termicky

modifikované dřevo má tedy menší hygroskopicitu v porovnání s klasickým rostlým dřevem [23, 6,7].

Snížení hygroskopicity tepelně upraveného dřeva můžeme zdůvodnit těmito jevy [6]:

- odebráním určitého podílu hemicelulóz ze dřeva,
- odebráním nebo prostorovou blokací hydrofobních – OH skupin,
- migrací a distribucí lipoidních i jiných hydrofobních látek ve dřevě.

Rozměrová stálost

Tepelně upravené dřevo má lepší rozměrovou stálost, tzn., že při změnách relativní vlhkosti okolního vzduchu se jeho rozměry mění podstatně méně než u klasického rostlého dřeva. Zlepšení rozměrové stálosti se charakterizujeme parametrem UVN (účinnost vůči nabobtnání) [57, 123]:

$$UVN = \frac{(\beta_{rost} - \beta_{mod})}{\beta_{rost}} . 100 \quad [\%] \qquad (1)$$

,

kde: β_{rost} je koeficient objemového bobtnání rostlého dřeva, β_{mod} je koeficient objemového bobtnání upraveného dřeva

Obecně se dřevo stává rozměrově stálejší již při usušení teplotou 110 °C. Na základě starších i novějších výzkumů ohřevu dřeva na teploty v rozmezí 150–300 °C, v ochranné atmosféře vzduchu nebo dusíku lze konstatovat to, že jeho maximální hodnoty rozměrové stálosti se dosáhnou při 15–20 % úbytcích jeho hmotnosti [29, 57, 121].

Podobně jako jev snížení hygroskopicity, tak i zlepšení rozměrové stálosti můžeme u termicky upraveného dřeva odůvodnit částečným odbouráním hemicelulóz ze dřeva, avšak nemůžeme vyloučit ani jiné vlivy, například tvorbu esterových a etherových příčných vazeb v ligninu, případně mezi ligninem a hemicelulózami, díky nimž se struktura silných buněčných stěn tepelně upraveného dřeva stává odolnější proti vniknutí molekul vody [61, 31].

Hustota

Při tepelných modifikacích dřeva se některé složky dřeva odbourávají, především hemicelulózy a několik doprovodných látek. Objem modifikovaného dřeva se sice zmenšuje, ale podstatně méně, než jsou jeho vlastní úbytky hmotnosti. V součtu se tento jev odráží v drobném poklesu hustoty tepelně upraveného dřeva. Proces zhušťování tepelně modifikovaného dřeva v příčném směru byl popsán v několika vědeckých a odborných pracích, přičemž se současně zjistila skutečnost, že výsledkem vznikajícího napětí v tangenciálním a radiálním směru je i nepatrné zvětšení rozměrů v podélném směru ve dřevě [61, 23, 68].

Vůně a barva termicky modifikovaného dřeva

Tepelně modifikované dřevo má svoji charakteristickou vůni a barvu [57, 120]. Dřevo se vlivem vysokých teplot zbarvuje do žluto-hnědých až hnědo-černých odstínů. Zvyšováním teploty a delším časem ohřevu dochází k tmavšímu zbarvení modifikovaného dřeva [7, 98, 20]. Ohřev v ochranné atmosféře vzduchu vyvolává větší změny v jeho barevné struktuře v porovnání s ohřevem v ochranné atmosféře dusíku. Netradiční změna lesku a barvy dřeva nastává při jeho ohřevu v rostlinných olejích [23, 99, 118].

Obr. 5. Barevné změny tepelně upraveného dřeva [128]

Termicky modifikované dřevo získává charakteristickou vůni podobnou karamelu. Příčinou jsou vyluhovatelné organické produkty (VOC) vznikající rozkladem hemicelulóz. Termicky modifikovaná dřeva s vyšším podílem těchto vyluhovatelných

látek v určitém smyslu zapáchají, což občas bývá drobnou překážkou jeho širšího využití v interiérech budov [7, 91].

Tepelně izolační vlastnosti

Tepelná vodivost termicky upraveného dřeva se snižuje v průměru o 10–30 %. Z tohoto důvodu je výhodné použití Thermowoodu pro okna, vnější dveře, obklady budov, ale například i sauny [29].

Akustické vlastnosti

Termicky modifikované dřevo má také zvláštní akustické vlastnosti. Pro výrobu hudebních nástrojů je možné při nižších teplotních podmínkách připravit speciální druhy Thermowoodu, jejichž struktura a vlastnosti se shodují s dlouhodobě přirozeně skladovaným rostlým dřevem, tzn. vyznačující se mírným nárůstem Youngova modulu pružnosti [79].

Pevnost, tvrdost a rázová houževnatost

Pokles rázové houževnatosti a pevnosti tepelně modifikovaného dřeva je závislé na stupni modifikace, jeho stavebních polymerů (odbourání, depolymerizace, kondenzace apod.). Tyto změny se stávají nejen v hemicelulózách, ale také i v jiných složkách upraveného dřeva. Hlavní změny mechanických vlastností Thermowoodu jsou především ovlivněné výškou teploty a časem působení nejvyšší teploty. Obecně platí, že s přibývající teplotou a dobou modifikace klesá houževnatost a pevnost [13].

Vlastnosti díky poklesu houževnatosti a pevnosti termicky modifikovaného dřeva jsou pro výrobce a uživatele velmi důležité. Všeobecně platí, že velké snížení houževnatosti a ohybové pevnosti dřeva při tvrdších a delších režimech tepelných modifikací v průměru o 30–50 % je pro většinu dřevařských výrobků nepřijatelné [23]. Znamená to tedy to, že v technologiích výroby jednotlivých typů Thermowoodu je potřeba zajistit tato opatření [21, 56]:

- dlouhodobě nepřekračovat teplotu 220 °C a zároveň omezit přístup vzduchu,

- pokud teplota dlouhodobě překročí 220 °C, tak ohřev musíme ukončit za nepřítomnosti kyslíku.

Následně platí také zásada, že vyráběné tepelně upravené dřevěné materiály typu Thermowoodu se nesmí používat pro nosné konstrukce [9, 76, 85].

Modul pružnosti

Modul pružnosti se většinou díky vlivu ohřevu dočasně zvýší a začne klesat až poté, co dochází k výraznějším úbytkům hmotnosti dřeva pod 6 až 8 %. Avšak při ohřevu dřeva s větším podílem agresivních chemikálií se modul pružnosti dřeva snižuje ve většině případů ihned [22, 61, 81].

2.1.3 Trvanlivost tepelně modifikovaného dřeva

Pojem trvanlivost dřeva znamená v první řadě jeho odolnost vůči působení dřevokazných hub, plísní, dřevokaznému hmyzu, ale i jiným biologickým škůdcům [30]. Ve větším měřítku sem řadíme také jeho odolnost proti povětrnostním vlivům, požáru a mechanickému opotřebení [61, 93].

Biologická odolnost

Velké zlepšení biologické odolnosti termicky upraveného dřeva zapříčiňuje použití vyšších teplot 150–260 °C, kdy se zjevněji mění jeho chemická stavba [116]. Zlepšení biologické odolnosti tepelně upraveného dřeva se obecně připisuje následujícím změnám v jeho chemické struktuře [105]:

- snížením podílu – OH funkčních skupin a zvýšením hydrofóbnosti daného dřeva následkem kondenzačních reakcí. Snižuje se tím jednak sorpční kapacita dřeva a také i jeho vlhkost potřebná pro biologické škůdce (pro hmyz w_{min} = 10 %, pro houby w_{min} = 20 %) také se mění i podmínky pro difúzní transport enzymů i nízko molekulových katalyzátorů vytvářených houbami ve dřevě) [116],
- odebráním určitého podílu hemicelulóz, které jsou potřebné pro houby a hmyz,

- vytvoření speciálních látek s biocidním účinkem, vytvořených z původních extrahovatelných látek a také z termicky degradovaných složek rostlého dřeva – např. fenantrén apod. [61].

Resistence vůči hnilobě a plísním je důležitá tehdy, když se vlhkost dřeva dostává k hranici 20 % [116]. Thermowood ve srovnání s nemodifikovaným dřevem vykazuje lepší odolnost vůči všem výše uvedeným biologickým činitelům [61].

Na základě dlouhodobých poznatků můžeme říci, že biologická odolnost Thermowoodu se výrazně zvyšuje hlavně vůči celulózovorním (*Coniphora puteana, Gloeophyllum trabeum, Poria placenta* apod.) a ligninovorním (*Trametes versicolor* apod.) houbám [49, 73].

Odolnost vůči povětrnostním vlivům

Odolnost tepelně modifikovaných dřevin vůči vlivu komplexu povětrnostních vlivů (sluneční záření, vítr, emise, voda, kyslík apod.) přímo závisí na konkrétních technologických podmínkách při výrobě [61].

Barevný tón se vlivem UV záření, kyslíku a vodních srážek velice rychle mění z hnědé na odstíny šedé. Z těchto důvodu se vždy doporučuje, aby se v exteriérových expozicích povrchově ošetřovaly oleji nebo barvami, které mají podíl pigmentů i UV-absorbentů [108, 45].

Vlhkost tepelně upraveného dřeva je vždy po celou dobu vnitřní nebo vnější expozice nižší než u klasického rostlého dřeva, což souvisí s jeho nižší hygroskopicitou.

Drobné trhlinky na povrchu Thermowoodu se tvoří méně, což souvisí s jejich trvale nižší rovnovážnou vlhkostí a lepší rozměrovou stálostí [61].

Eroze povrchu termicky modifikovaného dřeva vlivem drobných částic unášených větrem – jako např. zrnka písku nebo prachu je o něco vyšší než u klasického rostlého dřeva. Povrch takto termicky modifikovaného dřeva je tedy méně odolný vůči abrazivním činitelům [47].

Protipožární odolnost

Tepelně upravená dřeva jsou celkem stejně odolné jako původní neupravené dřevem. Zatímco tvorba dýmu je o něco nižší než u rostlého dřeva [61].

Obrábění

Termicky modifikované dřevo se lépe opracovává běžnými ručními i strojními způsoby (nástroje však musí být velmi dobře naostřené), řezné plochy jsou znatelně hladší a snižuje se i řezná síla potřebná na obrobení tohoto dřeva. Drobnou překážkou může být tvorba jemného prachu, který se musí odsávat, aby nedocházelo k znečišťování pracovního prostředí a nemohlo nevyvolávat zdravotní problémy obslužného personálu, aby nedošlo k jeho vdechování. Po celou dobu obrábění se uvolňují také aromatické látky, které můžeme výrazně cítit ve formě zápachu [47].

Chemické složení dřeva

Struktura a složení dřeva je velmi složitý proces a každá dřevina se svým obsahem chemických látek liší, obecně lze však říci, že za nejdůležitější složky dřeva patří [92, 31, 119]:

Celulóza

Nejrozšířenější organická látka na naší planetě. Tvoří tzv.“kostru” buněčných stěn všech rostlinných organismů. V jehličnanech se nachází 46–55 %, u listnáčů 41–48 %. Základní jednotka: celulózy je celobióza (složena ze dvou β-D-glukopyranosových jednotek), polymerační stupeň: 5–14 tisíc (izo. celulóza 500–1500), vodíkové vazby umožňují vznik nadmolekulární struktury (prostorové uspořádání). Celulóza má dva strukturální typy: krystalická část 70 % s pravidelnou strukturou a amorfní část 30 %, což jsou vláknité makromolekuly bez prostorového uspořádání. Vysoký podíl krystalické složky má za následek, že je vyšší hustota dřeva, vyšší rozměrovou stabilitu, vyšší pevnost v tahu a vyšší Youngův modul pružnosti. Sousední řetězce celulózy se spojují pomocí vodíkových vazeb, tím vzniká nad molekulová struktura celulózy. Pokud se mezi řetězce celulózy dostanou molekuly vody, řetězce celulózy se začnou oddalovat a tím dochází k bobtnání dřeva [87, 92].

Hemicelulóza

Je to směs dalších polysacharidů ve složce dřeva. Hemicelulóza má polymerizační stupeň 100–200, jsou to heteropolysacharidy, které obsahují další hexózy a pentózy (D-glukosa, D-galaktóza, D-xylóza, Larabinosa, uronové kyseliny a další). Mezi vláknitými strukturami celulózy a ligninem tvoří tmelící složku. Xylany u listnáčů obsah až 35 %, nachází se zde řetězce z β-D-xylopyranosových jednotek (pentózy), kde se nachází polymerizační stupeň 100–200. U jehličnanů 10–15 % s polymerizačním stupněm 70–130. Manany obsahují řetězce z glukopyranózových a manopyranózových jednotek (hexózy), kde se nachází polymerizační stupeň 60–70, u jehličnanů až 20 %, u listnáčů 3–5 %. Poslední polysacharidy jsou Galaktany, který má zvýšený podíl v reakčním dřevě. Chemické vlastnosti hemicelulóz je závislý na délce řetězce, stupni acetylace a stupni rozvětvení. Hemicelulózy můžeme extrahovat ze směsi pomocí zředěných alkálií, některé z nich i vodou. Hemicelulózy jsou snadno hydrolyzovatelné, a jejich vliv na fyzikální a chemické vlastnosti se projevují při technologických procesech, jako jsou paření, vaření, lisování a sušení dřeva [92, 126].

Holocelulóza

Je název pro všechny polysacharidické frakce ve dřevě (celulózu a hemicelulózu). Jedná se tedy o dřevní extrakt, ze kterého byl odstraněn lignin [53, 126].

Lignin

Lignin je po celulóze druhým nejvíce zastoupeným přírodním biopolymerem. Má své makromolekuly prostorově rozložené. Vazba na polysacharidy je pomocí elektrostatických interakcí, chemickými vazbami (především vázané na boční řetězce hemicelulóz) a van der Walsovými silami. Polysacharidy tvoří s ligninem LCC nepravidelné rozložení v rámci BS Lignin je v jehličnanech zastoupen 24–33 %, u listnáčů 19–28 %. Chemickou strukturu a stavbu ligninu lze definovat jako amorfní polyfenolickou látku vytvářející dehydrogenativní polymerací tři fenylpropanových monomerů. Lignin postrádá pravidelnou strukturu. Lignin je směs chemicky a fyzikálně a heterogenních látek. Ve většině publikací se nazývá termínem statistický polymer hydroxyfenylpropanových jednotek. Lignin dodává přírodnímu dřevu větší tuhost, snižuje propouštění a zvyšuje ochrannou funkci všech rostlinných pletiv, zvyšuje mechanickou pevnost dřeva (ohybovou, tlakovou houževnatost) [53, 94].

Extraktivní látky

Mezi extraktivní látky patří různé látky, které se vyskytují v menších množstvích. Nacházejí se v mezibuněčných prostorách, buněčných stěnách a lumenech. Tyto látky mají vliv na vůni, sušení, trvanlivost, odolnost a barvu dřeva. Ve dřevě se nacházejí organické látky, které označujeme také jako extraktivní látky (1–5 % hmoty dřeva) a anorganické látky, jejichž spálením dostaneme popel (méně než 1 % hmoty dřeva). Anorganické látky dostaneme mineralizací, především draselné, hořečnaté a vápenaté soli (fosforečnany, sírany, uhličitany) – ve formě krystalků – okolo 25 % lze vyluhovat vodou. Dále potom soli vápníku až do 50 %, menší množství Na, P, Mn, Cl. Organické látky, sacharidy, pektinové látky, deriváty poly-D-galakturonové kyseliny, stopové prvky, škrob (= amylosa + amylopektin) [53, 94, 35].

Toxicita

Výroba Thermowoodu je ekologicky velmi přijatelný technologický proces, při kterém se využívá jen teplo s vodní párou bez žádných toxických chemikálií. Termicky modifikované dřevo nevykazuje žádnou jinou toxicitu ve srovnání s rostlým dřevem, což znamená, že s ním můžou být lidé trvale v kontaktu [108, 104].

Drobným ekologickým nedostatkem může být výrazný karamelový zápach, který se ze dřeva trvale uvolňuje a má ho za následek zvýšený podíl 2 - furaldehydu, také jemný prach vznikající při jeho mechanickém opracování, který může mít nepříznivý vliv hlavně na astmatiky. Použité výrobky z Thermowoodu se dají bez jakýchkoliv problémů zlikvidovat spálením nebo jiným způsobem používaným pro likvidaci odpadů a rostlého dřeva [97].

2.1.4 Klasifikace a použití tepelně modifikovaného dřeva

Všechny technologie tepelných úprav dřeva nám umožňují vyrobit takové druhy Thermowoodu, které mají „specifické vlastnosti“ tak, aby co nejvíce vyhovovaly kvalitativním kritériím vzhledem k jejich budoucímu využití [109]. V dnešní době je na trhu již mnoho druhů termicky modifikovaného dřeva, například termicky modifikované dřevo vyráběné v Holandsku pod označením Plato®Hout, Plato®Wood, případně Platonium®. Ve Finsku se průmyslově vyrábí tepelně modifikované dřevo pod názvem Thermowood® a to ve dvou třídách Thermo-D a Thermo-S zvlášť pro listnaté a jehličnaté dřeviny. Tyto třídy se navzájem liší v technologických parametrech jejich výroby (časových, teplotních a jiných podmínkách) a také se liší v možnostech jejich použití (tab. 1). [108, 27].

Tab. 1. Změny základních vlastností termicky upraveného dřeva ThermoWood® (typy: Thermo-S a Thermo-D) [108]

Dřevina	Vlastnosti	Thermo-S	Thermo-D
Jehličnaté dřeviny (borovice, smrk…)	• Rozměrová stabilita	+	++
	• Odolnost vůči povětrnosti	+	++
	• Trvanlivost (EN 350-1 / vůči hnilobě: třídy 1-5)	3	2
	• Ztmavnutí	+/-	-
	• Ohybová pevnost	+	++
Listnaté dřeviny (osika, bříza…)	• Rozměrová stabilita	+/-	+
	• Ohybová pevnost	+	+
	• Trvanlivost (EN 350-1 / vůči hnilobě: třídy 1-5)	4	3
	• Ztmavnutí	+/-	-
	• Odolnost vůči povětrnosti	+	++

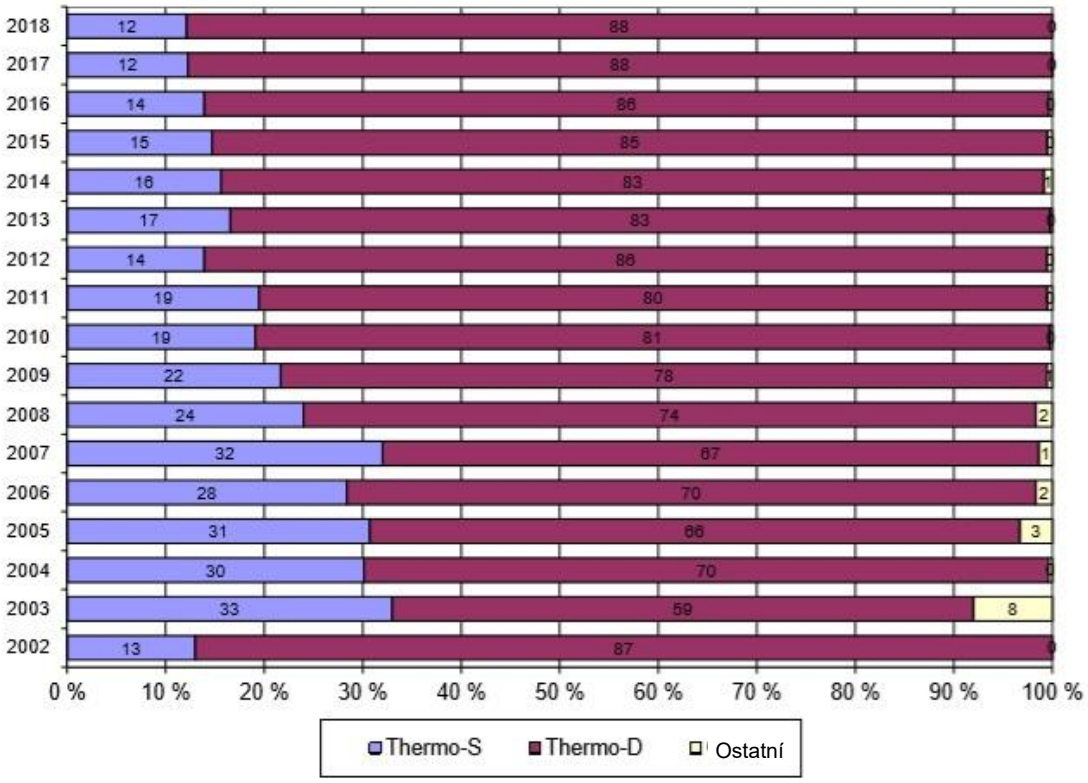
Tab. 2. Příklady použití termicky upraveného dřeva ThermoWood®

Jehličnaté dřeviny (smrk, borovice, …)	• interiérové konstrukční prvky • podlahy • okna a dveře • nábytek • sauny • obklady	• obklady • dlažby • dětská hřiště • protihlukové bariéry • sauny a koupelnový nábytek • konstrukce do exteriérů
Listnaté dřeviny (bříza, osika, …)	• interiérové konstrukční prvky • nábytek • sauny • podlahy	• termodřevo je tmavší, protože se upravilo vyšší teplotou • podobné jako Thermo-S

(typy: Thermo-S a Thermo-D) [108]

Poznámky: Podmínky tepelné úpravy dřeva:

Thermo-D → 212 ± 3 °C (jehličnaté), 200 ± 3 °C (listnaté)
Thermo-S → 190 ± 3 °C (jehličnaté), 185 ± 3 °C (listnaté)
+ → zlepšení vlastností
- → zhoršení vlastností



Obr. 6. Podíl výroby Thermo-S a Thermo-D Thermowoodu v letech 2001–2018 [127]

Použití termicky modifikovaného dřeva v interiéru

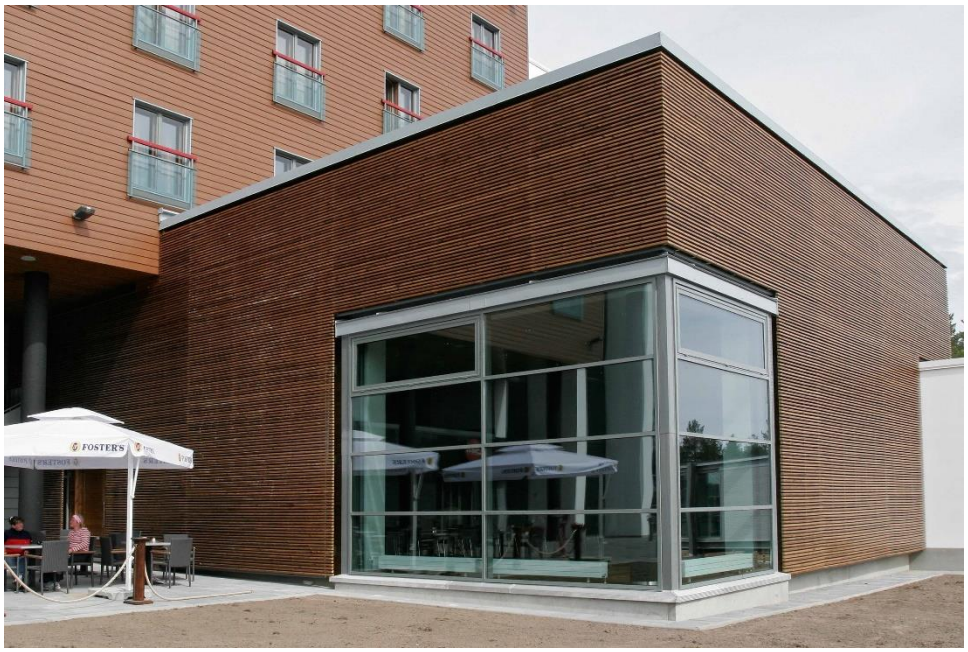
Thermowood má v současnosti široké možnosti využití. V interiéru se používá především na parkety, kuchyňský a koupelnový nábytek, obklady, lavičky v saunách a na stěnové panely [10].

Díky svým vlastnostem odolává například v saunách velkým teplotám a vlhku bez nutnosti dalších úprav jako lakováním, mořením atd. (viz obr. 7.). Díky svým vlastnostem a změně barevného odstínu vyhovuje také požadavkům a designu moderní doby.

Obr. 7. Příklad využití Thermowoodu jako materiál pro vnitřní vybavení saun [129]

Použití termicky modifikovaného dřeva v exteriéru

Vyšší trvanlivost a zlepšení rozměrové stálosti termicky modifikovaného dřeva se využívá hlavně při jeho užití v exteriérech. Především se však aplikuje do 3. třídy ohrožení bez trvalého kontaktu s terénem (např. pro obklady vnějších fasád, okna, oplocení nad úrovní terénu, vnější dveře, altánky, zahradní nábytek zajištěný vůči kontaktu dřevěných nohou s terénem atd.).



Obr. 8. Příklad využití Thermowoodu jako obklady pláště budov [130]

2.2 Rovinné frézování

Jako dalším hlavním bodem mé disertační práce je nejčastější operace při opracování dřeva, a to obrábění dřeva frézováním (v našem případě se budeme zabývat především rovinným frézováním). Problematikou obrábění a frézování dřeva se zabývají především autoři publikací jako Wilkowski J., Davim J. P., Rousek M. a mnoho dalších[109, 19, 80].

2.2.1 Teorie frézování

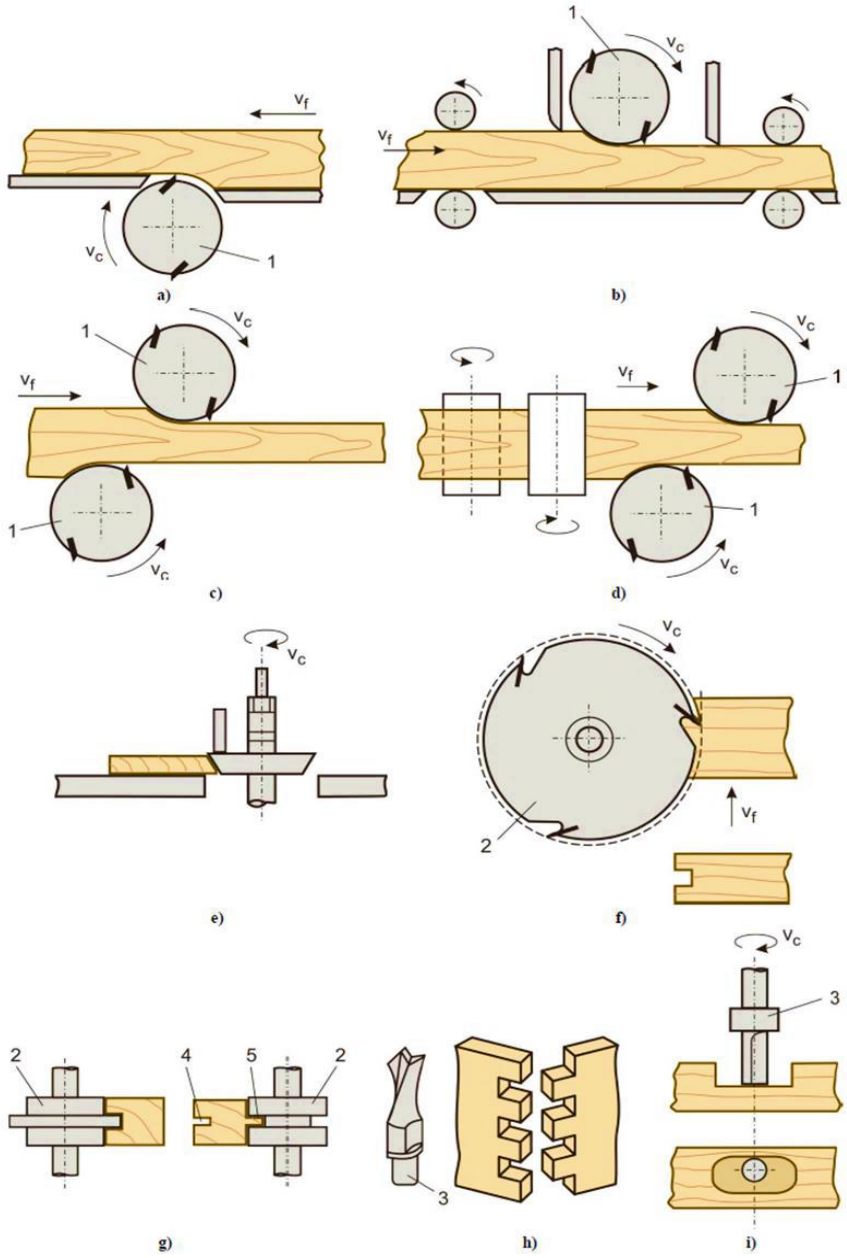
Frézování je obrábění materiálu otáčejícím se nástrojem (frézovací hlavou, frézou) za účelem úběru materiálu [83]. Ofrézováním materiálu získáme kvalitní povrch s přesnými rozměry, který je důležitý pro další zpracování (rotační, rovinná nebo tvarová plocha). Tento proces mechanického opracování obrobku je charakteristický především tím, že je procesem, při kterém se tvoří třísky. Tloušťka třísky se mění od minimální až po maximální [109]. Díky kruhovému rotačnímu pohybu celého nástroje a řezné hrany spolu s nožem přímočarým, rovnoměrným pohybem obrobku je konečný pohyb řezného nože cykloidní [6, 66, 122].

Obrábění se rozděluje do čtyř základních kategorií dle hlavního řezného pohybu [77]:

1. Cykloidní pohyb vykonává přímo obrobek (soustružení);
2. Cykloidní pohyb vykonává pouze nástroj (řezání kotoučovou pilou zahlubování, frézování, broušení, vrtání);
3. Přímočarý vratný pohyb při obrábění vykonává přímo obrobek (hoblování);
4. Přímočarý vratný pohyb při obrábění vykonává nástroj (řezání pásovou pilou, pilování protlačování, řezání rámovou pilou).

Základní technologické způsoby frézování [77]:

- rovinné („srovnání“ a „tloušťkování“),
- křivoploché (frézování křivé plochy),
- profilovací (frézování různých profil),
- speciální (např. frézování reliéfů).



Obr. 9. Hlavní druhy frézování

a) srovnání, tloušťkování, b) oboustranné frézování, c) boční frézování d) frézování pera a drážky, e) úhlové frézování, f) čepování, g) frézování spojů rybinovou frézou, h-i) frézování vrchní frézou [6]

„Srovnáním“ nazýváme ofrézování jedné základní plochy na nerovném dílci, díky které dílec v následující operaci opracujeme na přesnou tloušťku [52].

„Tloušťkování“ následuje po srovnání jedné plochy dílce, díky které se dílec položí na stůl a tloušť kovací nožová hlava upevněná nad stolem ofrézuje druhou plochu a ofrézuje dílec na požadovanou přesnou tloušťku [77].

Při rovinném frézování se používají válcové nožové hlavy a frézovací kotouče. Frézování je také možné vykonávat i kónickými nožovými hlavami, stopkovými frézami nebo čelními frézami [52, 54].

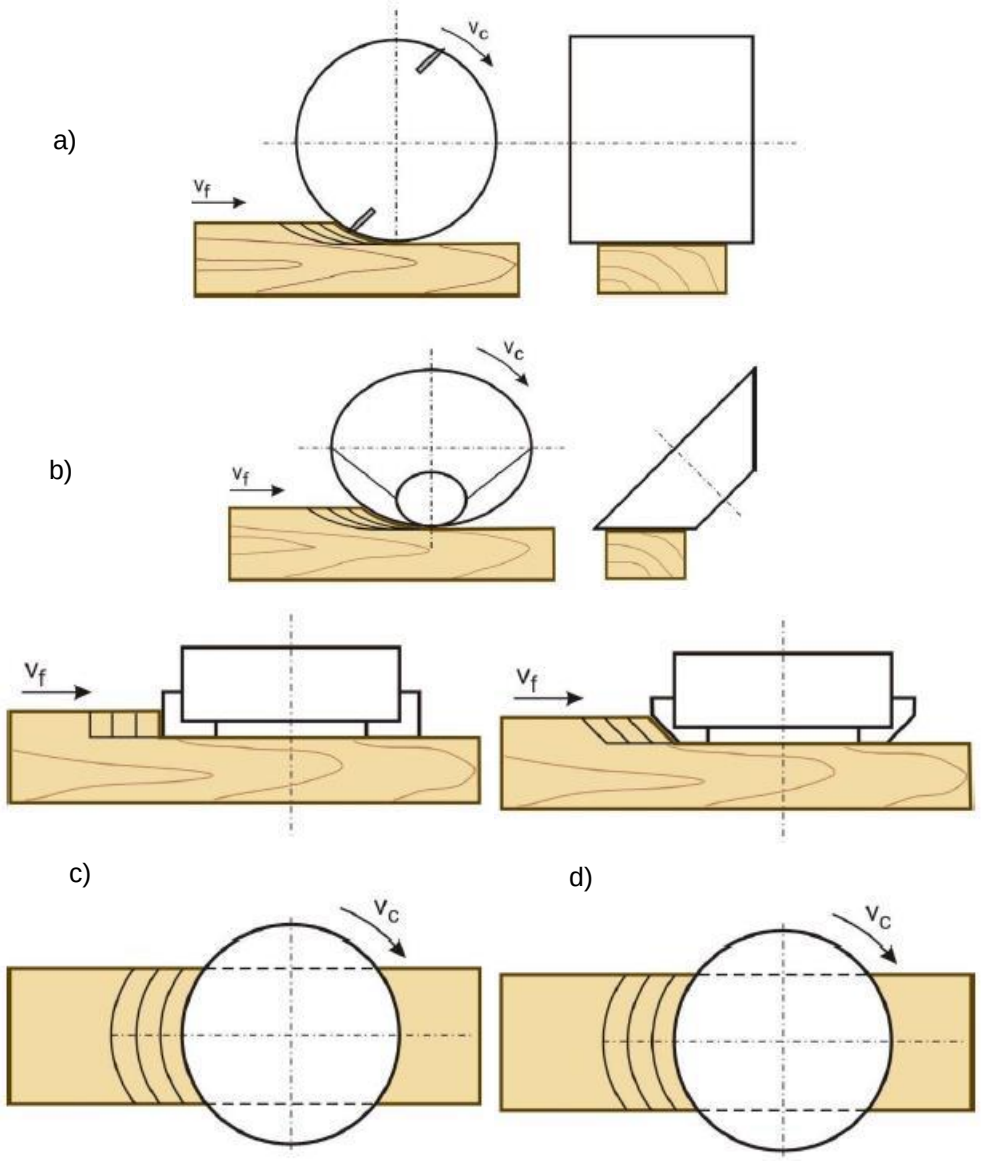
Nerovné plochy můžeme frézováním na dílcích vytvářet vedením dílce okolo kotoučové frézy za použití šablon nebo nakláněním zadního stolu na srovnávací frézce apod. [62].

Ostatní profily se na dílcích vytvářejí s použitím kotoučových fréz s tvarovanými řeznými hranami, případně soupravami jednoduchých kotoučů, nebo i stopkovými profilovacími frézami. Dle druhu posuvu dílce se získá rovný či zakřivený profil. Při speciálním frézování např. při vytváření reliéfů se používají téměř výhradně stopkové frézy [77, 96].

2.2.2 Nejběžnější druhy frézování dle polohy osy otáčení nástroje a tvaru ploch, které při frézování přímo opisují břity nástroje:

- válcové frézování – osa otáčení nástroje je rovnoběžná s obrobenou plochou, břity opisují přímo válcovou plochu [82, 77],
- kuželové – osa otáčení frézy je nakloněná o přesný úhel k obráběné ploše a břity opisují tuto válcovou plochu. Čelní břity jsou rovnoběžné s odebíraným povrchem. Tento způsob se používá u většiny tvarových a stopkových fréz. Boční břity tedy pracují na bázi válcového frézování, a to téměř kolmo ke směru dřevních vláken [82, 77],
- čelní frézování – osa frézovacího nástroje je přímo kolmá k obráběnému povrchu, břity nástroje opisují válcovou plochu. Boční břity pracují na principu již zmíněného válcového frézování téměř kolmo ke směru dřevních vláken. Čelní břity jsou rovnoběžné s odebíraným povrchem. Tento způsob frézování se používá u většiny tvarových a stopkových fréz po celém světě [82, 77],

- čelní kuželové frézování – osa obrábějícího nástroje je kolmá k obráběnému povrchu, ovšem tentokrát jsou břity nakloněné k obráběnému povrchu pod přesným úhlem. Břit nástroje může být přímý nebo zaoblený [77, 66, 62].



Obr. 10. Způsoby frézování podle polohy osy otáčení a podle tvaru plochy, které opisují břity nástroje

a) válcové frézování, b) kuželové frézování, c) čelní frézování, d) čelní kuželové frézování [6]

2.2.3 Kinematika procesu frézování

Při konstantní řezné rychlosti (v_c) a podávací rychlosti (v_f) má kinematický pohyb řezné hrany cykloidní tvar [15].

Souřadnice bodu A (tj. poloha řezné hrany) na cykloidě je daný výrazy [6, 64]:

$$x_A = x_B \pm \overline{AB} = R.\sin\psi \pm \frac{f_z}{\omega}\psi \quad [mm], \qquad (2)$$

kde:

***R* – je poloměr řezné kružnice [mm],**

***ψ* – středový úhel natočení řezné hrany nástroje [°],**

***f_z* – posuv dílce na jeden zub [mm],**

***ω* – úhlová rychlost [°.s^{-1}].**

$$y_A = y_B = R.(Q - \cos D\hat{}) \quad [mm] \qquad (3)$$

Díky otáčejícímu pohybu ostří a přímočarému pohybu obráběného materiálu je výsledný pohyb ostří cykloidní [109]. Charakter závisí na způsobu frézování (znaménko + v rovnici (3) platí pro frézování protiběžné, znaménko – je pro frézování souběžné), dále na řezné a posuvné rychlosti [15]. Vznikání cykloid, ze kterých vyplývá rozdílný profil odfrézované plochy za stejných podmínek frézování, je zobrazen na obr 11. [66, 46].

$$v_f \approx v_c = \frac{\pi.D.n}{60.1000} \quad [m.s^{-1}] \qquad (4)$$

,

kde:

***v_f* – relativní rychlost řezného klínu (m/s),**

***v_c* – řezná rychlost (m/s),**

***D* – průměr řezné kružnice (mm),**

***n* – frekvence otáčení nástroje (1/min).**

U frézovacích nástrojů s větším průměrem je řezná rychlost v poměru k rychlosti posuvu velmi vysoká, to znamená, že na úseku záběru jednoho řezného klínu můžeme s dostatečně velkou přesností předpokládat, že řezná dráha tvoří kružnici [6, 66, 52].

Cykloidy s obloukem kruhovým [66]:

$$l = \pi . D . \frac{\psi_0}{360} \quad [mm^{-1}] \tag{5}$$

$$D\hat{}_0 = arcsin 2\sqrt{\frac{e}{D}} \quad [°], \tag{6}$$

kde:

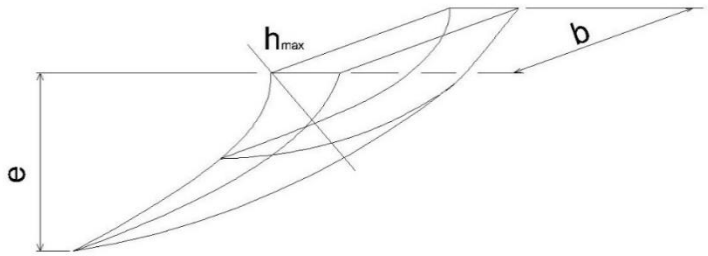
***l* – délka kruhového oblouku (mm^{-1}),**

***e* – výška řezu (mm).**

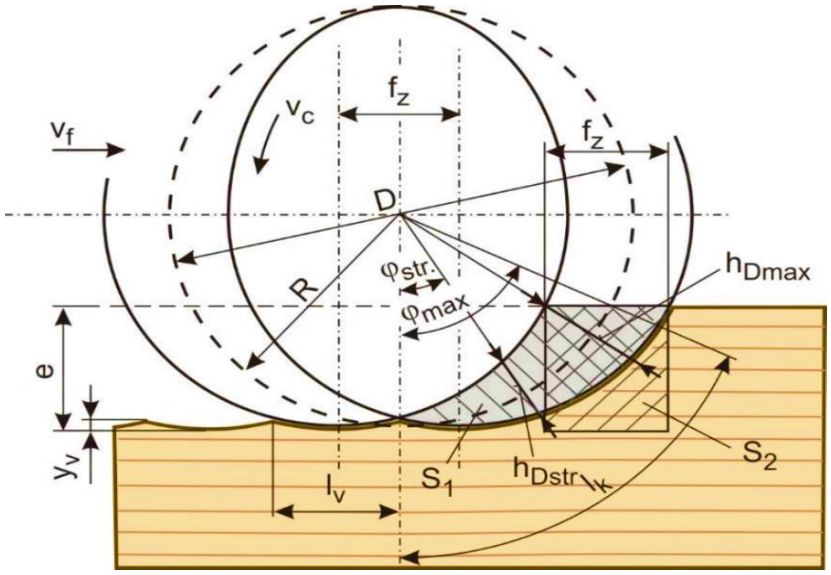
2.2.4 Tvar a rozměr třísky

Kinematiku oddělování třísky při rovinném frézování vidíme na obr. 11. V běžné praxi však narazíme na rozdíl mezi skutečným a nominálním průřezem třísky. To je dáno otupení břitu, nepřesnosti při chodu vřetene, odchylky břitů od řezné cykloidy, nestabilní průchod obrobku přes podávacího zařízení, a také především velký vliv má odštipování a nestejnorodosti obráběného materiálu [77, 22, 16].

Přířez (tloušťka) třísky je proměnlivý od $h = 0$ až $h_{max} < f_z$, vztah pro tloušťku třísky vyplývá z obr. 12. [4, 124].



Obr. 11. Profil odfrézované třísky válcovou frézou [4]



Obr. 12. Teoretický výpočet tloušťky a délky odfrézované třísky [6]

$$\frac{h_{max}}{f_z} = sinD\text{^} \qquad \rightarrow \qquad h_{max} = f_z sinD\text{^}$$

$$h_{max} = \frac{2f_z}{D}\sqrt{e(D-e)} \quad [mm] \tag{7}$$

***h_{max}* – maximální tloušťka třísky (mm)**

Protože:

$$f_z = \frac{v_f}{nz} \tag{8}$$

$$h_{max} = \frac{2v_f}{Dnz}\sqrt{e(D-e)} \quad [mm] \tag{9}$$

$$h_{str} = \frac{1000v_f}{nz}\sqrt{\frac{e}{D}} \quad [mm] \tag{10}$$

***h_{str}* – střední tloušťka třísky (mm)**

Délka třísky ($\bar{b}$) je dána délkou řezného oblouku (obr. 12.) a její znalost je důležitá při analýze trvanlivosti řezné hrany [71].

$$\bar{b} = \bar{b}_2 + \bar{b}_1 = Rarc(\psi_2 + \psi_1) \quad [mm] \tag{11}$$

***R* – poloměr řezné kružnice (mm),**

kde:

$$\psi_2 = arcsin\frac{f_z}{D} = arcsin\frac{\pi v_f}{60 v_c};\ \psi_1 = arccos\frac{R-e}{R} \tag{12}$$

$$e' = R - RcosD\hat{}_2 = R(1 - cosD\hat{}_2) \quad [mm] \tag{13}$$

Stanovení posuvné rychlosti v_f a úběru e:

$$v_f \leq \frac{h_{max} Dnz}{2\sqrt{e(D-e)}} \tag{14}$$

$$v_{fmax} = \frac{xzn}{1000} \quad [m.min^{-1}] \tag{15}$$

$$e \leq \frac{D}{2} + \frac{D}{2}\sqrt{1 - \frac{h_{max}^2}{f_z^2}} \quad [mm], \tag{16}$$

kde:

***z* – počet zubů (řezných klínů) na nástroji (kus),**

***x* – vyčnívání řezné hrany z nástroje (mm).**

Posuv na jednu otáčku nástroje:

$$f_n = \frac{v_f 1000}{n} \quad [mm]. \tag{17}$$

Posuv na jeden zub nástroje:

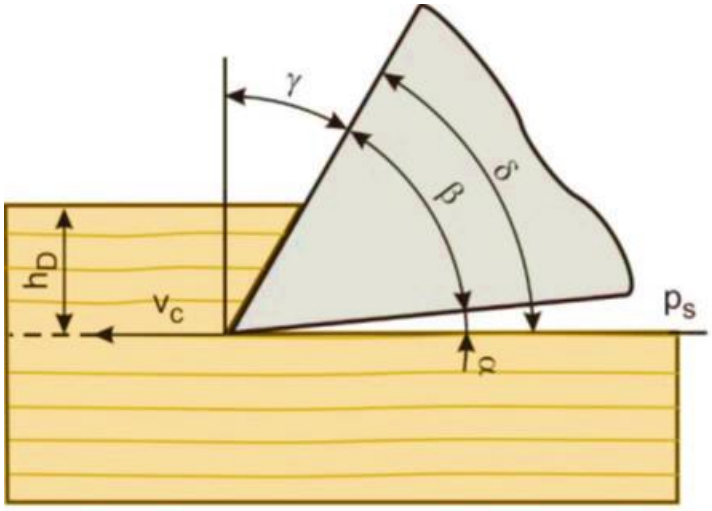
$$f_z = \frac{v_f 1000}{nz} \quad [mm]. \tag{18}$$

Bez procesu frézování se při opracování termicky modifikovaného dřeva opravdu neobejdeme [18]. Díky tomuto poznatku také víme, že bude jednou ze zásadních operací, kde bude velká spotřeba elektrické energie [109, 34].

V následujících kapitolách si tedy popíšeme, jak se dá měřit spotřeba elektrické energie při samotné výrobě termicky modifikovaného dřeva [84], dále jak se dá měřit okamžitá spotřeba přímo při frézování a jaké faktory ovlivňují samotnou spotřebu při frézování [12, 16].

2.2.5 Úhlová geometrie břitu

Úhlová geometrie břitu je důležitá z hlediska určení geometrické polohy řezné hrany, čela a hřbetu nástroje.



Obr. 13. Úhlová geometrie řezného nástroje [86]

p_s – nástrojová základní rovina,v_c – řezná rychlost,

δ – nástrojový řezný úhel,

α – nástrojový úhel hřbetu,

β – nástrojový úhel řezného klínu,

γ – nástrojový úhel čela,

h_D – nominální tloušťka třísky.

2.3 Měření energetické náročnosti procesu frézování

2.3.1 Řezný výkon stroje

Při hodnocení strojů na obrábění dřeva z hlediska terminologie rozeznáváme příkon a výkon. Příkon je velmi důležitý parametr, který je potřebný pro určení energetických nákladů například pro dimenzování elektrické rozvodné sítě ke stroji [67]. Příkon motoru P_p můžeme definovat jako součin proudu, účinku cosφ tj. výkon stroje odebraný ze sítě elektrické energie a napětí [59]. Požadovaný řezný výkon stroje P_c je výkon důležitý na vyvinutí potřebné řezné síly důležité k odloučení třísky z materiálu při dané technologické operaci. Jednoznačně se dá říci, že je to množství vynaložené práce za jednu sekundu [79, 60, 6].

- při měřeních můžeme zaznamenávat dva druhy elektrických příkonů: Příkon elektromotoru při volnoběhu P_{PO}, který změříme na dřevoobráběcím stroji při práci bez opracování materiálu (což je potřebný příkon k překonání elektromechanických ztrát motoru, ztrát v převodech a vedeních daného dřevoobráběcího stroje) [90],

- příkon elektromotoru naměřený při technologické operaci P_{PR} je, když dřevoobráběcí stroj reálně opracovává daný materiál, zde se využívá kromě překonání již zmíněných ztrát i energie k samotné technologické operaci.

Pokud známe oba dva příkony a akceptujeme pravděpodobnost, že absolutní ztráty v elektromotoru stroje pracujícího na volnoběh a motoru při samotné práci stroje jsou stejně veliké, můžeme pro výpočet řezného výkonu použít následující vzorec [6, 66, 63]:

$$P_C = \frac{P_{PR} - P_{PO}}{\eta_C} \qquad [kW], \qquad (19)$$

kde:

η_C – celková účinnost dřevoobráběcího stroje.

Pokud známe řezný výkon, je možné jednoduše zjistit i řeznou sílu, kterou chápeme jako sílu, kterou musíme působit na obráběcí nástroj, abychom mohli překonat odpor dřeva a vykonal se tak třískotvorný proces [66]:

$$F_C = \frac{P_C}{v_C} \qquad [N]. \tag{20}$$

2.3.2 Empiricko-statistický výpočet řezné síly a spotřeby energie

Pokud z nějakého důvodu nelze řezný výkon přímo změřit, můžeme ho na základě následujících vzorců vypočítat [6, 66].

Řezná síla při podélném frézování:

$$F_{r_{str}} = C_F h_{str}^{-0,51} \delta^{1,1} v^m w^{-0,23} \rho^{0,44} \varphi_{2_{str}}^{0,17} e^{0,8} \gamma_{šp}^{1,43} bU \qquad [N] \tag{21}$$

$při\ v \leq 45\ m.s^{-1}$ $\qquad C_F = 1\,126.10^{-6}$ $\qquad m = -1{,}37$

$při\ v > 45\ m.s^{-1}$ $\qquad C_F = 5\,867.10^{-9}$ $\qquad m = 0{,}03$

Řezný výkon:

$$P_r = C_F h_{str}^{-0,51} \delta^{1,1} v^k w^{-0,23} \rho^{0,44} \varphi_{2_{str}}^{0,17} e^{0,8} \gamma_{šp}^{1,43} bU \qquad [kW] \tag{22}$$

$při\ v \leq 45\ m.s^{-1}$ $\qquad C_F = 11{,}26.10^{-8}$ $\qquad m = -0{,}37$

$při\ v > 45\ m.s^{-1}$ $\qquad C_F = 5\,867.10^{-11}$ $\qquad m = 1{,}03$

Platnost předcházejících rovnic (21) a (22) je v mezích (uvedené meze zahrnují vyskytující se podmínky frézovacích procesů v dřevařské praxi téměř úplně) [66].

$$F_{r_{str}} = C_F h_{str}^{-0,44} \delta^{1,1} v^m w^{-0,31} \rho^{0,31} e^{0,17} \gamma_{šp}^{1,23} bU \qquad [N] \qquad (23)$$

$$při\ v \leq 35\ m.s^{-1} \qquad C_F = 219.10^{-5} \qquad m = -1{,}13$$

$$při\ v > 35\ m.s^{-1} \qquad C_F = 7\,717.10^{-9} \qquad m = 0{,}4$$

Řezný výkon:

$$P_r = C_F h_{str}^{-0,44} \delta^{1,1} v^k w^{-0,31} \rho^{0,31} e^{0,17} \gamma_{šp}^{1,23} bU \qquad [kW] \qquad (24)$$

$$při\ v \leq 35\ m.s^{-1} \qquad C_F = 219.10^{-7} \qquad m = -0{,}37$$

$$při\ v > 35\ m.s^{-1} \qquad C_F = 7\,717.10^{-11} \qquad m = 1{,}4$$

Platnost rovnic (23) a (24) je v mezích:

$$h_{str} = 0{,}06 \div 0{,}5\ mm \qquad \delta = 40° \div 90° \qquad v = 3 \div 89\ m.s^{-1}$$

$$w = 10 \div 70\% \qquad \rho = 5 \div 40 \mu m \qquad e = 3 \div 30\ mm$$

$$\gamma_{SP} = 0{,}44 \div 1{,}13\ t.m^3$$

2.4 Kvalita řezného procesu

Kvalitou řezného procesu rozumíme výsledek činnosti nástroje jako celku (ten může mít jen jednu nebo více řezných hran) na celkovou kvalitu produktu podmíněnou třemi druhy přesnosti: tvarová, rozměrová a povrchová [66].

Tvarová a rozměrová přesnost obrobku jsou ovlivňované hlavně tuhostí nástroje celého frézovacího a podávacího mechanismu stroje, přesností nastavení nožů ve více nožovém nástroji. Drsnost povrchu se projevuje jako opakovaný výsledek řezné činnosti samotné řezné hrany na řezném klínu. Zvýšenou pozornost si vyžaduje drsnost zejména pro dílce, které jsou v dalším technologickém kroku určeny pro povrchovou úpravu.

Frézování z pohledu kvality obrobeného povrchu je možné rozdělit na 3 třídy:

název třídy	f_z (mm)	h_{str} (mm)	v_f (m/min)
jemné frézování	0,3–0,8	0,014–0,04	5,4–7,2
střední frézování	0,8–2,5	0,04–0,16	7,2–45
hrubé frézování	2,5 – 5	0,16–0,4	45–90

Uvedené hodnoty se vztahují na otáčky n = 4 500 min^{-1} a 4nožovou frézovací hlavu.

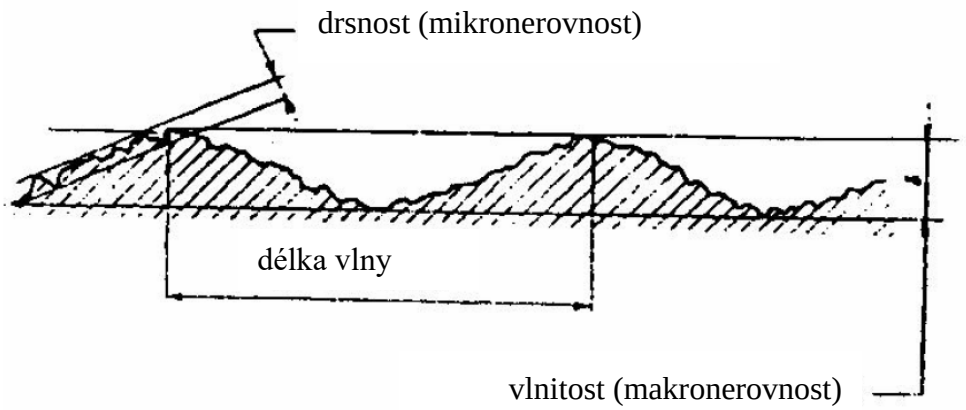
2.4.1 Kvalita frézovaného povrchu

Drsnosti povrchu při frézování jsou vytvářené rotačním pohybem řezné hrany a přímočarým pohybem obrobku. Obrobená plocha se od ploch zadaných výkresem liší především vlivem [46]:

- pružných a plastických deformací v čase tvoření třísky,
- kmitání, vznikající v technické soustavě,
- třením čela nože o obrobenou plochu,
- přesnost výrobního zařízení.

Na obrobeném povrchu, při zkoumání geometrických odchylek skutečného povrchu od ideálního, můžeme v rovině kolmé na obrobený povrch stanovit následující druhy odchylek (obr. 14.):

a) mikrogeometrické b) makrogeometrické



Obr. 14. Geometrické charakteristiky (STN ISO 4287-1)

Mikrogeometrické odchylky jsou dané stopami, které na obrobeném povrchu zanechává nástroj a jsou charakterizované drsností [46]. Kolik se hodnoty drsnosti v různých směrech od sebe liší, rozlišujeme drsnost podélnou (ve směru řezu) a příčnou (kolmou ke směru řezu) [100].

Makrogeometrické odchylky nejsou zapříčiněné jen nástrojem, ale společným působením soustavy stroj – nástroj – obrobek [46]. Mezi tyto odchylky můžeme zařadit vlnitost, kterou můžeme na výkresu ohraničit pomocí tolerancí tvaru [2, 112, 125].

Charakteristické parametry vlnitosti jsou:

- hloubka vlny – vzdálenost mezi nejvyšším a nejnižším bodem z vyrovnaného vlnového profilu, při odfiltrování drsnosti, v rozsahu vyhodnocované délky l_m.
- hloubka profilu – nejmenší vzdálenost mezi dvěma rovnoběžnými hraničními přímkami z nefiltrovaného profilu vyhodnocované délky l_t.

Při nesouběžném frézování a dodržení hodnot *v, u* a *R* vznikne vlnkovitý profil povrchu odfrézovaného dílce, se vzdálenostmi vrcholů vln:

$$l_1 = f_z = \frac{v_f}{nz} \qquad [mm] \qquad (25)$$

a hloubkou vln:

$$y = R - \sqrt{R^2 - \left(\frac{f_z}{2}\right)^2} = \frac{f_z^2}{8R} \quad [mm]. \qquad (26)$$

Při souběžném frézování v podmínkách *u*, *u*, *R* = konstantní hloubka vlnkování:

$$y = \frac{D}{16}\left(\frac{f_z}{R - \frac{fn}{2\pi}}\right)^2 \qquad (27)$$

eventuálně

$$y \doteq R_k - \sqrt{R_k^2 - 0{,}25 f_z^2} \quad [mm], \qquad (28)$$

kde:

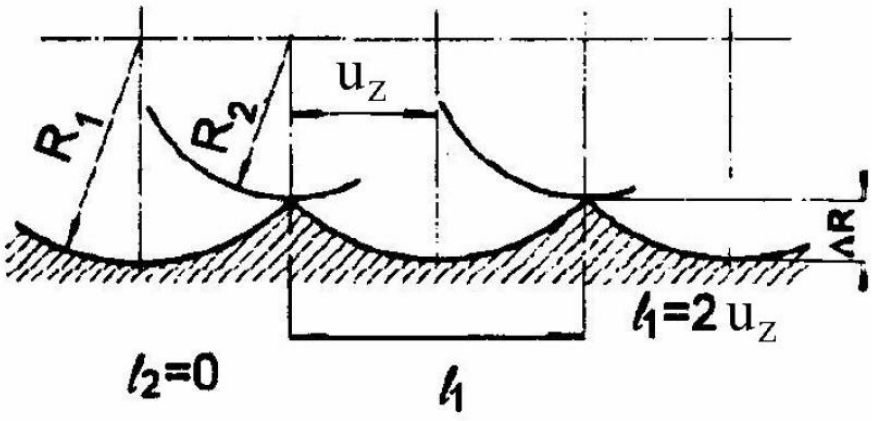
$$R_k = \frac{0{,}5D - f_z z (2\pi)^{-1}}{0{,}5D} \quad [mm], \qquad (29)$$

kde:

R_k – poloměr indikované křivky v bodě A.

U vícenožových hlav v důsledku různých hodnot poloměru řezných hran (*R*) vznikne ofrézovaný povrch s nepravidelnou vlnitostí. V praktických podmínkách je obtížné dosáhnout větší přesnosti nastavení nožů v nožových hlavách než 0,02 mm. Aby ve dvojnožové hlavě pracovaly oba nože, musí být posuvná rychlost minimálně [44, 99]:

$$v_{f\,min} = \frac{nz}{1000}\sqrt{\Delta \mathrm{RD}_1} \quad [m.min^{-1}]. \qquad (30)$$



Obr. 15. Profil povrchu ofrézovaného dvěmi noži s rozdílným poloměrem řezání [66]

Dvojnožová hlava začne pracovat jen jedním nožem při nepřesnosti nastavení:

$$\triangle R \doteq \frac{R_n^2 \psi}{360D}\left(1 - \frac{\psi}{360}\right). \qquad (31)$$

Při počtu nožů více než 2 a běžných hodnot $\Delta R > 0{,}02$ budou pracovat všechny nože při $U_{min} > 60$ m/min, čemuž odpovídá:

$$\Delta R \doteq \frac{u_n^2}{Dz}\left(1 - \frac{1}{z}\right). \qquad (32)$$

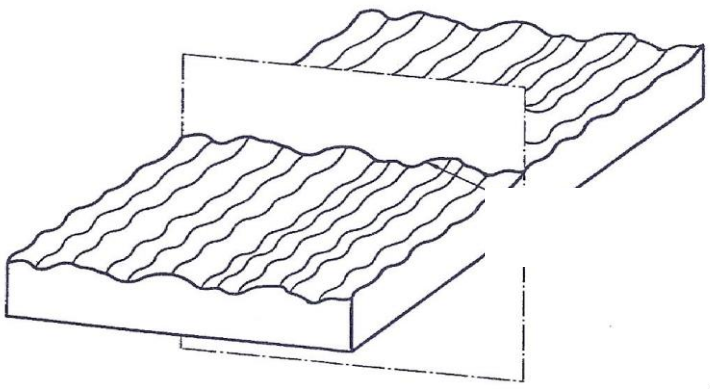
Makrostruktura rostlého dřeva se projevuje na ofrézovaném povrchu ve formě žlábkových rýh, vzniklých přeřezáváním cév.

2.4.2 Průměrné aritmetické úchylky profilu drsnosti a vlnitosti

Ra – průměrné aritmetické úchylky profilu drsnosti a *Wa* – průměrné aritmetické úchylky vlnitosti jsou výškové parametry opracovaného profilu plochy. Dají se definovat jako aritmetický průměr absolutních hodnot souřadnic *Z(x)* v rozsahu základní délky [39, 86].

Dle normy ČSN EN ISO 4287 (1999) je profil povrchu opracovaného materiálu definován jako souřadnicový systém a skutečný povrch. Souřadnicový systém je systém, kde jsou definovány výškové parametry struktury opracovaného povrchu. Skutečný povrch je povrch, který omezuje těleso a izoluje ho od okolního prostředí [39].

Skutečný profil opracovaného povrchu pak vznikne jako průsečnice skutečného povrchu a dané roviny.



Obr. 16. Profil skutečného povrchu [39]

Profil skutečného povrchu slouží k odvození jednotlivých opracovaných profilů. Tři nejzákladnější jsou: profil drsnosti, základní profil a profil vlnitosti. Díky těmto profilům jsou dále charakterizovány a popsány jednotlivé parametry. Pro vyhodnocení struktury daného povrchu tělesa je potřeba oddělit jednotlivé složky profilu jejich vyfiltrováním. K těmto účelům se používá filtr profilu, který nám rozděluje profil na dlouhovlnné a krátkovlnné složky [39, 86].

- filtr profilu λs: definuje rozhraní mezi nejkratšími vlnovými složkami přítomnými na povrchu a drsností;
- filtr profilu λc: definuje rozhraní mezi složkou drsnosti a vlnitosti;
- filtr profilu λf: definuje rozhraní mezi vlnitostí a delšími složkami vln přítomnými na opracovaném povrchu;
- cut–off je mezní vlnová délka filtru profilu.

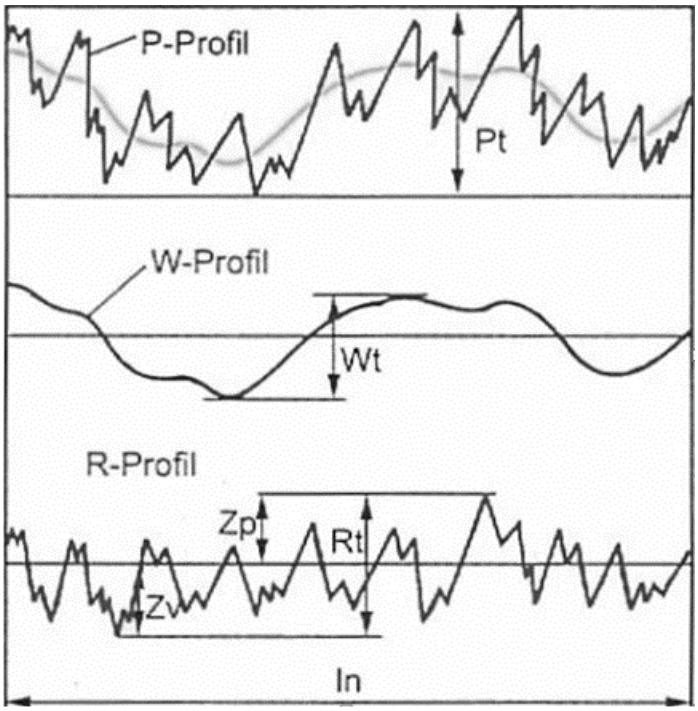
Základní profil drsnosti povrchu je odvozen ze základního profilu a to potlačením dlouhovlnných složek s pomocí filtru λc. Na základě takovéhoto profilu drsnosti můžeme vyhodnotit parametry drsnosti *Ra*. Profil vlnitosti povrchu je získán postupnou aplikací filtru profilu λc a filtru λf na základní profil povrchu. Použitím filtru profilu λc dojde k potlačení krátkých vln složek a filtrem λf dojde k potlačení dlouhých vln složek. Na základě profilu vlnitosti povrchu lze vyhodnotit parametry vlnitosti [39].

V tab. 3. jsou popsány základní parametry kvality povrchu dle ČSN EN ISO 4287 (1999).

Tab. 3. Parametry kvality povrchu podle normy ČSN EN ISO 4287 [39]

Název	Značení	Popis
Délka základní	*Lp, lw, lr*	Délka na ose X rozlišení nerovností charakterizujících vyhodnocovaný profil daného povrchu
Délka vyhodnocovaná	*ln*	Délka na ose X, k posouzení vyhodnocovaného profilu daného povrchu
Geometrické parametry	*P* – parametr *R* – parametr *W* – parametr	*P* – parametr vypočítaný ze základního profilu *R* – parametr vypočítaný z profilu drsnosti *W* – parametr vypočítaný z profilu vlnitosti
Výstupek profilu		Z povrchu směřující část posuzovaného profilu směrem ven s osou X
Prohlubeň profilu		Směrem dovnitř směřující část posuzovaného profilu povrchu, které spojují dva přilehlé body průsečíku profilu s osou X
Hodnota pořadnice	*Z(x)*	Celá výška posuzovaného profilu v libovolné poloze x
Výška výstupku profilu	*Zp*	Výška mezi osou X a nejvyšším bodem výstupku profilu povrchu
Hloubka prohlubně profilu	*Zv*	Výška mezi osou X a nejnižším bodem prohlubně profilu povrchu
Výška prvku profilu	*Zt*	Součet výšek výstupku a hloubky prohlubně prvku profilu povrchu
Šířka prvku profilu	*Xs*	Délka osy X protínající prvek profilu povrchu
Výška profilu celkem	*Pt, Wt, Rt*	Součet rozměru *Zp* nejvzdálenějších bodů v profilu *Zv* nejnižší prohlubně profilu

Na obr. 17. jsou graficky znázorněné parametry profilu povrchu a detailní vysvětlení jednotlivých prvků profilu je popsáno v tab. 3.



Obr. 17. Složky profillu povrchu[39]

Výškové parametry (průměrné hodnoty souřadnic) mohou být podle ČSN EN ISO 4287 (1999) definovány jako průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu a délkové parametry mohou být specifikovány průměrnou šířkou prvků profilu povrchu.

Průměrné aritmetické úchylky měřeného profilu (*Pa, Ra, Wa*) se získají aritmetickým průměrem absolutních hodnot pořadnic *Z(x)* v rozsahu základní délky podle vzorečku (33), kde l = lp, lr případně lw:

$$Pa, Ra, Wa = \frac{1}{l}\int_0^l |Z(x)|dx. \tag{33}$$

Průměrná šířka prvků profilu (*PSm, RSm, WSm*) se vypočítá jako aritmetický průměr šířek *Xs* prvků profilu v rozsahu základní délky podle vzorce (34):

$$PSm, RSm, WSm = \frac{1}{m}\sum_{i=m}^{m} XS_i. \tag{34}$$

2.5 Faktory ovlivňující spotřebu elektrické energie a kvalitu opracovaného povrchu

V předchozích kapitolách jsme si vysvětlili téměř vše od termické modifikace, opracování dřeva a materiálů na bázi dřeva formou frézování, měření elektrické energie termo komory, měření okamžité spotřeby elektrické energie frézovacího stroje. V této předposlední kapitole probereme technicko-technologické parametry frézování, které mohou ovlivňovat kvalitu, a hlavně spotřebu elektrické energie při frézování.

2.5.1 Řezná rychlost

Řezná rychlost je jedním z hlavních parametrů při frézování, která může nejvíce ovlivňovat spotřebu elektrické energie a kvalitu opracovaného povrchu. Spotřeba elektrické energie je dána buď přímou funkcí elektromotoru (nejčastěji základní rychlostí) a poté převodováním pomocí řemenu, případně změnou elektromotoru na vyšší otáčky [95]. Řezná rychlost tedy přímo ovlivňuje rychlost nástroje v řezu a tím tedy i kvalitu ofrézovaného povrchu a spotřebu elektrické energie. [5, 70].

2.5.2 Řezný úhel čela frézovacího nástroje

Jako další faktor ovlivňující spotřebu elektrické energie při frézování může být řezný úhel čela nástroje. Detail, kde přesně se nachází úhel čela nástroje je zobrazen na obr. 18.

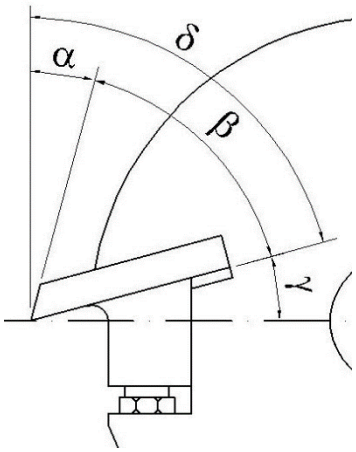
Při zvyšování úhlu čela nám klesá řezný odpor, což může mít za následek změnu kvality a změnu spotřeby elektrické energie. Při zvyšování úhlu dochází ke snižování řezného odporu, ale může docházet k horšímu opracování dřeva. Při opracování dřeva se nejčastěji používá úhel čela 15°–25° [5, 28].

α – úhel hřbetu

β – úhel řezného klínu

δ – řezný úhel

γ – řezný úhel čela



Obr. 18. Detail úhlů řezného nože osazeného na frézovací hlavě [5]

2.5.3 Posuvná rychlost

Jedním z faktorů, která může ovlivňovat spotřebu elektrické energie a kvalitu opracovávaného povrchu je také posuvná rychlost při obrábění. V našem případě je to rychlost, kterou je dané řezivo posouváno k frézovací hlavě. Čím rychleji posouváme obrobek do řezu, tím nám vzniká větší tříska (dochází tedy k většímu úběru materiálu za jednotku času) to může ovlivňovat spotřebu elektrické energie a samozřejmě i kvalitu opracovaného povrchu [5, 32, 90].

2.5.4 Druh dřeviny, termická modifikace při dané teplotě

Samotné frézování v neposlední řadě také ovlivňuje druh materiálu, který obrábíme. Obecně lze říci, že nižší spotřebu elektrické energie mají dřeviny, které mají menší tvrdost a houževnatost. Větší spotřebu naopak tvrdší a houževnatější dřeviny. V našem případě ovlivňuje spotřebu elektrické energie také samotné přeměna materiálu termickou modifikací, a to tím, že termickou modifikací se částečně zvyšuje křehkost materiálu a tím je materiál i energeticky snadněji opracovatelný. Jak mnoho tuto vlastnost ovlivňují jednotlivé teploty termické modifikace je jedním z částí tohoto výzkumu [32].

2.6 Specifikace vybraných domácích dřevin

2.6.1 Smrk

Dřevo smrku (*Picea*) patří mezi dřeva jehličnatých dřevin. Zbarvení je žlutobílé až světle žlutohnědé a dřevo je v celém průměru kmene pouze bělové. Obvykle se skládá ze souměrných úzkých letokruhů (1–4 mm), s podílem letního dřeva v letokruhu v rozmezí 5–20 %. Jednotlivé druhy našich dřev se mohou odlišit ostrostí přechodu mezi jarním a letním dřevem. U smrku barva jarního dřeva pozvolně přechází do tmavší barvy letního dřeva. Protože dřevo smrku obsahuje pryskyřičné kanálky, zvyšuje si tak nízkou trvanlivost a odolnost proti biotickým škůdcům. Přesto patří mezi nejméně trvanlivé dřevo našich dřevin. Oproti ostatním dřevinám z rodu smrkům je ve dřevě větší četnost suků, které jsou většinou malého průměru a tmavšího zbarvení. Dřeňové paprsky jsou z hlediska makroskopické stavby znatelné pouze na radiálních řezech, a to spíše výjimečně. Dřeň je úzká s průměrem maximálně 0,5 cm a příčným průřezem je zpravidla kruh. Hustota smrku je 420 kg/m^3 [14, 58].

Smrk je naše nejdůležitější užitkové dřevo, konstrukční a stavební dřevo pro podzemní i pro nadzemní stavby (střešní a mostní konstrukce, lešení, sloupy, stožáry, důlní dříví, podlahovina atd.), v nábytkářském průmyslu (lišty, nábytek, dýhy, překližky), na chemické a polo chemické zpracování (dřevovláknité a dřevotřískové desky, dřevovina, buničina); bez vad, poskytuje rezonanční dřevo [58, 96].

Obr. 19. Příčný, podélný a tangenciální řez dřeva smrku pichlavého (*Picea abies* L.) [106]

2.6.2 Dub

Dubové dřevo má vylišeno jádro a běl. Běl je úzká nažloutlá až světle hnědá, jádro světle až tmavohnědé. Je to dřevo s typickou, kruhovitě pórovitou stavbou se zřetelnou hranicí mezi letokruhy i hranicí mezi jarním a letním dřevem. Makro póry (široké jarní cévy) tvoří v zóně jarního dřeva zřetelné póry, na podélných řezech viditelné jako zřetelné rýhy. Mikro póry (úzké letní cévy) tvoří na příčném řezu v zóně letního dřeva světlé radiální pásky (radiální seskupení cév). Dřeňové paprsky jsou zřetelné na všech řezech, na příčném řezu tvoří viditelné pásy kolmé k letokruhům, na radiálním řezu křivolaká lesklá zrcadla a na tangenciálním řezu až několik centimetrů vysoké tmavší pásy [96].

Pro velký obsah tříslovin patří k našim nejtrvanlivějším dřevinám. Dřevo je dobře opracovatelné, hůře se suší a obtížněji se impregnuje. Využití: na vodní stavby, ke stavbě lodí, v nábytkářství, v řezbářství, soustružnictví, na rozmanité konstrukce, na parkety, prahy, schody, sloupy atd. [14, 96, 103].

Hustota při w_0 = 680 kg/m^3

Tvrdost 67,5 MPa.

Obr. 20. Příčný, podélný a tangenciální řez dřeva dubu (*Quercus*) [106]

3 Metodika měření

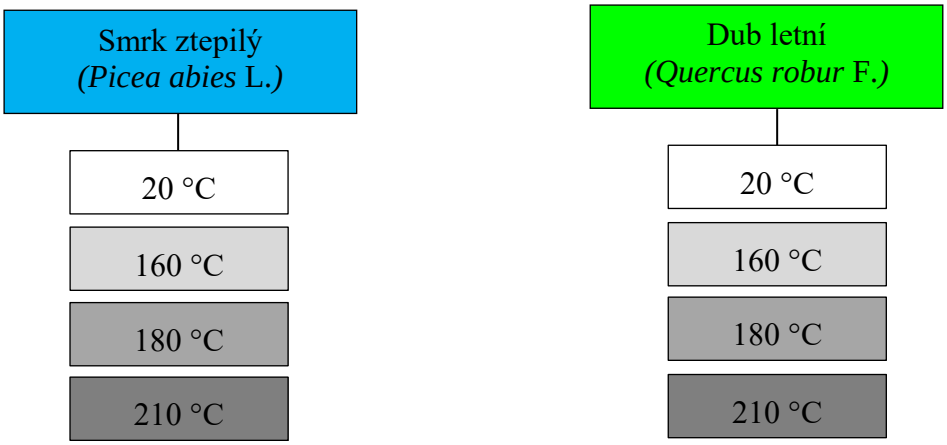
3.1 Výběr a příprava zkušebních vzorků

Celý výzkum probíhal vybráním a přípravou materiálu. Dřeviny byly vybrány domácí smrk ztepilý *(Picea abies* L.*)* a dub letní *(Quercus robur* F.*)*. Materiál byl nařezán na vzorky o velikostech 100×20×450 mm.

Vzorky z každé dřeviny byly rozděleny do 4 skupin, které se následně termicky modifikovali na 160, 180, 210 °C a jedna skupina zůstala termicky nemodifikovaná. Vzorky byly vysušeny na rovnovážný obsah vlhkosti ve dřevě 8±2 %. Z každé dřeviny bylo připraveno celkem 108 vzorků.

Hustota všech vzorků byla stanovena před a po termické modifikaci podle ISO 13061-2 [38].

Tab. 4. Schéma připravených vzorků smrku ztepilého *(Picea abies* L.*)* a dubu letního *(Quercus robur* F.*)* k termické modifikaci



Vzorky byly detailně změřeny v podélném, příčném a tangenciálním směru a po termické modifikaci opět přeměřeny (obr. 21.).

Obr. 21. Příprava a přeměřování vzorků ve školní laboratoři České zemědělské univerzity v Praze (dub letní teplota termické modifikace 180 °C)

Po usušení a znovu změření vzorků následovala příprava k samotné termické modifikaci.

3.2 Termická modifikace vzorků

Vzorky obou dřevin byly termicky modifikovány v termokomoře Katres (ČZU, Kostelec nad Černými lesy, Česká republika). Pro optimální termickou modifikaci byly vzorky naskládané uprostřed termokomory a proložené proklady, aby byl zabezpečený volný proud vzduchu (viz obr. 23.). Do vybraných horních vzorků, uprostřed a na spodu hráně byla umístěna kontrolní čidla termo komory, které snímají aktuální vlhkost a teplotu uvnitř materiálu. Termická modifikace byla provedena ve třech fázích, dle principu Thermowood®, licencované mezinárodní asociací International Thermowood Association ve Finsku (obr. 4.).

První fáze spočívala v pozvolném zahřívání termokomory, vysoušení dřeva až na teplotu 160°, 180° nebo 210 °C. Regulace vlhkosti byla prováděná párou.

Během druhé fáze byla požadovaná teplota termické modifikace 160, 180 nebo 210 °C udržována po dobu 3 hodin.

V poslední třetí fázi byla termokomora pomalu ochlazována a klimatizovaná, aby se dosáhlo teploty 40 °C a vlhkosti 5–7 %, poté byla komora otevřena a vzorky vyjmuty.

Obr. 22. Termo komora České zemědělské univerzity v Praze, která je umístěna v Kostelci nad Černými lesy

Tab. 5. Technické parametry termokomory

Parametry termokomory	
Vstupní vlhkost dřeva	0–8 %
Objem naplněné komory	1 m^3
Maximální dosažitelná teplota	214 °C

Vzorky byly po termické modifikaci 3 hodiny umístěné v okolním prostředí k aklimatizaci. Tab. 6—7. a Obr. 24.- 25. popisují přesné časy jednotlivých fází během termické modifikace jak smrku ztepilého *(Picea abies* L.*)*, tak dubu letního *(Quercus robur* F.*).*

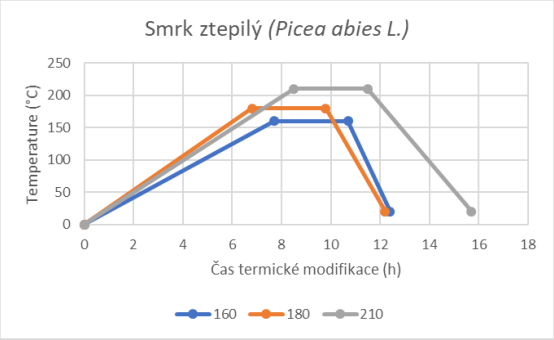
Obr. 23. Naplněná termo komora zkušebními vzorky smrku určenými k termické modifikaci

Tab. 6. Průběh času termické modifikace smrku ztepilého *(Picea abies* L.*)*

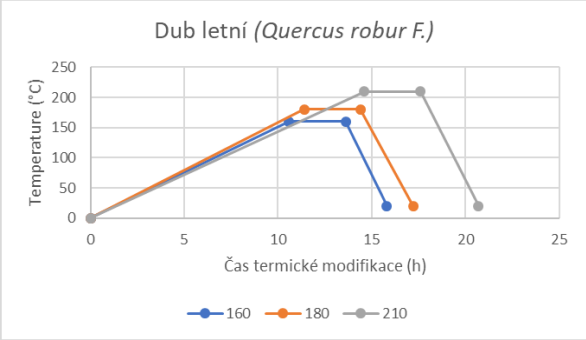
Čas jednotlivých fází	160 °C	180 °C	210 °C
Zahřívací fáze (h)	10,7	9,8	11,5
Termická modifikace (h)	1,7	2,4	4,2
Klimatizace, ochlazení (h)	2,0	2,6	2,9
Celkový čas (h)	**14,4**	**14,8**	**18,6**

Tab. 7. Průběh času termické modifikace dubu letního *(Quercus robur* F.*)*

Čas jednotlivých fází	160 °C	180 °C	210 °C
Zahřívací fáze (h)	10,6	11,4	14,6
Termická modifikace (h)	3	3	3
Klimatizace, ochlazení (h)	2,2	2,8	3,1
Celkový čas (h)	**15,8**	**17,2**	**20,7**



Obr. 24. Grafický průběh termické modifikace smrku ztepilého *(Picea abies* L.*)*



Obr. 25. Grafický průběh termické modifikace dubu letního *(Quercus robur* F.*)*

Všechny zkušební vzorky byly před a po termické úpravě detailně změřeny, zváženy a byla vypočtena jejich průměrná hustota, která je popsána v tab. 8. pro smrk ztepilý *(Picea abies* L.*)* a v tab. 9. pro dub letní *(Quercus robur* F.*)*.

Tab. 8. Průměrná hustota obou dřevin zkušebních vzorků smrku ztepilého *(Picea abies* L.*)*

	Teplota termické modifikace (°C)			
	20 °C	**160 °C**	**180 °C**	**210 °C**
Průměrná hustota vzorků před termickou modifikací	442 (6,2)	457 (6,7)	443 (7,3)	450 (7,7)
Průměrná hustota vzorků po termické modifikaci		438 (6,5)	436 (7,1)	434 (8,2)

Tab. 9. Průměrná hustota obou dřevin zkušebních vzorků dubu letního *(Quercus robur* F.*)*

	Teplota termické modifikace (°C)			
	20 °C	**160 °C**	**180 °C**	**210 °C**
Průměrná hustota vzorků před termickou modifikací	743 *(5,4)*	730*(5,2)*	715*(4,9)*	726 *(5,4)*
Průměrná hustota vzorků po termické modifikaci		719 *(5,3)*	699 *(3,6)*	665 *(1,4)*

Po úspěšné termické modifikaci byly vzorky pečlivě rozřazeny a připraveny na další měření. V obr. 26. můžeme vidět část vzorků již připravenou na další fázi našeho výzkumu, a to na měření spotřeby elektrické energie během rovinného frézování.

Obr. 26. Část vzorků po termické modifikaci

3.3 Rovinné frézování vzorků

Modifikované vzorky byly převezeny do školní laboratoře k dalšímu měření. Před měřením byla znovu zkontrolována vlhkost dřeva, aby byla zaručena vlhkost testovaného dřeva 8 ± 2 %. Měření bude probíhat formou rovinného, válcového frézování.

Frézování probíhalo na spodní jedno vřetenové frézce typu FVS spolu s podávacím zařízením STEFF 2034, které jsou standardním vybavením truhlářské dílny České zemědělské univerzity v Praze. Detailní technické údaje frézky jsou zobrazeny v tab. 10. a 11.

Tab. 10. Technické údaje použité jedno vřetenové frézky

příkon	3,8 kW
kmitočet	50 Hz
proudová sestava	360 V
otáčky stroje	3 000, 4 500, 6 000, 9 000
řezná rychlost pro průměr nástroje 130 mm	20, 30, 40 m/s
výrobce	Československé hudební nástroje Hradec Králové
rok výroby	1975

Obr. 27. Ukázka jednovřetenové spodní frézky typu FVS

Obr. 28. Pohled na podávací zařízení STEFF 2034

Tab. 11. Technické údaje podávacího zařízení STEEF

příkon	0,8 kW
otáčky	1400/2800
podávací rychlost	360 V
otáčky stroje	4, 8, 11, 22 m/min
rok výroby	2005

K experimentu byly použity celkem tři dvojnožové frézovací hlavy na dřevo s vyměnitelnými, naostřenými noži obr. 29. Při výzkumu byly frézovací hlavy nastaveny na výšku řezu 1 mm a každý vzorek byl ofrézovaný několikrát. Frézovací nože byly vyrobeny z oceli 19855 a 0,7 % C; 4,2 % Cr; 18 % W a 1,5 % V.

Tab. 12. Technická specifikace nástroje (frézy)

průměr frézy	125 mm
průměr frézy s nasazenými noži	130 mm
výška frézovací hlavy	45 mm
počet osazených nožů	2 (jeden v záběru, druhý vyvažovací)

Obr. 29. Ukázka frézovací hlavy [131]

Pro tento experiment byly vybrány frézovací hlavy s úhlem čela (γ) 15°, 20°, 25° a frézovací nože s úhlem řezného klína (β) 45°, čemuž odpovídá úhel hřbetu (α) 30°, 25°, 20°, a řezný úhel (δ) 80°, 75° a 70°.

Celé měření probíhalo tak, aby se při rovinném frézování otestovaly všechny dřeviny nativní a modifikované na 160°, 180° a 210 °C při rovinném frézování, a to při změně úhlu čela nástroje (15°, 20°, 25°), řezné rychlosti (20, 30, 40 m/s) a posuvné rychlosti (4, 8, 11 m/min) viz tab. 14.

Vzhledem k tomu, abychom mohli výsledky práce porovnat i s jinými typy frézek a jinými posuvnými/řeznými rychlostmi, je důležité také znát hodnoty posuv na zub v_f, maximální tloušťku třísky h_{max} a střední hodnotu tloušťky třísky h_{str} tohoto experimentu. Veškeré hodnoty jsou zobrazeny v tab. 13. a jsou vypočteny podle vzorců (9, 10 a 18). Ke každé kombinaci řezné a posuvné rychlosti je tedy vypočítaná přesná hodnota posuvu na zub, maximální tloušťky třísky a střední tloušťka třísky.

Tab. 13. Přepočty posuvu na zub, maximální a střední tloušťky třísky

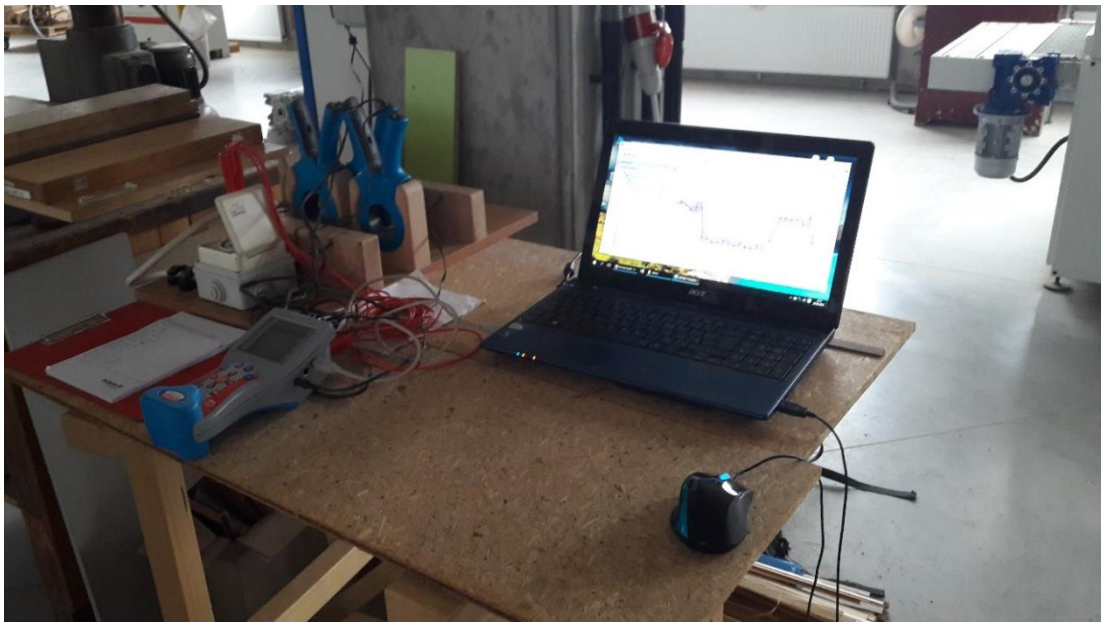
Řezná rychlost (m/s)	Počet otáček	Posuvná rychlost (m/min)	Počet zubů	Posuv na zub (mm)	Výška řezu (mm)	Průměr nástroje (mm)	Maximální tloušťka třísky (mm)	Střední tloušťka třísky (mm)
20	3000	4	1	1,3	1	125	0,238	0,119
30	4500	4	1	0,9	1	125	0,158	0,079
40	6000	4	1	0,7	1	125	0,118	0,059
20	3000	8	1	2,7	1	125	0,475	0,238
30	4500	8	1	1,8	1	125	0,317	0,159
40	6000	8	1	1,3	1	125	0,238	0,119
20	3000	11	1	3,7	1	125	0,653	0,328
30	4500	11	1	2,4	1	125	0,435	0,219
40	6000	11	1	1,8	1	125	0,327	0,164

3.4 Zařízení na měření řezného příkonu frézovacího stroje

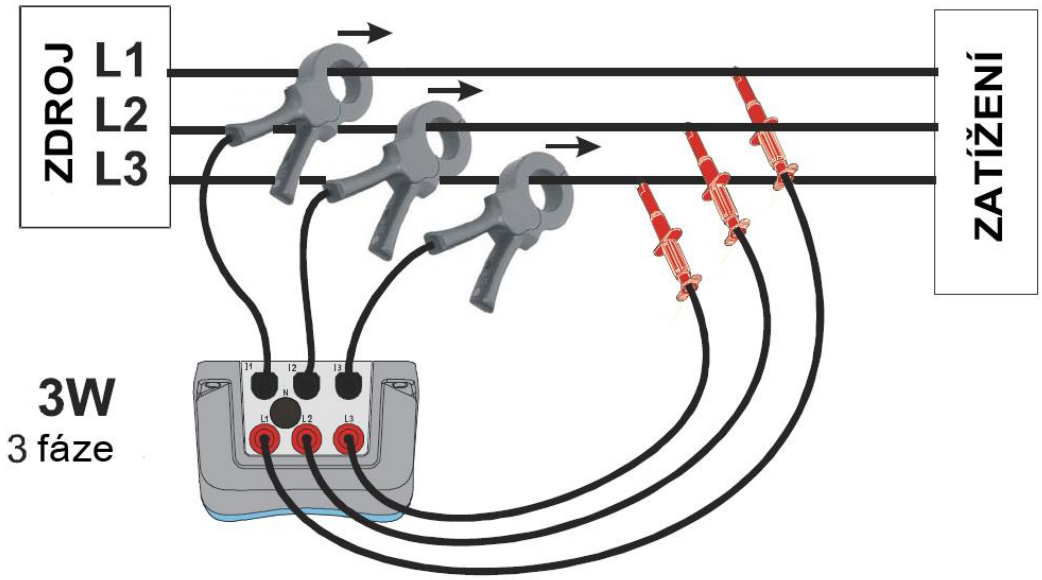
Na měření okamžité spotřeby elektrického řezného příkonu frézky byl použit měřicí přístroj METREL Power Q plus MI2392 (výrobce Metrel d.d., Horjul, Slovenia).

Měření bylo založeno na změně množství odebíraného proudu elektromotorem stroje ze sítě. Tento přístroj snímá jak změnu odebíraného proudu *I*, tak aktuální hodnotu napětí *U* a díky následnému nasnímanému fázovému posunu je toto zařízení schopné spočítat příkon našeho elektromotoru.

Tyto zjišťované hodnoty se zaznamenávají v intervalu 1 sekundy, přičemž se v tomhle intervalu naměří několik hodnot, které jsou následně zprůměrované, a tato hodnota je podkladem pro okamžité vyhodnocení. K přenosu naměřených dat byl použit program PowerQ Link, který sloužil k zobrazení grafu příkonu a exportu hodnot to Microsoft Excel 2019 a Statistika 13.5.0.17 od společnosti StatSoft k dalšímu vyhodnocení.

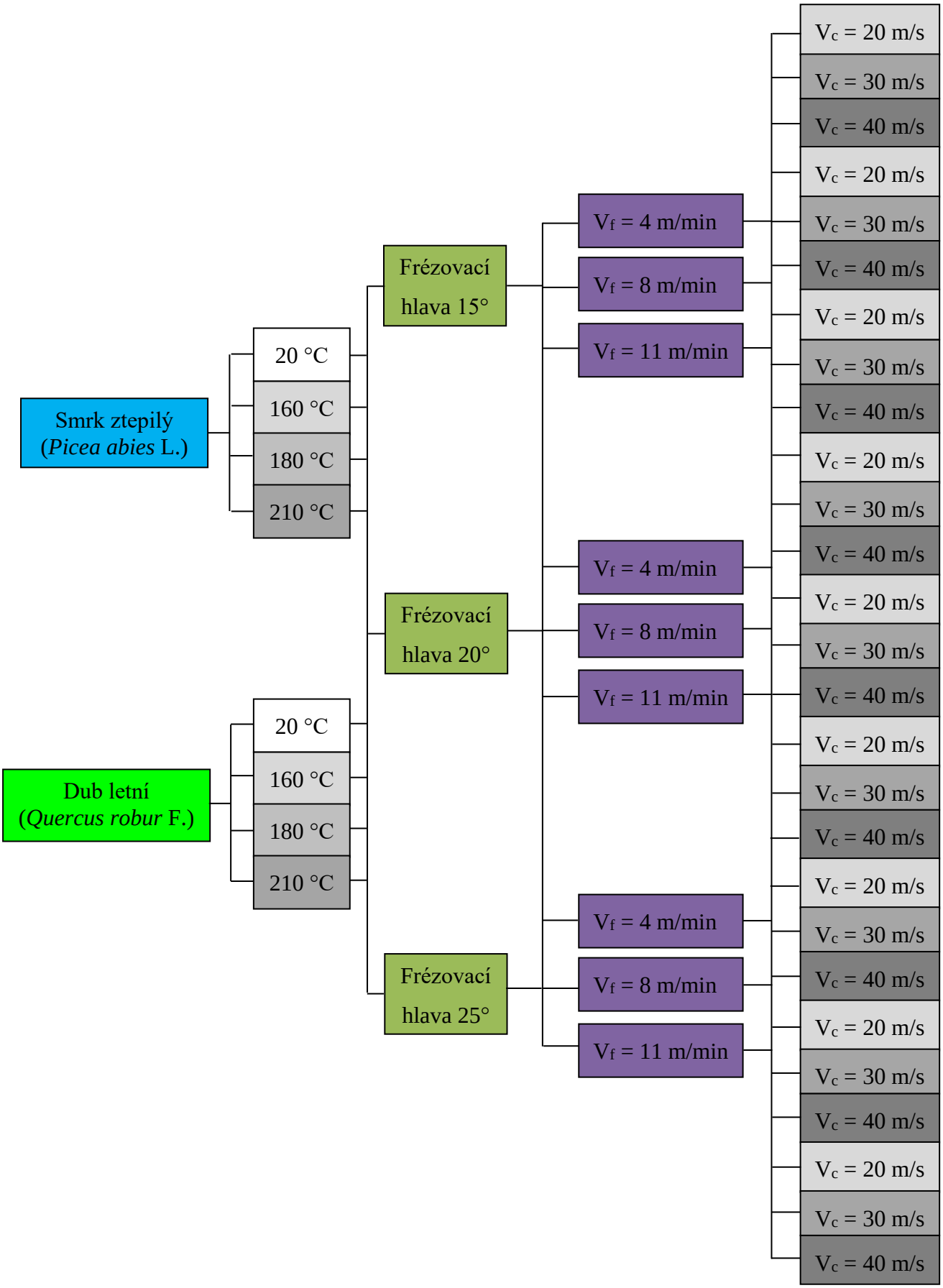


Obr. 30. Používaný přístroj METREL Power Q plus MI2392



Obr. 31. Schéma zapojení METREL Power Q plus MI2392

Tab. 14. Schéma vzorků a jejich následný výzkum odběru elektrické energie při rovinném frézování a změnách úhlu čela, řezné rychlosti a rychlosti posuvu.



Zařízení na měření drsnosti, vlnitosti kontaktní a bezkontaktní (laserovou) metodou

Měření drsnosti a vlnitosti povrchu všech zkušebních vzorků bylo uskutečněno pomocí dvou metod:

1) kontaktní metoda – přístroj FORMTALYSURF 50 Intra 2 (TaylorHobson),
2) bezkontaktní (laserová) metoda – přístrojem LEXT 3D measuring laser microscope OLS4100 (Olympus).

Kvalita ofrézovaného povrchu byla měřena podle normy ČSN EN ISO 4287 (1999) a ČSN EN ISO 4288 (1999) [37, 39, 40, 41]

Vzorky pro samotné měření měly stejné rozměry jako vzorky na spotřebu elektrické energie 100×20×450 mm a byla u nich označena frézovaná strana a vyznačen směr posuvu do frézování. Vzorky vznikly tím, že se nejprve naměřila spotřeba elektrické energie a poté se 1 cm vzorku odřízl na kotoučové pile, označil a připravil na toto další měření. Kvalita povrchu vzorků byla měřena u klimatizovaných vzorcích na vlhkost 8 ± 2 %. Každý takto připravený vzorek byl změřen 10×, celkem tedy proběhlo 1 080 měření při každé metodě snímání povrchu a dřevině.

Obr. 32. Používaný přístroj pro kontaktní metodu měření FORMTALYSURF 50 Intra 2 (TaylorHobson)

Obr. 33. Používaný přístroj pro bezkontaktní (laserovou) metodu měření LEXT 3D measuring laser microscope OLS4100 (Olympus)

V tab. 15. nalezneme přesné rozepsání parametrů během samotného měření drsnosti a vlnitosti.

Tab. 15. Tabulka podmínek měření drsnosti a vlnitosti [39]

Periodické profily	**Parametry měření dle ČSN EN ISO 4287 (1999)**			
R_{Sm} (mm)	$\lambda_c = l_r$ (mm)	l_n (mm)	l_t (mm)	r_{tip} (µm)
0,013 < R_{Sm} ≤ 0.04	0,08	0,4	0,48	2
0,04 < R_{Sm} ≤ 0.13	0,25	1,25	1,5	2
0,13 < R_{Sm} ≤ 0.4	0,8	4	4,8	2 nebo 5
0,4 < R_{Sm} ≤ 1.3	2,5	12,5	15	5
1,3 < R_{Sm} ≤ 4	8	40	48	10

3.5 Chemická analýza

Termicky nemodifikované vzorky (značené jako modifikované na 20 °C) a ostatní termicky modifikované vzorky smrku ztepilého *(Picea abies* L.*)* a dubu letního *(Quercus robur* F.*)*, na kterých bylo provedeno měření spotřeby elektrické energie a kvalita

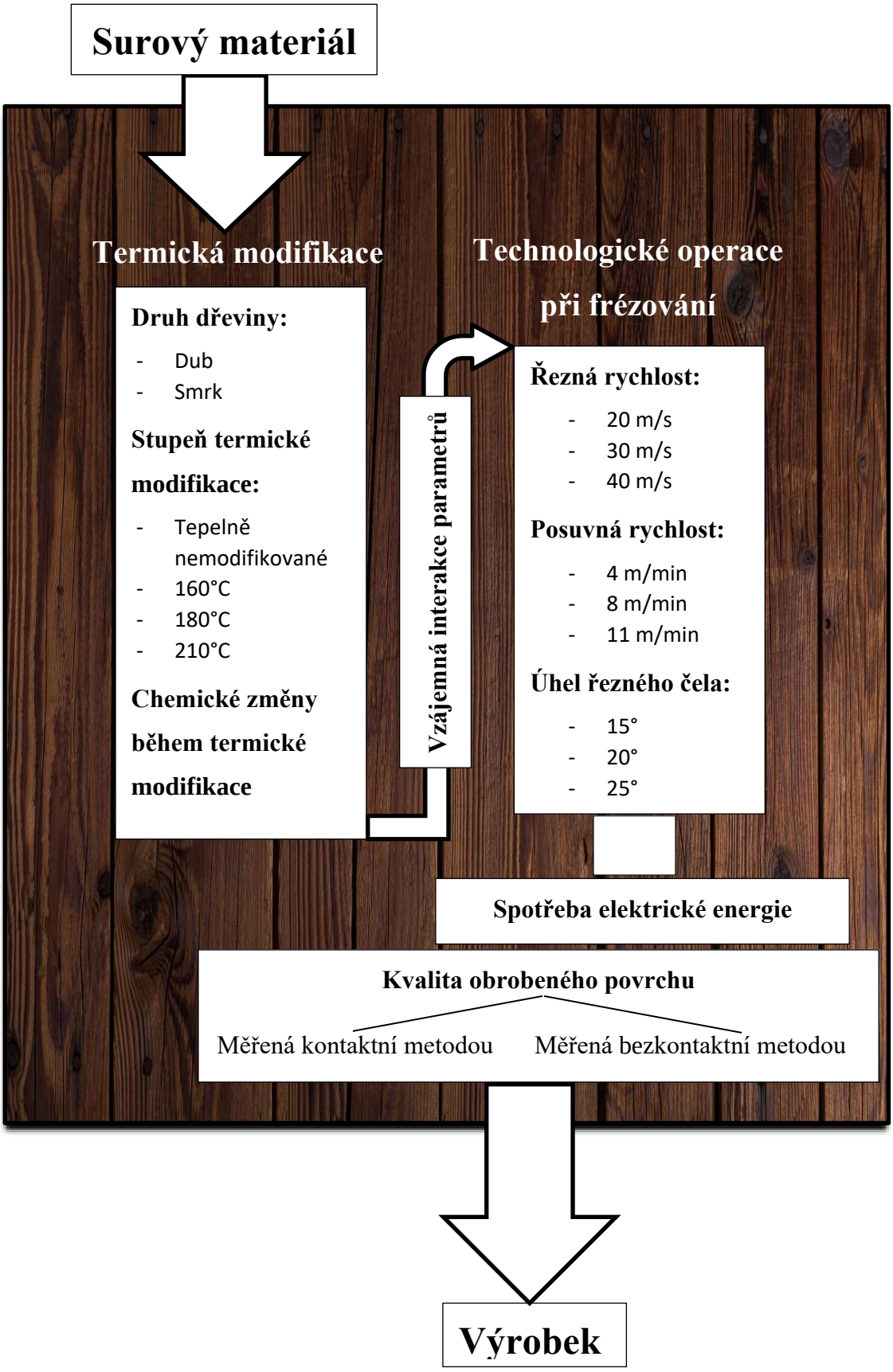
opracovaného povrchu byly mechanicky rozmělněny na piliny a frakce o velikosti 0,5 – 1,0 mm (tím bylo dosaženo maximálního využití materiálu ke studijním účelům). Rozmělněná směs byla extrahována v Soxhletově přístroji se směsí etanolu a toluenu podle ASTM D1107-96 [1]. Obsah ligninu byl zjištěn podle stanoveného postupu NREL [89]. Holocelulóza dle metody Wise [111] a celulóza Seiferttovou metodou [87]. Holocelulóza byla vypočtena rozdílem mezi holocelulózou a celulózou. Podrobným vyhodnocením chemické analýzy zjistíme, jak ovlivňuje teplota termické modifikace chemické složení dřevin smrku ztepilého *(Picea abies* L.*)* a dubu letního *(Quercus robur* F.*).*

3.6 Optimální kombinace obrábění pomocí analýzy hodnot

Všechny naměřené výsledky byly nejprve zpracovány softwarem daného měřícího zařízení a exportovány do souhrnných tabulek v Microsoft Excel 2019 a poté vyhodnoceny programem Statistika 13.5.0.17 od společnosti Statsoft. Veškeré hodnoty byly posouzené navzájem, aby bylo možné z výzkumu vytěžit maximum důležitých informací.

Pro nalezení nejlepší kombinace technicko-technologických parametrů frézování (řezná rychlost, úhel čela, rychlost posuvu, teplota termické modifikace) v závislosti na spotřebu elektrické energie a na kvalitu obrobeného povrchu (drsnost *Ra* a vlnitost *Wa*) bylo nutné v první řadě najít pro každou hodnocenou skupinu extrém, který odpovídá hodnotě parametrů nejlepší kvality a nejnižší spotřeby. Jakmile bylo dosaženo tohoto zpracování dat, byly všechny hodnoty uspořádány podle „váhy“ a spojeny dohromady. Tímto spojením poté seřazeny a výsledkem je optimální kombinace nastavení technicko-technologických parametrů rovinného frézování smrku ztepilého *(Picea abies* L.*)* a dubu letního *(Quercus robur* F.*)* při různých stupních termické modifikace.

Celá metodika výzkumu byla koncipovaná tak, aby zahrnula jeden kompletní výrobní proces od surového materiálu přes nejčastější technologickou operaci během opracování dřeva (rovinné, válcové frézování) až po samotný výrobek a zhodnotilo se co nejvíce důležitých informací potřebných v praxi. Na obr. 34. je znázorněn souhrn výrobního procesu od surového materiálu až po samotný výrobek včetně vlivů a činitelů, který celý proces ovlivňují.



Obr. 34. Schéma metodiky výrobního procesu

4 Výsledky a vyhodnocení

4.1 Chemické změny složení termicky modifikovaných dřevin a vliv těchto změn na spotřebu elektrické energie

Zvýšená teplota při termické modifikaci má významný vliv na změnu v chemické struktuře dřeva. Tab. 16. ukazuje průměrné hodnoty a variační koeficienty ligninu, celulózy, hemicelulózy, holocelulózy a extraktivních látek dubu a smrku.

Podíl extraktivních látek u obou dřevin se termickou modifikací téměř lineárně zvyšoval, kdy u dubu termicky neupraveného a modifikovaného na 210 °C vzrostl o 229 % a u smrku o 279 %. Co se týká ligninu, tak obě dřeviny nativní, tepelně upravené na 160 a 180 °C se příliš nezměnili, v průměru pouze o 2,5 - 3 %. Nevětší rozdíl byl zaznamenán až při termické modifikaci na 210 °C, kdy u dubu vzrostl podíl ligninu oproti neupravenému vzorku o 18,4 % a u smrku o 8,8 %. Obsah holocelulózy v obou zkoumaných dřevinách se termickou modifikací snižoval, nejvíce v případě dubu, kde byl rozdíl mezi neupraveným a termicky modifikovaným vzorkem na 210 °C 16,7 % a v případě smrku 11,7 %. Obsah celulózy termickou úpravou v případě dubu rovnoměrně vzrůstal na rozdíl 7 %, v případě smrku se podíl celulózy nejprve z nemodifikovaného dřeva na termicky modifikované snížil o 1,9 % a poté rovnoměrně rostl a nevětšího rozdílu dosáhl při termické modifikaci na 210 °C, kdy byl rozdíl 4,2 %. Poslední sledovanou chemickou látkou byla hemicelulóza, která v případě dubu termickou modifikací celkem razantně klesala, a to až na rozdíl 58,8 % v porovnání při termické modifikaci 210 °C a neupravenému dřevu, v případě smrku byl zaznamenán také pokles v obsahu hemicelulózy, ale pouze o 37,6 %.

Tab. 16. Chemická analýza termicky neupraveného a modifikovaného smrku ztepilého *(Picea abies* L.*)* a dubu letního *(Quercus robur* F.*)*

Dub letní *(Quercus robur* F.*)*					
Teplota (°C)	**Extraktivní látky (%)**	**Lignin (%)**	**Holocelulóza (%)**	**Celulóza (%)**	**Hemicelulóza (%)**
neupravené	4,31 (1,82)	22,35 (0,70)	74,92 (0,12)	47,93 (0,19)	26,99 (0,04)
160	6,55 (0,71)	22,92 (0,30)	71,45 (0,20)	48,41 (0,38)	23,05 (1,19)
180	7,22 (1,52)	23,78 (0,81)	69,30 (0,30)	49,61 (0,22)	19,69 (0,56)
210	9,87 (1,77)	26,47 (0,64)	62,41 (0,39)	51,31 (0,29)	11,11 (0,86)

Smrk ztepilý *(Picea abies* L.*)*					
Teplota (°C)	**Extraktivní látky (%)**	**Lignin (%)**	**Holocelulóza (%)**	**Celulóza (%)**	**Hemicelulóza (%)**
neupravené	0,96 (5,58)	26,22 (0,42)	75,71 (0,32)	46,70 (0,87)	29,01 (0,66)
160	1,73 (5,17)	26,96 (0,35)	74,45 (0,50)	45,79 (0,07)	28,67 (1,29)
180	1,85 (3,69)	27,29 (0,31)	73,54 (0,56)	48,16 (0,19)	25,38 (1,98)
210	2,68 (4,21)	28,55 (0,09)	66,84 (0,96)	48,68 (0,41)	18,16 (2,64)

Data představují průměrné hodnoty látek sušině dané dřeviny při určitém stupni termické modifikace, data v závorkách ukazují variační koeficienty.

Množství celulózy, holocelulózy, ligninu a extraktivních látek se ve struktuře dubu a smrku zvýšil, zatímco obsah hemicelulózy se výrazně snížil. Zvýšení extraktivních látek při 210 °C bylo zapříčiněno především degradací makromolekul ligninu [17]. Zvýšení hladiny ligninu v tepelně modifikovaném dřevě odpovídá obecně uznávané skutečnosti, že lignin je teplotně stabilnější než sacharidy a kondenzáty [75, 35, 110, 20].

Tab. 17. Statistické vyhodnocení vlivu teploty termické modifikace na změny chemického složení smrku *(Picea abies L.)*

Extraktivní látky (%)					
Sledované faktory	**Součet čtverců**	**Stupně volnosti**	**Rozptyl**	**Fischerův *F*-test**	**Hladina významnosti *P***
Intercept	3429,566	1	3429,566	140409,4	***
Teplota (°C)	359,970	3	119,990	4912,5	***
Chyba	26,282	1076	0,024		
Příslušný model vysvětluje přibližně 99,2 % celkového součtu čtverců.					
Lignin (%)					
Sledované faktory	**Součet čtverců**	**Stupně volnosti**	**Rozptyl**	**Fischerův *F*-test**	**Hladina významnosti *P***
Intercept	800864,3	1	800864,3	22320545	***
Teplota (°C)	682,4	3	227,5	6340	***
Chyba	38,6	1076	0,0		
Příslušný model vysvětluje přibližně 98,1 % celkového součtu čtverců.					

Holocelulóza (%)					
Sledované faktory	**Součet čtverců**	**Stupně volnosti**	**Rozptyl**	**Fischerův *F*-test**	**Hladina významnosti *P***
Intercept	5722938	1	5722938	4505692	***
Teplota (°C)	10902	3	3634	2861	***
Chyba	1367	1076	1		
Příslušný model vysvětluje přibližně 97,3 % celkového součtu čtverců.					
Celulóza (%)					
Sledované faktory	**Součet čtverců**	**Stupně volnosti**	**Rozptyl**	**Fischerův *F*-test**	**Hladina významnosti *P***
Intercept	2417321	1	2417321	51571867	***
Teplota (°C)	1381	3	460	9824	***
Chyba	50	1076	0		
Příslušný model vysvětluje přibližně 95,6 % celkového součtu čtverců.					
Hemicelulóza (%)					
Sledované faktory	**Součet čtverců**	**Stupně volnosti**	**Rozptyl**	**Fischerův *F*-test**	**Hladina významnosti *P***
Intercept	701394,4	1	701394,4	493453,5	***
Teplota (°C)	18026,6	3	6008,9	4227,4	***
Chyba	1529,4	1076	1,4		
Příslušný model vysvětluje přibližně 97,9 % celkového součtu čtverců.					

NS – statisticky nevýznamný, *** – statisticky významný, $P < 0,05$

Kromě kondenzačních reakcí způsobují vysoké teploty také degradaci makromolekul ligninu [101, 48]. Naše výsledky ukázaly, že při tepelném zpracování dřeva smrku ztepilého (*Picea abies* L.) a dubu letního (*Quercus robur* F.) byly dominantní kondenzační reakce, což vedlo ke zvýšení obsahu ligninu ve dřevě. Nejméně stabilní složkou u obou druhů dřevin byla hemicelulóza, kde se jejich obsah snížil u smrku ztepilého (*Picea abies* L.) o 37,6 % a u dubu letního (*Quercus robur* F.) o 58,8 %. Pro srovnání je hemicelulóza v tepelně modifikovaném dřevu stabilnější. Podobně poklesl obsah hemicelulóz také v tepelně ošetřeném teakovém dřevu o 58 % [88]. Tento pokles byl pravděpodobně kvůli různým hemicelulózovým strukturám, protože kratší hemicelulózové řetězce degradují při vysokých teplotách a něco rychleji [48].

Tab. 18. Statistické vyhodnocení vlivu teploty termické modifikace na změny chemického složení dubu (*Quercus robur* F.)

Extraktivní látky (%)					
Sledované faktory	**Součet čtverců**	**Stupně volnosti**	**Rozptyl**	**Fischerův *F*-test**	**Hladina významnosti *P***
Intercept	52689,67	1	52689,67	6008473	***
Teplota (°C)	4249,29	3	1416,43	161523	***
Chyba	9,44	1076	0,01		
Příslušný model vysvětluje přibližně 99,9 % celkového součtu čtverců.					

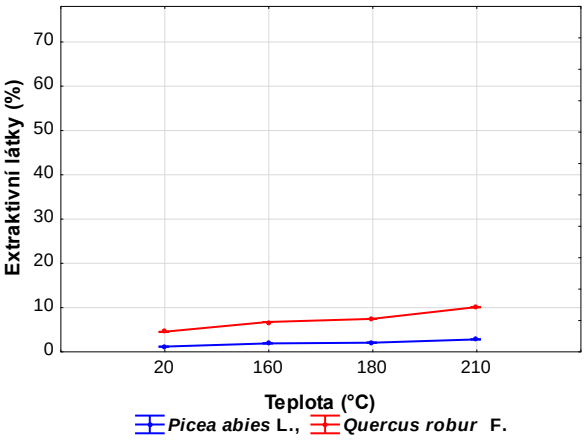
Lignin (%)					
Sledované faktory	**Součet čtverců**	**Stupně volnosti**	**Rozptyl**	**Fischerův *F*-test**	**Hladina významnosti *P***
Intercept	615694,2	1	615694,2	35823973	***
Teplota (°C)	2681,9	3	894,0	52016	***
Chyba	18,5	1076	0,0		
Příslušný model vysvětluje přibližně 99,9 % celkového součtu čtverců.					

Holocelulóza (%)					
Sledované faktory	**Součet čtverců**	**Stupně volnosti**	**Rozptyl**	**Fischerův *F*-test**	**Hladina významnosti *P***
Intercept	5219485	1	5219485	23040369	***
Teplota (°C)	22543	3	7514	331712	***
Chyba	24	1076	0		
Příslušný model vysvětluje přibližně 98,5 % celkového součtu čtverců.					

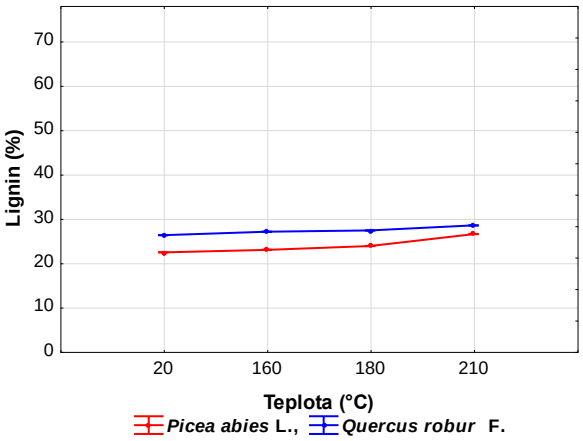
Celulóza (%)					
Sledované faktory	**Součet čtverců**	**Stupně volnosti**	**Rozptyl**	**Fischerův *F*-test**	**Hladina významnosti *P***
Intercept	2626127	1	2626127	19019033	***
Teplota (°C)	1840	3	613	44414	***
Chyba	15	1076	0		
Příslušný model vysvětluje přibližně 95,3 % celkového součtu čtverců.					

Hemicelulóza (%)					
Intercept	**Součet čtverců**	**Stupně volnosti**	**Rozptyl**	**Fischerův *F*-test**	**Hladina významnosti *P***
Intercept	441010,5	1	441010,5	21802612	***
Teplota (°C)	37069,7	3	12356,6	610882	***
Chyba	21,8	1076	0,0		
Příslušný model vysvětluje přibližně 98,7 % celkového součtu čtverců.					

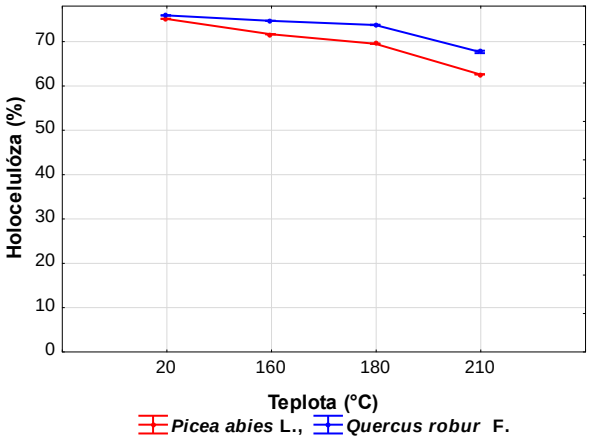
NS – statisticky nevýznamný, *** – statisticky významný, P < 0,05



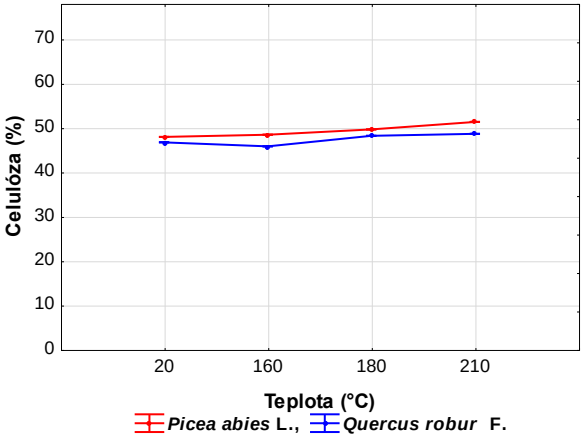
Obr. 35. Změny (%) extraktivních látek při různých stupních termické modifikace



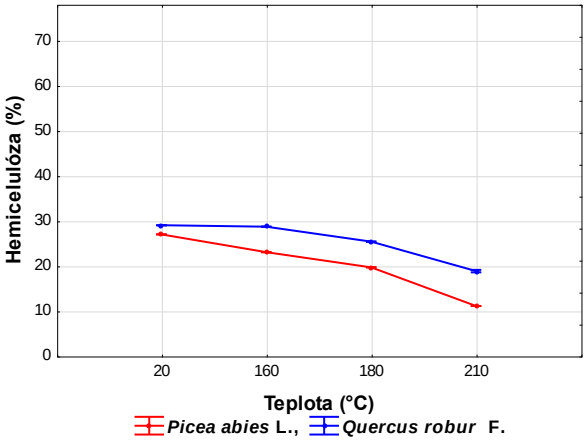
Obr. 36. Změny (%) ligninu při různých stupních termické modifikace



Obr. 37. Změny (%) holocelulózy při různých stupních termické modifikace



Obr. 38. Změny (%) celulózy při různých stupních termické modifikace



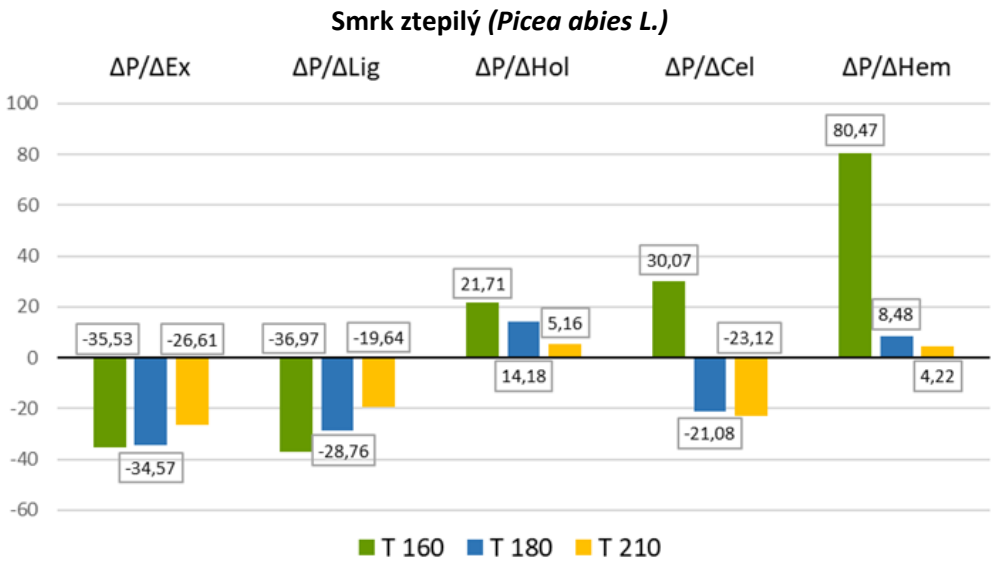
Obr. 39. Změny hemicelulózy při různých stupních termické modifikace

Vzájemnou provázanost změny v chemické struktuře dřeva při teplotách termické modifikace nám dokazuje i statistické vyhodnocení v tab. 17. a 18., kde je jednoznačně vidět, že termická modifikace při všech teplotách (20 °C, 160 °C, 180 °C 210 °C) ovlivňuje chemické složení jak smrku ztepilého *(Picea abies* L.*)*, tak dubu letního *(Quercus robur* F.*)* dle hladiny významnosti $P < 0,05$. V obr. 35. – 39. je přehledně graficky vyobrazena a porovnána změna v chemickém složení látek dřeva (Extraktivních látek, ligninu, holocelulózy, celulózy a hemicelulózy) při určitém stupni termické modifikace.

V této práci byla vyhodnocena také teorie, zda jednotlivé látky složení termicky modifikovaného dřeva nějak významně ovlivňují spotřebu elektrické energie při rovinném frézování. V tab. 19. je díky spearmanově korelaci vyhodnocena závislost jednotlivých složek dřeva na řezný příkon při rovinném frézování smrku ztepilého *(Picea abies L.).* Z této tabulky vyplívá, že žádná látka významně neovlivňuje řezný příkon, protože průměrná korelační závislost byla u všech hodnot pouze 5,27 %.

Tab. 19. Spearmanova korelace energetické náročnosti při obrábění smrku ztepilého *(Picea abies L.)* v závislosti na chemickém složení

Smrk ztepilý (*Picea abies* L.)					
	Extraktivní látky	Lignin	Holocelulóza	Celulóza	Hemicelulóza
Řezný příkon (W)	-0,0556	-0,0629	0,0610	-0,0311	0,0529



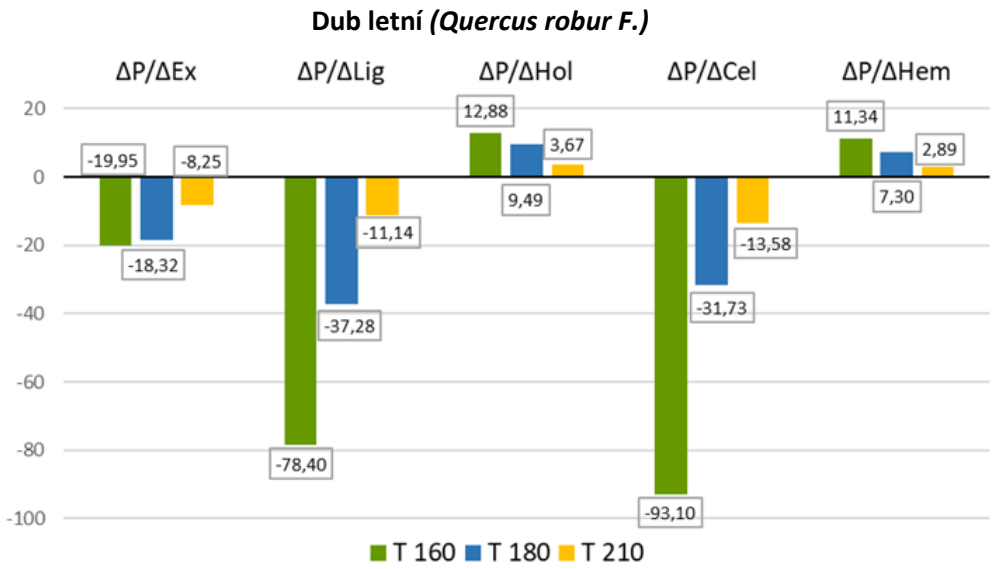
Obr. 40. Poměrové změny příkonu stroje P v závislosti na chemickém složení smrku ztepilého *(Picea abies L.)*

Poměrnou změnu řezného příkonu v závislosti na změně obsahu jednotlivých složek dřeva smrku ztepilého *(Picea abies L.)* nám znázorňuje obr. 40. Zde také není jednoznačně patrné, že chemické složení zásadně ovlivňovalo řezný příkon. U hodnoty změny hemicelulózy sice došlo k výrazné změně u termicky modifikovaného smrku na teplotu 160 °C, ale tato změna nebyla potvrzena ani na ostatních teplotách a ani na druhé dřevině (obr. 41.).

V tab. 20. je vyhodnocen dub letní *(Quercus robur F.).* Spearmanova korelace také ani u této dřeviny nepotvrzuje významnou závislost řezného příkonu na chemickém složení. Průměrné hodnoty sice dosahují 7,61 %, což je více než v případě smrku ztepilého, ale přesto tuto změnu nemůžeme považovat za příliš významnou. Tvrzení nám potvrzuje i obr. 43., kde také dochází k velkým hodnotám v případě ligninu a celulózy, ale opět tato výrazná změna není potvrzena dalšími teplotami.

Tab. 20. Spearmanova korelace energetické náročnosti při obrábění dubu letního *(Quercus robur F.)* v závislosti na chemickém složení

Dub letní *(Quercus robur L.)*					
	Extraktivní látky	Lignin	Holocelulóza	Celulóza	Hemicelulóza
Řezný příkon (W)	-0,0790	-0,0743	0,0771	-0,0722	0,0783



Obr. 41. Poměrové změny příkonu stroje P v závislosti na chemickém složení dubu letního *(Quercus robur F.)*

Drobná závislost však byla pozorována u jednotlivých složek dřeva u obou druhů dřevin, proto celková termická modifikace ovlivňuje spotřebu elektrické energie, ale při hodnocení každé chemické složky zvlášť, není tato změna příliš významná. V holocelulóze a hemicelulózách se příkon energie zvyšoval se zvyšováním procenta těchto složek ve dřevě, v případě ostatních složek (extraktivních látek, ligninu a celulózy) tomu bylo naopak. Z vyhodnocení tedy můžeme říci, že chemické složení dřeva má drobný vliv na řezný příkon, ale ne příliš významný.

4.2 Vliv vybraných faktorů rovinného, válcového frézování na řezný příkon

Vliv technicko-technologických parametrů nastavení při frézování má velký vliv na množství odebírané elektrické energie frézkou. Tento fakt nám potvrzují i tab. 20. a 21., kde je jasně vidět významná závislost všech faktorů na spotřebu elektrické energie obou dřevin. Pouze při rovinném frézování smrku ztepilého *(Picea abies* L.*)* se ukázal statisticky nevýznamný pouze faktor posuvné rychlosti, dle $P < 0{,}05$.

Vliv řezné rychlosti na řezný příkon má velmi jasný charakter. Na obr. 42. můžeme vidět, jak se zvyšováním řezné rychlosti také dochází ke zvyšování řezného příkonu frézky. Nejprve je nárůst mezi řeznými rychlostmi 20, 30 m/s pozvolný, průměrně pouze o 20 %, zatímco mezi řeznými rychlostmi 30, 40 m/s se řezný příkon zvyšuje průměrně o 100 %. Toto porovnání mezi sebou je nejvhodnější, protože dochází rovnoměrně ke zvyšování řezné rychlosti o 10 m/s. Celkově byl průměrný rozdíl mezi nejnižší a nejvyšší řeznou rychlostí 160 %. Při procesu rovinného frézování všeobecně platí, že s rostoucí

řeznou rychlostí roste také řezný příkon stroje, což nám potvrzují i výsledky jiných autorů [4, 65].

Tab. 21. Statistické vyhodnocení vlivu vybraných faktorů na řezný příkon smrku ztepilého *(Picea abies* L.*)*

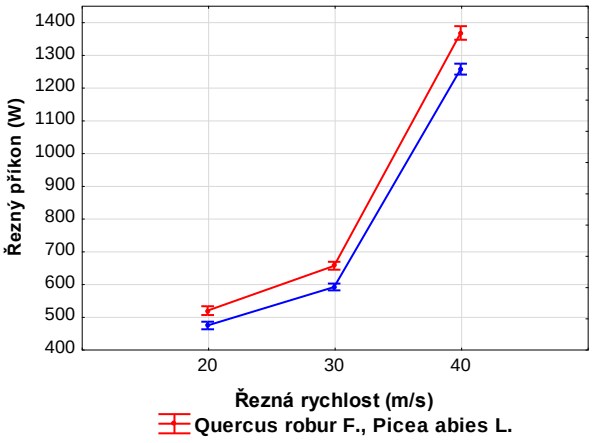
Vliv vybraných faktorů na řezný příkon					
Sledované faktory	**Součet čtverců**	**Stupně volnosti**	**Rozptyl**	**Fischerův *F*-test**	**Hladina významnosti *P***
Intercept	644122510	1	644122510	416275,9	***
Řezná rychlost (m/s) (1)	128341845	2	64170922	41471,6	***
Úhel čela (°) (2)	12058892	2	6029446	3896,6	***
Posuvná rychlost (m/min) (3)	5075	2	2537	1,6	NS
Teplota (°C) (4)	272305	3	90768	58,7	***
1 * 2 * 3 * 4	453421	24	18893	12,2	***
Chyba	1504020	972	1547		
Příslušný model vysvětluje přibližně 99,8 % celkového součtu čtverců.					

NS – statisticky nevýznamný, *** - statisticky významný, $P < 0,05$

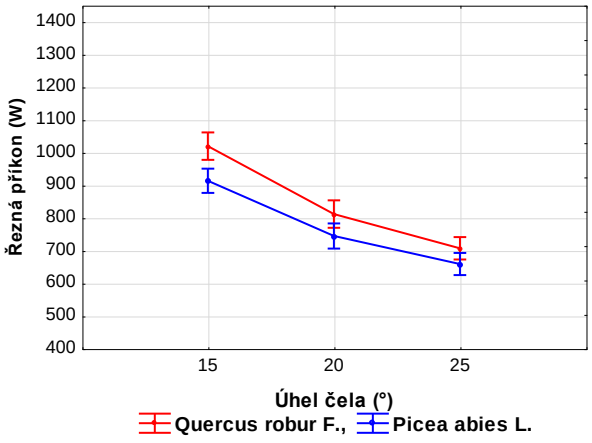
Tab. 22. Statistické vyhodnocení vlivu vybraných faktorů na řezný příkon dubu letního *(Quercus robur F.)*

Sledované faktory	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozptyl	Fischerův *F*-test	Hladina významnosti *P*
Intercept	772804089	1	772804089	1101448	***
Řezná rychlost (m/s) (1)	149177189	2	74588595	106308	***
Úhel čela (°) (2)	18182096	2	9091048	12957	***
Posuvná rychlost (m/min) (3)	427569	2	213785	305	***
Teplota (°C) (4)	1168900	3	389633	555	***
1 * 2 * 3 * 4	288848	24	12035	17	***
Chyba	681980	972	702		
Příslušný model vysvětluje přibližně 99,9 % celkového součtu čtverců.					

NS – statisticky nevýznamný, *** – statisticky významný, $P < 0,05$

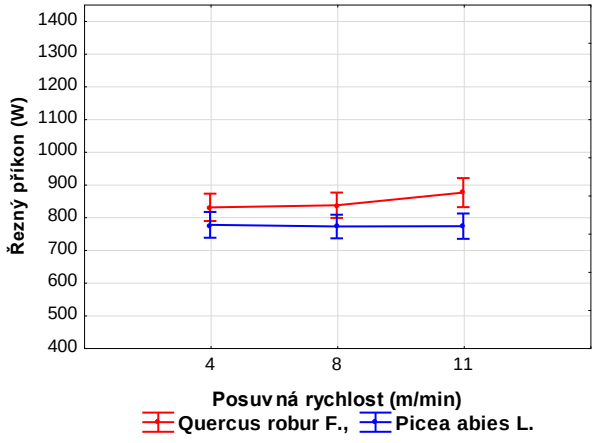


Obr. 42. Vliv řezné rychlosti na řezný příkon

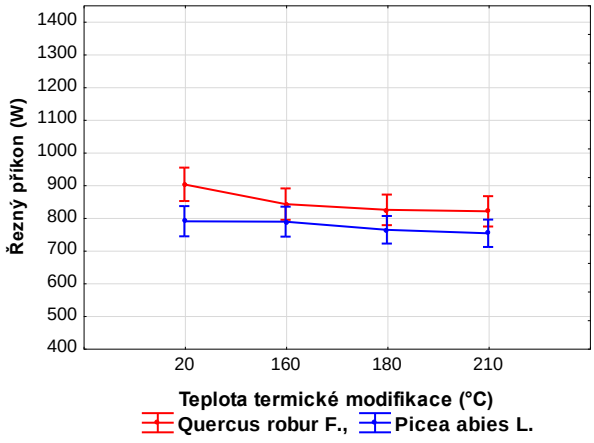


Obr. 43. Vliv úhlu řezného čela na řezný příkon

Vliv úhlu řezného čela nástroje nám znázorňuje obr. 43., kde je také vidět jasná závislost jak u smrku ztepilého (*Picea abies* L.), tak u dubu letního (*Quercus robur* F.). Se zvyšujícím se úhlem čela klesá i spotřeba elektrické energie. Průměrně se příkon stroje při změně úhlu z 15° na 20° snížil o 18,2 %. Při změně z úhlu čela 20° na 25° nebyl rozdíl tak markantní, v průměru o 10,8 %. Celkový rozdíl mezi úhlem čela nástroje 15° a 25° byl 27 %. Tento fakt potvrzují i práce jiných autorů např. Barcík, Korčok [3, 55].



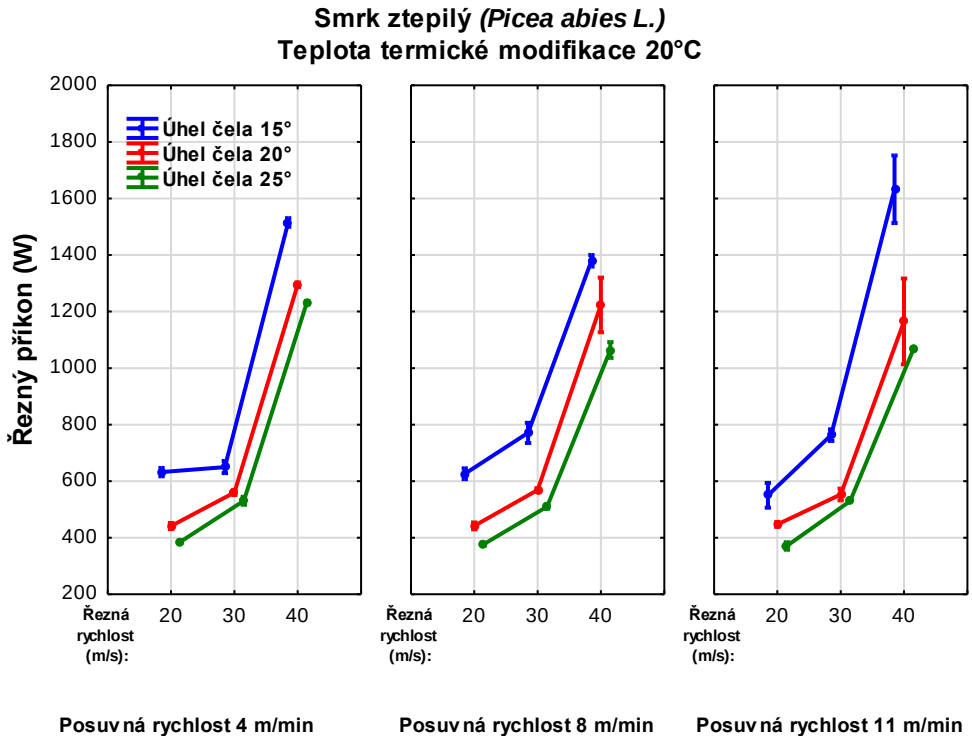
Obr. 44. Vliv posuvné rychlosti na řezný příkon



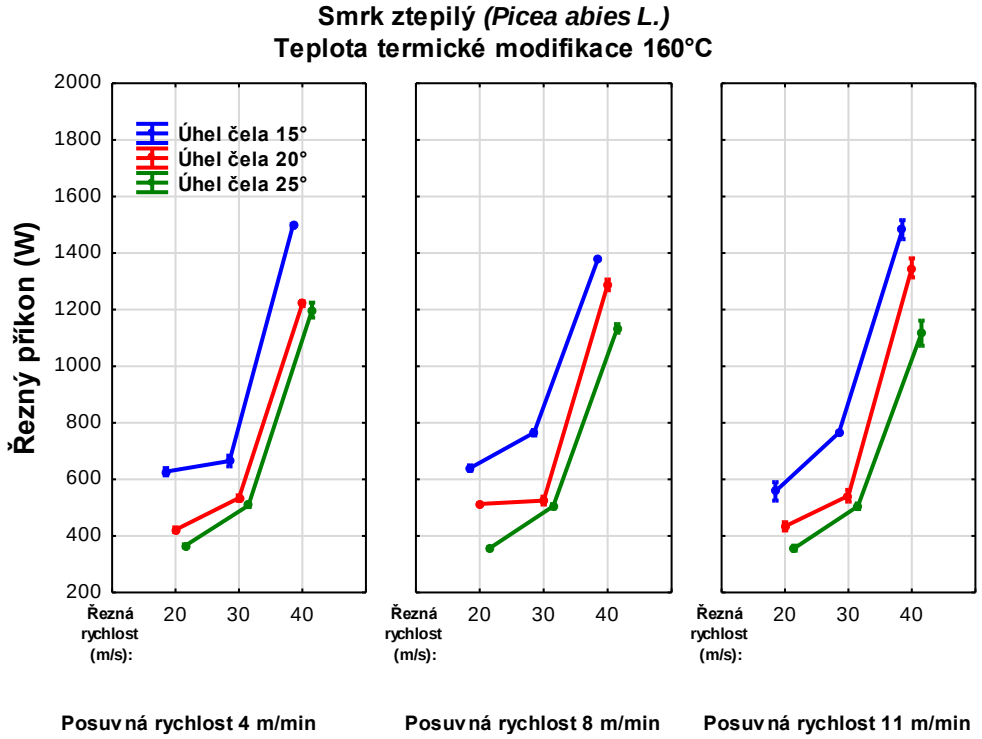
Obr. 45. Vliv teploty termické modifikace na řezný příkon

Vliv posuvné rychlosti na řezný příkon má podobný charakter jako u řezné rychlosti, avšak ne tak razantní. Průběh nárůstu spotřeby elektrické energie ukazuje obr. 44. Rozdíl posuvné rychlosti 4 a 8 m/min byl v průměru 0,4 % (v případě smrku ztepilého nám statistická analýza neukázala žádnou závislost). Rozdíl mezi posuvnou rychlostí 8 a 11 m/min byl 1,2 %. Celkový rozdíl mezi nejnižší posuvnou rychlostí 4 m/min a nejvyšší 11 m/min, byl v průměru 1,6 %. Vliv podávací rychlosti na řezný příkon nám také potvrzují i práce jiných autorů např. Barcík [3].

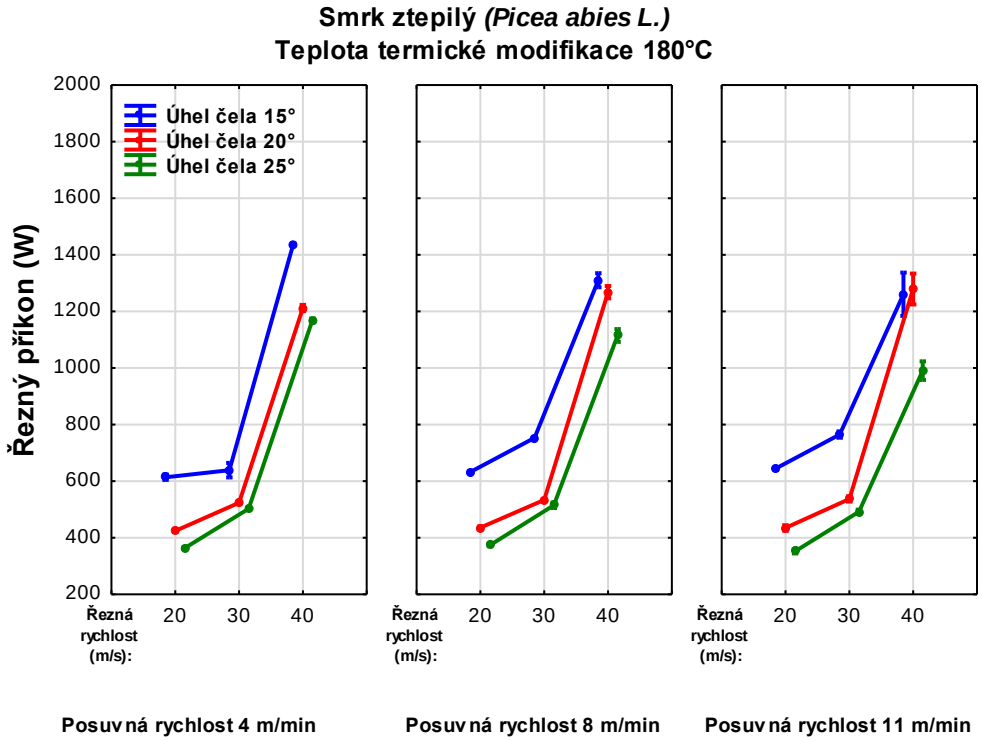
Stupeň termické modifikace také přímo ovlivňuje řezný příkon u obou dřevin. Rozdíl mezi nativním dřevem a modifikovaným na 160 °C byl v průměru 6,3 %, rozdíl mezi 160 °C a 180 °C byl 1,8 %, mezi 180 °C a 210 °C došlo ke snížení řezného příkonu o 1,2 %. Celkový průměrný rozdíl mezi termicky neupravenou a termicky modifikovanou dřevinou na 210 °C byl 9,2 %. Tato změna spotřeby elektrické energie byla dána změnou v chemické struktuře dřeva termicky modifikovaných dřevin, kdy se mění i fyzikálně mechanické vlastnosti dřeva, a tedy i řezný odpor při rovinném frézování.



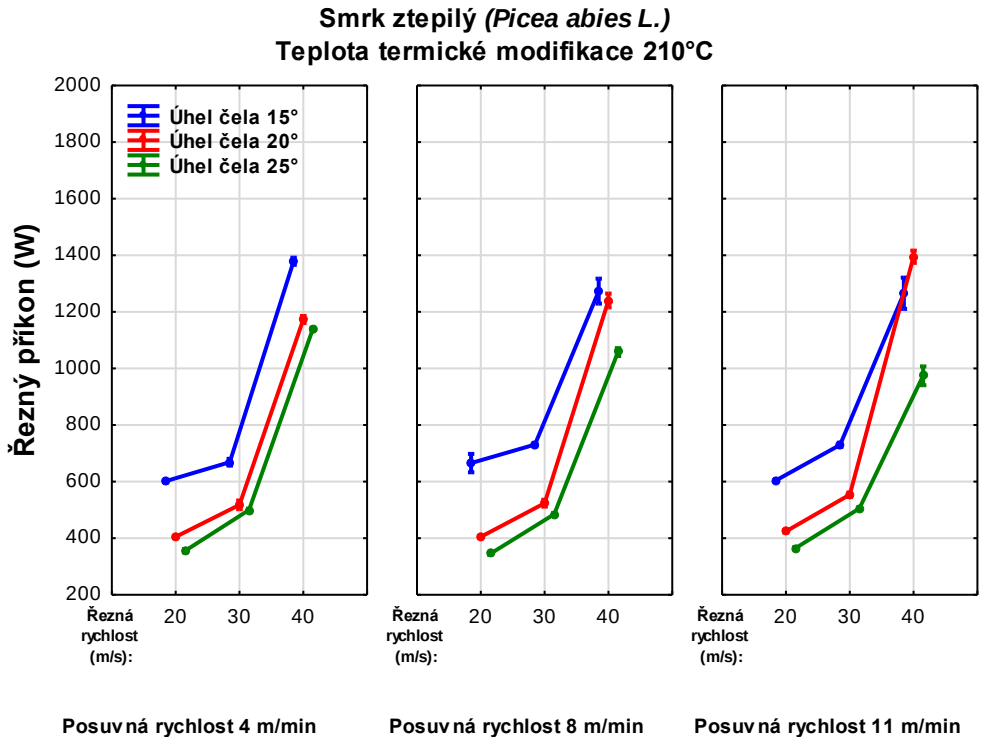
Obr. 46. Čtyř faktorová analýza řezného příkonu nemodifikovaného smrku



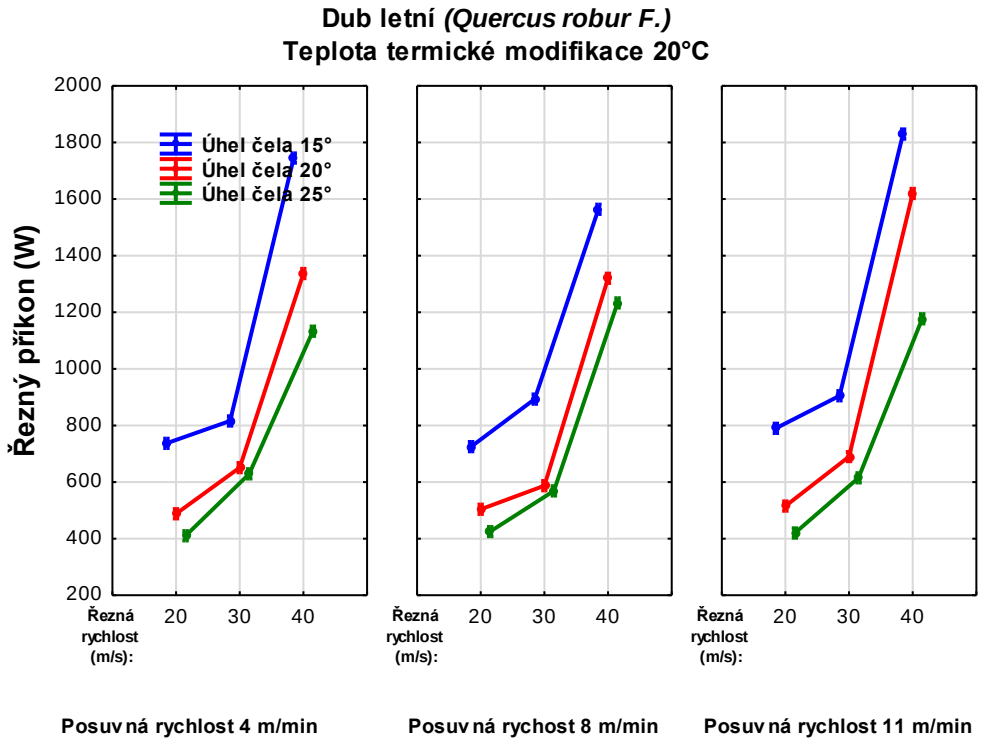
Obr. 47. Čtyř faktorová analýza řezného příkonu termicky modifikovaného smrku na 160 °C



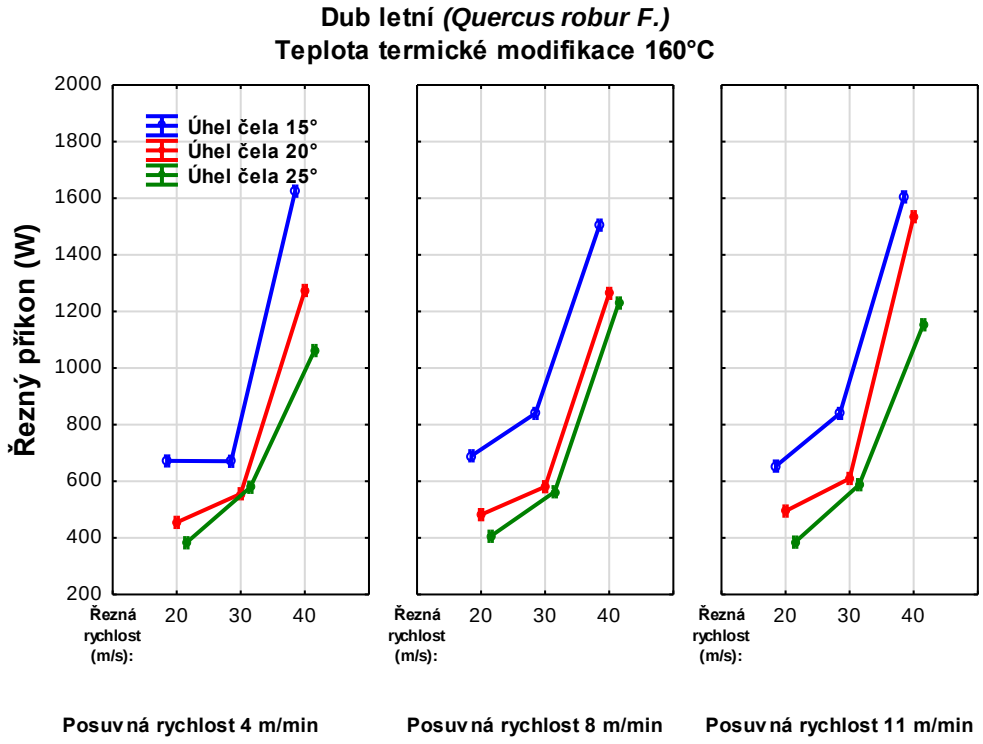
Obr. 48. Čtyř faktorová analýza řezného příkonu termicky modifikovaného smrku na 180 °C



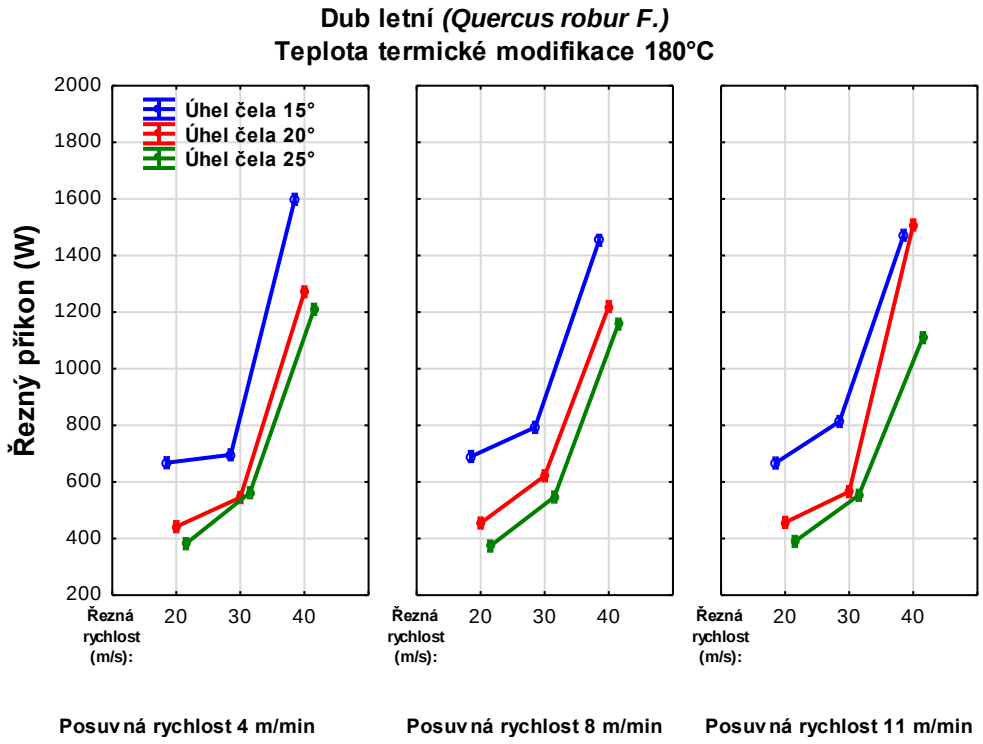
Obr. 49. Čtyř faktorová analýza řezného příkonu termicky modifikovaného smrku na 210 °C



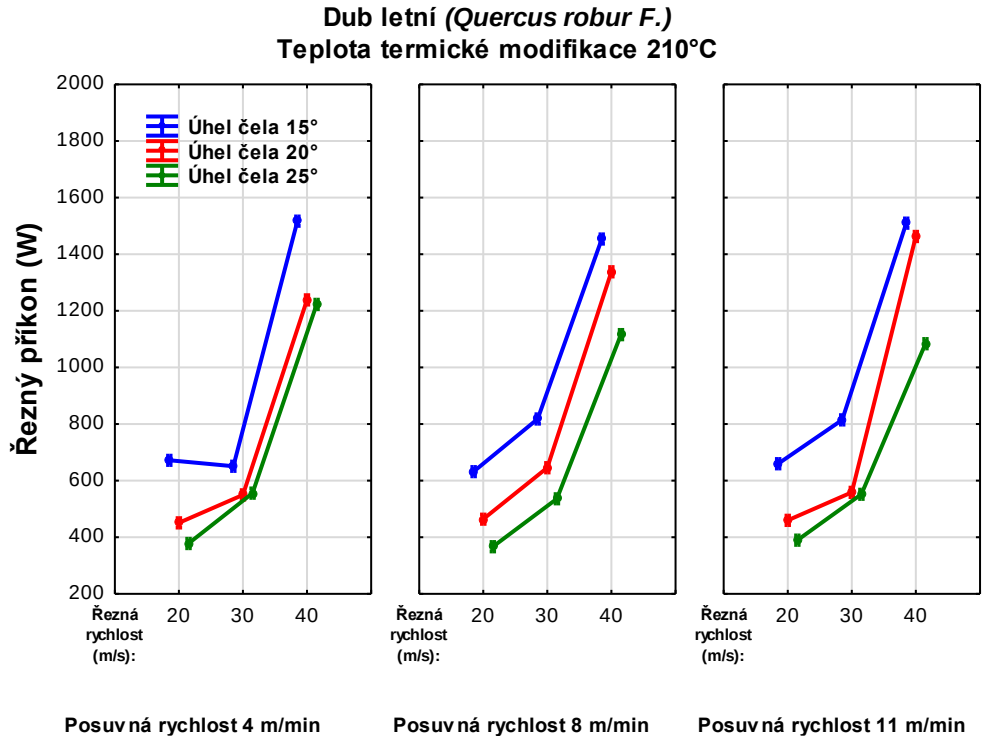
Obr. 50. Čtyř faktorová analýza řezného příkonu nemodifikovaného dubu



Obr. 51. Čtyř faktorová analýza řezného příkonu termicky modifikovaného dubu na 160 °C



Obr. 52. Čtyř faktorová analýza řezného příkonu termicky modifikovaného dubu na 180 °C



Obr. 53. Čtyř faktorová analýza řezného příkonu termicky modifikovaného dubu na 210 °C

Prokazatelný vliv na řezný příkon má také druh frézovaného materiálu. V našem případě vyšší řezný příkon byl u dubu letního *(Quercus robur* F.*)* než u smrku ztepilého *(Picea abies* L.*)* průměrně o 2,5 % to bylo dáno samotnou makroskopickou strukturou obou dřevin, ovšem největší vliv má na tento fakt také rozdílná hustota obou dřevin.

V obr. 46.–53. můžeme pozorovat detailní srovnání všech faktorů (řezné rychlosti, posuvné rychlosti, úhlu čela, dřeviny a teploty termické modifikace) na množství odebírané elektrické energie při rovinném, válcovém frézování.

Pokud bychom tuto kapitolu o řezném příkonu shrnuli, zaměřili se pouze a jen na množství odebírané energie při rovinném frézování, bylo by v případě smrku ztepilého *(Picea abies* L.*)* optimální nastavení řezné rychlosti 20 m/s, úhlu čela 25°, posuvné rychlosti 8 m/min, posuvu na zub 2,7 mm a opracování termicky modifikovaný smrku na teplotu 210 °C – při takovéto kombinaci dosáhl průměr řezného příkonu pouze 345 W. Optimální nastavení parametrů pro dub letní *(Quercus robur)* byl totožný jako v případě smrku ztepilého, kdy hodnota řezného příkonu dosáhla 366 W. Naopak nejhorší nastavení frézování bylo v případě smrku ztepilého *(Picea abies* L.*)*, jehož řezná rychlost dosáhla 40 m/s, úhel čela 15°, posuvná rychlost 4 m/min, posuv na zub 0,7 mm a opracování

termicky nemodifikovaného dřeva, zde hodnota řezného příkonu byla neuvěřitelných 1517 W. V případě dubu letního *(Quercus robur)* nejhorší kombinace byla zaznamenána při řezné rychlosti 40 m/s, úhlu čela 15°, posuvné rychlosti 11 m/min, posuvu na zub 1,8 mm a termicky nemodifikovaného dřeva, zde se hodnota řezného příkonu dostala až na 1 830 W.

Z předešlých výsledků výzkumu je jednoznačně patrné, že toto sledování optimálních parametrů je velice důležité, protože hodnota příkonu optimální a nejhorší kombinace dosahovala v případě smrku ztepilého *(Picea abies* L.*)* rozdíl 339 % a v případě dubu letního *(Quercus robur* F.*)* až 400 %. Což samozřejmě ovlivňuje nejen ekonomickou stránku výroby, ale také, a především efektivnost výroby vázanou na životní prostředí.

Abych lépe znázornil výše uvedené výsledky, v tab. 23. pro smrk ztepilý je znázorněno kolik českých korun by stála spotřeba elektrické energie při plně vytíženém stroje, při 2 směnném provozu 1 rok. Při optimálním nastavení je to 5 407,- Kč a v případě nejhoršího nastavení 23 778,- Kč.

Tab. 23. Optimální a nejhorší varianta nastavení včetně přepočtu na cenu elektřiny smrk ztepilý (*Picea abies* L.)

Řezná rychlost (m/s)	Úhel čela (°)	Posuvná rychlost (m/min)	Teplota (°C)	Posuv na zub (mm)	Spotřeba elektrické energie (W)	Cena za 16 h/1 rok (CZK)
20	25	8	210	2,7	345	5407
-	-	-	-	-	-	-
40	15	4	20	0,7	1517	23778

Stejně je tomu v případě dubu letního (*Quercus robur* F.), kde při optimálním nastavení je cena 5 737,- Kč za rok a při nejhorším nastavení 28 685,- Kč za rok. Což je velmi výrazný rozdíl. Všechny ceny byly kalkulovány na průměrnou cenu elektrické energie 1 *KWh* = 4,082,- Kč.

Tab. 24. Optimální a nejhorší varianta nastavení včetně přepočtu na cenu elektřiny dub letní (*Quercus Robur* F.)

Řezná rychlost (m/s)	Úhel čela (°)	Posuvná rychlost (m/min)	Teplota (°C)	Posuv na zub (mm)	Spotřeba elektrické energie (W)	Cena za 16 h/1 rok (CZK)
20	25	8	210	2,7	366	5737
-	-	-	-	-	-	-
40	15	11	20	1,8	1830	28685

Zde se samozřejmě klade otázka, zda energeticky optimální nastavení technicko-technologických parametrů při frézování je také efektivní z hlediska kvality opracovaného povrchu, to samozřejmě vyhodnotíme v další kapitole.

4.3 Vyhodnocení energetické náročnosti při rovinném frézování v závislosti na posuvu na zub f_z

Pokud se na spotřebu elektrické energie podíváme z hlediska posuvu na zub, zjistíme dle tab. 25. a 26., uvidíme, že na hladině významnosti $P < 0,05$ je závislost posuvu na zub na spotřebu elektrické energie také statisticky významné jak u smrku ztepilého (*Picea abies* L.), tak u dubu letního (*Quercus robur* F.).

Tab. 25. Statistické vyhodnocení vlivu vybraných faktorů na Energetickou náročnost (smrk ztepilý)

Řezný příkon (*W*)					
Sledované faktory	**Součet čtverců**	**Stupně volnosti**	**Rozptyl**	**Fischerův *F*-test**	**Hladina významnosti *P***
Intercept	644122510	1	644122510	40821,73	***
Posuv na zub (mm)	128704637	8	16088080	1019,59	***
Chyba	16899216	1071	15779		
Příslušný model vysvětluje přibližně 88,4 % celkového součtu čtverců.					

NS – statisticky nevýznamný, *** – statisticky významný, $P < 0,05$

Tab. 26. Statistické vyhodnocení vlivu vybraných faktorů na Energetickou náročnost (Dub)

Řezný příkon (*W*)					
Sledované faktory	**Součet čtverců**	**Stupně volnosti**	**Rozptyl**	**Fischerův *F*-test**	**Hladina významnosti *P***
Intercept	772804089	1	772804089	33606,60	***
Posuv na zub (mm)	150023217	8	18752902	815,50	***
Chyba	24628293	1071	22996		
Příslušný model vysvětluje přibližně 85,9 % celkového součtu čtverců.					

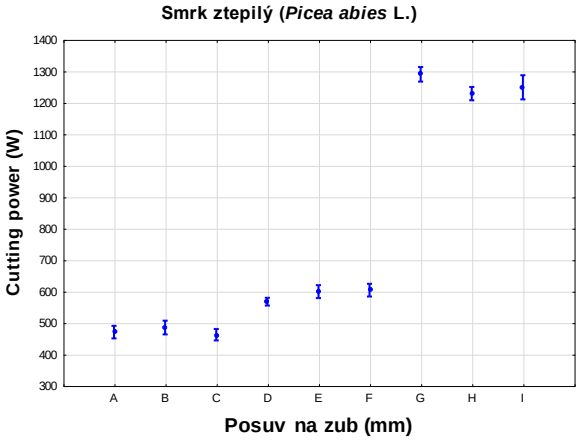
NS – statisticky nevýznamný, *** – statisticky významný, $P < 0,05$

Tab. 27. Vysvětlující tabulka k obr. 54. a 55.

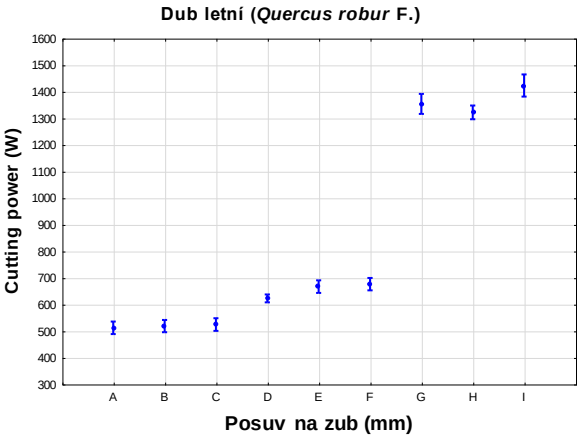
Popis	Řezná rychlost (m/s)	Posuvná rychlost (m/min)	Posuv na zub (mm)
A	20	4	1,3333
B	20	8	2,6667
C	20	11	3,6667
D	30	4	0,8889
E	30	8	1,7778
F	30	11	2,4444
G	40	4	0,6667
H	40	8	1,3333
I	40	11	1,8333

Na obr. 54. pro smrk ztepilý (*Picea abies* L.) a obr. 55. pro dub letní (*Quercus robur* F.) je znázorněno všech 9 námi testovaných hodnot posuvu na zub, vypočtených z použité řezné rychlosti, posuvné rychlosti a průměru frézy. Veškeré posuvy na zub jsou odznačeny písmeny A-D a současně v tab. 27. vysvětlena jejich hodnota. Posuv na zub byl takto označen z toho důvodu, abychom pro lepší srovnání a vyhodnocení neztratili přehled při jaké kombinaci řezné a posuvné rychlosti nám vyšla hodnota posuvu na zub. V obr. 54. a 55. dochází k zajímavému jevu a to k takovému, že u hodnot G, H, I dochází až k trojnásobnému navýšení hodnot řezného příkonu i přes to, že hodnoty posuvu na zub jsou srovnatelné s předchozími hodnotami. Je to dáno především tím, že byla použita řezná rychlost 40 m/s a tím došlo k velkému nárůstu řezného příkonu. Obecně lze z našich

výsledků konstatovat, že se zvětšujícím se posuvem na zub, nepatrně stoupá spotřeba elektrické energie, ale tento jev je v našem případě zanedbatelný.



Obr. 54. Závislost řezného příkonu na posuvu na zub, smrk ztepilý (*Picea abies* L.)



Obr. 55. Závislost řezného příkonu na posuvu na zub, dub letní (*Quercus robur* F.)

4.4 Vliv vybraných faktorů na kvalitu obrobeného povrchu měřenou kontaktní a bezkontaktní (laserovou) metodou

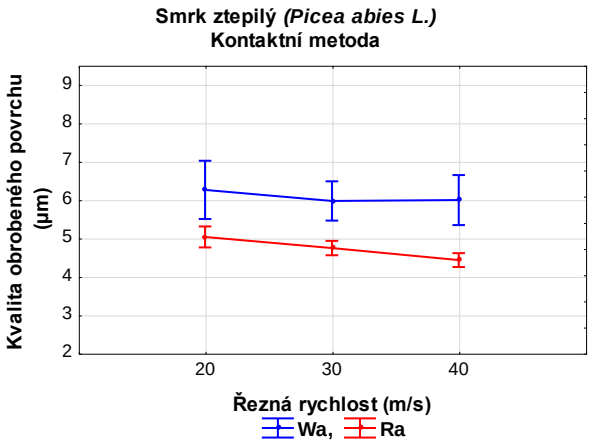
Samozřejmě nejen hodnota elektrického příkonu je pro proces frézování důležitá, musíme také porovnat kvalitu opracovaného povrchu. Pro lepší přesnost měření a možnost porovnání byly výsledky naměřené dvěma způsoby, a to kontaktní a bezkontaktní (laserovou) metodou. Pomoci obou metod byly vzorky změřeny a sledovala se průměrná aritmetická úchylka profilu drsnosti *Ra* a průměrná aritmetická úchylka profilu vlnitosti *Wa* obou dřevin jak smrku ztepilého *(Picea abies* L.*)*, tak dubu letního *(Quercus robur* F.*).*

4.4.1 Výsledky a porovnání kontaktní a bezkontaktní metody měření drsnosti a vlnitosti smrku ztepilého *(Picea abies* L.*)* a dubu letního *(Quercus robur* F.*)*

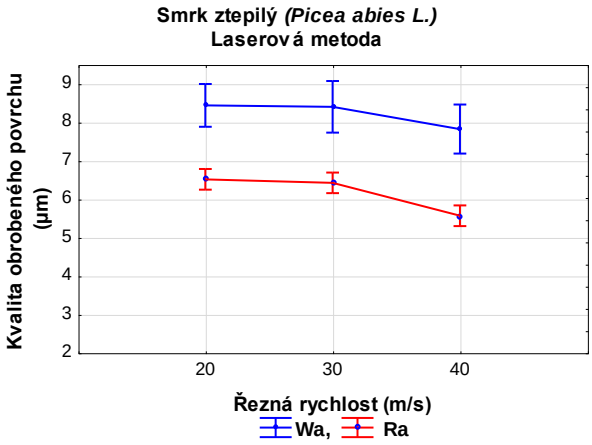
Řezná rychlost

Jedním z prvních sledovaných faktorů na kvalitu opracovaného povrchu byla řezná rychlost rovinného frézování, která v našem případě činila 20, 30 a 40 m/s. V tab. 28.

a 29. můžeme ze statistického vyhodnocení vyčíst vzájemný vliv řezné rychlosti obou parametrů *Ra* a *Wa* u smrku ztepilého *(Picea abies* L.*)*. Z první tab. 28. kontaktní metody vyplývá, že řezná rychlost nemá významný vliv na kvalitu hodnot *Ra* a *Wa*. Z obr. 56. můžeme vyčíst, jak stagnovala či se lehce zlepšovala kvalita opracovaného povrchu. Rozdíl mezi řeznou rychlostí 20 m/s a 40 m/s byl v průměru u hodnoty *Ra* 1,9 %, a u hodnoty *Wa* 9,7 %. Lze tedy konstatovat, že i když statistická analýza nepředpokládá v tomto případě silnou závislost, ovlivňuje řezná rychlost kvalitu opracovaného povrchu, avšak ne ve velkém měřítku.



Obr. 56. Závislost vlnitosti a drsnosti povrchu na řezné rychlosti Smrk ztepilý (kontaktní metoda)



Obr. 57. Závislost vlnitosti a drsnosti povrchu na řezné rychlosti Smrk ztepilý (laserová metoda)

Co se týká výsledků bezkontaktního měření v závislosti na řezné rychlosti, vidíme naopak v tab. 24. významnou závislost těchto dvou faktorů. Naměřené absolutní hodnoty při tomto měření jsou sice odlišné, avšak dochází ke stejnému jevu, jako v předchozím případě a to, že kvalita obrobeného povrchu se s vzrůstající řeznou rychlostí zlepšuje. Na měření laserovou metodou výsledky ukazují větší rozdíly a to mezi 20 a 30 m/s u *Wa* 1,1 %, u *Ra* 1,5 %, mezi 30 a 40 m/s u *Wa* 5,9 % a u *Ra* 11,1 %. Co se týká celkové změny, byl rozdíl mezi 20 a 40 m/s *Wa* 6 % a u *Ra* 13,8 %.

Tab. 28. Statistické vyhodnocení vlivu vybraných faktorů na kvalitu obrobeného povrchu měřenou kontaktní metodou (smrk ztepilý)

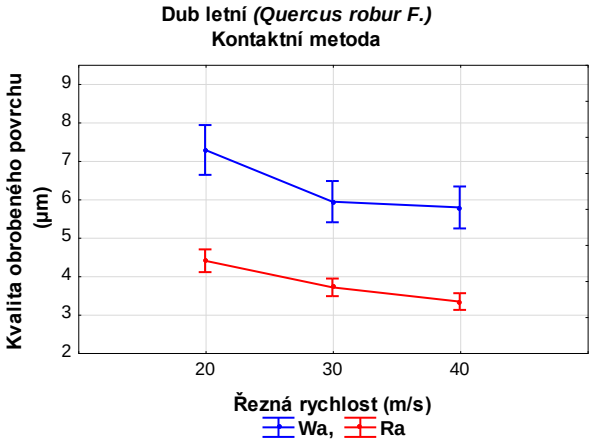
Vlnitost (*Wa*)					
Sledované faktory	**Součet čtverců**	**Stupně volnosti**	**Rozptyl**	**Fischerův *F*-test**	**Hladina významnosti *P***
Intercept	39808,58	1	39808,58	1174,825	***
Řezná rychlost (m/s) (1)	18,56	2	9,28	0,274	NS
Úhel čela (°) (2)	647,57	2	323,79	9,556	***
Posuvná rychlost (m/min) (3)	304,14	2	152,07	4,488	***
Teplota (°C) (4)	517,54	3	172,51	5,091	***
1 * 2 * 3 * 4	2489,16	24	103,71	3,061	***
Chyba	32935,91	972	33,88		
Příslušný model vysvětluje přibližně 57,3 % celkového součtu čtverců.					
Drsnost (*Ra*)					
Sledované faktory	**Součet čtverců**	**Stupně volnosti**	**Rozptyl**	**Fischerův *F*-test**	**Hladina významnosti *P***
Intercept	24195,13	1	24195,13	7149,685	***
Řezná rychlost (m/s) (1)	64,96	2	32,48	9,597	***
Úhel čela (°) (2)	13,28	2	6,64	1,963	NS
Posuvná rychlost (m/min) (3)	205,18	2	102,59	30,315	***
Teplota (°C) (4)	44,98	3	14,99	4,430	***
1 * 2 * 3 * 4	393,19	24	16,38	4,841	***
Chyba	3289,33	972	3,38		
Příslušný model vysvětluje přibližně 88,3 % celkového součtu čtverců.					

NS – statisticky nevýznamný, *** – statisticky významný, $P < 0,05$

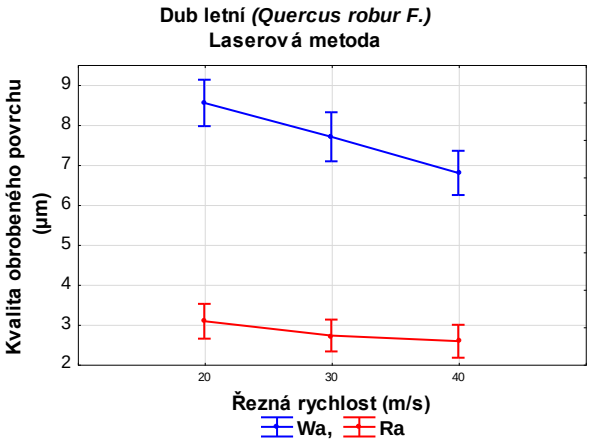
Výsledky z měření dubu letního *(Quercus robur* F.*)* jsou taktéž velice zajímavé. Pokud začneme nejprve porovnávat hodnoty kontaktního měření, tak dojdeme k výsledkům (obr. 58.) toho, že rozdíl mezi řeznou rychlostí 20 a 30 m/s je u *Wa* je 17,3 % u *Ra* 9,4 %, mezi řeznými rychlostmi 30 a 40 m/s je rozdíl u *Wa* 3,36 %, *Ra* 15,7 %. Celkem tedy mezi řeznými rychlostmi 20 a 40 m/s došlo ke zlepšení kvality opracovaného povrchu z hlediska *Wa* o 18,7 % a *Ra* o 26,1 %.

Bezkontaktní (laserová) metoda (obr. 59.) dospěla opět k trochu odlišným hodnotám, ale potvrzuje stejný trend jako u kontaktní metody a to tak, že průměrný rozdíl mezi řeznou rychlostí 20 a 30 m/s u *Wa* byl 10,3 %, u *Ra* 7,3 %, mezi řeznými rychlostmi

30 a 40 m/s byl rozdíl u *Wa* 11,5 %, *Ra* 10,7 %. Souhrnně tedy byla kvalita opracovaného povrchu u dubu letního *(Quercus robur* F.*)* měřené bezkontaktní (laserovou) metodou z nejnižší řezné rychlosti 20 m/s na nejvyšší 40 m/s lepší u *Wa* o 20,1 % a u *Ra* o 16,6 %.



Obr. 58. Závislost vlnitosti a drsnosti povrchu na řezné rychlosti Dub letní (kontaktní metoda)



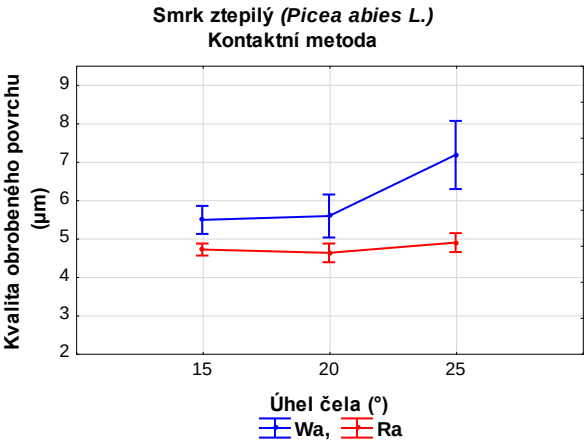
Obr. 59. Závislost vlnitosti a drsnosti povrchu na řezné rychlosti Dub letní (laserová metoda)

Z výsledků měření závislosti řezné rychlosti na kvalitu opracovaného povrchu tedy můžeme jednoznačně konstatovat, že se se zvyšující řeznou rychlostí zvyšuje kvalita opracovaného povrchu jak z hlediska drsnosti *Ra*, tak z hlediska vlnitosti *Wa* u obou našich testovaných dřevin. Toto tvrzení potvrzuje např. i práce Kaplana [50].

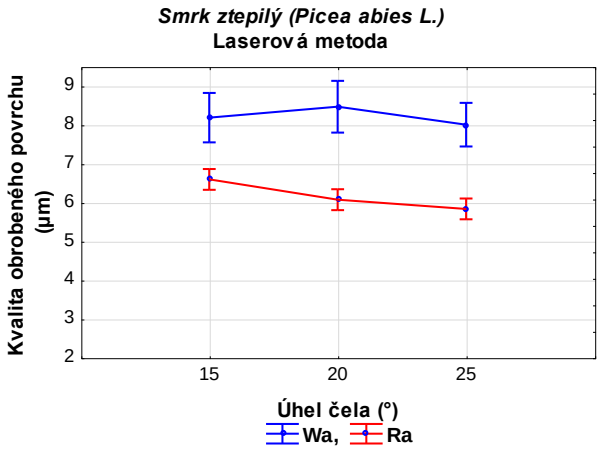
Úhel čela

Jako další sledovaný faktor vlivu na kvalitu opracovaného povrchu byl úhel čela nástroje a to 15°, 20°, 25°. Tento parametr je v našem měření obou dřevin poměrně rozporuplný, dle statistické analýzy v tab. 29., kde se testoval smrk ztepilý *(Picea abies* L.*)* kontaktní metodou, má tento parametr statisticky významný vliv na kvalitu opracovaného povrchu. Ovšem měření bezkontaktní (laserovou) metodou (tab. 30.) tento fakt nepotvrdilo. Pojďme se tedy podívat na obr. 60., kde vidíme, že hodnota vlnitosti *Wa* se při změně úhlu čela z 15° na 25° změnila o 29 % a hodnota drsnosti *Ra* o 3 %. Tento rozdíl mohl být dán nějakým vnějším vlivem či nepřesností při měření.

Laserová metoda totiž tento trend nepotvrzuje, spíše naopak bezkontaktní metoda naměřila lehce snižující se trend hodnot kvality opracovaného povrchu, a to při změně úhlu čela z 15° na 25° u hodnoty *Wa* 1,8 % a u hodnoty *Ra* 11,9 %.



Obr. 60. Závislost vlnitosti a drsnosti povrchu na úhlu řezného čela. Smrk ztepilý (kontaktní metoda)



Obr. 61. Závislost vlnitosti a drsnosti povrchu na úhlu řezného čela. Smrk ztepilý (laserová metoda)

Výsledky statistického vyhodnocení dubu letního *(Quercus robur* F.*)* můžeme sledovat v tab. 25. kontaktní metodu a v tab. 26. bezkontaktní (laserovou) metodu. Z obou tabulek lze vyčíst, že v případě dubu není vliv úhlu čela na kvalitu opracovaného

Tab. 29. Statistické vyhodnocení vlivu vybraných faktorů na kvalitu obrobeného povrchu měřenou laserovou metodou (smrk ztepilý)

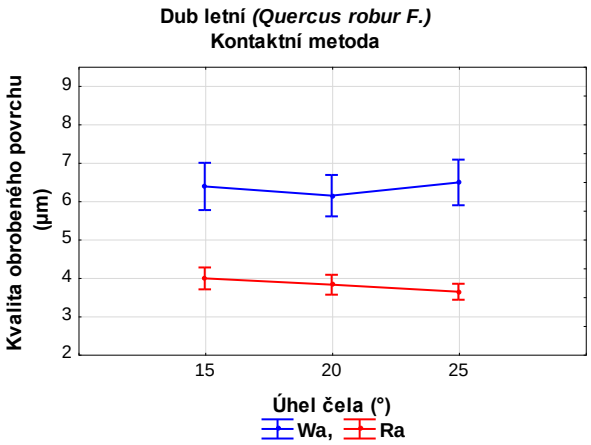
Vlnitost (*Wa*)					
Sledované faktory	**Součet čtverců**	**Stupně volnosti**	**Rozptyl**	**Fischerův *F*-test**	**Hladina významnosti *P***
Intercept	72974,61	1	72974,61	2426,545	***
Řezná rychlost (m/s) (1)	86,17	2	43,09	1,433	NS
Úhel čela (°) (2)	39,21	2	19,60	0,652	NS
Posuvná rychlost (m/min) (3)	190,87	2	95,44	3,173	***
Teplota (°C) (4)	74,65	3	24,88	0,827	NS
1 * 2 * 3 * 4	3003,33	24	125,14	4,161	***
Chyba	29231,41	972	30,07		
Příslušný model vysvětluje přibližně 72,3 % celkového součtu čtverců.					

Drsnost (*Ra*)					
Sledované faktory	**Součet čtverců**	**Stupně volnosti**	**Rozptyl**	**Fischerův *F*-test**	**Hladina významnosti *P***
Intercept	41082,48	1	41082,48	6117,799	***
Řezná rychlost (m/s) (1)	196,95	2	98,47	14,664	***
Úhel čela (°) (2)	109,26	2	54,63	8,135	***
Posuvná rychlost (m/min) (3)	168,98	2	84,49	12,582	***
Teplota (°C) (4)	36,73	3	12,24	1,823	NS
1 * 2 * 3 * 4	792,23	24	33,01	4,916	***
Chyba	6527,21	972	6,72		
Příslušný model vysvětluje přibližně 86,7 % celkového součtu čtverců.					

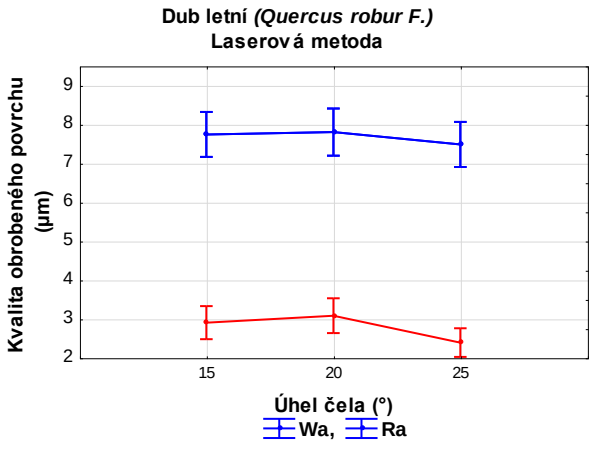
NS – statisticky nevýznamný, *** – statisticky významný, $P < 0,05$

povrchu statisticky významný. Pokud se podíváme na grafické znázornění hodnot (obr. 62.), vidíme, že se průměrné hodnoty z úhlu čela 15° na 25° změnily u hodnoty vlnitosti *Wa* o 1,5 % v neprospěch kvality povrchu a u drsnosti *Ra* o 4,5 % ve prospěch kvality opracovaného povrchu.

Během bezkontaktního (laserového) měření bylo zjištěno, že změna mezi úhlem čela je u *Wa* 4,45 % a u *Ra* 17,3 % v prospěch kvality opracovaného povrchu.



Obr. 62. Závislost vlnitosti a drsnosti povrchu na úhlu řezného čela. Dub letní (kontaktní metoda)

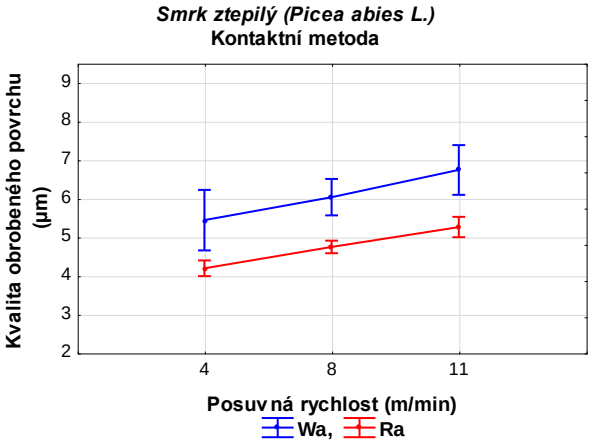


Obr. 63. Závislost vlnitosti a drsnosti povrchu na úhlu řezného čela. Dub letní (laserová metoda)

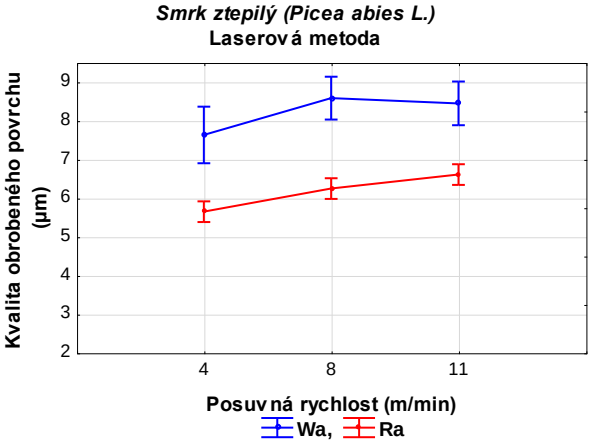
Z výsledků našeho měření smrku ztepilého *(Picea abies* L.) a dubu letního (*Quercus robur* F.) nelze jednoznačně určit, zda změna úhlu čela nástroje má statisticky významný vliv na kvalitu opracovaného povrchu. Největší změny jsme zaznamenali u bezkontaktní metody měření s tím, že s vzrůstajícím úhlem řezného čela nástroje se zlepšuje kvalita opracovaného povrchu.

Posuvná rychlost

Jedním z faktorů, který ovlivňuje kvalitu opracovaného povrchu, je také to, jakou rychlostí je obráběný materiál posouván do řezu. To, že posuvná rychlost má vliv na kvalitu výsledného povrchu u smrku ztepilého *(Picea abies* L.*)* značí i tab. 30., kde je jednoznačně čitelné, že je vliv posuvné rychlosti statistický významný na kvalitu opracovaného povrchu. Z obr. 64. je tato závislost také na první pohled patrná, kdy se při změně posuvné rychlosti ze 4 m/min na 8 m/min změnila hodnota *Wa* o 9,1 %, a *Ra* o 19,4 %. Při změně z 8 m/min na 11 m/min *Wa* o 14,1 % a *Ra* o 5,2 %. Celkem se tedy kvalita opracovaného povrchu dřeva při změně posuvné rychlosti ze 4 m/min na 11 m/min u kontaktní metody měření zhoršila u hodnoty *Wa* o 23,6 % a u *Ra* o 25,6 %.



Obr. 64. Závislost vlnitosti a drsnosti povrchu na posuvné rychlosti. Smrk ztepilý (kontaktní metoda)



Obr. 65. Závislost vlnitosti a drsnosti povrchu na posuvné rychlosti. Smrk ztepilý (laserová metoda)

U bezkontaktní (laserové) metody měření smrku ztepilého *(Picea abies* L.*)* docházelo ke stejnému jevu, že se vzrůstající posuvnou rychlostí se zhoršuje kvalita opracovaného povrchu. Při změně posuvu ze 4 m/min na 8 m/min došlo ke změně u *Wa* o 9,6 %, *Ra* o 6 %. Pokud zvýšíme posuvnou rychlost z 8 m/min na 11 m/min dostaneme u *Wa* změnu o 1,1 % a u *Ra* o 10,5 %. Celkově tedy došlo ke změně ze 4 m/min na 11 m/min u *Wa* o 7,7 %, *Ra* o 12,9 %.

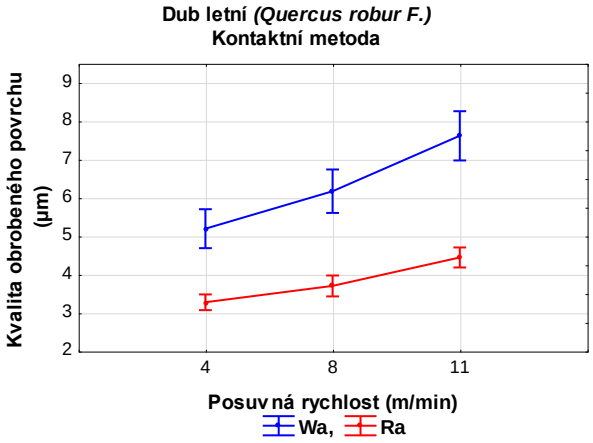
Tab. 30. Statistické vyhodnocení vlivu vybraných faktorů na kvalitu obrobeného povrchu měřenou kontaktní metodou (dub letní)

Vlnitost (*Wa*)					
Sledované faktory	**Součet čtverců**	**Stupně volnosti**	**Rozptyl**	**Fischerův *F*-test**	**Hladina významnosti *P***
Intercept	43209,64	1	43209,64	1504,033	***
Řezná rychlost (m/s) (1)	488,90	2	244,45	8,509	***
Úhel čela (°) (2)	22,32	2	11,16	0,388	NS
Posuvná rychlost (m/min) (3)	1069,30	2	534,65	18,610	***
Teplota (°C) (4)	69,56	3	23,19	0,807	NS
1 * 2 * 3 * 4	1171,39	24	48,81	1,699	***
Chyba	27924,76	972	28,73		
Příslušný model vysvětluje přibližně 9,2 % celkového součtu čtverců.					
Drsnost (*Ra*)					
Sledované faktory	**Součet čtverců**	**Stupně volnosti**	**Rozptyl**	**Fischerův *F*-test**	**Hladina významnosti *P***
Intercept	15635,43	1	15635,43	3031,754	***
Řezná rychlost (m/s) (1)	209,04	2	104,52	20,267	***
Úhel čela (°) (2)	21,70	2	10,85	2,104	NS
Posuvná rychlost (m/min) (3)	251,07	2	125,53	24,341	***
Teplota (°C) (4)	50,25	3	16,75	3,248	***
1 * 2 * 3 * 4	131,91	24	5,50	1,066	NS
Chyba	5012,82	972	5,16		
Příslušný model vysvětluje přibližně 11,7 % celkového součtu čtverců.					

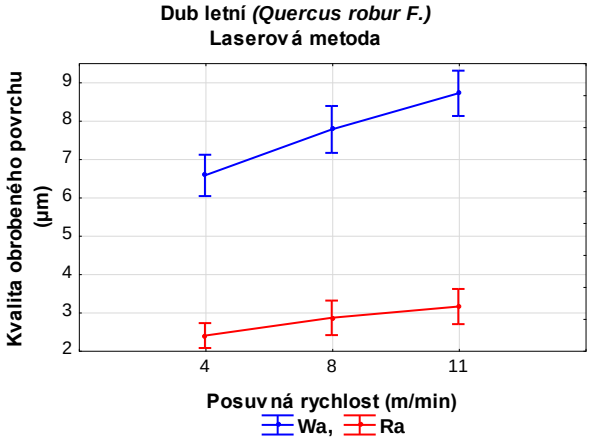
NS – statisticky nevýznamný, *** – statisticky významný, $P < 0,05$

Co se týká naměřených hodnot dubu letního *(Quercus robur* F.*)*, tak u obou metod měření došlo ke stejnému trendu jako v případě smrku ztepilého. Z posuvné rychlosti 4 m/min na 8 m/min se hodnota *Wa* u kontaktní metody zvýšila o 16,3 %, u *Ra* o 22,5 %. Při změně posuvné rychlosti z 8 m/min na 11 m/min došlo ke změně *Wa* o 25,6 %, *Ra* o 15,8 %. Celková změna ze 4 na 11 m/min byl u *Wa* o 46,1 a *Ra* o 40,3 %.

Bezkontaktní laserová metoda potvrzuje všechny naše výsledky o posuvné rychlosti. Taktéž došlo ke zvýšení hodnot *Wa* a *Ra* se zvyšující se hodnotou posuvné rychlosti. Konkrétně se při změně posuvné rychlosti ze 4 m/min na 8 m/min zvýšila hodnota vlnitosti *Wa* o 9,8 %, *Ra* o 19,1 %. Při změně z 8 m/min na 11 m/min se zvýšilo *Wa* o 10,9 % a *Ra* o 8,7 %. Celková změna z nejnižší posuvné rychlosti 4 m/min na 11 m/min zaznamenala nárůst hodnot vlnitosti *Wa* o 28,5 % a drsnosti *Ra* o 31,9 %.



Obr. 66. Závislost vlnitosti a drsnosti povrchu na posuvné rychlosti. Dub letní (kontaktní metoda)



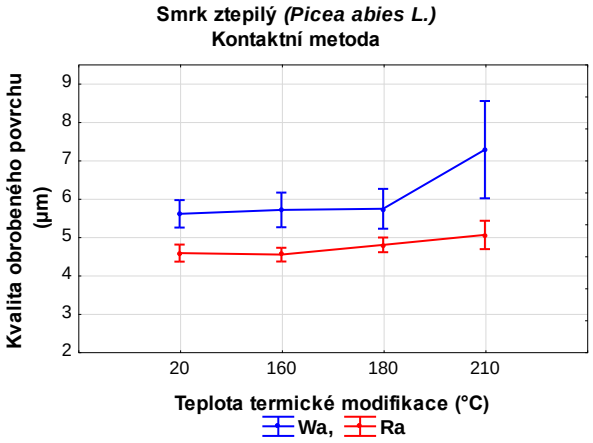
Obr. 67. Závislost vlnitosti a drsnosti povrchu na posuvné rychlosti. Dub letní (laserová metoda)

Po zhodnocení všech naměřených výsledků závislosti rychlosti posuvu na kvalitu opracovaného povrchu můžeme jednoznačně konstatovat, že se zvyšující se posuvnou rychlostí klesá kvalita opracovaného povrchu. Tato závislost je statisticky velmi významná. Z technického hlediska je to dáno především tím, že při vyšší posuvné rychlosti musí řezný klín za jednotku času odebírat větší množství třísky, a to má nepříznivý vliv na kvalitu ofrézované plochy. Tyto výsledky byly také potvrzeny vědeckými pracemi Barcík, Gaff [26, 27,3].

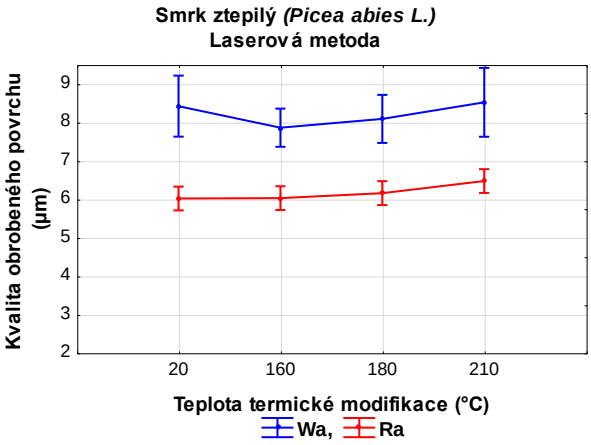
Teplota termické modifikace

Posledním sledovaným parametrem při rovinném frézování byl vliv teploty termické modifikace na kvalitu opracovaného povrchu. V případě smrku ztepilého *(Picea abies* L.*)* nedocházelo k výraznějším změnám v kvalitě opracovaného povrchu při různých druzích teploty termické modifikace, zajímavým byl pouze přechod z teploty 180 °C na 210 °C, kdy došlo k výraznému zhoršení hodnoty vlnitosti *Wa* o 22,2 % a hodnoty drsnosti *Ra* o 4,1 %. Celkový rozdíl mezi termicky nemodifikovaným a modifikovaným vzorkem na 210 °C byl v případě *Wa* 26,5 %, *Ra* 5,2 %. Významnou závislost nepotvrzuje ani statisticky vyhodnocená tab. 31.

Metoda měření laserem v případě smrku ztepilého také nepřinesla jasný výsledek. Hodnota vlnitosti se nejprve snižovala a poté se hodnota vlnitosti *Wa* a drsnosti *Ra* mírně stoupala. Rozdíl tedy při termicky nemodifikovaném a modifikovaném vzorku byl u hodnoty *Wa* zvýšen pouze o 1 %, *Ra* o 6,6 %.



Obr. 68. Závislost vlnitosti a drsnosti povrchu na teplotě termické modifikace. Smrk ztepilý (kontaktní metoda)



Obr. 69. Závislost vlnitosti a drsnosti povrchu na teplotě termické modifikace. Smrk ztepilý (laserová metoda)

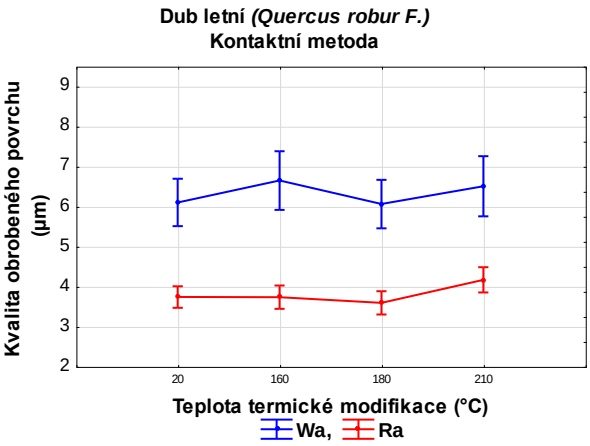
Na obr. 70. vidíme závislost termické modifikace dubu letního *(Quercus robur* F.*)* na kvalitě opracovaného povrchu. V případě dubu docházelo k zajímavému jevu a to k tomu, že nejprve se hodnota *Wa* o 10,4 % zvýšila a poté o 9,7 % klesla. Celkově se ovšem hodnoty z termicky nemodifikovaného a termicky modifikovaného dubu na 210 °C zvýšili u *Wa* o 8,2 %, *Ra* o 7,9 %.

Tab. 31. Statistické vyhodnocení vlivu vybraných faktorů na kvalitu obrobeného povrchu měřenou laserovou metodou (dub letní)

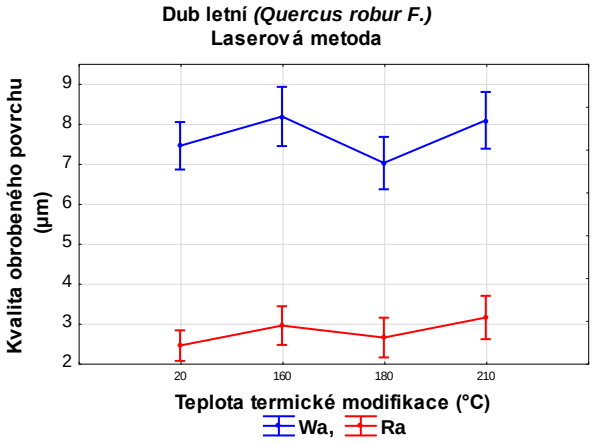
Vlnitost (*Wa*)					
Sledované faktory	**Součet čtverců**	**Stupně volnosti**	**Rozptyl**	**Fischerův *F*-test**	**Hladina významnosti *P***
Intercept	63619,23	1	63619,23	2169,329	***
Řezná rychlost (m/s) (1)	552,77	2	276,38	9,424	***
Úhel čela (°) (2)	20,73	2	10,36	0,353	NS
Posuvná rychlost (m/min) (3)	829,88	2	414,94	14,149	***
Teplota (°C) (4)	245,43	3	81,81	2,790	***
1 * 2 * 3 * 4	895,58	24	37,32	1,272	NS
Chyba	28505,54	972	29,33		
Příslušný model vysvětluje přibližně 17,3 % celkového součtu čtverců.					
Drsnost (*Ra*)					
Sledované faktory	**Součet čtverců**	**Stupně volnosti**	**Rozptyl**	**Fischerův *F*-test**	**Hladina významnosti *P***
Intercept	8419,58	1	8419,578	545,6224	***
Řezná rychlost (m/s) (1)	48,06	2	24,029	1,5572	NS
Úhel čela (°) (2)	92,89	2	46,443	3,0097	***
Posuvná rychlost (m/min) (3)	104,80	2	52,398	3,3956	***
Teplota (°C) (4)	78,85	3	26,282	1,7032	NS
1 * 2 * 3 * 4	487,95	24	20,331	1,3176	NS
Chyba	14999,07	972	15,431		
Příslušný model vysvětluje přibližně 30 % celkového součtu čtverců.					

NS – statisticky nevýznamný, *** – statisticky významný, $P < 0,05$

Podobný trend byl i u dubu letního *(Quercus robur* F.*)* měřeného bezkontaktní (laserovou) metodou, kde docházelo taktéž nejdříve ke zvýšení hodnot *Wa* a *Ra*, poté ke snížení a při teplotě 210 °C opět k zvýšení hodnot vlnitosti *Wa* a drsnosti *Ra*. Celkový průběh kvality opracovaného povrchu byl tedy z termicky neupraveného a termicky modifikovaného vzorku na 210 °C zvýšen u hodnot *Wa* o 6,6 %, *Ra* o 22,3 %.



Obr. 70. Závislost vlnitosti a drsnosti povrchu na teplotě termické modifikace. Dub letní (kontaktní metoda)



Obr. 71. Závislost vlnitosti a drsnosti povrchu na teplotě termické modifikace. Dub letní (laserová metoda)

Dle vyhodnocených výsledků výše má teplota termické modifikace (díky změně své chemické struktury během termické modifikace) vliv na kvalitu opracovaného povrchu. Z našich výsledků jsme zaznamenali při rozdílu termicky nemodifikovaného a termicky modifikovaného vzorku na 210 °C drobný nárůst hodnot *Wa* a *Ra*, ale ne tak markantní. I dle výsledků statistické analýzy nemůžeme stanovit jednoznačnou závislost těchto parametrů. Tepelně modifikované dřevo samozřejmě se změnou v chemické struktuře mění své fyzikálně-mechanické vlastnosti, ovšem v případě kvality opracování při rovinném, válcovém frézování je tento jev (u námi sledovaných dřevin) téměř zanedbatelný.

4.5 Vyhodnocení kvality opracovaného povrchu z hlediska posuvu na zub f_z

Jedním z faktorů, který je velmi důležitý pro celý proces rovinného frézování je i hodnota posuvu na zub f_z. Díky této hodnotě lze vyhodnocená data lépe porovnávat i s jinými řeznými a posuvnými rychlostmi frézovacích strojů.

Statistické vyhodnocení jednofaktorové analýzy závislosti posuvu na zub smrku ztepilého (*Picea abies* L.) s hodnotou drsnosti *Ra* a vlnitosti *Wa* pro měření kontaktní metodou jsou v tab. 32 a hodnot bezkontaktního (laserového) měření v tab. 33. U obou sledovaných měření drsnosti i vlnitosti na posuvu na zub byla velmi významná závislost.

Tab. 32. Statistické vyhodnocení vlivu posuvu na zub na kvalitu opracovaného povrchu – kontaktní metoda (smrk ztepilý)

Vlnitost (*Wa*)					
Sledované faktory	**Součet čtverců**	**Stupně volnosti**	**Rozptyl**	**Fischerův *F*-test**	**Hladina významnosti *P***
Intercept	39808,58	1	39808,58	1028,237	***
Posuv na zub (mm)	553,50	8	69,19	1,787	***
Chyba	41464,16	1071	38,72		
Příslušný model vysvětluje přibližně 1,3 % celkového součtu čtverců.					
Drsnost (*Ra*)					
Sledované faktory	**Součet čtverců**	**Stupně volnosti**	**Rozptyl**	**Fischerův *F*-test**	**Hladina významnosti *P***
Intercept	24195,13	1	24195,13	5724,810	***
Posuv na zub (mm)	287,79	8	35,97	8,512	***
Chyba	4526,44	1071	4,23		
Příslušný model vysvětluje přibližně 6,0 % celkového součtu čtverců.					

NS – statisticky nevýznamný, *** – statisticky významný, $P < 0,05$

Na obr. 72. a 73. vidíme graficky znázorněnou drsnost *Ra* a vlnitost *Wa* ke všem devíti námi testovaných posuvech na zub, přesné popisy hodnot posuvu na zub a k jakému konkrétnímu nastavení (řezné rychlosti a posuvné rychlosti) vysvětluje tab. 34. Měření kontaktní metodou a laserovou metodou opět dosahuje jiných hodnot, ale trendy jsou stejné. Můžeme u obou metod pozorovat i fakt, jak drsnost *Ra* s *Wa* spolu navzájem velmi korelují.

Tab. 33. Statistické vyhodnocení vlivu posuvu na zub na kvalitu opracovaného povrchu – laserová metoda (smrk ztepilý)

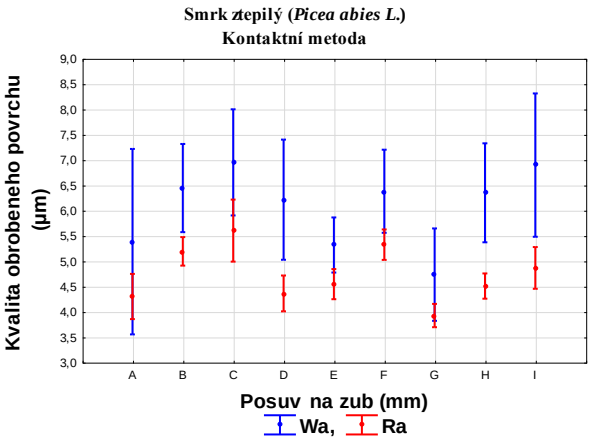
Vlnitost (*Wa*)					
Sledované faktory	**Součet čtverců**	**Stupně volnosti**	**Rozptyl**	**Fischerův *F*-test**	**Hladina významnosti *P***
Intercept	72974,61	1	72974,61	2050,451	***
Posuv na zub (mm)	818,21	8	102,28	2,874	***
Chyba	38116,40	1071	35,59		
Příslušný model vysvětluje přibližně 2,1 % celkového součtu čtverců.					

Drsnost (*Ra*)					
Sledované faktory	**Součet čtverců**	**Stupně volnosti**	**Rozptyl**	**Fischerův *F*-test**	**Hladina významnosti *P***
Intercept	41082,48	1	41082,48	5080,605	***
Posuv na zub (mm)	452,65	8	56,58	6,997	***
Chyba	8660,26	1071	8,09		
Příslušný model vysvětluje přibližně 5,0 % celkového součtu čtverců.					

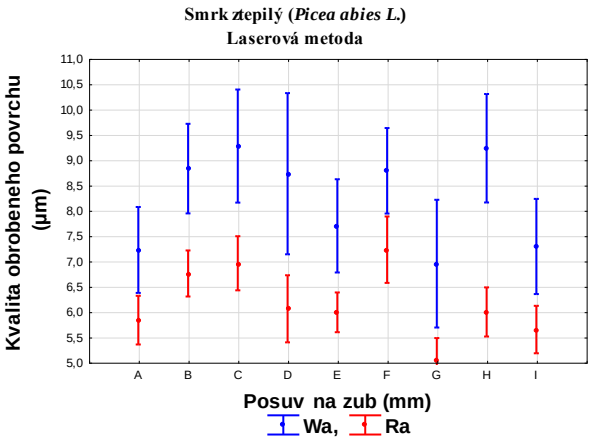
NS – statisticky nevýznamný, *** – statisticky významný, $P < 0,05$

Tab. 34. Vysvětlující tabulka k obr. 72, 73, 74. a 75.

Popis	Řezná rychlost (m/s)	Posuvná rychlost (m/min)	Posuv na zub (mm)
A	20	4	1,3333
B	20	8	2,6667
C	20	11	3,6667
D	30	4	0,8889
E	30	8	1,7778
F	30	11	2,4444
G	40	4	0,6667
H	40	8	1,3333
I	40	11	1,8333



Obr. 72. Závislost vlnitosti a drsnosti povrchu na posuvu na zub, Smrk ztepilý (kontaktní metoda)



Obr. 73. Závislost vlnitosti a drsnosti povrchu na posuvu na zub, Smrk ztepilý (laserová metoda)

Statistickou významnost na hladině $P < 0,05$ lze pozorovat také v tab. 35., kde je statistickou analýzou vyhodnocena vlnitost *Wa* a drsnost *Ra* v závislosti na posuvu na zub měřenou kontaktní metodou dub letní (*Quercus robur* F.). Tab. 36. nám jen potvrzuje předešlé tvrzení a udává závislost také při vyhodnocení naměřených hodnot bezkontaktní (laserovou) metodou. Obr. 74. a 75. vykresluje celou situaci v grafické podobě, opět za pomoci vysvětlovací tab. 34.

Tab. 35. Statistické vyhodnocení vlivu posuvu na zub na kvalitu opracovaného povrchu – kontaktní metoda (dub letní)

Vlnitost (*Wa*)					
Sledované faktory	**Součet čtverců**	**Stupně volnosti**	**Rozptyl**	**Fischerův *F*-test**	**Hladina významnosti *P***
Intercept	41101,98	1	41101,98	1603,319	***
Posuv na zub (mm)	1297,77	8	162,22	6,328	***
Chyba	27455,68	1071	25,64		
Příslušný model vysvětluje přibližně 4,5 % celkového součtu čtverců.					
Drsnost (*Ra*)					
Sledované faktory	**Součet čtverců**	**Stupně volnosti**	**Rozptyl**	**Fischerův *F*-test**	**Hladina významnosti *P***
Intercept	15052,11	1	15052,11	3201,406	***
Posuv na zub (mm)	346,40	8	43,30	9,209	***
Chyba	5035,54	1071	4,70		
Příslušný model vysvětluje přibližně 6,4 % celkového součtu čtverců.					

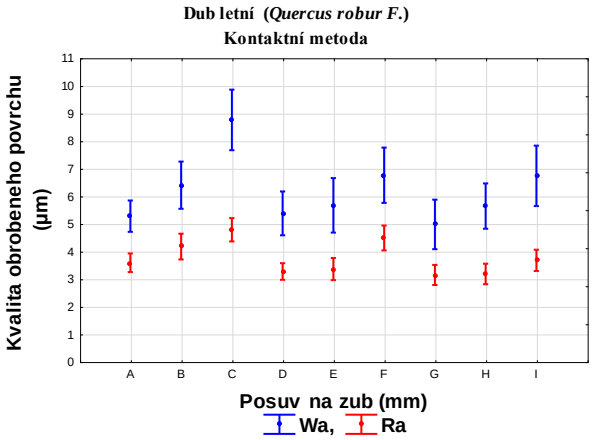
NS – statisticky nevýznamný, *** – statisticky významný, $P < 0,05$

Tab. 36. Statistické vyhodnocení vlivu posuvu na zub na kvalitu opracovaného povrchu – laserová metoda (dub letní)

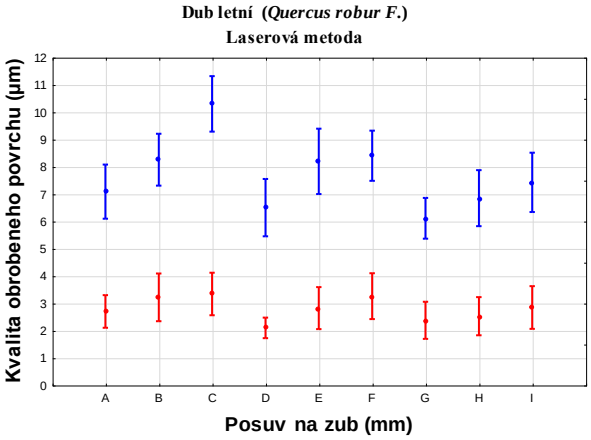
Vlnitost (*Wa*)					
Sledované faktory	**Součet čtverců**	**Stupně volnosti**	**Rozptyl**	**Fischerův *F*-test**	**Hladina významnosti *P***
Intercept	63619,23	1	63619,23	2059,822	***
Posuv na zub (mm)	1551,78	8	193,97	6,280	***
Chyba	33078,68	1071	30,89		

Příslušný model vysvětluje přibližně 4,5 % celkového součtu čtverců.					
Drsnost (*Ra*)					
Sledované faktory	**Součet čtverců**	**Stupně volnosti**	**Rozptyl**	**Fischerův *F*-test**	**Hladina významnosti *P***
Intercept	8419,58	1	8419,578	523,9635	***
Posuv na zub (mm)	172,04	8	21,505	1,3383	***
Chyba	17209,91	1071	16,069		
Příslušný model vysvětluje přibližně 1 % celkového součtu čtverců.					

NS – statisticky nevýznamný, *** – statisticky významný, $P < 0,05$



Obr. 74. Závislost vlnitosti a drsnosti povrchu na posuvu na zub, dub letní (kontaktní metoda)

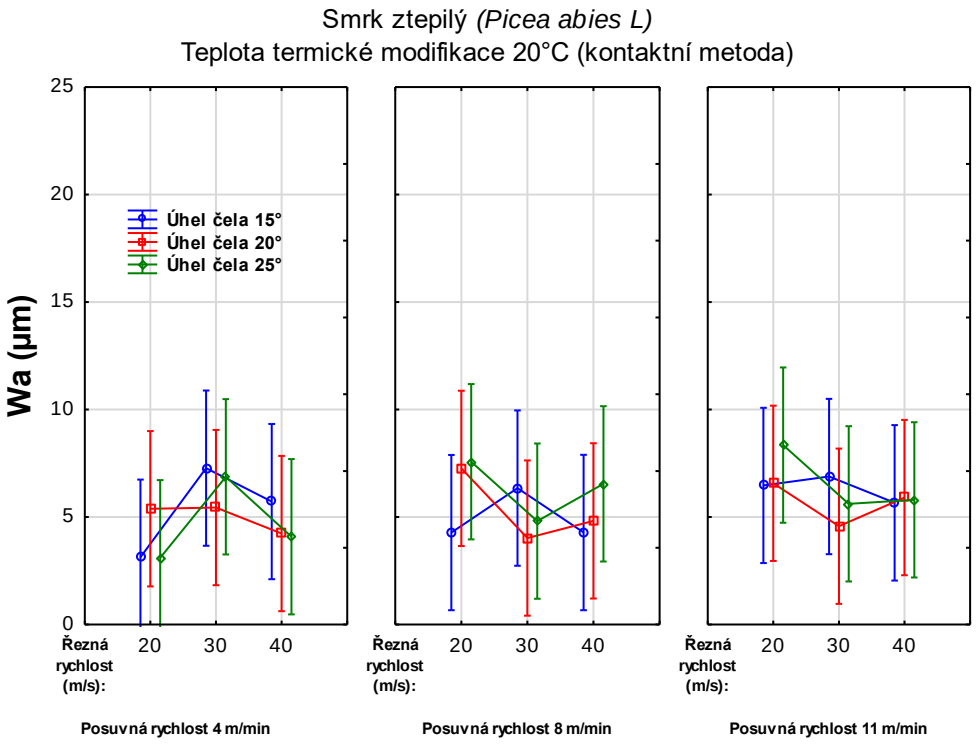


Obr. 75. Závislost vlnitosti a drsnosti povrchu na posuvu na zub, dub letní (laserová metoda)

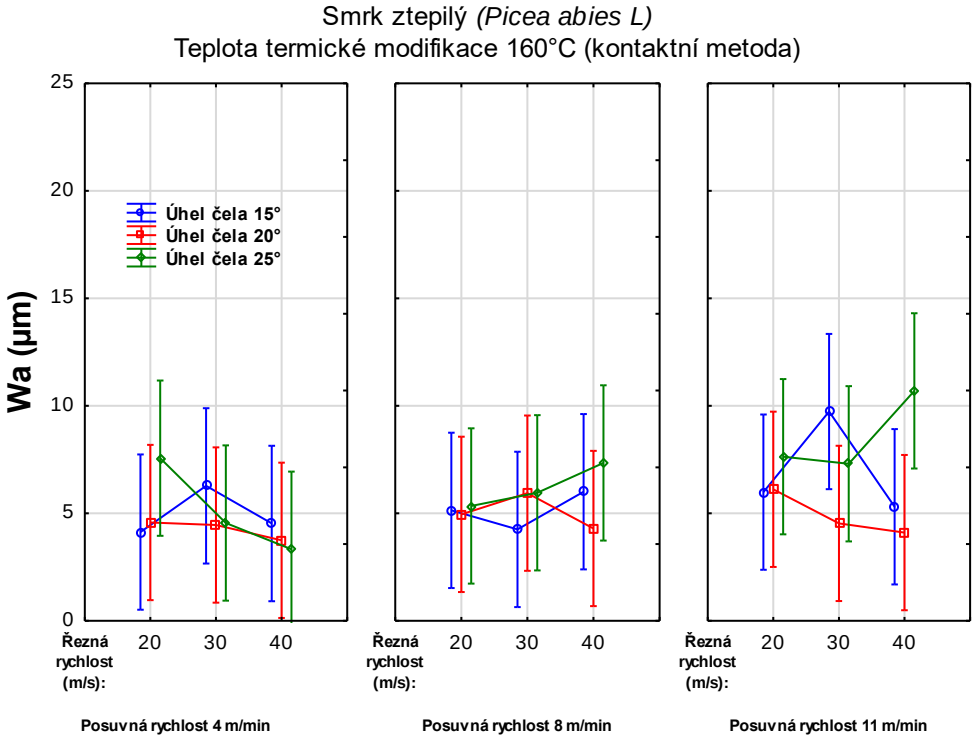
Z vyhodnoceného měření můžeme jednoznačně konstatovat skutečnost, že vliv posuvu na zub má na kvalitu opracovaného povrchu rovinným, válcovým frézováním velmi velkou závislost. Výsledky vyhodnocení ukazují, že se zvyšující se hodnotou posuvu na zub velmi výrazně klesá kvalita frézovaného povrchu jak z hlediska drsnosti, tak z hlediska vlnitosti.

Na obr. 76.–107. je pro lepší přehlednost a detailnější porovnání vidět vzájemná interakce všech parametrů včetně kontaktní, bezkontaktní (laserové metody), hodnot *Wa*, *Ra*, řezné rychlosti, posuvné rychlosti, úhlu čela a stupni termické modifikace smrku ztepilého *(Picea abies* L.*)* a dubu letního *(Quercus robur* F.*)*.

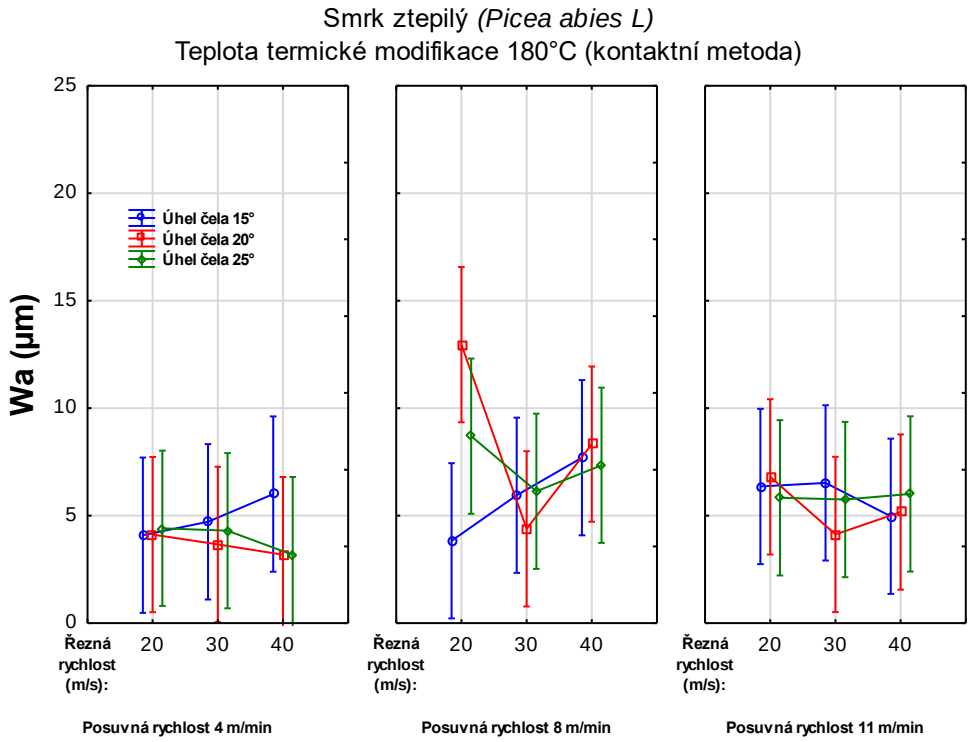
Kontaktní metoda, *Wa*, smrk ztepilý *(Picea abies* L.*):*



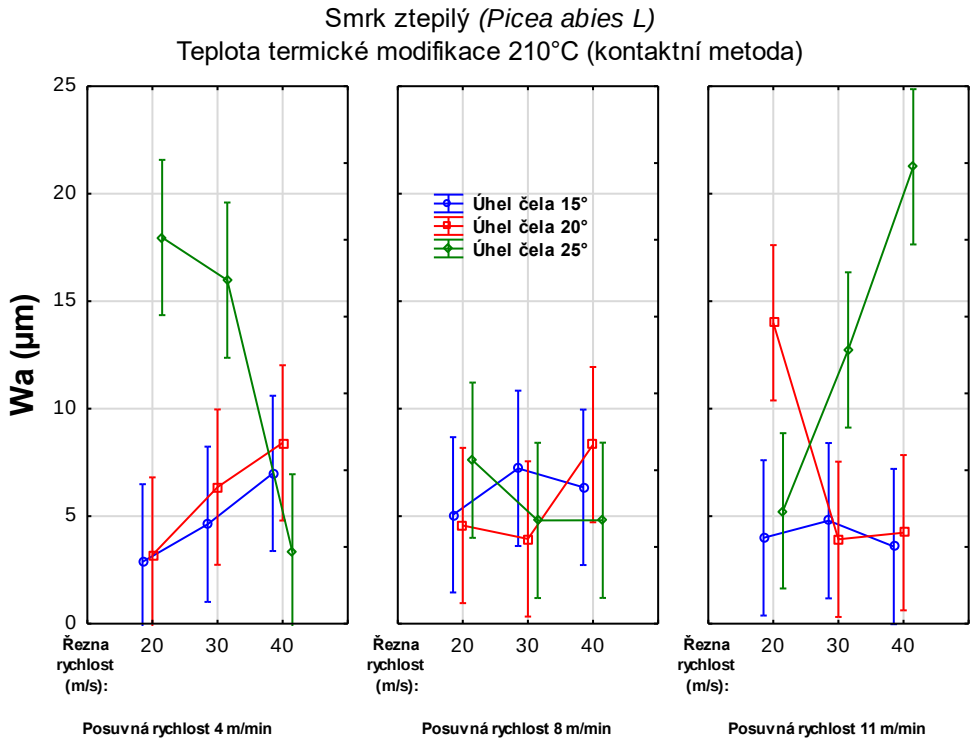
Obr. 76. Čtyř faktorová analýza vlnitosti *Wa* nemodifikovaného smrku (kontaktní metoda)



Obr. 77. Čtyř faktorová analýza vlnitosti *Wa* termicky modifikovaného smrku na 160 °C (kontaktní metoda)

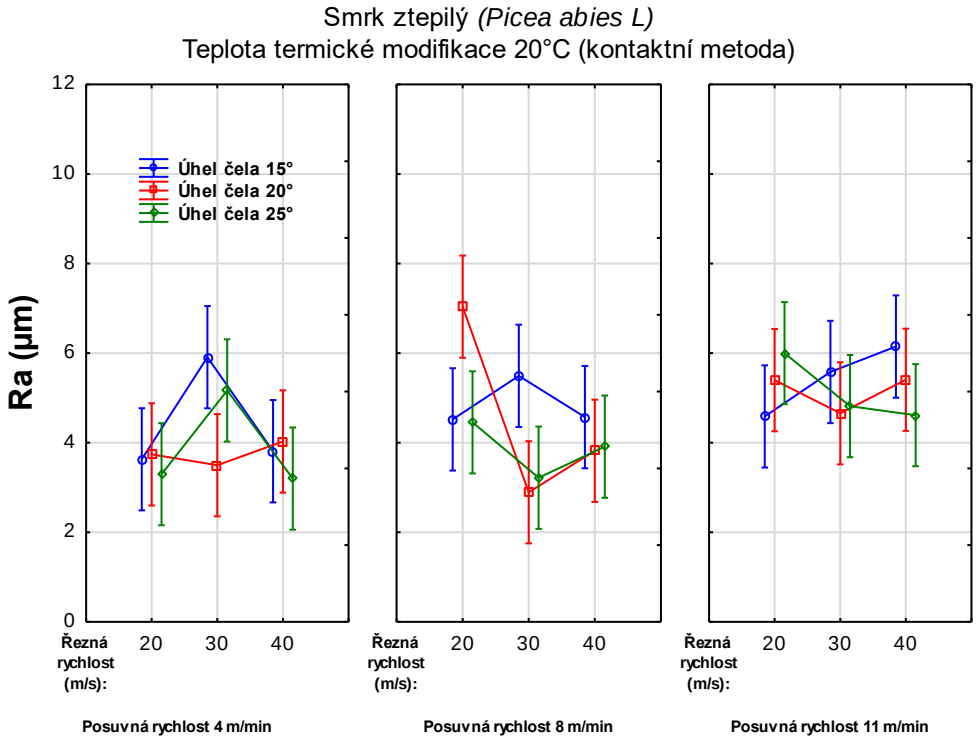


Obr. 78. Čtyř faktorová analýza vlnitosti *Wa* termicky modifikovaného smrku na 180 °C (kontaktní metoda)

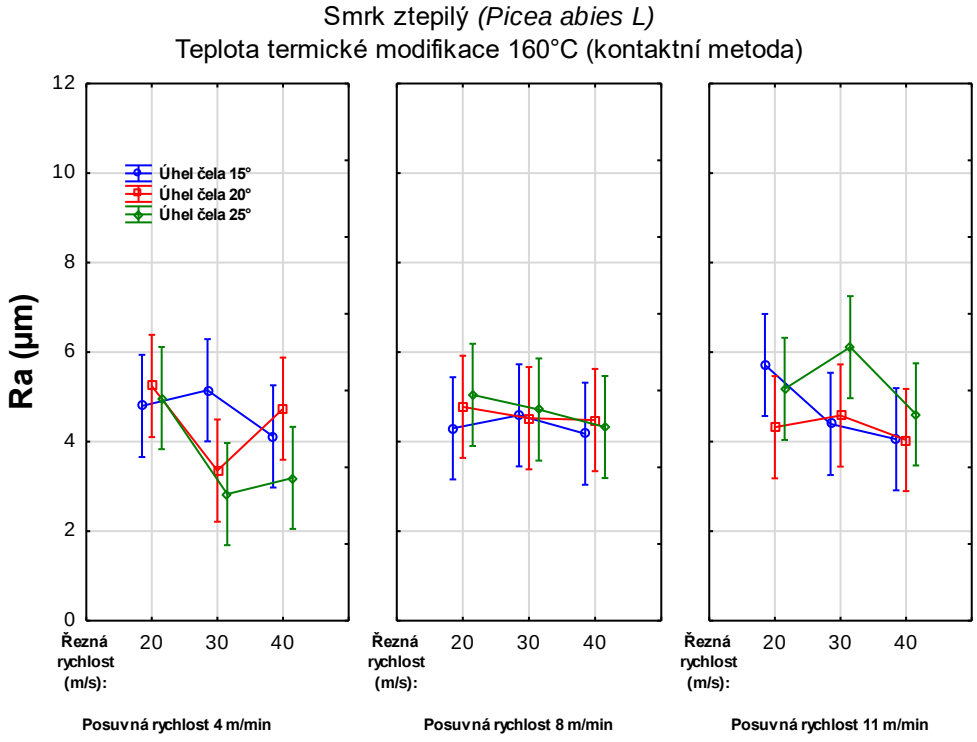


Obr. 79. Čtyř faktorová analýza vlnitosti *Wa* termicky modifikovaného smrku na 210 °C (kontaktní metoda)

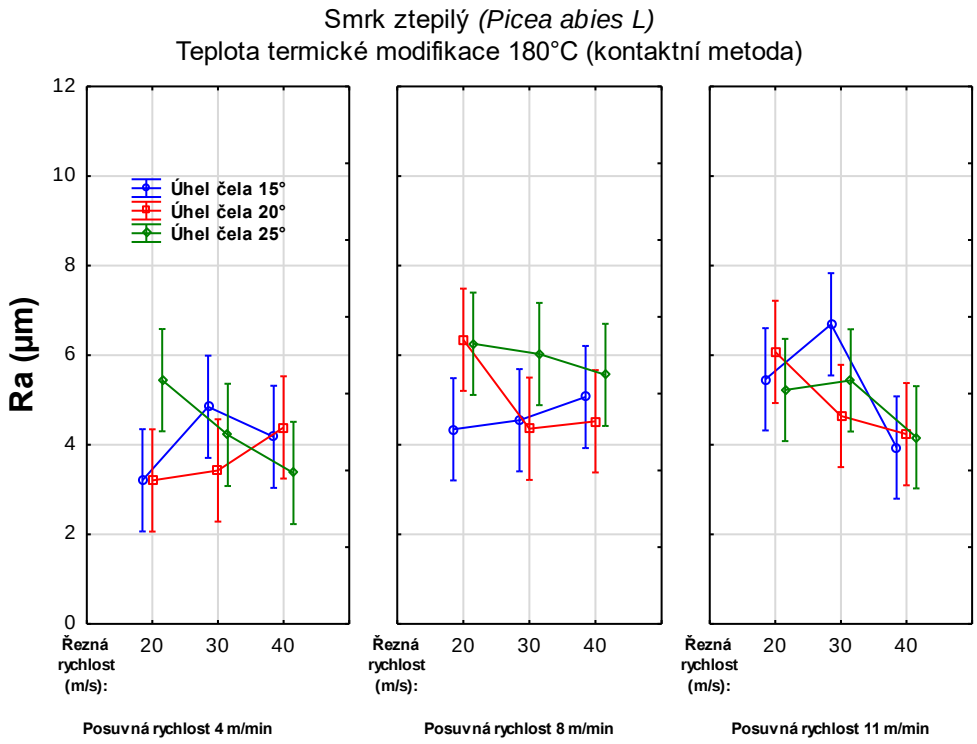
Kontaktní metoda, *Ra*, smrk ztepilý *(Picea abies* L.*):*



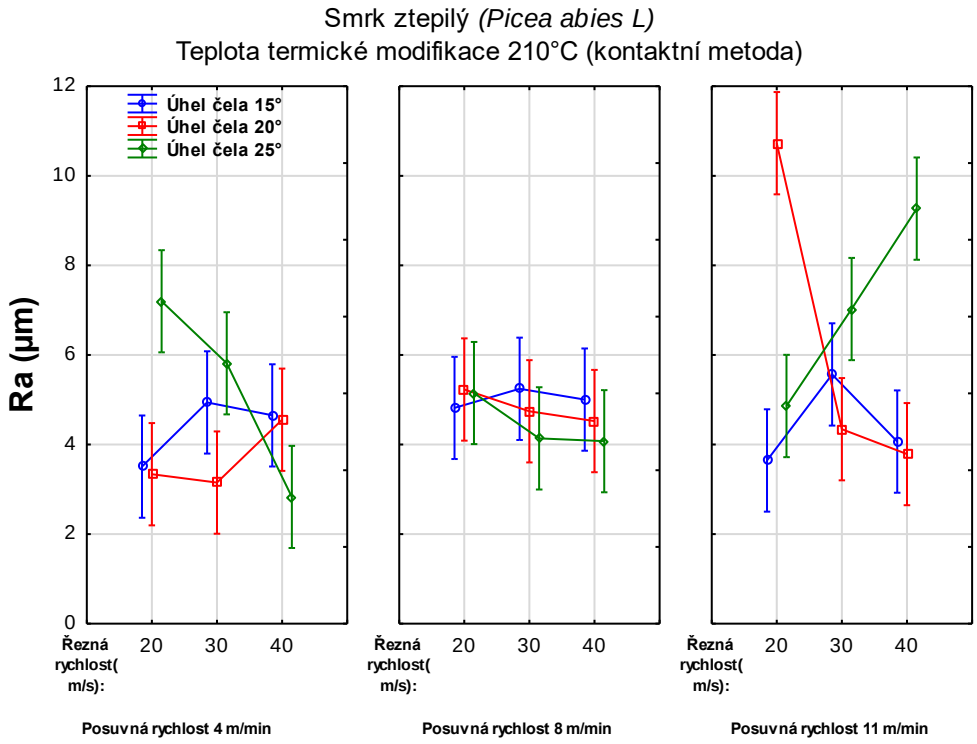
Obr. 80. Čtyř faktorová analýza drsnosti *Ra* nemodifikovaného smrku (kontaktní metoda)



Obr. 81. Čtyř faktorová analýza drsnosti *Ra* termicky modifikovaného smrku na 160 °C (kontaktní metoda)

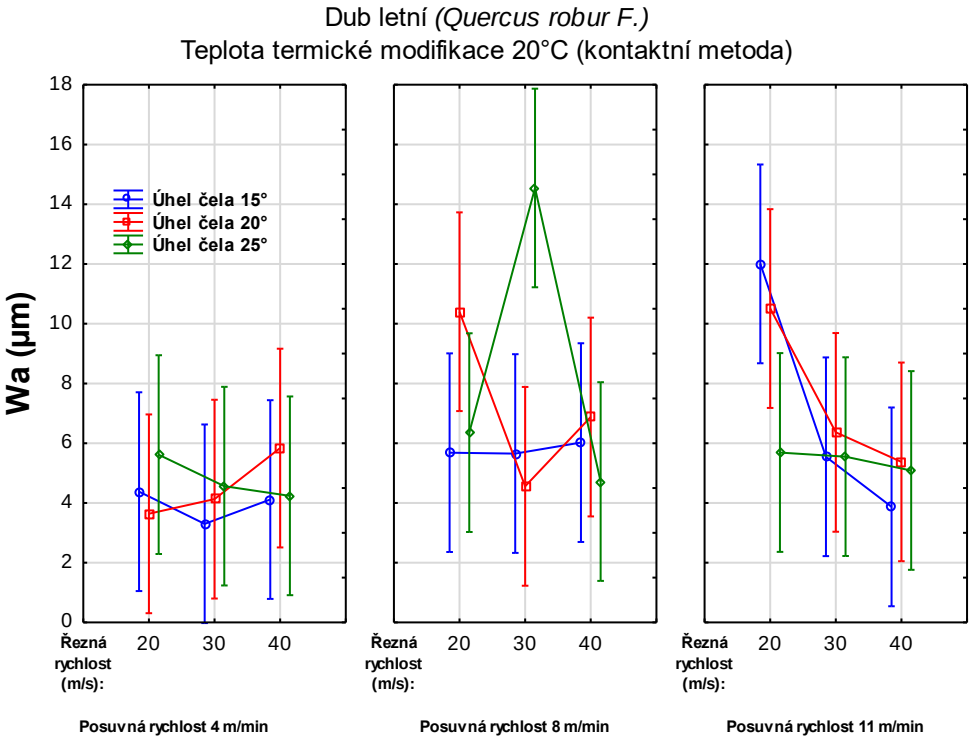


Obr. 82. Čtyř faktorová analýza drsnosti *Ra* termicky modifikovaného smrku na 180 °C (kontaktní metoda)

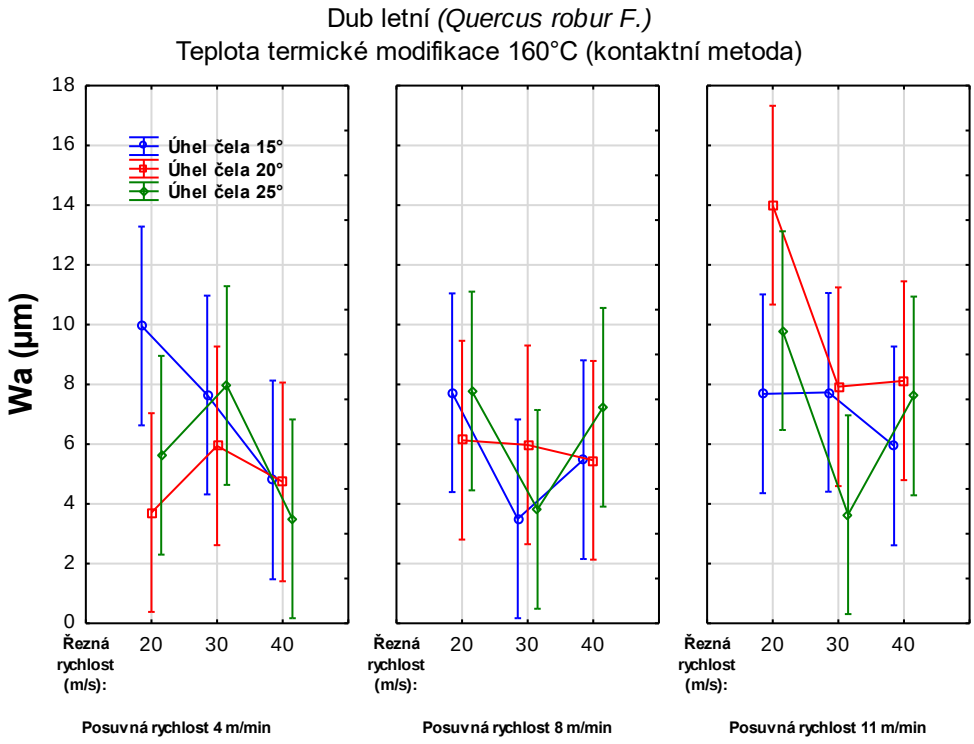


Obr. 83. Čtyř faktorová analýza drsnosti *Ra* termicky modifikovaného smrku na 210 °C (kontaktní metoda)

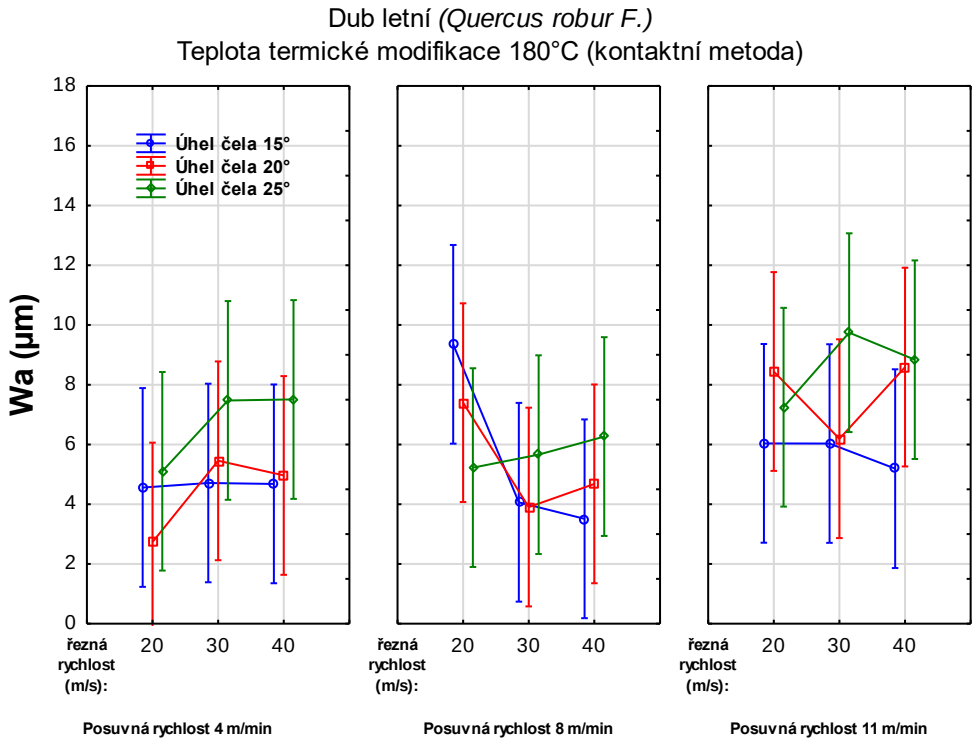
Kontaktní metoda, *Wa*, dub letní *(Quercus robur* F.*):*



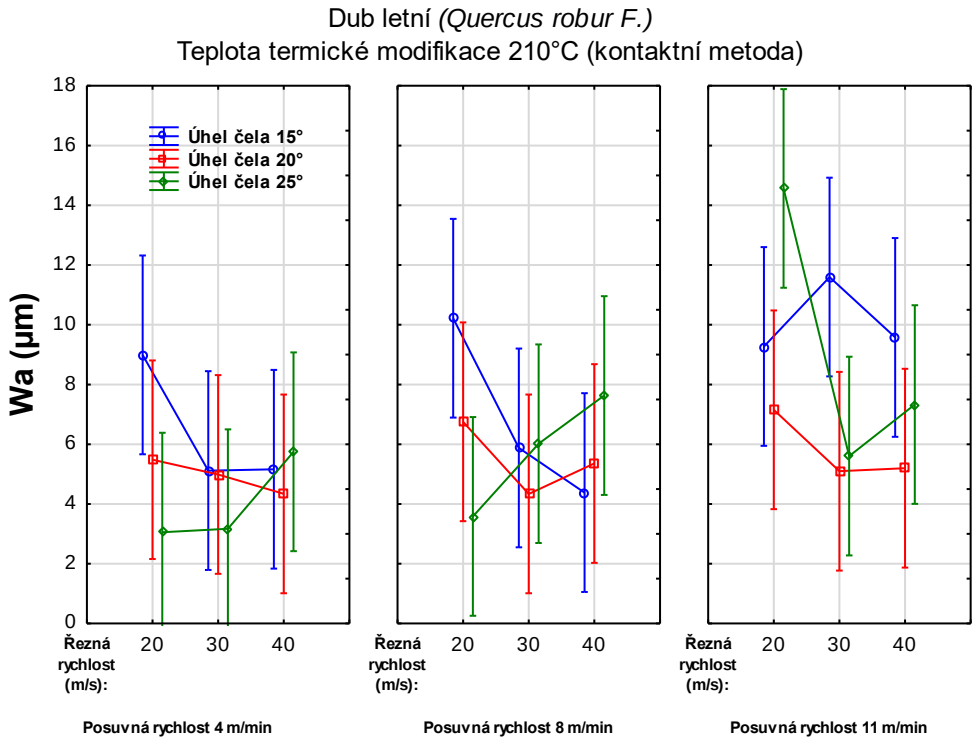
Obr. 84. Čtyř faktorová analýza vlnitosti *Wa* nemodifikovaného dubu (kontaktní metoda)



Obr. 85. Čtyř faktorová analýza vlnitosti *Wa* termicky modifikovaného dubu na 160 °C (kontaktní metoda)

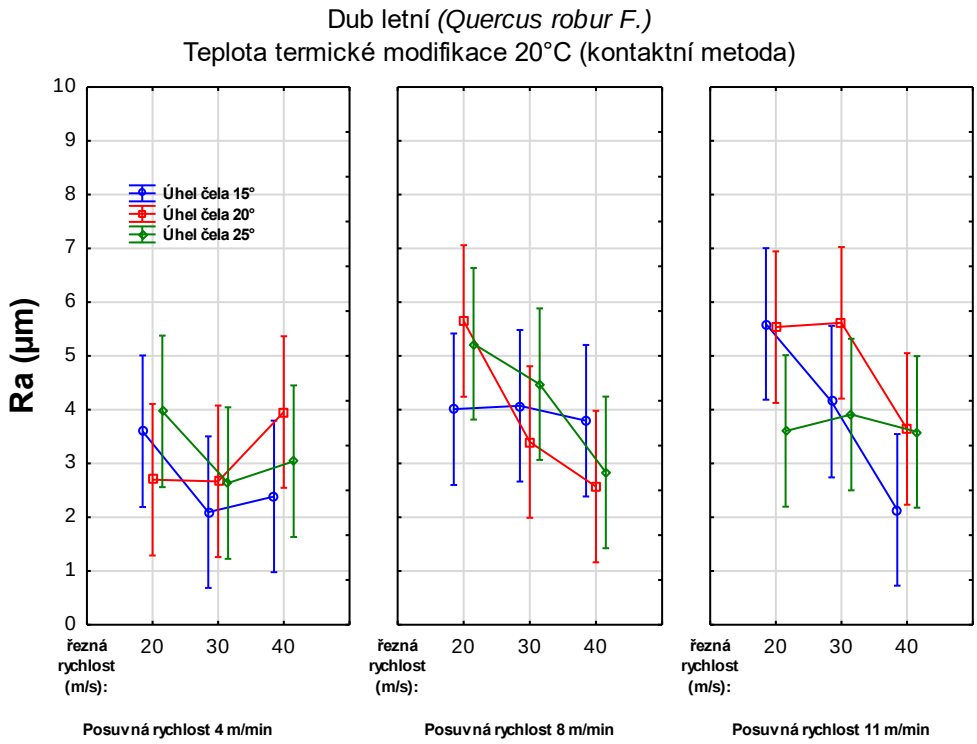


Obr. 86. Čtyř faktorová analýza vlnitosti *Wa* termicky modifikovaného dubu na 180 °C (kontaktní metoda)

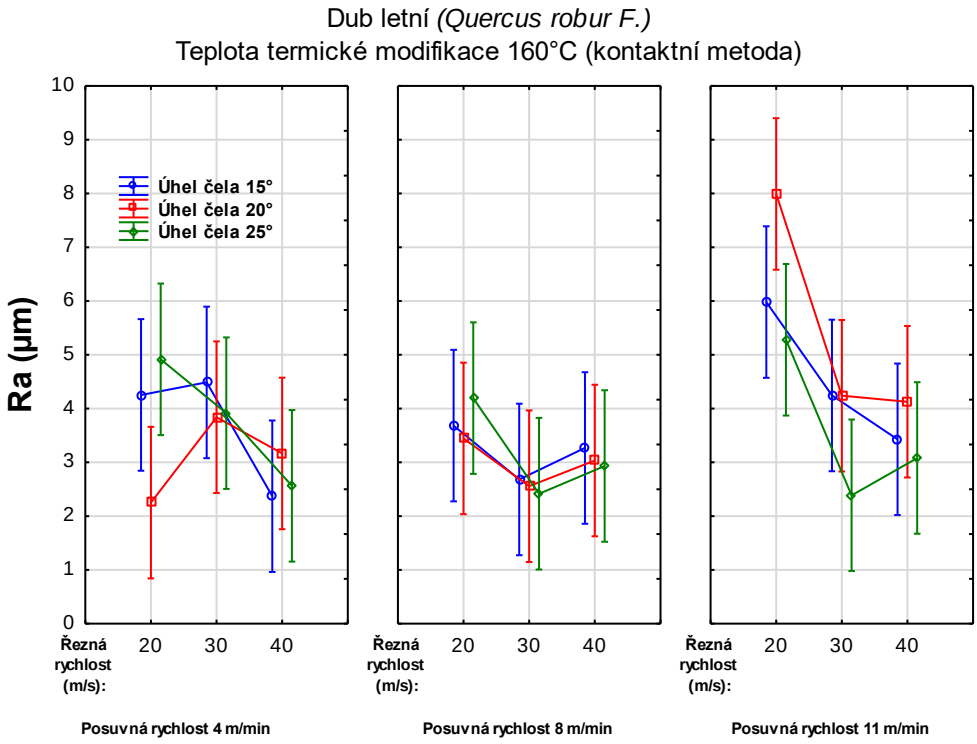


Obr. 87. Čtyř faktorová analýza vlnitosti *Wa* termicky modifikovaného dubu na 210 °C (kontaktní metoda)

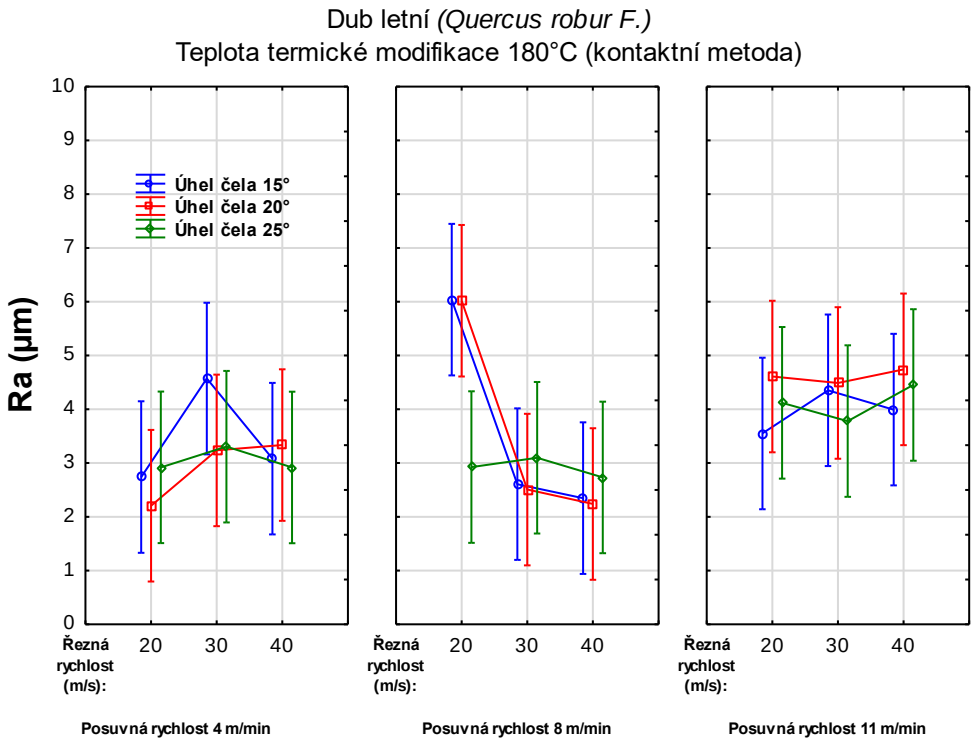
Kontaktní metoda, *Ra*, dub letní *(Quercus robur* F.*):*



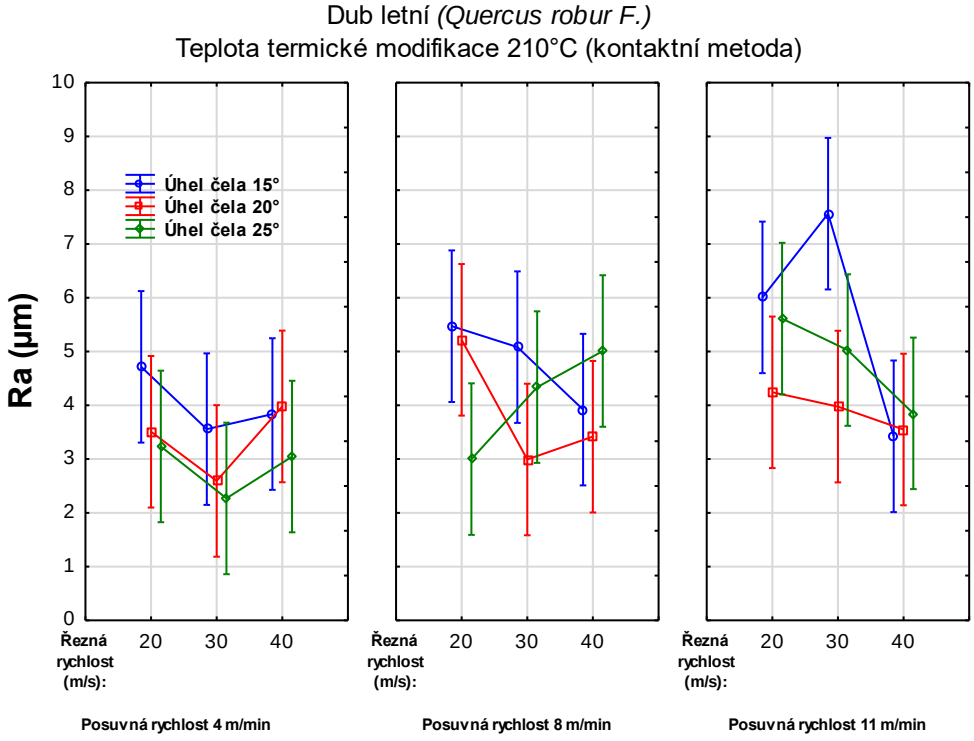
Obr. 88. Čtyř faktorová analýza drsnosti *Ra* nemodifikovaného dubu (kontaktní metoda)



Obr. 89. Čtyř faktorová analýza drsnosti *Ra* termicky modifikovaného dubu na 160 °C (kontaktní metoda)

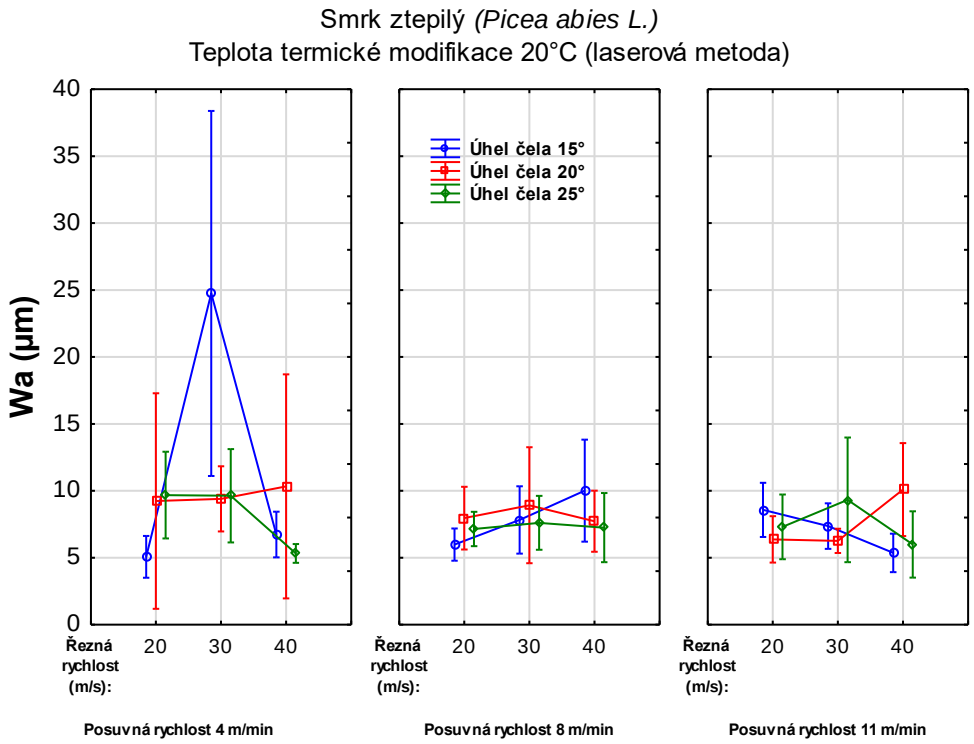


Obr. 90. Čtyř faktorová analýza drsnosti *Ra* termicky modifikovaného dubu na 180 °C (kontaktní metoda)

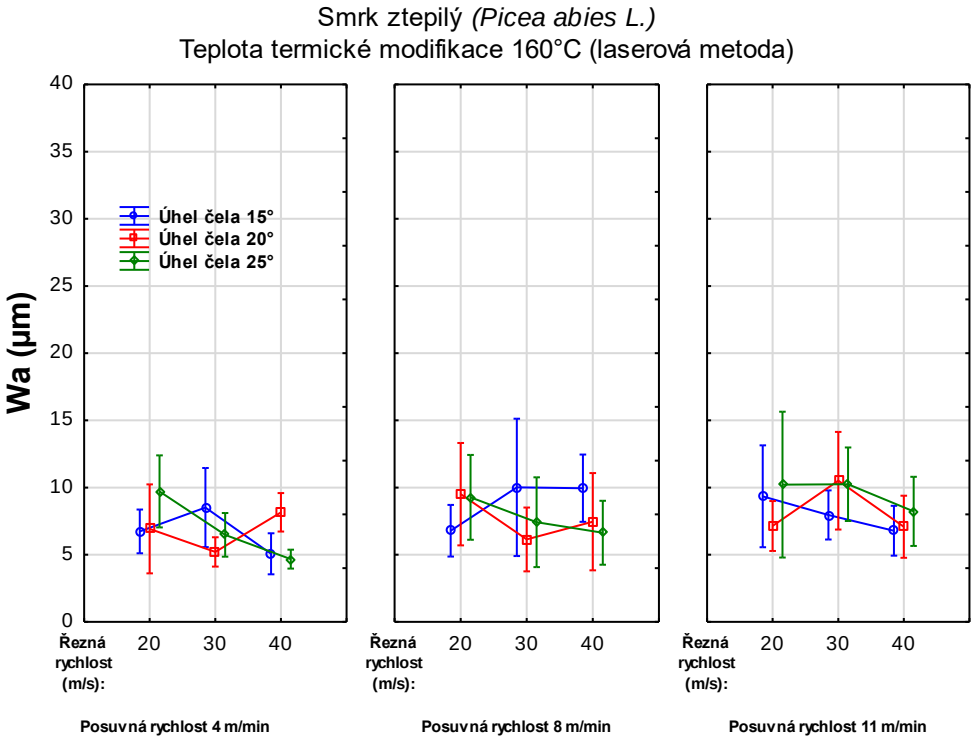


Obr. 91. Čtyř faktorová analýza drsnosti *Ra* termicky modifikovaného dubu na 210 °C (kontaktní metoda)

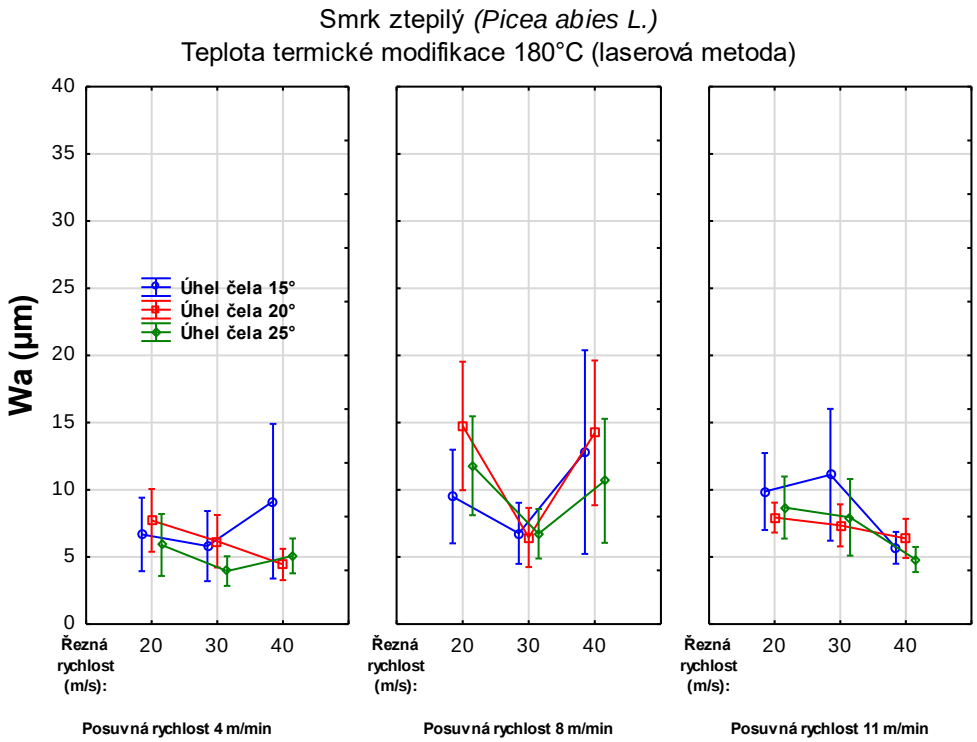
Bezkontaktní (laserová) metoda, *Wa*, smrk ztepilý *(Picea abies* L.*):*



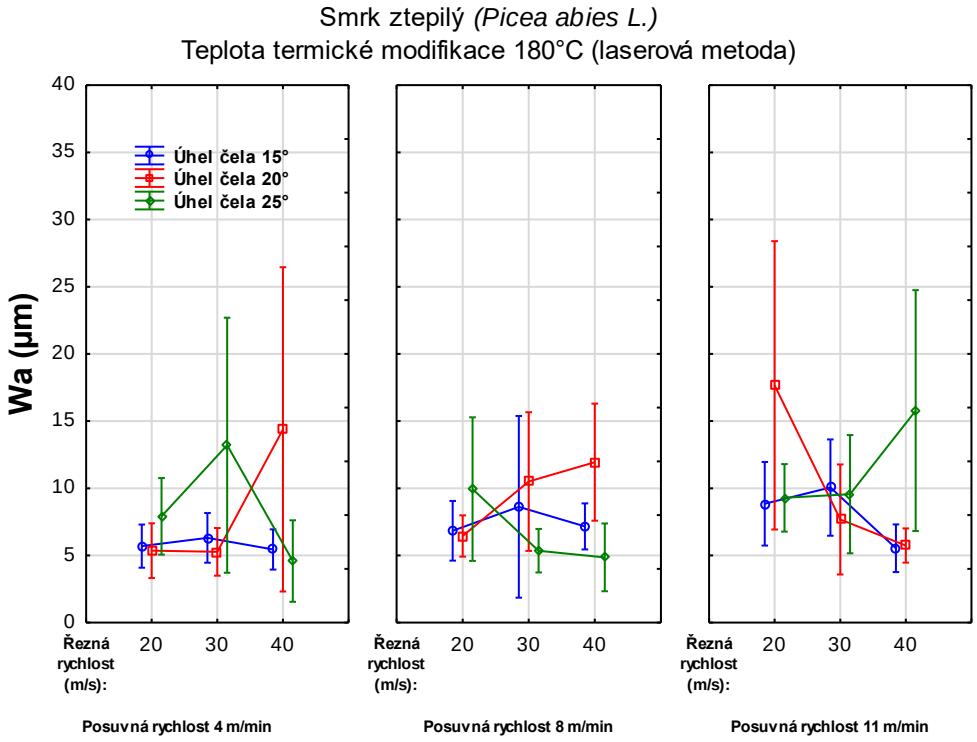
Obr. 92. Čtyř faktorová analýza vlnitosti *Wa* nemodifikovaného smrku (laserová metoda)



Obr. 93. Čtyř faktorová analýza vlnitosti *Wa* termicky modifikovaného smrku na 160 °C (laserová metoda)

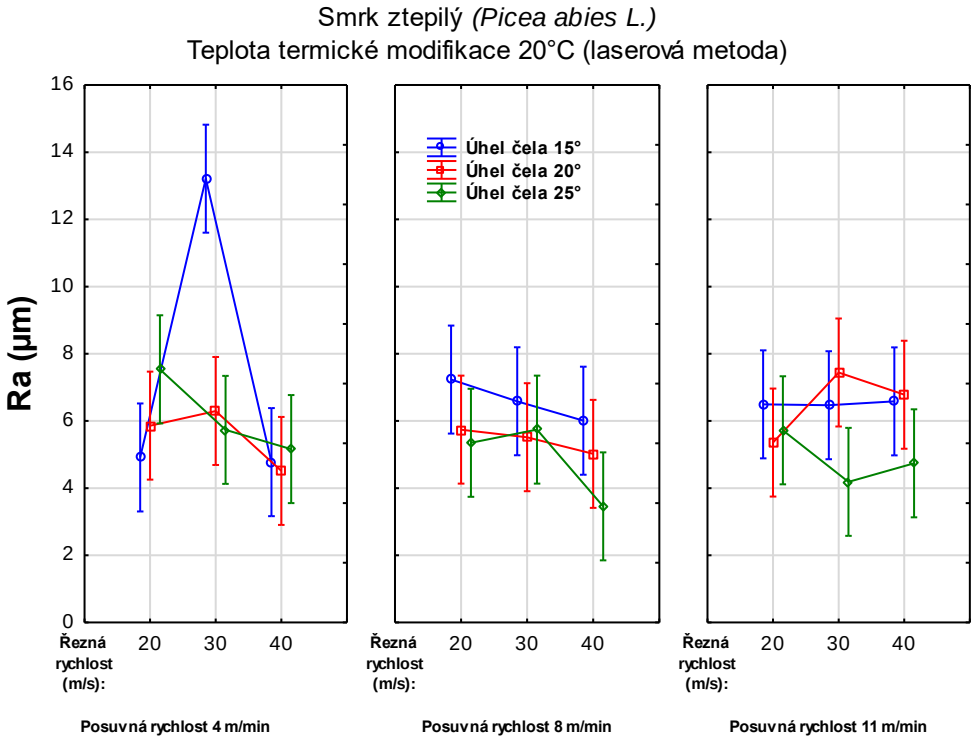


Obr. 94. Čtyř faktorová analýza vlnitosti *Wa* termicky modifikovaného smrku na 180 °C (laserová metoda)

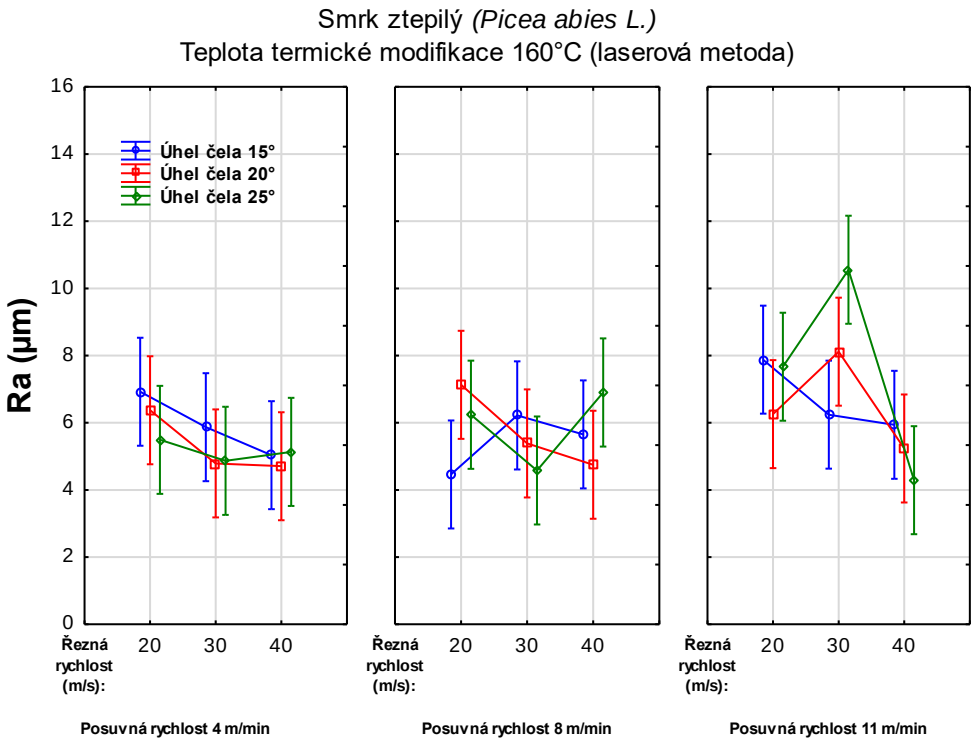


Obr. 95. Čtyř faktorová analýza vlnitosti *Wa* termicky modifikovaného smrku na 210 °C (laserová metoda)

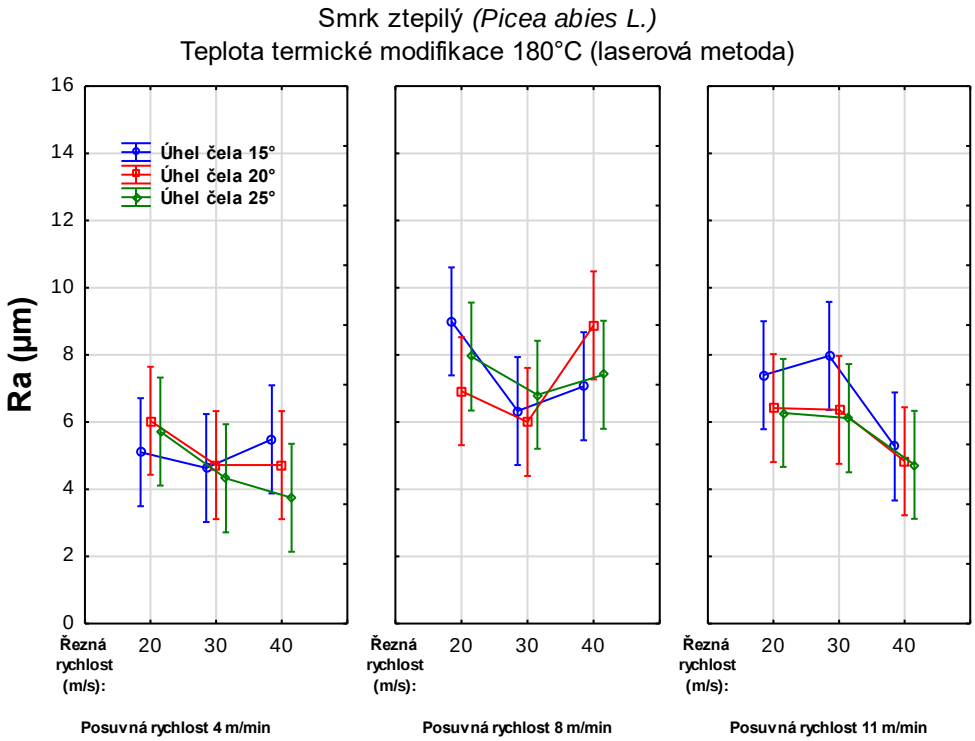
Bezkontaktní (laserová) metoda, *Ra*, smrk ztepilý *(Picea abies* L.*):*



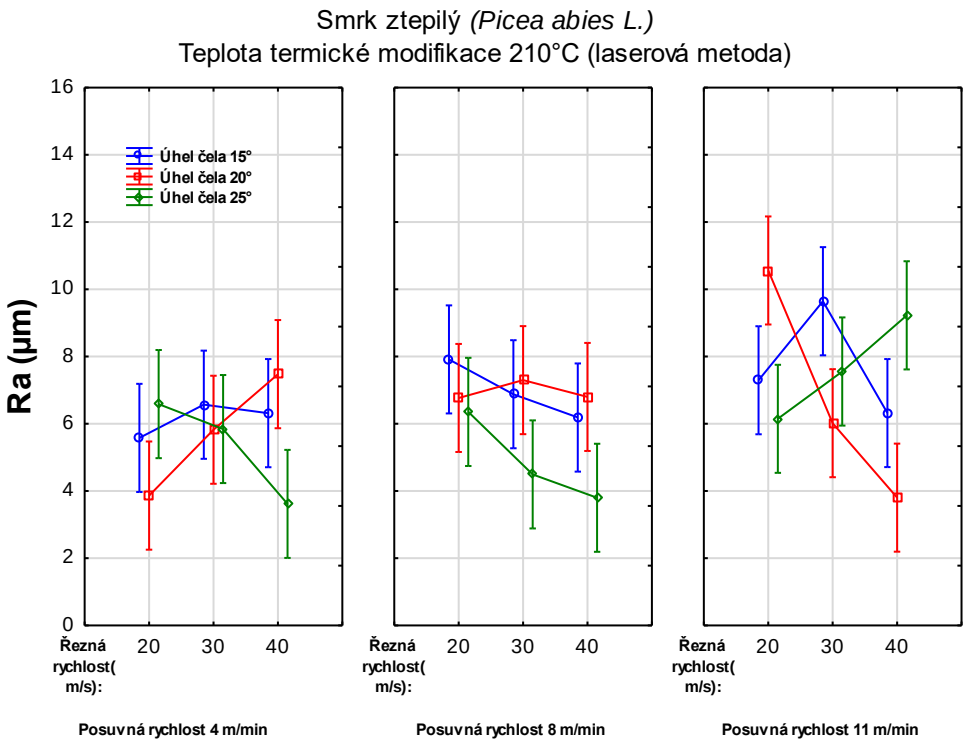
Obr. 96. Čtyř faktorová analýza drsnosti *Ra* nemodifikovaného smrku (laserová metoda)



Obr. 97. Čtyř faktorová analýza drsnosti *Ra* termicky modifikovaného smrku na 160 °C (laserová metoda)

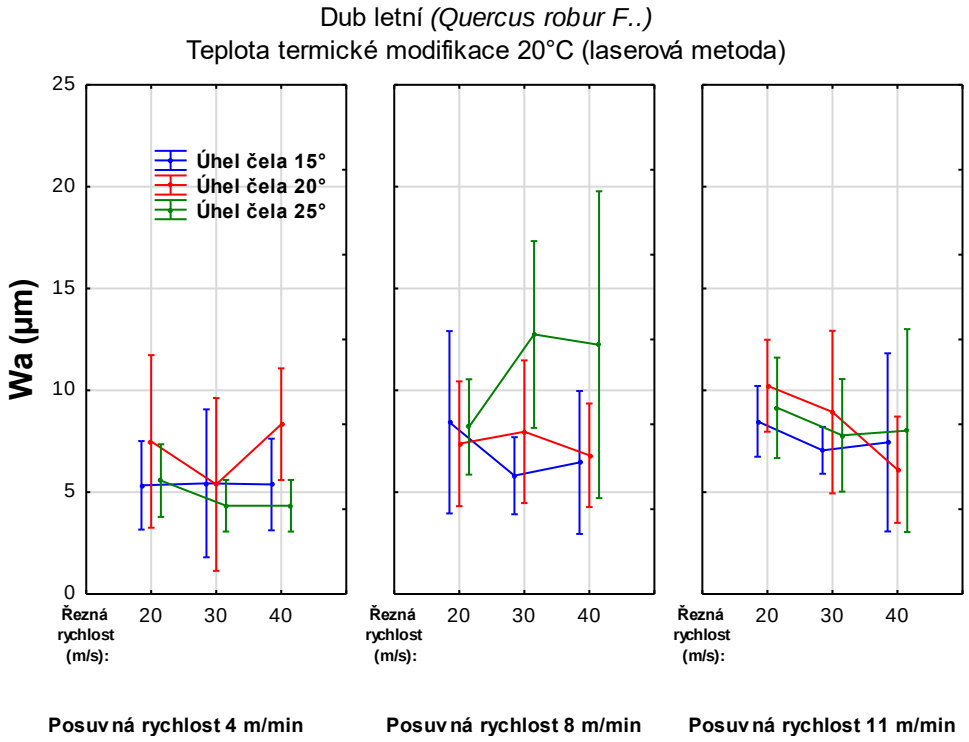


Obr. 98. Čtyř faktorová analýza drsnosti *Ra* termicky modifikovaného smrku na 180 °C (laserová metoda)

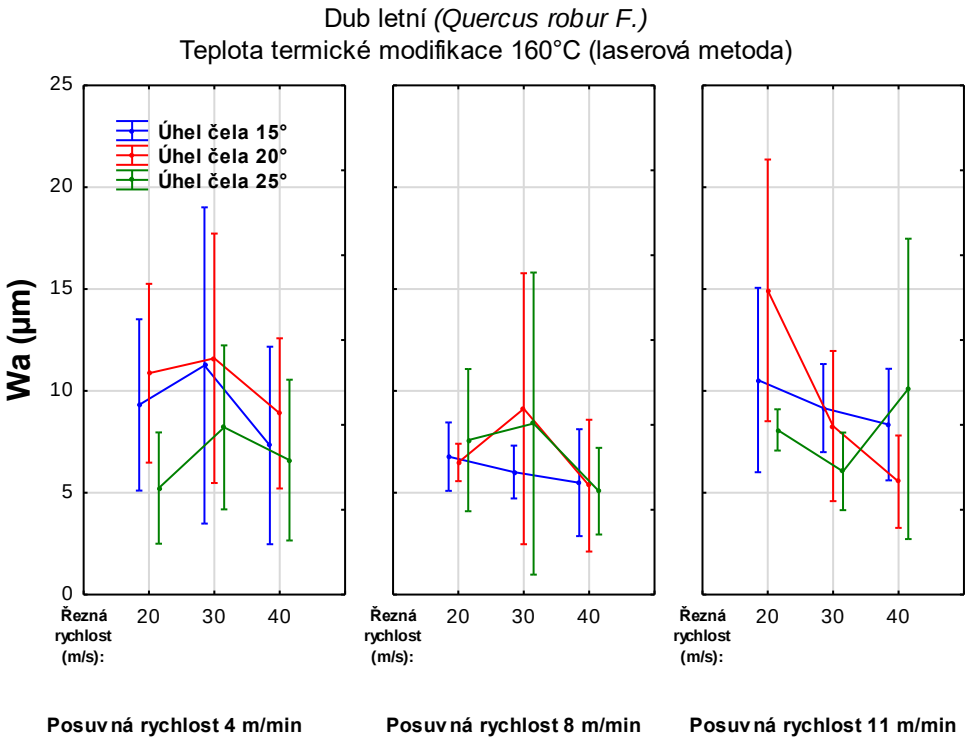


Obr. 99. Čtyř faktorová analýza drsnosti *Ra* termicky modifikovaného smrku na 210 °C (laserová metoda)

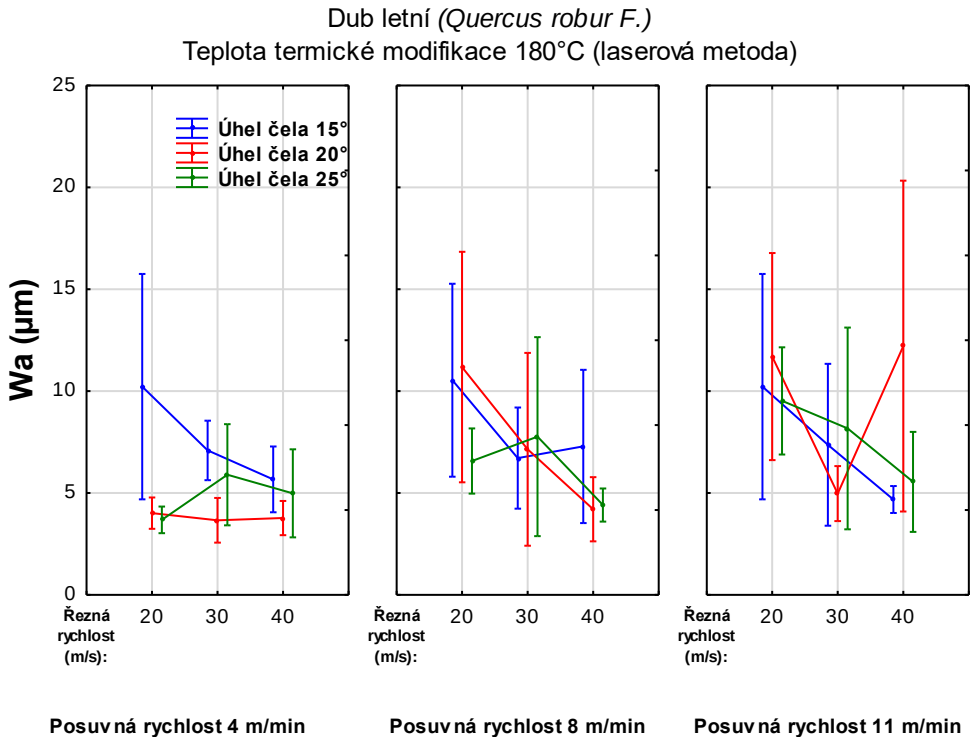
Bezkontaktní (laserová) metoda, *Wa*, dub letní *(Quercus robur* F.*):*



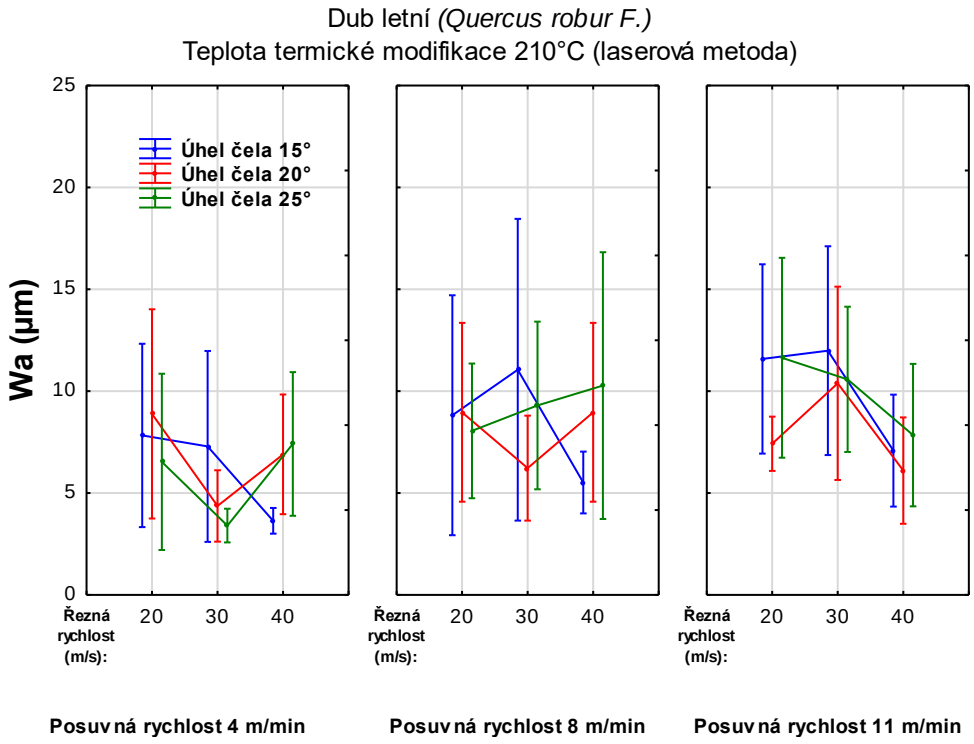
Obr. 100. Čtyř faktorová analýza drsnosti *Wa* nemodifikovaného dubu (laserová metoda)



Obr. 101. Čtyř faktorová analýza drsnosti *Wa* termicky modifikovaného dubu na 160 °C (laserová metoda)

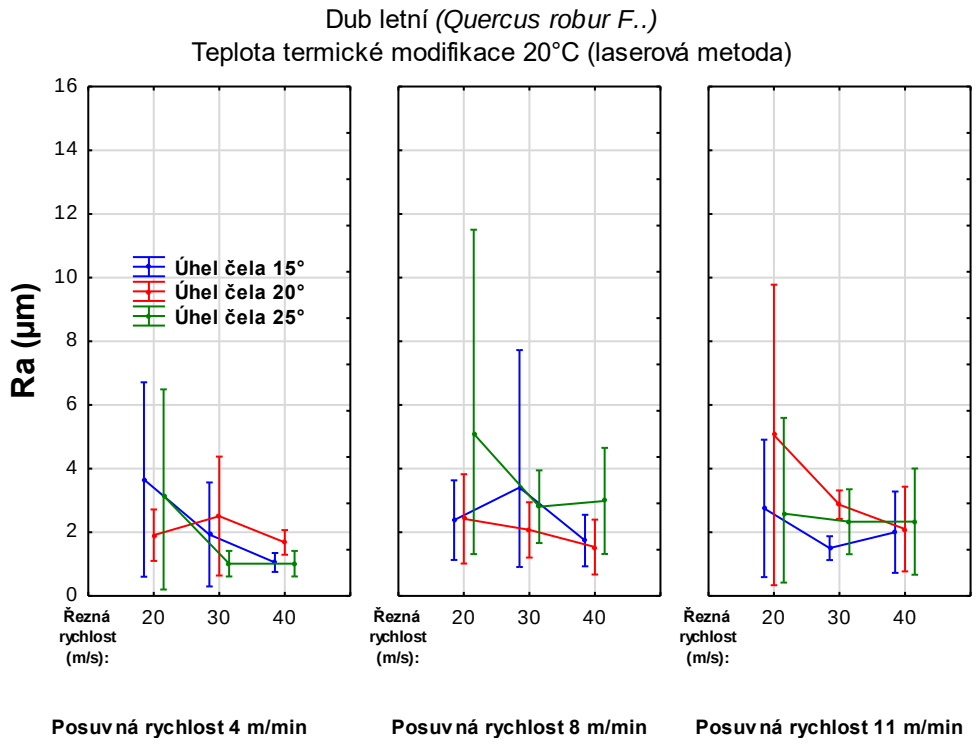


Obr. 102. Čtyř faktorová analýza drsnosti *Wa* termicky modifikovaného dubu na 180 °C (laserová metoda)

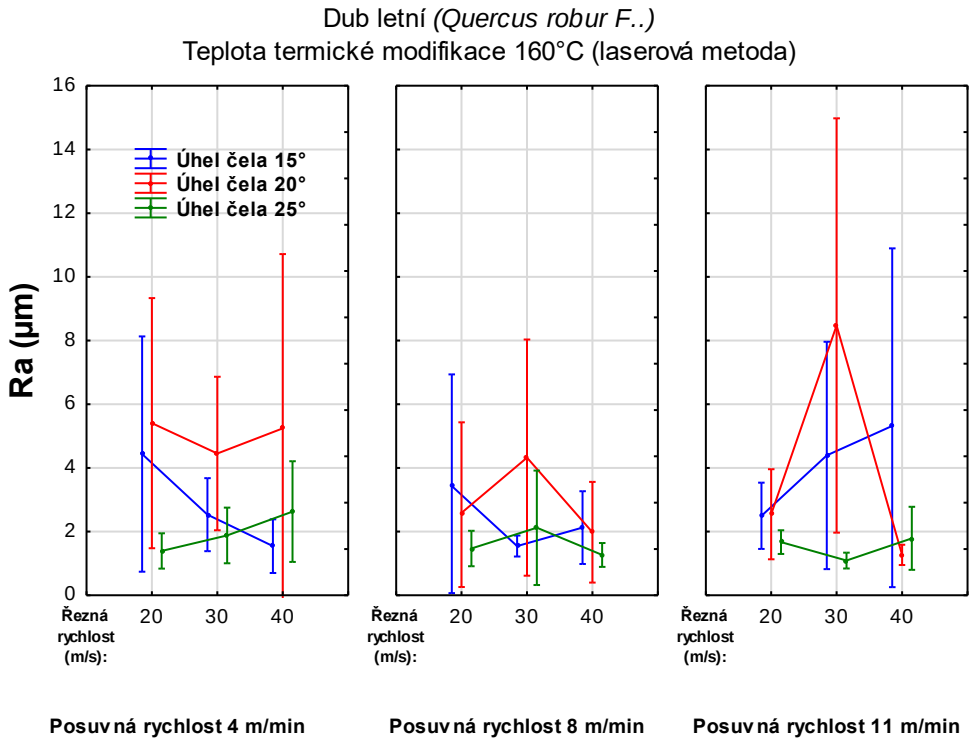


Obr. 103. Čtyř faktorová analýza drsnosti *Wa* termicky modifikovaného dubu na 210 °C (laserová metoda)

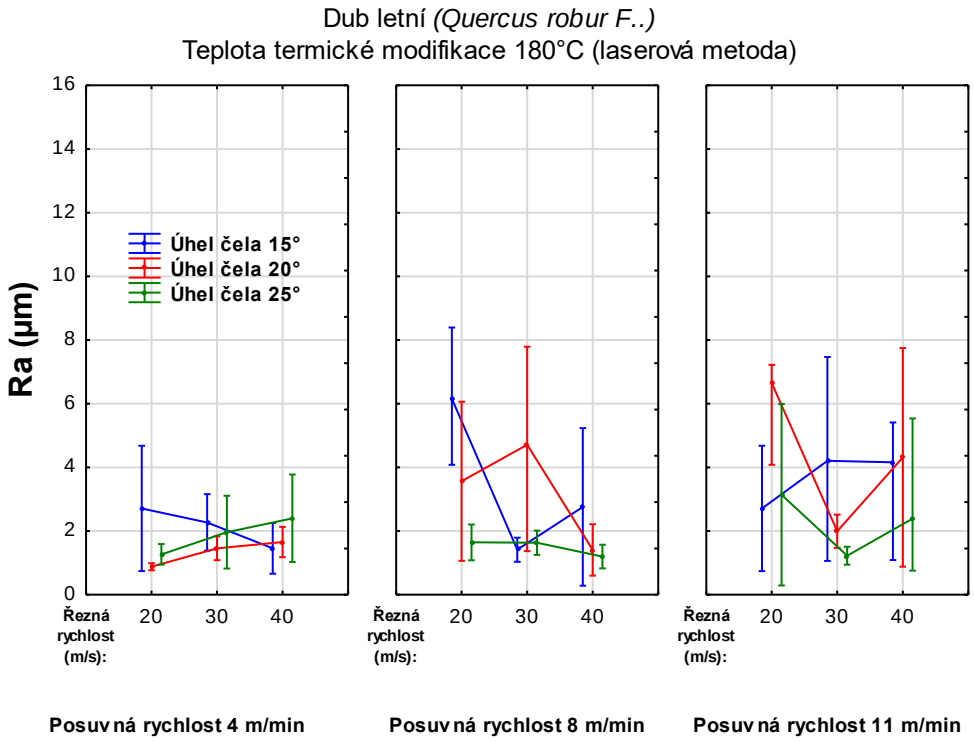
Bezkontaktní (laserová) metoda, *Ra*, dub letní *(Quercus robur* F.*):*



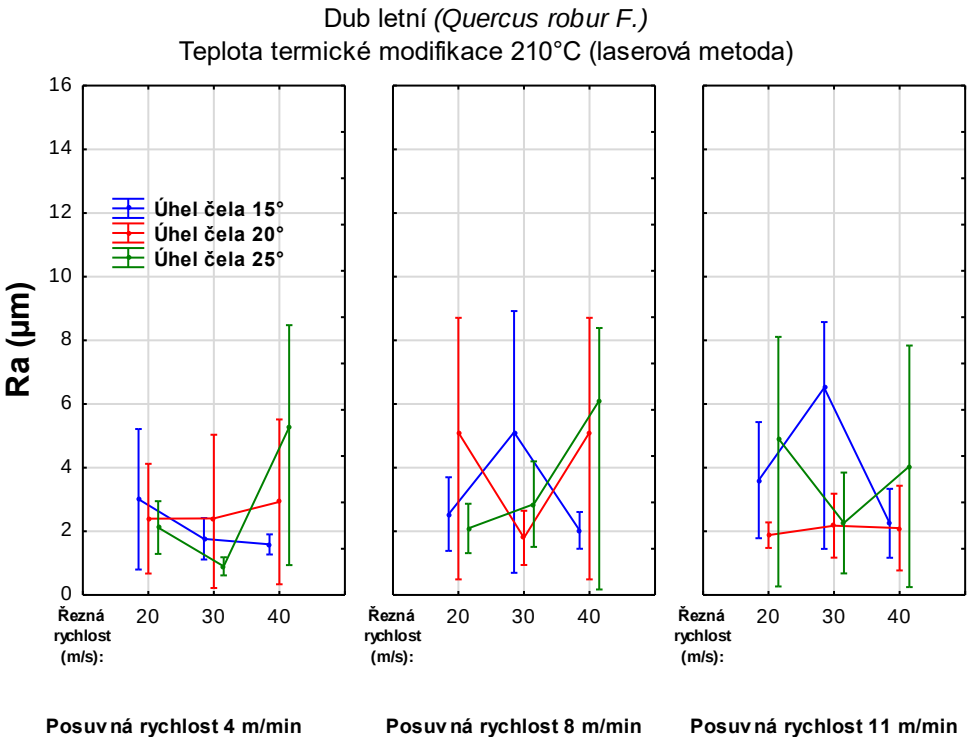
Obr. 104. Čtyř faktorová analýza drsnosti *Ra* nemodifikovaného dubu (laserová metoda)



Obr. 105. Čtyř faktorová analýza drsnosti *Ra* termicky modifikovaného dubu na 160 °C (laserová metoda)



Obr. 106. Čtyř faktorová analýza drsnosti *Ra* termicky modifikovaného dubu na 180 °C (laserová metoda)



Obr. 107. Čtyř faktorová analýza drsnosti *Ra* termicky modifikovaného dubu na 210 °C (laserová metoda)

Z výsledků našeho měření a vyhodnocení vlivu technicko-technologických parametrů nastavení rovinného frézování a stupě termické modifikace na kvalitu opracovaného povrchu z hlediska vlnitosti *Wa* a drsnosti *Ra* je jednoznačně patrné, že tento výzkum je velice důležitý.

Pokud bychom se nejprve soustředili pouze na vlnitost *Wa*, můžeme díky našemu výzkumu stanovit, že nejlepší nastavení technicko-technologických parametrů při rovinném frézování tak, aby hodnota vlnitosti byla co nejmenší, je u smrku ztepilého *(Pice abies* L.*)* takto: řezná rychlost 20 m/s, úhel čela 15°, posuvná rychlost 4 m/min, posuv na zub 1,3 mm a termická modifikace 210 °C – při takovémto nastavené dosahuje hodnota vlnitosti nejnižších hodnot a to *Wa* = 2,878 μm. Naopak nejhorší kombinace vypadá takto: řezná rychlost 40 m/s, úhel čela 25°, posuvná rychlost 11 m/min, posuv na zub 1,8 mm, termická modifikace 210 °C – při takovém to nastavení dosahuje průměrná hodnota *Wa* = 21,254 μm.

Pokud se podíváme na dub letní *(Quercus robur* F.*),* optimální hodnota vlnitosti je při nastavení řezné rychlosti 20 m/s, úhlu čela 20°, posuvné rychlosti 4 m/min, posuvu na zub 1,3 mm, termické modifikace na 180°, při takovémto nastavení vychází hodnota *Wa* = 2,735 μm. Naopak nejhorší nastavení je při řezné rychlosti 20 m/s, úhlu čela 25°, posuvné rychlosti 11 m/min, posuvu na zub 3,7 mm a termické modifikace 210 °C – při takovémto nastavení dosahovala hodnota *Wa* = 14,562 μm.

Pokud se na celou problematikou podíváme pouze z hlediska drsnosti, můžeme optimální nastavení technicko-technologických parametrů při rovinném frézování smrku ztepilého *(Pice abies* L.*)* nastavit takto: řezná rychlost 30 m/s, úhel čela 25°, posuvná rychlost 4 m/min, posuv na zub 0,9 mm, teplota termické modifikace 160 °C – při takovémto nastavení dosahovala průměrná hodnota *Ra* = 2,829 μm. Nejhorší nastavení bylo takto: řezná rychlost 20 m/s, úhel čela 20°, posuvná rychlost 11 m/min, posuvu na zub 0,9 mm, teplota termické modifikace 210 °C – při takto nastavených parametrech dosáhla průměrná hodnota *Ra* = 10,729 μm.

U dubu letního *(Quercus robur* F.*)* je z hlediska nejnižší drsnosti nastavení technicko-technologických parametrů: řezná rychlost 30 m/s, úhel čela 15°, posuvná rychlost 4 m/min, posuv na zub 0,9 mm, termicky nemodifikované dřevo – při takovýchto parametrech byla hodnota *Ra* = 2,094 μm. V případě nejhoršího nastavení to vypadalo takto: řezná rychlost 20 m/s, úhel čela 20°, posuvná rychlost 11 m/min, posuv na zub

3,7 mm, termicky modifikované dřevo na 160 °C – při takovémto nastavení dosáhla hodnota *Ra* = 7,992 µm.

Samozřejmě nelze jednoznačně říci, zda je nejefektivnější nejnižší hodnota vlnitosti, či drsnosti. Nejefektivnější je porovnání obou veličin navzájem a společně i s množstvím odebíraného elektrického proudu. Výsledkem by pak byla opravdu optimální nastavení rovinného frézování z hlediska vlnitosti, drsnosti a spotřeby elektrické energie. Optimální nastavení vyhodnotíme v poslední kapitole tohoto výzkumu.

Korelační analýza

V tabulce 37. pro smrk ztepilý *(Picea abies* L.*)* a dub letní tab. 38. *(Quercus robur* F.*)* je vyhodnocena Spearmanova korelace mezi parametry rovinného frézování, teplotou termické modifikace a změnou chemické struktury ve dřevě.

Tab. 37. Spearmanova korelace parametrů obrábění, termické modifikace a chemického složení smrku ztepilého *(Picea abies* L.*)*

	Řezná rychlost (m/s)	Úhel čela (°)	Posuvná rychlost (m/min)	Teplota termické modifikace (°C)	*Wa* (µm)	*Ra* (µm)	Řezný příkon (W)
Řezná rychlost (m/s)	1,000	0.000	0.001	0.000	-0.045	-0.102	0.845
Úhel čela (°)	0.000	1.000	0.001	0.000	-0.088	-0.114	-0.377
Posuvná rychlost (m/min)	0.001	0.001	1.000	0.002	0.186	0.230	0.145
Teplota termické modifikace (°C)	0.000	0.000	0.002	1.000	0.089	0.230	-0.104
Wa (µm)	-0.045	-0.088	0.186	0.089	1.000	0.771	0.119
Ra (µm)	-0.102	-0.114	0.230	0.230	0.771	1.000	0.054
Řezný příkon (W)	0.845	-0.377	0.145	-0.104	0.119	0.054	1.000
Extraktivní látky (%)	0.000	0.000	-0.002	-0.388	0.072	0.081	0.104
Lignin (%)	0.000	0.000	0.001	0.776	0.107	0.216	-0.027
Holocelulóza (%)	0.000	0.000	-0.001	-0.856	-0.112	-0.225	0.048
Celulóza (%)	0.000	0.000	0.002	0.932	0.080	0.207	-0.069
Hemicelulóza (%)	0.000	0.000	-0.002	-0.932	-0.076	-0.204	0.069

	Extraktivní látky (%)	Lignin (%)	Holocelulóza (%)	Celulóza (%)	Hemiceluló za (%)
Řezná rychlost (m/s)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Úhel čela (°)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Posuvná rychlost (m/min)	-0.002	0.001	-0.001	0.002	-0.002
Teplota termické modifikace (°C)	-0.388	0.776	-0.856	0.932	-0.932
Wa (µm)	0.072	0.107	-0.112	0.080	-0.076
Ra (µm)	0.081	0.216	-0.225	0.207	-0.204
Řezný příkon (W)	0.104	-0.027	0.048	-0.069	0.069
Extraktivní látky (%)	1.000	0.020	0.204	-0.284	0.307
Lignin (%)	0.020	1.000	-0.865	0.846	-0.828
Holocelulóza (%)	0.204	-0.865	1.000	-0.851	0.874
Celulóza (%)	-0.284	0.846	-0.851	1.000	-0.977
Hemicelulóza (%)	0.307	-0.828	0.874	-0.977	1.000

Spearmanova korelace smrku ztepilého *(Picea abies* L.*)* na všech sledovaných hodnotách nám nejen potvrzuje vyhodnocení výše testovaných jednotlivých parametrů, ale také ukazuje, které parametry patří mezi nevíce závislé. Co se týká termické modifikace smrku ztepilého *(Picea abies* L.*)*, změna teploty termické modifikace má nejzásadnější vliv na změnu množství celulózy a hemicelulózy ve dřevě. Z hlediska spotřeby elektrické energie je největší závislost změna řezné rychlosti a kvalitu opracovaného povrchu (*Ra* a *Wa*) nejvíce ovlivňuje posuvná rychlost.

Tab. 38. Spearmanova korelace parametrů obrábění, termické modifikace a chemického složení dubu letního *(Quercus robur* F.*)*

	Řezná rychlost (m/s)	Úhel čela (°)	Posuvná rychlost (m/min)	Teplota termické modifikace (°C)	*Wa* (µm)	*Ra* (µm)	Řezný příkon (W)
Řezná rychlost (m/s)	1,000	0,000	0,000	0,000	-0,140	-0,224	0,835
Úhel čela (°)	0,000	1,000	0,000	0,000	0,043	-0,015	-0,434
Posuvná rychlost (m/min)	0,000	0,000	1,000	0,000	0,260	0,258	0,044
Teplota termické modifikace (°C)	0,000	0,000	0,000	1,000	-0,036	0,070	-0,094
***Wa* (µm)**	-0,140	0,043	0,260	-0,036	1,000	0,687	-0,099
***Ra* (µm)**	-0,224	-0,015	0,258	0,070	0,687	1,000	-0,172
Řezný příkon (W)	0,835	-0,434	0,044	-0,094	-0,099	-0,172	1,000
Extraktivní látky (%)	0,000	0,000	0,000	0,970	-0,038	0,068	-0,091
Lignin (%)	0,000	0,000	0,000	0,970	-0,032	0,070	-0,090
Holocelulóza (%)	0,000	0,000	0,000	-0,970	0,037	-0,077	0,092
Celulóza (%)	0,000	0,000	0,000	0,970	-0,032	0,061	-0,090
Hemicelulóza (%)	0,000	0,000	0,000	-0,970	0,040	-0,070	0,091

	Extraktivní látky (%)	Lignin (%)	Holocelulóza (%)	Celulóza (%)	Hemicelulóza (%)
Řezná rychlost (m/s)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Úhel čela (°)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Posuvná rychlost (m/min)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Teplota termické modifikace (°C)	0,970	0,970	-0,970	0,970	-0,970
***Wa* (µm)**	-0,038	-0,032	0,037	-0,032	0,040
***Ra* (µm)**	0,068	0,070	-0,077	0,061	-0,070
Řezný příkon (W)	-0,091	-0,090	0,092	-0,090	0,091
Extraktivní látky (%)	1,000	0,960	-0,943	0,912	-0,926
Lignin (%)	0,960	1,000	-0,958	0,953	-0,939
Řezná rychlost (m/s)	-0,943	-0,958	1,000	-0,911	0,973
Úhel čela (°)	0,912	0,953	-0,911	1,000	-0,938
Posuvná rychlost (m/min)	-0,926	-0,939	0,973	-0,938	1,000

Tab. 38. také ukazuje velikost závislosti všech sledovaných parametrů dřeviny dubu letního *(Quercus robur* F.*).* Vyhodnocení nám potvrzuje, že termická modifikace má významný vliv na změnu chemického složení dubu. Dochází taktéž ke stejnému jevu jako u smrku ztepilého *(Picea abies* L.*)* a to tak, že při rostoucí řezné rychlosti dochází k velkému zvyšování spotřeby elektrické energie i u dubu letního *(Quercus robur* F.*).* Parametry drsnosti *Ra* a vlnitosti *Wa* ovlivňuje taktéž nejvíce posuvná rychlost a řezná rychlost. Ostatní sledované parametry mají dle výsledných hodnot také samozřejmě vliv na ostatní parametry, avšak tyto jsou nejzásadnější.

Pokud obě dřeviny ve Spearmanově korelaci porovnáme, zjistíme velmi zajímavý jev a to, že i když má každá dřevina jinou buněčnou stavbu, jinou hustotu, chemické složení atd., působí na ně sledované parametry obdobně.

Díky všem výsledkům a vyhodnocením můžeme v další kapitole přejít k tomu nejpodstatnějšímu a nejdůležitějšímu výsledku celé práce a to tomu, jaké můžeme (díky vyhodnocení všech interakcí sledovaných faktorů) stanovit optimální nastavení technicko-technologických parametrů frézování obou sledovaných dřevin.

4.6 Stanovení optimálního nastavení technicko-technologických parametrů při rovinném frézování

Ve výše uvedených výsledcích a vyhodnoceních jsme se zabývali vyhodnocením každého parametru zvlášť. Vyhodnotili jsme nejlepší technicko-technologické nastavení rovinného frézování z hlediska spotřeby elektrické energie při výrobě, poté při jakém nastavení je nejlepší hodnota drsnosti *Ra* a při jakém nastavení hodnota vlnitosti *Wa* smrku ztepilého *(Picea abies* L.*)* a dubu letního *(Quercus robur* F.*)*. Je však zřejmé, že v reálné výrobě nás málokdy budou zajímat separátně pouze tyto parametry. Celý výrobní proces výroby nábytku a dřevařského průmyslu je složen z jednotlivých technologických operací a mezi nejběžnější patří právě rovinné frézování. Musíme tedy tento proces vyhodnotit také jako celek a to tak, že nalezneme optimální nastavení všech zkoumaných parametrů a tím docílíme nejlepšího výsledku této práce a celého výzkumu tak, aby byl na 100 % využitelný v praxi. V dnešní době se sice začínají rozvíjet vysokorychlostní a moderní frézovací stroje, ale nemalá část z nich používají starší, funkční stroje. Nalezli jsme tedy optimální nastavení technicko-technologických nastavení rovinného frézování smrku ztepilého *(Picea abies* L.*)* tab. 39. Kde optimální nastavení je, pokud nastavíme řeznou rychlost na 20 m/s, úhel čela 25°, posuvnou rychlost 4 m/min, posuv na zub 1,3 mm a budeme frézovat termicky neupravené dřevo. Při takto nastavených parametrech máme optimální kvalitu opracovaného povrchu z hlediska

Tab. 39. Optimální nastavení parametrů frézování podle analýzy hodnot smrku ztepilého *(Picea abies* L.*)*

Řezná rychlost (m/s)	Úhel čela (°)	Posuvná rychlost (m/min)	Teplota (°C)	Posuv na zub (mm)	*Wa* (µm)	*Ra* (µm)	Spotřeba elektrické energie (W)	Cena za 16 h/ 1 rok (CZK)
20	25	4	20	1,3	3	3	385	6048
20	20	4	210	1,3	3	3	405	6360
20	20	4	180	1,3	4	3	423	6624
-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-
40	15	8	180	1,3	8	5	1338	20976
40	15	11	20	1,8	6	6	1440	22680
40	25	11	210	1,8	21	9	1027	16272

drsnosti *Ra* = 3,30 µm, z hlediska vlnitosti *Wa* = 3,11 µm a množství odebíraného elektrického proudu 385 W. Naopak nejhorším nastavením technicko-technologických parametrů, které můžeme mít je řezná rychlost 40 m/s, úhel čela 25°, posuvná rychlost 11 m/min, posuv na zub 1,8 mm a opracování termicky modifikovaného smrku na 210 °C. Při takovémto natavení dosáhla kvalita opracovaného povrch z hlediska drsnosti *Ra* = 9,27 µm, vlnitosti *Wa* = 21,25 µm a spotřeby elektrické energie 1 027 W.

Tab. 40. Optimální nastavení parametrů frézování podle analýzy hodnot dubu letního *(Quercus robur* F.*)*

Řezná rychlost (m/s)	Úhel čela (°)	Posuvná rychlost (m/min)	Teplota (°C)	Posuv na zub (mm)	*Wa* (µm)	*Ra* (µm)	Spotřeba elektrické energie (W)	Cena za 16 h/ 1 rok (CZK)
20	20	4	180	1,3	3	2	442	6912
20	20	4	160	1,3	4	2	453	7104
20	25	8	210	2,7	4	3	367	5752
-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	15	11	20	3,7	12	6	790	12453
30	15	11	210	2,4	12	8	815	12775
40	20	11	180	1,8	9	5	1510	23664

Optimální nastavení parametrů rovinného frézování dubu letního *(Quercus robur* F.*)* tab. 40. má podobné tendence jako u smrku ztepilého *(Picea abies* L.*)* avšak výsledky optimálního nastavení jsou odlišné. Optimální nastavení bylo při řezné rychlosti 20 m/s, úhlu čela 20°, posuvné rychlosti 4 m/min, posuvu na zub 1,3 mm a teplotě termické modifikace 180°C. Při takovémto nastavení byla hodnota drsnosti *Ra* = 2,21 µm, vlnitosti *Wa* = 2,73 µm a spotřeba elektrické energie 442 W. Naopak nejhorší nastavení bylo při řezné rychlosti 40 m/s, úhel čela 20°, posuvná rychlost 11 m/min, posuv na zub 1,8 mm a teplota termické modifikace 180°C. Při takovémto nastavení byla hodnota *Ra* = 4,74 µm, hodnota *Wa* = 8,59 µm a spotřeba elektrické energie 1510 W.

Ze stanovení optimálního nastavení technicko-technologických parametrů při rovinném frézování jak smrku ztepilého *(Picea abies* L.*)*, tak dubu letního *(Quercus*

robur F.*)* je jednoznačně vidět, že sledování těchto parametrů má velmi významný vliv na energetickou a kvalitativní stránku výroby, které by se mělo věnovat nemalou pozornost. Pro srovnání, např. spotřeba elektrické energie při frézování smrku ztepilého při optimálním a nejhorším nastavení technicko-technologických parametrů je 166 %. Pokud porovnáme hodnotu drsnosti *Ra*, je hodnota trojnásobná a *Wa* až sedminásobná – tato hodnota poté dává rozdíl takový, že se kvalita ofrézovaného povrchu pohybuje v rozmezí povrchu připraveného k povrchové úpravě a povrchu srovnatelného s řezem kotoučové pily. V případě dubu je rozdíl spotřeby elektrické energie 241 %, hodnota *Ra* dvojnásobná a *Wa* trojnásobná. Příloze v tab. 43. a 44. najdeme seřazené všechny technicko-technologické nastavené od optimálního po nejhorší obou testovaných dřevin. Výzkum je užitečný také z toho důvodu, že s tabulkou optimálních hodnot se dá libovolně pracovat. Např. pokud bychom potřebovali zjistit optimální nastavení a víme, že musíme stihnout vyrobit xy výrobků za jednotku času, odfiltrujeme si jinou posuvnou/řeznou rychlost dle potřeby a vygenerujeme příslušné optimální nastavení rovinného frézování.

Tyto faktory nám významně ovlivňují celý proces výroby. Pokud by se při rovinném frézování vybralo špatné technicko-technologické nastavení, dojde k několikanásobně větší spotřebě energie a nekvalitnímu opracovanému povrchu, který musí následně být např. dobroušen, aby mohla být aplikována povrchová úprava. Takto neoptimální nastavení výroby vede k delšímu času na opracování, potřeba dalších zaměstnanců, strojů a nástrojů. Optimálním nastavením těchto parametrů ušetříme všechny tyto důležité věci a dosáhneme kvalitnější, ekonomičtější, a hlavně ekologičtější výroby.

5 Přínos pro vědu a praxi

5.1 Přínos pro vědu

Tento výzkum je pro vědu důležitý především proto, že obsahuje kompletně prozkoumané dřeviny smrk ztepilý *(Picea abies* L.*)* a dub letní *(Quercus robur* F.*)* z hlediska chemických změn při různých teplotách termické modifikace, změn parametrů při rovinném frézování a vliv těchto parametrů na kvalitu opracovaného povrchu (měřenou dvěma metodami) a spotřebu elektrické energie. Celá práce obsahuje velmi složitě a zdlouhavě shromážděná důležitá data, která mohou dalším způsobem velmi pomoci v porovnávání, vyhodnocení a směrování vědy tímto směrem:

1) Naměřené hodnoty obou dřevin z hlediska obsahu jednotlivých chemických sloučenin a jak se obsah těchto sloučenin mění při různých stupních termické modifikace zkoumaných dřevin. Zda má chemické složení vliv na spotřebu elektrické energie při rovinném frézování.

2) Jak ovlivňují jednotlivé technicko-technologické faktory, teploty termické modifikace spotřebu elektrické energie.

3) Jak ovlivňují technicko-technologické faktory kvalitu opracovaného povrchu měřenou průměrnou aritmetickou úchylkou profilu drsnosti (*Ra*) a profilu vlnitosti (*Wa*), jak velký má vliv na kvalitu opracovaného povrchu rovinné frézování termicky modifikovaných dřevin a při jakém stupni termické modifikace.

4) Vzájemné naměření kvality opracování povrchu a průměrné aritmetické úchylky drsnosti (*Ra*) a vlnitosti (*Wa*) dvěma nezávislými způsoby, a to kontaktní metodou a bezkontaktní (laserovou) metodou, abychom zjistili rozdíly mezi nimi.

5) Způsob vzájemného porovnání a nalezení optimálního technicko-technologického nastavení parametrů rovinného frézování interakcí veličin jako je spotřeba elektrické energie, průměrné úchylky profilu drsnosti *Ra* a průměrné úchylky profilu vlnitosti *Wa*.

5.2 Přínos pro praxi

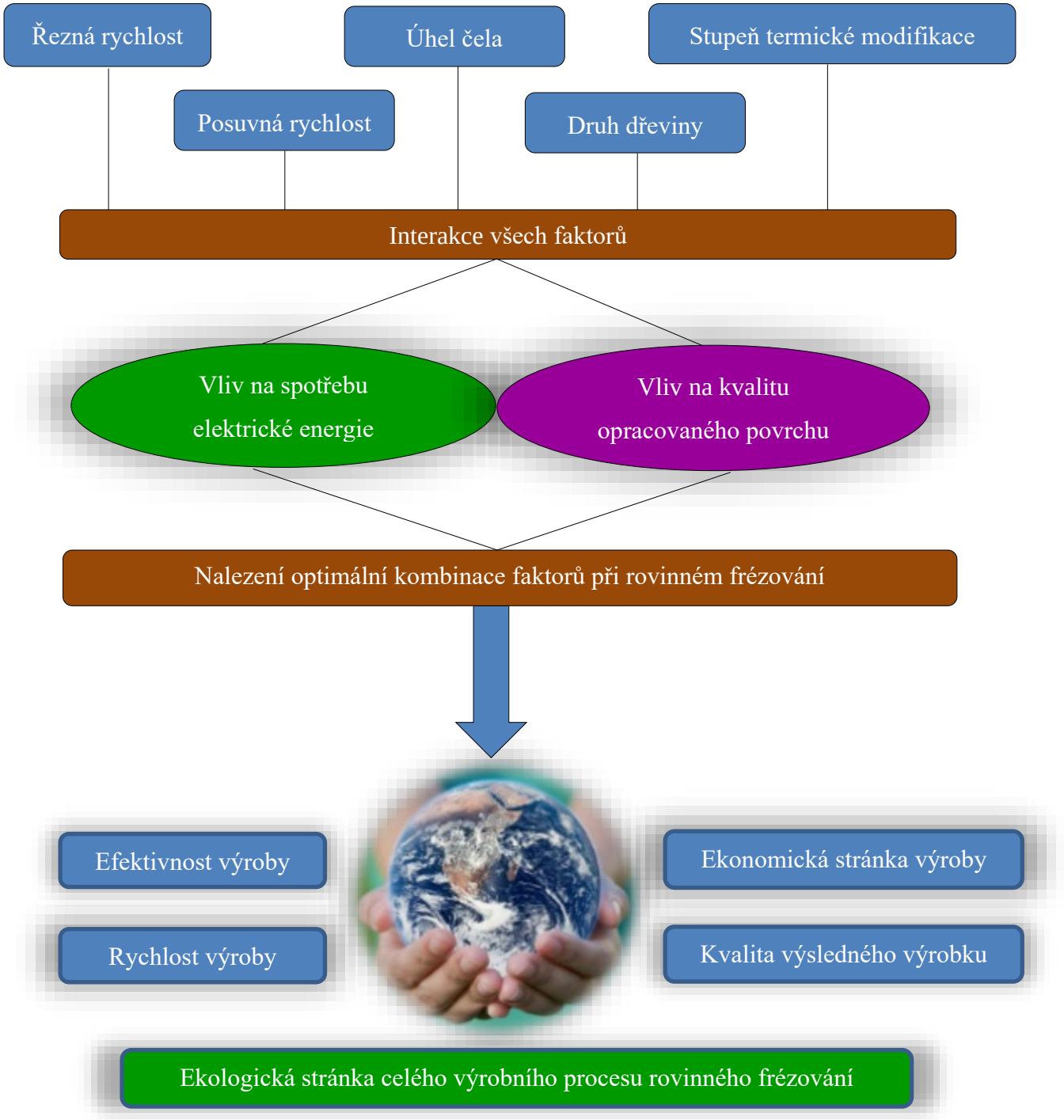
Tato práce je stejně důležitá jak pro vědu, tak z pohledu praxe. Výrobní technologie a samotné technologické procesy se musejí neustále zdokonalovat a zlepšovat. Tímto celý výzkum významným způsobem ovlivňuje celý proces rovinného frézování a to především:

1) Při jakých kombinací technicko-technologických faktorů dosáhneme nejnižší spotřeby elektrické energie. I když jsou náklady na elektrickou energii pouze část nákladů na celý výrobní proces, dají se vhodným nastavením podstatně snížit, a tak i ovlivnit právě ekonomickou a ekologickou stránku celé výroby.

2) Při jakém nastavení procesu rovinného frézování dosáhneme nejlepší hodnoty drsnosti *Ra*. Tato hodnota má velmi významný vliv na celkovou produktivitu výroby. Ideální je, aby výrobek procházel co nejnižším množstvím technologických operací, a tedy aby i po rovinném frézování měl natolik kvalitní povrch, aby se nemusel dále např. brousit a mohl jít rovnou na vhodnou povrchovou úpravu.

3) Při jakém nastavení procesu rovinného frézování dosáhneme nejlepší hodnoty vlnitosti *Wa*. Podobně jako hodnota drsnosti i vlnitost ovlivňuje konečnou podobu ofrézovaného povrchu. I tento činitel významně ovlivňuje jakost i kvalitu celého výrobku.

4) Pro praxi asi nejdůležitějším výsledkem je interakce všech předcházejících sledovaných hodnot spotřeby elektrické energie, hodnoty drsnosti a vlnitosti navzájem. Celý proces rovinného frézování se skládá z velkého množství vlivů a faktorů a nejzásadnější vliv má celkové působení těchto faktorů mezi sebou. Proto byly v práci vyhodnoceny a seřazeny veškeré technicko-technologické nastavení rovinného frézování od optimálních po nejhorší. Toto seřazení může zásadním vlivem ovlivňovat kvalitu výrobku, efektivnost výroby, ekonomickou stránku, rychlost výroby a v celkovém globálním měřítku pomoci snížit ekologickou zátěž celého výrobního procesu. Na obr. 108. je znázorněné celé schéma, jak důležité pro zdokonalování procesu rovinného frézování může být nalezení optimálního technicko-technologického nastavení.



Obr. 108. Schéma vlivu všech vybraných faktorů procesu rovinného frézovaní na výsledný produkt

6 Závěr

Díky provedenému výzkumu se ukázalo jak velký a významný vliv na kvalitu a energetickou stránku výroby může mít sledování různých technicko-technologických parametrů při rovinném frézování. Mezi nejdůležitější výsledky bych mohli zařadit:

1) Chemické složení dřeva:
    a. čím vyšší teplota termické modifikace, tím menší je podíl hemicelulózy ve dřevě a je vyšší podíl extraktivních látek a ligninu. S vyšší teplotou termické modifikace také klesá hustota dané dřeviny.
    b. u holocelulózy a hemicelulózy se řezný příkon zvyšuje se zvyšováním procenta těchto složek ve dřevě, u ostatních složek (extraktivních látek, ligninu a celulózy) tomu je naopak.

2) Spotřebu elektrické energie nejvíce ovlivňuje:
    a. řezná rychlost, čím vyšší řezná rychlost, tím větší spotřeba elektrické energie,
    b. posuvná rychlost, čím vyšší je posuvná rychlost, tím vyšší je spotřeba elektrické energie,
    c. úhel čela, se zvyšujícím se úhlem čela klesá spotřeba elektrické energie,
    d. vliv termické modifikace, se zvyšující se teplotou termické modifikace klesá spotřeba elektrické energie,
    e. vliv dřeviny, energeticky méně náročné je rovinné frézování dubu ztepilého *(Picea abies* L.*)* než dubu letního *(Quercus robur* F.*).*
    f. posuv na zub nemá z hlediska energetické náročnosti podstatný vliv

3) Kvalitu obrobeného povrchu nejvíce ovlivňuje:
    a. posuvná rychlost, se vzrůstající posuvnou rychlostí klesá kvalita opracovaného povrchu,
    b. řezná rychlost, se vzrůstající řeznou rychlostí dochází ke zlepšení kvality opracovaného povrchu,
    c. úhel čela nemá významný vliv na kvalitu opracovaného povrchu, ale obecně můžeme říci, že v nepatrném rozsahu při zvyšování úhlu čela dochází ke zlepšení kvality opracovaného povrchu,

d. vliv termické modifikace opět nemá extrémně významný vliv na kvalitu opracovaného povrchu, avšak můžeme sledovat při zvyšování teploty termické modifikace drobné snižování kvality opracovaného povrchu,
e. naměřené hodnoty kontaktní a bezkontaktní metodou byly velmi odlišné, ale dosahovali stejných trendů a potvrzovali navzájem správnost měření.
f. posuv na zub má výrazný vliv na kvalitu opracovaného povrchu. S rostoucím posuvem na zub klesá kvalita opracovaného povrchu.

4) Nejzásadnější vliv na celý proces rovinného frézování má interakce všech sledovaných parametrů.

7 Seznam použité literatury

[1] ASTM D1107-96(2013), Standard Test Method for Ethanol-Toluene Solubility of Wood, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013,

[2] Aydin, I., and Colakoglu, G. (2005). "Effects of surface inactivation, high temperature drying and preservative treatment on surface roughness and colour of alder and beech wood," *Applied Surface Science* 252(2), 430-440. DOI: 10.1016/j.apsusc.2005.01.022

[3] Barcík, Š., Kminiak, R., Řehák, T. and Kvietková, M. (2010). The influence of selected factors on energy requirements for plain milling of beech wood. Journal of Forest Science56(5), 243-250

[4] Barcík, Š., Pivolusková, E., and Kotlínová, M. (2005). „The influence of chosen factors on granulometric composion of chip in plane milling of juvenile pine wood," *Drvna Industrija* 3(5), 107-114.

[5] Barcík, Š., Pivolusková, E., Kminiak, R. (2007). "Vplyv vybraných Technicko-technologických faktorov na energetické a kvalitatívne ukazovatele pri rovinnom frézovaní juvenilného topolového dreva [Influence of selected technical - technological parameters on the energy and qualitative indicators during face milling poplar wood]," Transfer 2007, Využívanie nových poznatkov v strojárskej praxi, Technical University in Zvolen, Slovakia, pp. 59-66 (in Slovak).

[6] Barcík, Š. – Homola, T.: Vplyv vybraných parametrov na kvalitu obrobeného povrchu při rovinom frézování juvenilního borovicového dreva. In: Trieskové a beztrieskové obrabanie dreva, Zvolen, 2004, ISBN 80-228-1385-0

[7] Baysal, E., Kart, S., Toker, H., and Degirmentepe, S. (2014). "Some physical characteristics of thermally modified Oriental-beech wood," *Maderas. Ciencia y Tecnología* 16(3), 291-298. DOI: 10.1016/j.apsusc.2005.01.022

[8] Bekhta P., and Niemz, P. (2003). "Effect of high temperature on the changes in colour, dimensional stability and mechanical properties of spruce wood," *Holzforschung* 57(5), 539-546. DOI: 10.1515/HF.2003.080

[9] Bengtsson, C., Jermer, J., Clang, A., and Ek-Olausson, B. (2003). "Investigation of some technical properties of heat-treated wood," *Proceedings of the International Research Group on Wood Preservation,* 18. – 23.May, Brisbane, Australia, No. IRG/WP 03-40266.

[10] Boonstra, M. J. (2008). „A two-stage thermal modification of wood," Ph.D. dissertation in co-supervision Ghent University, Ghent, Belgium and Henri Poincaré University, Nancy, France, pp. 297.

[11] Bourgeois, J., Bartholin, M.C. and Guyonnet, R. (1989) Thermal treatment of wood: analysis of obtained product. Wood Sci Technol 23:303–310

[12] Budakçı M, Ilçe AC, Korkut DS, Gurleyen T (2011) Evaluating the surface roughness of heat-treated wood cut with different circular saws. BioRes 6, 4247–4258

[13] Budakci, M., Ilce, A. C., Gürleyen, T., and Utar, M. (2013). „Determination of the surface roughness of heat-treated wood materials planed by the cutters of a horizontal milling machone," *BioResources* 8(4), 3189-3199. DOI: 10.15376/biores.8.3.3189-3199

[14] Burmester, A. (1975). Zur Dimensionstabilisieruing von Holz. Holz-Roh-Werkst.33, 333-335

[15] Costes, J. P., and Larricq, P. (2002). "Towards high cutting speed in wood milling," *Annals of Forest Science* 59(8), 857-865. DOI: 10.1051/forest:2002084

[16] Cristovao, L., Broman, O., Grunlund, A., Ekevad, M., and Sitoe, R. (2012). "Main cutting force models for two species of tropical wood," Material Sciences and Engineering 7(3), 143-149. DOI:10.1080/17480272.2012.662996

[17] Čabalová, I., Kačík, F., Lagaňa, R., Výbohová, E., Bubeníková, T., Čaňová, I., and Ďurkovič, J. (2018). Effect of thermal treatment on the chemical, physical, and mechanical properties of pedunculate oak (Quercus robur L.) wood. *BioRes.*13(1), 157-170.

[18] Darmawan, W., Gottlöber, C., Oertel, M., Wagenführ, A., and Fischer, R. (2011). „Performance of helical edge milling cutters in planning wood," *European journal of Wood and Wood Products* 69(4), 565-572. DOI: 10.1007/s010-0517-8

[19] Davim, J. P. *Surface Integrity in Machining*. 1. vyd. London: Springer. 2010. 215 s. ISBN 978-1-84882-973-5.

[20] De Moura, L.F., Brito, J.O., Nolasco, A.M. and Uliana, L. R. (2011). Effect of thermal rectification on machinability of Eucalyptus grandis and Pinus caribaea var. Hondurensiswoods. Eur. J. Wood Prod. 69 (4): 641-648

[21] Dilik, T. and Hiziroglu, S. (2012). Bonding strength of heat treated compressed Eastern redcedar wood, Materials & Design, 42, 317-320,

DOI: 10.1016/j.buildenv.2005.07.017 h, s. 539 – 546

[22] Dornyak, O.R. (2003). Modeling of the rheological behavior of wood in compression processes. J Eng Phys Thermophys 76(3):648–654

[23] Dubovsky, J., Babiak, M., and Čunderlík, I. (1998). *Textúra, Štruktúra a Úžitkové Vlastnosti Dreva*, Technická Univerzita vo Zvolene, Zvolen, Slovakia.

[24] Esteves, B. M, Domingos, I. J, and Pereira, H. M. (2008). „Pine wood modification by heat treatment in air“ *BioResources* 3, 142. DOI: 10.15376/biores.3.1.142-145

[25] Esteves, B. M., and Pereira, H. M. (2009). "Wood modification by heat treatment: A review," *BioResources* 4(1), 370-404. DOI: 10.15376/biores.4.1.370-404

[26] Gaff, M., Kvietková, M., Gašparík, M., Kaplan, L. and Barcík, Š. (2015). Effect of selected parameters on the surface waviness in plane milling of thermally modified birch wood, BioRes 10(4): 7618-7626

[27] Gaff, M., Kačík, F., Gašparík, M., Todaro, L., Jones, D., Corleto, R., Osvaldová, L. M. and Čekovská, H. (2019). The effect of synthetic and natural fire-retardants on burning and chemical characteristics of thermally modified teak (Tectona grandis L. f.) wood, Construction and Building Materials, 200, 551-558,

[28] Gunay M., Korkut I., Aslan E. and Seker U. (2005). Experimental Investigation of the Effect of Cutting Tool Rake Angle on Main Cutting Force, Journal of Materials Processing Technology. 166: 44-49.

[29] Gündüz, G., Korkut, S., and Korkut, D. S. (2008). "The effects of heat treatment on physical and technological properties and surface roughness of Camiyani black pine (*Pinus nigra* Arn. subsp. *pallasiana* var. *pallasiana*) wood," *Bioresource Technology* 99(7), 2275-2280. DOI: 10.1016/j.biortech.2007.05.015

[30] Hill, C. A. S. (2006). Wood Modification: Chemical, thermal, and Other Processes, John Eiley and Sons, Hoboken, NJ, USA. Pp. 260. ISBN 978-0-470-02172-9

[31] Hillis, W. (1984). High temperature and chemical effects on wood stability. Part 1. General consideration. Wood Sci Technol 18:281–293

[32] Hlásková, L., Tomasz Rogoziński, T., and Kopecký, Z., (2016). „Influence of feed speed on the content of fine dust during cutting of two – side – laminated particleboards,“ *Drvna Industrija* 67(1), 9-15. DOI: 10.5552/drind.2016.1417

[33] Hrčka, R., and Babiak, M. (2012). „Some non-traditional factors influencing thermal properties of wood,“ *Wood-research* 57 (3), 367-373.

[34] Huang, Y. S.; CHEN, S. S.; TANG, J.-L. Analyses of rotating disc cutting of wood. *Taiwan Journal of Forest Science*. 2003, roč. 18, č. 4, s. 263-271. ISSN 1026-4469.

[35] Inari, G. N., Petrissans, M., and Gerdin, P. (2007). Chemical Reactivity of Heat-treated Wood. Journal of Wood Science and Technology, 41(2), 157-168

[36] International Energy Agency (2017) „*World energy statistics 2017*“ 847 p. ISBN 978-92-64-27807-3

[37] ISO 13061 1 (2014). “Physical and mechanical properties of wood -Test methods for small clear wood specimens --Part 1: Determination of moisture content for physical and mechanical tests,” International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.

[38] ISO 13061-2 (2014). “Physical and mechanical properties of wood --Test methods for small clear wood specimens -Part 2: Determination of density for physical and mechanical tests,” International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland

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

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

[41] ISO 322. Dosky z dreva: Zisťovanie vlhkosti. Praha: Český normalizační institut, 1994.

[42] ISO 323. Dosky z dreva: Zisťovanie hustoty. Praha: Český normalizační institut, 1994.

[43] ISO 3002-1. Rezné nástroje. Základné veličiny pri rezaní a brúsení Časť 1: Geometria aktívnej časti rezných nástrojov. Základné termíny, súradnicové sústavy, nástroje a pracovné úhly, lamače triesky. Praha: Český normalizační institut, 1993. 68 s.

[44] Ispas, M., Gurau, L., Campean, M., Hacibektasoglu, M. and Racasan, S. (2016). Milling of heat-treated beech wood (Fagus sylvatica L.) and analysis of surface quality. *BioRes.* 11(4), 9095-9111.

[45] Jämsä, S., and Viitaniemi, P. (2001). Heat treatment of wood – Better durability without chemicals. In: Proceedings of special seminar held in Antibes, France

[46] Javorek, L., and Osvald, J. (1998). "Surface quality *vs.* technological conditions," *Acta facultatis Technicae Zvolen,* TU vo Zolene, pp. 41- 46.

[47] Kacikova, D., Kacik, F., Cabalova, I., and Durkovic, J. (2013). „Effects of thermal treatment on chemical, mechanical and colour traits in Norway spruce wood," *Bioresource Technology* 144, 669. DOI 10.1016/j.biortech.2013.06.110

[48] Kačík, F., Luptáková, J., Šmíra, P., Nasswettrová, A., Kačíková, D., and Vacek, V. (2016). "Chemical alterations of pine wood lignin during heat sterilization. *BioRes.* 11(2), 3442-3452.

[49] Kamdem, D., Pizzi, A., and Jermannaud, A. (2002). Durability of heat-treated wood. Holz Roh-Werkst. 60, 1-6.

[50] Kaplan, L., Kvietková, M.S. and Sedlecký, M. (2018). Effect of the interaction between thermal modification temperature and cutting parameters on the quality of oak wood BioRes. 13(1), 1251-1264

[51] Karagoz, U., Akyildiz, M. H., and Isleyen, O. (2011). "Effect of heat treatment on surface roughness of thermal wood machined by CNC," *Pro Ligno* 7(4), 50-58.

[52] Kilic, M., Hiziroglu, S., and Burdurlu, E. (2006). "Effect of machining on surface roughness of wood," Build. Environ. 41(8), 1074-1078. DOI: 10.1016/j.buildenv.2005.05.008

[53] Kirk, T. K. and Cowling, E. B., (1984). Biological decomposition of solid wood, Adv. Chem., 207, 455–487

[54] Kocman, K. and Prokop, J. (2001). Technologie obrábění (Technology of Machining). 1. ed., CERM, Brno, Czech Republic (in Czech)

[55] Korčok, M., Koleda, P., Barcík, Š. and Vančo, M. (2018). Milling thermally modified Oak. BioRes. 13(4), 8569-8577.

[56] Korkut, D.S. and Guller, B. (2008). The effects of heat treatment on physical properties and surface roughness of red-bud maple (Acer trautvetteri Medw.) wood. Bioresour Technol. 99:2846–2851.

[57] Korkut, S. D., Hiziroglu, S., and Aytin, A. (2013). "Effect of heat treatment on surface characteristics of wild cherry wood," *BioResources* 8(2), 1582-1590.

[58] Kotalík, O.; „Stav a vybrané vlastnosti dřeva solitérního smrku pichlavého *(Picea pungens Engelm.)* z nelesních půd“, diplomová práce, Mendelova univerzita v Brně, 2010.

[59] Krauss, A., Piernik, M., and Pinkowski, G. (2016). „Cutting power during milling of thermally modified pinse wood,“ *Drvna Industrija* 67(3), 215-222.

[60] Krejčí V., Kábele J, Elektrotechnické měřící přístroje a měření, Státní nakladatelství technické literatury, 1962, 270 stran, 04-535-62,

[61] Kretschmann, D. E., Alden, H. A., and Verill, S. (1997). „Variations of microfibril angle in loblolly pine: Comparison of iodine crystallization and X-ray diffraction techniques,“ in Microfibril Angle in Wood, Butterfield, B. G. (ed.), University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, pp. 157-176.

[62] Krilek, J., Kováč. J., and Kučera, M. (2014). “Wood crosscutting process analysis for circular saws,” BioResources 9(1), 1417-1429. DOI: 10.15376/biores.9.1.1417-1429

[63] Kubín, J. Energetika-perspektivy-strategie-inovace. Křtiny: Jiří Láznička- Lpress, 2003, 540 stran, Neprodejná účelová publikace

[64] Kugela, I. S. (1958). “O frezovaniji listevnych porod drevesiny [Milling of deciduous trees],” Vol., 226 (in Slovak).

[65] Kvietková, M., Gašparík, M. and Gaff, M. (2015). Effect of thermal treatment on surface quality of beech wood after plane milling. BioRes.10(3), 4226-4238,

[66] Lisičan, J. (1996). *Teória a Technika Spracovania Dreva [Theory and Technique of Wood Processing]*, Matcentrum, Zvolen (in Slovak).

[67] Marthy, M., and Cismaru, I. (2009). „Experimental study concerning the power consumption at the milling of pear wood,“ *ProLigno* 5(3), 47-52.

[68] Mayes, D., Oksanen, O. (2003). Thermowood handbook, Thermowood, Finnforest, Finland.

[69] Mckenzie, W. M.; KO, P.; Cvitkovic, R.; Ringler, M. (2001), Towards a model predicting cutting forces and surface quality in routing layered boards. *Wood Science and Technology*. 2001, roč. 35, č. 6, s. 563-569. ISSN 0043-7719.

[70] Mifitieva, E., Gaff, M., Svoboda, T., Babiak, M., and Gašparík, M. (2016). „Effect of selected factors on bending characteristics of beech wood,“ *BioResources* 11(1), 599-611. DOU: 10.15376/biores.11.1.599-611

[71] Mikleš, M., Kováč, J., and Krilek, J. (2010). Výskum rezných podmienok priečneho pílenia dreva [Research of Cutting Conditions of Wood Cross-Cutting], Technical University in Zvolen, Zvolen, Slovakia.

[72] Militz, H. and Tjeerdsma, B. (2001). Heat treatment of wood by the PLATO-process. Review on heat treatments of wood. In: Rapp AO (ed) Proc of the special seminar held in Antibes, France, on 9 February 2001, Forestry and Forestry Products, France. COST Action E22, EUR 19885, pp 23–24

[73] Mitchell, P. (1988). Irreversible property changes of small Loblolly Pine specimens heated in air, nitrogen, or oxygen. Wood Fiber Sci. 20(3), 320-333.

[74] Novák, V., Rousek, M., and Kopecký, Z. (2011). "Assessment of wood surface quality obtained during high speed milling by use of non-contact method," *Drvna Industrija* 62 (2), 105-113. DOI: 10.5552/drind.2011.1027

[75] Nuopponen, M., Vuorinen, T., Jamsa, S. and Viitaniemi, P. (2005). Thermal modification in softwood studied by FT-IR and UV resonance Raman spectroscopies. J Wood Chem Tech 24(1):13–26

[76] Procházka, M.; Dokončování dřeva vybraných tropických dřevin, Diplomová práce, Mendelova univerzita v Brně, Brno, 2005-2006

[77] Prokeš, S. (1982). Obrábění Dřeva a Nových Hmot ze Dřeva [Woodworking and New Materials from Wood], SNTL – Nakladatelství Technické Literatury, Prague, Czech Republic.

[78] Rapp, A. (2001). Review on heat treatments of wood, COST ACTION E22-Environmental optimisation of wood protection. Proceedings of Special Seminar in Antibes, França

[79] Reinprecht, L., and Vidholdová, Z. (2008). "Termodrevo – Príprava, Vlastnosti a Aplikácie [ThermoWood – Preparing, Properties and Applications]," *Monograph*, Technical University in Zvolen, Slovakia (in Slovak).

[80] Rousek, M.; Kopecký, Z.; Chlebovský, R. Dodržení kvality obrábění dřeva frézováním ve vazbě na povrchové úpravy. *Trieskové a beztrieskové obrábanie dreva*. 2010, roč. 7, č. 1, s. 141-150. ISBN 978-80-228-2143-8.

[81] Rowell, R. M., Ibach, R. E., McSweeny, J. and Nilsson, T. (2009). Understanding decay resistance, dimensional stability and strength changes in heat treated and acetylated wood. Wood Material Science and Engineering 4(1-2), 14-22.

[82] Řasa, J., and Gabriel, V. (2000). Strojírenská Technologie 3. Metody, Stroje A Nástroje Pro Obrábění, 1. Díl. [Engineering Technology 3. Methods, Machinery and Instruments for Machining, Part 1], Scientia, Prague, Czech Republic.

[83] Sadoh, T., and Nakato, K. (1987). "Surface properties of wood in physical and sensory aspects," Wood Sci. Technol. 21(2), 111-120. DOI: 10.1007/BF00376191

[84] Sandak, J., and Negri, M. (2005). "Wood surface roughness - What is it?," in: Proceedings of the 17th International Wood Machining Seminar (IWMS 17), Rosenheim, Germany, pp. 242-250.

[85] Sandberg, D.,Haller, P. and Navi. P., (2013). Thermo-hydro and thermo-hydro-mechanical wood processing: An opportunity for future environmentally friendly wood products. Wood Material Science and Engineering 8:1, 64-88.

[86] Sedlecký, M. (2017). „Vliv druhu materiálu stroje na kvalitu opracovaného povrchu při podélném frézování dřeva a materiálu na bázi dřeva"

[87] Seifert, K.(1960). Zur Frage der Cellulose-Schnellbestimmung nach der Acetylacetone-Methode. Das Papier 14:104--106.

[88] Sikora, A., Kačík, F., Gaff, M., Vondrová, V., Bubeníková, T. and Kubovský, I. (2018). Impact of thermal modification on color and chemical changes of spruce and oak wood. Journal of Wood Science64(4): 406-416

[89] Sluiter, A., Hames, B., Ruiz, R., Scarlata, C., Sluiter, J., Templeton, D. and Crocker, D. (2012) Determination of Structural Carbohydrates and Lignin in Biomass. Version 08-03-2012

[90] Söğütlü, C. (2010a). „The effect of the feeding direction and feeding speed of planing on the surface roughness of oriental beech and Scotch pine woods," *Wood Research* 55 (4), 67-77

[91] Srinivas, K. and Pandey, K.K. (2012). Effect of heat treatment on color changes, dimensional stability, and mechanical properties of wood. J. Wood Chem. Technol., 32: 304-316

[92] Stamm, A. J. (1964). Wood and cellulose science. Ronald Press, USA, Chapter 19, pp 312–342

[93] Stamm, A., Burr, H., and Kline, A. (1946). Stayb-wood-A- heat stabilized wood. Ind. Eng. Chem. 38(6), 630-634

[94] Stamm, A.J., (1935). Shriking and swelling of wood. Industrial & Engineering Chemistry 27: 401–406

[95] Škaljić, N., Beljo-Lučić, R., Čavlović, A., and Obućina, M. (2009). „Effect of speed and wood species on roughness of machined surface," *Drvna Industrija* 60(4), 229-223. DOI: 10.1007/s10086-004-0655-x

[96] Šlazingerová, J.; Gandelová, L.: Stavba dřeva –cvičení, MZLU v Brně, Brno 2004, 130s, ISBN 80-7157-400-7

[97] Tjeerdsma, B., Boonstra, M., Pizzi, A., Tekely, P. and Militz, H. (1998). Characterisation of thermaly modified wood: Molecular reasons for wood performance improvement. Holz Roh-Werkst 56, 149-153.

[98] Tuong, V. M. and Li, J. (2010). Effect of heat treatment on the change in colour and dimensional stability of acacia hybrid wood. BioRes, 5: 1257–1267

[99] Turkoglu, T., Toker, H., Baysal, E., Kart, S., Yuksel, M. and Ergun, M. E. (2015). Some surface properties of heat treated and natural weathered Oriental beech, Wood Research 60(6): 881-890

[100] Unsal, O. and Ayrilmis, N. (2005). Variations in compression strength and surface roughness of heat-treated Turkish river red gum (Eucalyptus camaldulensis) wood. J Wood Sci. 51:405–409

[101] Uribe, B.B. and Ayala, O A. (2015). Characterization of three wood species (Oak, Teak and Chanul) before and after heat treatment. J. Ind. Acad. Wood Sci. 12 (1), 54-62.

[102] Vančo, M.; Jamberová, Z.; Barcík, Š.; Gaff, M.; Čekovská, H.; Kubš, J.; Kaplan, L. The effect of selected technical, technological and material factors on the size of juvenile poplar wood chips generated during face milling. *BioResources*. 2016, roč. 12, č. 3, s. 4881-4896. ISSN 1930-2126.

[103] Vavrčík, H.; Anatomická stavba dřeva – multimediální výukový systém, verze 1,04a, MZLU v Brně, Brno 2003

[104] Vernois, M. (2000). "Heat treatment of wood in France-State of the art," Centre Technique du Bois et de l'Ameublement, Paris, França

[105] Vymětalík, J.; Degradace tropického dřeva Meranti (Shorea) napadeného dřevokaznou houbou (Trametes versicolor), Diplomová práce, Mendelova univerzita v Brně, Brno, 2009-2010.

[106] Wagenfur, R., 2002. Obrazový lexikon: dřevo. 1. vydání. Překlad Bohumil Hurda. Praha: Grada Publishing, 347 s. ISBN 80-247-0346-7.

[107] Warcholinski, B.; Gilewicz, A.; Ratajski, J. Cr2N/CrN multilayer coating for wood machining tools. *Tribology International.* 2011, roč. 44, č. 9, s. 1076-1082. ISSN 0301-679X.

[108] Welzbacher, C. R. and Rapp, A. O. (2005): Durability of different heat treated materials from industrial processes in ground contact. Stockholm: *International Research Group on Wood Preservation,* 2005.

[109] Wilkowski, J., Grześkuewicz, M., Czarniak, P., Siwek, I., Javorek, L., and Pauliny, (2011). "Influence of thermal modification of oak wood on cutting forces during milling," in: *Drewno material ekologiczny: konferencja naukowa Wydzialu Technologii Drewna SGGW,* Warszawa: Wydzial Technologii Drewna SGGW, 2011, s. 309-314. ISBN 83-86980-88-5.

[110] Windeisen, E., and Wegener, G. (2008). "Behaviour of lignin during thermal treatments of wood," Ind. Crop. Prod. 27(2), 157-162.

[111] Wise, L.E., Murphy, M. and Daddieco, A. A. (1946). Chlorite Holocellulose, Its Fractionation and Bearing on Summative Wood Analysis and on Studies on the Hemicelluloses. Technical Association Papers, 29(6):210-8

[112] Yanda, H., Ghani, J.A., Rodzi, M.N.A.M., Othman, K., Haron, C.H.C. (2010). Optimization of material removal rate, surface roughness and tool life on conventional dry turning ff FCD700, International Journal of Mechanical and Materials Engineering, 5(2), 2010, 182-190

[113] Yildiz, S. (2002). Physical, Mechanical, Technological and Chemical Properties of Beech and Spruce Wood Treated by Heating, Ph.D. thesis, Karadeniz Technical University, Trabzon, Turkey.

[144] Yildiz, S., Gezer, E. D., and Yildiz, U. C. (2006). "Mechanical and chemical behavior of spruce wood modified by heat," *Building and Environment* 41(12), 1762-1766.

[115] Yildiz, S., Tomak, E.D., Yildiz, C., Ustaomer and D. (2013). Effect of artificial weathering on the properties of heat treated wood, Polymer Degradation and Stability 98(8): 1419-1427.

[116] Yinodotlgör, N. and Kartal, S. N. (2010): Heat modification of wood: Chemical properties and resistance to mold and decay fungi. Forest Products Journal 60(4), 357-361.

[117] Zobel, B. J., and Sprague, J. R. (1998). „juvenile Wood in Forest trees," Springer-Verlag, Berlin, Germany.

[118] Gašparík, M., Gaff, M., Kačik, F., Sikora, A., (2019). "Color and chemical changes in teak (Tectona grandis L. f.) and meranti (Shorea spp.) wood after thermal treatment", Bioresources, 14 (2019): 2667-2683, Februar 2019. DOI: 10.15376/biores.14.2.2667-2683

[119] Gaff, M., Marian, B., Kačik, Sandberg, D., Turčani, M. Hanzlik, P., Vondrova, V., (2019). "Plasticity properties of thermally modified timber in bending – The effect of chemical changes during modification of European oak and Norway spruce", Composites Part B: Engineering, 165 (2019): 613-625, May 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.02.019

[120] Sikora, A., Kačík, F., Gaff, M., Vondrová, V., Bubeniková, T., Kubivský, I. (2018). " Impact of thermal modification on color and chemical changes of spruce and oak wood ", Journal of Wood Science 13(3): 4776-4794 · April 2018, DOI: https://doi.org/10.1007/s10086-018-1721-

[121] Osvald, A., Gaff, M. (2017). " Effect of thermal modification on flameless combustion of Spruce wood", Wood research 62(4):1-14, August 2017

[122] Vančo, M., Jamberová, Z., Barcík, Š., Gaff, M., Čekovská, H., Kaplan, L. (2017). "The effect of selected technical, technological, and material factors on the size of juvenile poplar wood chips generated during face milling",Bioresources 12(3):4881 4896 · August 2017 DOI: 10.15376/biores.12.3.4881-4896

[123] Gáborík, J., Gaff, M., Ruman, D., Šomšák, M., Gaffová, Z., Svoboda, T., Vokatý, V., Sikora, A. (2017). "The Influence of Thermomechanical Smoothing on Beech Wood Surface Roughness", Bioresources 12(1):448-456, January 2017DOI: 10.15376/biores.12.1.448-456

[124] Ruman, D., Gaff, M., Gašparík, M., Babiak, M. (2016). "Experimental evaluation of joints using thin steel angles for wood structures", Bioresources 11(1):33-43, January 2016 DOI: 10.15376/biores.11.1.33-43

[125] Gaff, M., Sarvašová Kvietková, M., Gašparík, M., Slávik, M. (2016). "Dependence of roughness change and crack formation on parameters of wood surface embossing" Wood research 61(1):163-174, January 2016

[126] Gaff, M., Kačik, F., Gašparík, M., (2019). "Impact of thermal modification on the chemical changes and impact bending strength of European oak and Norway spruce wood", Composite Structures, 216 (2019): 80-88, Februar 2019. DOI:https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.02.091

Internetové zdroje:

[127] https://asiakas.kotisivukone.com/files/en.thermowood.palvelee.fi/uutiset/Production statistics2018.pdf; cit. 2019.04.07.

[128]http://www.swm-wood.com/en/thermally-modified-wood/characteristics/colour/.pdf; cit. 2018.08.06.

[129] http://www.spa-solutions.me/en/products/d-line/thermowood-saunas; cit.2018.03.25.

[130] http://corell.ie/thermo-wood-cladding; cit. 2018.03.25.]

[131] (https://www.pilanamarket.cz/galerie/1_12367/univerzalni-frezovaci-hlava-120x40-50x50-2z-f021-alu-mec-doprodej-small_product.jpg, cit.01.07.2019)

8 Přílohy

Tab. 41. Průměrné hodnoty sledovaných charakteristik kvality povrchu, smrk

Řezná rychlost (m/s)	Úhel čela (°)	Posuvná rychlost (m/min)	Teplota termické modifikace (°C)	Posuv na zub (mm)	Wa – Kontaktní metoda (µm)	Ra – Kotaktní metoda (µm)	Wa – laserová metoda (µm)	Ra – laserová metoda (µm)	Hustota (Kg/m³)
20	**15**	**4**	**20**	**1,3**	**2,9** (17,0)	**3,2** (9,4)	**5,3** (16,0)	**4,5** (8,4)	**458** (5,6)
20	**15**	**4**	**160**	**1,3**	**4,3** (14,8)	**4,4** (10,3)	**6,0** (18,6)	**6,3** (15,0)	**463** (6,0)
20	**15**	**4**	**180**	**1,3**	**4,2** (16,7)	**3,0** (17,1)	**6,4** (12,1)	**5,5** (6,6)	**440** (12,3)
20	**15**	**4**	**210**	**1,3**	**2,6** (12,0)	**3,3** (8,3)	**5,6** (17,9)	**5,7** (9,6)	**452** (10,7)
20	**15**	**8**	**20**	**2,7**	**4,2** (18,8)	**4,3** (15,5)	**5,4** (7,8)	**7,5** (11,8)	**458** (5,6)
20	**15**	**8**	**160**	**2,7**	**5,2** (8,1)	**4,3** (10,5)	**6,4** (17,4)	**4,5** (12,0)	**463** (6,0)
20	**15**	**8**	**180**	**2,7**	**3,6** (15,7)	**3,8** (11,5)	**8,6** (14,5)	**8,8** (17,2)	**440** (12,3)
20	**15**	**8**	**210**	**2,7**	**4,1** (19,6)	**4,3** (11,8)	**6,5** (18,6)	**7,7** (17,8)	**452** (10,7)
20	**15**	**11**	**20**	**3,7**	**6,2** (16,6)	**4,4** (17,6)	**8,2** (19,0)	**6,8** (17,8)	**458** (5,6)
20	**15**	**11**	**160**	**3,7**	**6,2** (17,5)	**5,4** (17,1)	**6,7** (17,1)	**7,7** (14,0)	**463** (6,0)
20	**15**	**11**	**180**	**3,7**	**5,7** (19,8)	**5,7** (17,2)	**8,2** (18,9)	**7,4** (19,4)	**440** (12,3)
20	**15**	**11**	**210**	**3,7**	**3,4** (18,5)	**3,0** (16,4)	**7,8** (17,3)	**7,5** (8,3)	**452** (10,7)
20	**20**	**4**	**20**	**1,3**	**3,3** (19,9)	**3,7** (17,7)	**5,3** (16,9)	**5,3** (17,4)	**458** (5,6)
20	**20**	**4**	**160**	**1,3**	**4,4** (19,8)	**4,0** (13,9)	**5,3** (19,8)	**5,0** (12,1)	**463** (6,0)
20	**20**	**4**	**180**	**1,3**	**4,5** (17,3)	**3,4** (17,9)	**7,0** (16,3)	**6,0** (15,6)	**440** (12,3)
20	**20**	**4**	**210**	**1,3**	**3,0** (19,7)	**3,5** (19,3)	**4,4** (16,5)	**2,7** (19,0)	**452** (10,7)
20	**20**	**8**	**20**	**2,7**	**7,6** (17,4)	**7,0** (18,8)	**7,0** (17,3)	**5,7** (19,5)	**458** (5,6)
20	**20**	**8**	**160**	**2,7**	**4,5** (13,2)	**4,8** (10,5)	**7,4** (19,7)	**7,3** (8,8)	**463** (6,0)
20	**20**	**8**	**180**	**2,7**	**7,9** (17,0)	**6,8** (18,8)	**13,6** (14,6)	**6,4** (17,3)	**440** (12,3)
20	**20**	**8**	**210**	**2,7**	**4,2** (17,5)	**5,2** (10,6)	**6,0** (17,8)	**6,4** (18,1)	**452** (10,7)
20	**20**	**11**	**20**	**3,7**	**6,7** (19,2)	**5,0** (17,2)	**5,9** (19,7)	**5,1** (16,5)	**458** (5,6)
20	**20**	**11**	**160**	**3,7**	**5,4** (15,9)	**4,3** (19,1)	**6,0** (14,0)	**6,3** (18,7)	**463** (6,0)
20	**20**	**11**	**180**	**3,7**	**6,4** (14,2)	**5,6** (15,7)	**7,9** (19,6)	**6,7** (16,9)	**440** (12,3)
20	**20**	**11**	**210**	**3,7**	**7,3** (18,6)	**7,5** (19,4)	**11,0** (18,6)	**9,1** (16,3)	**452** (10,7)
20	**25**	**4**	**20**	**1,3**	**3,1** (10,5)	**3,3** (11,8)	**9,7** (46,8)	**7,5** (16,8)	**458** (5,6)
20	**25**	**4**	**160**	**1,3**	**7,6** (13,3)	**5,0** (13,6)	**9,7** (38,6)	**5,5** (14,2)	**463** (6,0)
20	**25**	**4**	**180**	**1,3**	**4,4** (19,4)	**5,4** (14,4)	**5,9** (54,8)	**5,7** (18,6)	**440** (12,3)
20	**25**	**4**	**210**	**1,3**	**18,0** (11,5)	**7,2** (17,9)	**7,9** (50,4)	**6,6** (16,8)	**452** (10,7)
20	**25**	**8**	**20**	**2,7**	**7,6** (12,6)	**4,5** (10,2)	**7,1** (25,1)	**5,4** (13,4)	**458** (5,6)
20	**25**	**8**	**160**	**2,7**	**5,3** (14,6)	**5,0** (19,6)	**9,3** (47,6)	**6,2** (19,4)	**463** (6,0)
20	**25**	**8**	**180**	**2,7**	**8,7** (19,7)	**6,3** (12,4)	**11,8** (43,7)	**7,9** (16,6)	**440** (12,3)
20	**25**	**8**	**210**	**2,7**	**7,6** (19,4)	**5,2** (11,3)	**9,9** (75,1)	**6,4** (12,8)	**452** (10,7)

20	**25**	**11**	**20**	**3,7**	**8,3** (11,7)	**6,0** (10,8)	**7,3** (46,3)	**5,7** (15,6)	**458** (5,6)
20	**25**	**11**	**160**	**3,7**	**7,6** (19,4)	**5,2** (10,9)	**10,2** (74,3)	**7,7** (10,0)	**463** (6,0)
20	**25**	**11**	**180**	**3,7**	**5,8** (19,8)	**5,2** (17,9)	**8,7** (37,2)	**6,3** (15,7)	**440** (12,3)
20	**25**	**11**	**210**	**3,7**	**5,3** (15,2)	**4,9** (15,6)	**9,3** (37,8)	**6,1** (19,4)	**452** (10,7)
30	**15**	**4**	**20**	**0,9**	**7,3** (15,0)	**5,9** (14,2)	**24,7** (77,0)	**13,2** (16,4)	**458** (5,6)
30	**15**	**4**	**160**	**0,9**	**6,3** (19,4)	**5,1** (19,9)	**8,5** (48,4)	**5,9** (11,9)	**463** (6,0)
30	**15**	**4**	**180**	**0,9**	**4,7** (15,4)	**4,8** (16,2)	**5,8** (62,8)	**4,6** (16,7)	**440** (12,3)
30	**15**	**4**	**210**	**0,9**	**4,6** (14,7)	**4,9** (12,8)	**6,3** (41,0)	**6,6** (12,0)	**452** (10,7)
30	**15**	**8**	**20**	**1,8**	**6,3** (11,2)	**5,5** (15,3)	**7,8** (45,0)	**6,6** (11,1)	**458** (5,6)
30	**15**	**8**	**160**	**1,8**	**4,3** (15,6)	**4,6** (17,8)	**10,0** (71,3)	**6,2** (13,4)	**463** (6,0)
30	**15**	**8**	**180**	**1,8**	**5,9** (17,1)	**4,5** (16,5)	**6,8** (47,1)	**6,3** (10,4)	**440** (12,3)
30	**15**	**8**	**210**	**1,8**	**7,2** (13,0)	**5,2** (18,7)	**8,6** (109,7)	**6,9** (12,7)	**452** (10,7)
30	**15**	**11**	**20**	**2,4**	**6,9** (13,7)	**5,6** (15,1)	**7,4** (32,2)	**6,5** (15,5)	**458** (5,6)
30	**15**	**11**	**160**	**2,4**	**9,7** (19,6)	**4,4** (13,8)	**8,0** (32,2)	**6,2** (13,9)	**463** (6,0)
30	**15**	**11**	**180**	**2,4**	**6,5** (10,8)	**6,7** (17,8)	**11,1** (61,7)	**8,0** (18,4)	**440** (12,3)
30	**15**	**11**	**210**	**2,4**	**4,8** (14,6)	**5,6** (13,3)	**10,1** (49,9)	**9,6** (11,5)	**452** (10,7)
30	**20**	**4**	**20**	**0,9**	**5,4** (12,7)	**3,5** (11,4)	**9,4** (36,2)	**6,3** (16,1)	**458** (5,6)
30	**20**	**4**	**160**	**0,9**	**4,5** (14,4)	**3,4** (11,0)	**5,2** (29,3)	**4,8** (16,4)	**463** (6,0)
30	**20**	**4**	**180**	**0,9**	**3,7** (19,0)	**3,4** (18,9)	**6,2** (44,2)	**4,7** (14,3)	**440** (12,3)
30	**20**	**4**	**210**	**0,9**	**6,4** (12,3)	**3,2** (10,5)	**5,3** (47,0)	**5,8** (17,3)	**452** (10,7)
30	**20**	**8**	**20**	**1,8**	**4,0** (13,2)	**2,9** (17,7)	**8,9** (67,8)	**5,5** (17,5)	**458** (5,6)
30	**20**	**8**	**160**	**1,8**	**5,9** (12,6)	**4,5** (19,8)	**6,1** (54,1)	**5,4** (12,7)	**463** (6,0)
30	**20**	**8**	**180**	**1,8**	**4,4** (13,9)	**4,4** (12,9)	**6,4** (47,7)	**6,0** (13,3)	**440** (12,3)
30	**20**	**8**	**210**	**1,8**	**3,9** (11,8)	**4,7** (18,5)	**10,5** (68,7)	**7,3** (17,0)	**452** (10,7)
30	**20**	**11**	**20**	**2,4**	**4,6** (12,2)	**4,7** (12,0)	**6,3** (20,2)	**7,4** (12,3)	**458** (5,6)
30	**20**	**11**	**160**	**2,4**	**4,5** (19,3)	**4,6** (16,8)	**10,5** (48,4)	**8,1** (12,3)	**463** (6,0)
30	**20**	**11**	**180**	**2,4**	**4,1** (12,5)	**4,6** (15,0)	**7,4** (29,8)	**6,4** (12,4)	**440** (12,3)
30	**20**	**11**	**210**	**2,4**	**3,9** (18,7)	**4,3** (10,7)	**7,7** (74,6)	**6,0** (12,0)	**452** (10,7)
30	**25**	**4**	**20**	**0,9**	**6,9** (18,6)	**5,2** (16,6)	**9,6** (50,7)	**5,7** (17,5)	**458** (5,6)
30	**25**	**4**	**160**	**0,9**	**4,5** (11,7)	**2,8** (15,2)	**6,5** (35,1)	**4,9** (17,0)	**463** (6,0)
30	**25**	**4**	**180**	**0,9**	**4,3** (10,8)	**4,2** (15,3)	**4,0** (38,9)	**4,3** (15,1)	**440** (12,3)
30	**25**	**4**	**210**	**0,9**	**16,0** (11,0)	**5,8** (16,6)	**13,2** (100,5)	**5,8** (15,7)	**452** (10,7)
30	**25**	**8**	**20**	**1,8**	**4,8** (13,3)	**3,2** (13,8)	**7,6** (37,0)	**5,7** (16,6)	**458** (5,6)
30	**25**	**8**	**160**	**1,8**	**6,0** (11,3)	**4,7** (11,3)	**7,4** (63,0)	**4,6** (10,6)	**463** (6,0)
30	**25**	**8**	**180**	**1,8**	**6,1** (17,1)	**6,0** (15,1)	**6,7** (38,4)	**6,8** (13,7)	**440** (12,3)
30	**25**	**8**	**210**	**1,8**	**4,8** (18,0)	**4,1** (11,2)	**5,4** (42,3)	**4,5** (14,3)	**452** (10,7)
30	**25**	**11**	**20**	**2,4**	**5,6** (17,5)	**4,8** (18,7)	**9,3** (69,8)	**4,2** (10,2)	**458** (5,6)
30	**25**	**11**	**160**	**2,4**	**7,3** (14,3)	**6,1** (17,3)	**10,2** (37,3)	**10,6** (10,9)	**463** (6,0)

30	**25**	**11**	**180**	**2,4**	**5,8** (14,5)	**5,4** (19,3)	**7,9** (50,1)	**6,1** (12,5)	**440** (12,3)
30	**25**	**11**	**210**	**2,4**	**12,7** (15,0)	**7,0** (15,0)	**9,6** (64,4)	**7,6** (17,8)	**452** (10,7)
40	**15**	**4**	**20**	**0,7**	**5,7** (19,8)	**3,8** (18,3)	**6,7** (35,4)	**4,8** (10,4)	**458** (5,6)
40	**15**	**4**	**160**	**0,7**	**4,5** (15,4)	**4,1** (10,2)	**5,1** (42,1)	**5,0** (19,8)	**463** (6,0)
40	**15**	**4**	**180**	**0,7**	**6,0** (13,3)	**4,2** (19,9)	**9,1** (87,9)	**5,5** (15,2)	**440** (12,3)
40	**15**	**4**	**210**	**0,7**	**7,0** (14,9)	**4,7** (10,4)	**5,4** (38,4)	**6,3** (11,0)	**452** (10,7)
40	**15**	**8**	**20**	**1,3**	**4,3** (14,9)	**4,6** (10,9)	**10,0** (53,2)	**6,0** (14,8)	**458** (5,6)
40	**15**	**8**	**160**	**1,3**	**6,0** (13,3)	**4,2** (19,9)	**9,9** (35,2)	**5,7** (12,1)	**463** (6,0)
40	**15**	**8**	**180**	**1,3**	**7,7** (12,8)	**5,1** (15,2)	**12,8** (82,7)	**7,1** (16,7)	**440** (12,3)
40	**15**	**8**	**210**	**1,3**	**6,3** (10,7)	**5,0** (16,0)	**7,2** (33,5)	**6,2** (13,5)	**452** (10,7)
40	**15**	**11**	**20**	**1,8**	**5,7** (10,2)	**6,1** (18,1)	**5,4** (37,6)	**6,6** (17,4)	**458** (5,6)
40	**15**	**11**	**160**	**1,8**	**5,3** (19,9)	**4,1** (16,5)	**6,8** (38,3)	**5,9** (16,7)	**463** (6,0)
40	**15**	**11**	**180**	**1,8**	**5,0** (19,5)	**3,9** (14,7)	**5,7** (29,2)	**5,3** (16,9)	**440** (12,3)
40	**15**	**11**	**210**	**1,8**	**3,6** (15,9)	**4,1** (15,7)	**5,5** (44,8)	**6,3** (11,3)	**452** (10,7)
40	**20**	**4**	**20**	**0,7**	**4,2** (19,1)	**4,0** (15,1)	**10,3** (113,3)	**4,5** (16,5)	**458** (5,6)
40	**20**	**4**	**160**	**0,7**	**3,7** (16,2)	**4,7** (15,3)	**8,2** (24,6)	**4,7** (17,2)	**463** (6,0)
40	**20**	**4**	**180**	**0,7**	**3,2** (13,5)	**4,4** (16,1)	**4,4** (36,6)	**4,7** (12,7)	**440** (12,3)
40	**20**	**4**	**210**	**0,7**	**8,4** (12,2)	**4,6** (19,5)	**14,4** (117,3)	**7,5** (14,8)	**452** (10,7)
40	**20**	**8**	**20**	**1,3**	**4,8** (12,1)	**3,8** (14,1)	**7,7** (41,3)	**5,0** (10,4)	**458** (5,6)
40	**20**	**8**	**160**	**1,3**	**4,3** (17,9)	**4,5** (13,5)	**7,5** (67,8)	**4,7** (18,5)	**463** (6,0)
40	**20**	**8**	**180**	**1,3**	**8,3** (14,4)	**4,5** (17,5)	**14,2** (52,9)	**8,9** (17,7)	**440** (12,3)
40	**20**	**8**	**210**	**1,3**	**8,3** (14,4)	**4,5** (17,5)	**11,9** (51,0)	**6,8** (10,0)	**452** (10,7)
40	**20**	**11**	**20**	**1,8**	**5,9** (18,4)	**5,4** (12,0)	**10,1** (48,1)	**6,8** (12,9)	**458** (5,6)
40	**20**	**11**	**160**	**1,8**	**4,1** (16,5)	**4,0** (17,2)	**7,1** (45,6)	**5,2** (11,6)	**463** (6,0)
40	**20**	**11**	**180**	**1,8**	**5,2** (12,8)	**4,2** (17,9)	**6,4** (31,9)	**4,8** (17,5)	**440** (12,3)
40	**20**	**11**	**210**	**1,8**	**4,2** (17,8)	**3,8** (12,3)	**5,7** (31,0)	**3,8** (12,2)	**452** (10,7)
40	**25**	**4**	**20**	**0,7**	**4,1** (16,1)	**3,2** (17,4)	**5,3** (18,3)	**5,2** (12,7)	**458** (5,6)
40	**25**	**4**	**160**	**0,7**	**3,3** (19,5)	**3,2** (14,9)	**4,7** (21,0)	**5,1** (10,5)	**463** (6,0)
40	**25**	**4**	**180**	**0,7**	**3,3** (19,5)	**3,2** (14,9)	**5,1** (35,7)	**3,7** (14,9)	**440** (12,3)
40	**25**	**4**	**210**	**0,7**	**3,3** (13,9)	**2,8** (10,0)	**4,6** (92,4)	**3,6** (17,7)	**452** (10,7)
40	**25**	**8**	**20**	**1,3**	**6,5** (17,1)	**3,9** (13,5)	**7,3** (49,7)	**3,5** (14,6)	**458** (5,6)
40	**25**	**8**	**160**	**1,3**	**7,3** (14,3)	**4,3** (19,0)	**6,6** (50,0)	**6,9** (13,7)	**463** (6,0)
40	**25**	**8**	**180**	**1,3**	**7,3** (13,8)	**5,6** (19,3)	**10,7** (60,5)	**7,4** (12,7)	**440** (12,3)
40	**25**	**8**	**210**	**1,3**	**4,8** (13,1)	**4,1** (11,2)	**4,9** (72,6)	**3,8** (17,5)	**452** (10,7)
40	**25**	**11**	**20**	**1,8**	**5,8** (10,7)	**4,6** (17,0)	**6,0** (57,8)	**4,7** (17,7)	**458** (5,6)
40	**25**	**11**	**160**	**1,8**	**10,7** (13,6)	**4,6** (16,3)	**8,2** (43,7)	**4,3** (10,6)	**463** (6,0)
40	**25**	**11**	**180**	**1,8**	**6,0** (10,7)	**4,2** (13,4)	**4,8** (27,2)	**4,7** (12,8)	**440** (12,3)
40	**25**	**11**	**210**	**1,8**	**21,3** (12,6)	**9,3** (19,9)	**15,8** (79,4)	**9,2** (15,5)	**452** (10,7)

Tab. 42. Průměrné hodnoty sledovaných charakteristik kvality povrchu, dub letní

Řezná rychlost (m/s)	Úhel čela (°)	Posuvná rychlost (m/min)	Teplota termické modifikace (°C)	Posuv na zub (mm)	Wa – Kontaktní metoda (µm)	Ra – Kotaktní metoda (µm)	Wa – laserová metoda (µm)	Ra – laserová metoda (µm)	Hustota (Kg/m^3)
20	**15**	**4**	**20**	**1,3**	**4,4** (14,7)	**3,6** (10,4)	**5,3** (16,9)	**3,7** (16,7)	**743** *(5,4)*
20	**15**	**4**	**160**	**1,3**	**10,0** (16,6)	**4,3** (15,6)	**9,3** (13,1)	**4,4** (16,4)	**719** *(5,3)*
20	**15**	**4**	**180**	**1,3**	**4,6** (11,4)	**2,7** (13,1)	**10,2** (15,7)	**2,7** (11,4)	**699** *(3,6)*
20	**15**	**4**	**210**	**1,3**	**9,0** (11,4)	**4,7** (14,4)	**7,8** (10,3)	**3,0** (12,5)	**665** *(1,4)*
20	**15**	**8**	**20**	**2,7**	**5,7** (17,1)	**4,0** (10,3)	**8,4** (14,2)	**2,4** (13,4)	**743** *(5,4)*
20	**15**	**8**	**160**	**2,7**	**7,7** (17,8)	**3,7** (13,5)	**6,8** (14,7)	**3,4** (12,6)	**719** *(5,3)*
20	**15**	**8**	**180**	**2,7**	**9,4** (10,7)	**6,0** (10,5)	**10,5** (12,8)	**6,2** (11,6)	**699** *(3,6)*
20	**15**	**8**	**210**	**2,7**	**10,2** (14,9)	**5,5** (10,3)	**8,8** (13,4)	**2,5** (13,6)	**665** *(1,4)*
20	**15**	**11**	**20**	**3,7**	**12,0** (12,4)	**5,6** (13,0)	**8,5** (18,6)	**2,8** (19,7)	**743** *(5,4)*
20	**15**	**11**	**160**	**3,7**	**7,7** (14,7)	**6,0** (11,5)	**10,5** (10,1)	**2,5** (18,1)	**719** *(5,3)*
20	**15**	**11**	**180**	**3,7**	**6,0** (16,5)	**3,5** (19,0)	**10,2** (15,7)	**2,7** (11,4)	**699** *(3,6)*
20	**15**	**11**	**210**	**3,7**	**9,3** (13,9)	**6,0** (12,4)	**11,6** (16,1)	**3,6** (10,7)	**665** *(1,4)*
20	**20**	**4**	**20**	**1,3**	**3,6** (12,1)	**2,7** (19,4)	**7,5** (19,1)	**1,9** (19,1)	**743** *(5,4)*
20	**20**	**4**	**160**	**1,3**	**3,7** (11,4)	**2,3** (12,1)	**10,9** (16,5)	**5,4** (11,6)	**719** *(5,3)*
20	**20**	**4**	**180**	**1,3**	**2,7** (16,3)	**2,2** (13,0)	**4,0** (16,8)	**0,9** (17,7)	**699** *(3,6)*
20	**20**	**4**	**210**	**1,3**	**5,5** (18,0)	**3,5** (19,7)	**8,9** (10,7)	**2,4** (10,4)	**665** *(1,4)*
20	**20**	**8**	**20**	**2,7**	**10,4** (17,5)	**5,6** (16,6)	**7,4** (18,0)	**2,4** (11,0)	**743** *(5,4)*
20	**20**	**8**	**160**	**2,7**	**6,1** (12,5)	**3,4** (17,0)	**6,5** (19,7)	**2,6** (13,9)	**719** *(5,3)*
20	**20**	**8**	**180**	**2,7**	**7,4** (14,0)	**6,0** (10,0)	**11,2** (10,7)	**3,6** (18,0)	**699** *(3,6)*
20	**20**	**8**	**210**	**2,7**	**6,7** (16,6)	**5,2** (19,2)	**9,0** (18,4)	**5,1** (13,2)	**665** *(1,4)*
20	**20**	**11**	**20**	**3,7**	**10,5** (19,2)	**5,5** (11,4)	**10,2** (10,8)	**5,1** (10,5)	**743** *(5,4)*
20	**20**	**11**	**160**	**3,7**	**14,0** (19,2)	**8,0** (18,9)	**14,9** (10,1)	**2,5** (17,8)	**719** *(5,3)*
20	**20**	**11**	**180**	**3,7**	**8,4** (10,3)	**4,6** (18,3)	**11,7** (10,7)	**6,7** (17,1)	**699** *(3,6)*
20	**20**	**11**	**210**	**3,7**	**7,2** (13,3)	**4,0** (18,5)	**7,4** (15,1)	**1,9** (19,9)	**665** *(1,4)*
20	**25**	**4**	**20**	**1,3**	**5,6** (16,7)	**4,0** (19,0)	**5,6** (14,8)	**3,1** (18,7)	**743** *(5,4)*
20	**25**	**4**	**160**	**1,3**	**5,6** (12,0)	**4,9** (17,8)	**5,2** (13,0)	**1,4** (15,8)	**719** *(5,3)*
20	**25**	**4**	**180**	**1,3**	**5,1** (18,9)	**2,9** (19,8)	**3,7** (14,8)	**1,3** (15,9)	**699** *(3,6)*
20	**25**	**4**	**210**	**1,3**	**3,1** (16,0)	**3,2** (14,6)	**6,5** (12,6)	**2,1** (14,7)	**665** *(1,4)*
20	**25**	**8**	**20**	**2,7**	**6,4** (10,6)	**5,2** (14,5)	**8,2** (19,8)	**5,1** (15,9)	**743** *(5,4)*
20	**25**	**8**	**160**	**2,7**	**7,8** (19,4)	**4,2** (12,2)	**7,6** (14,4)	**1,5** (12,8)	**719** *(5,3)*
20	**25**	**8**	**180**	**2,7**	**5,2** (13,0)	**2,9** (15,9)	**6,6** (14,1)	**1,6** (17,8)	**699** *(3,6)*
20	**25**	**8**	**210**	**2,7**	**3,6** (20,0)	**3,0** (16,0)	**8,1** (17,4)	**2,1** (11,9)	**665** *(1,4)*

20	**25**	**11**	**20**	**3,7**	**5,7** (19,3)	**3,6** (20,0)	**9,1** (17,7)	**2,6** (12,5)	**743** *(5,4)*
20	**25**	**11**	**160**	**3,7**	**9,8** (13,5)	**5,3** (17,0)	**8,1** (17,5)	**1,7** (11,2)	**719** *(5,3)*
20	**25**	**11**	**180**	**3,7**	**7,2** (18,3)	**4,1** (12,5)	**9,5** (18,6)	**3,1** (16,8)	**699** *(3,6)*
20	**25**	**11**	**210**	**3,7**	**14,6** (13,2)	**5,6** (12,3)	**11,6** (18,9)	**4,9** (17,5)	**665** *(1,4)*
30	**15**	**4**	**20**	**0,9**	**3,3** (10,4)	**2,1** (11,2)	**5,4** (13,3)	**1,9** (18,1)	**743** *(5,4)*
30	**15**	**4**	**160**	**0,9**	**7,6** (19,6)	**4,5** (13,1)	**11,3** (16,5)	**2,5** (13,2)	**719** *(5,3)*
30	**15**	**4**	**180**	**0,9**	**4,7** (10,2)	**4,6** (13,9)	**7,1** (18,8)	**2,3** (14,8)	**699** *(3,6)*
30	**15**	**4**	**210**	**0,9**	**5,1** (17,2)	**3,6** (14,4)	**7,3** (19,9)	**1,8** (11,5)	**665** *(1,4)*
30	**15**	**8**	**20**	**1,8**	**5,7** (12,8)	**4,1** (10,9)	**5,8** (15,5)	**3,4** (17,2)	**743** *(5,4)*
30	**15**	**8**	**160**	**1,8**	**3,5** (13,5)	**2,7** (16,2)	**6,0** (10,1)	**1,5** (19,7)	**719** *(5,3)*
30	**15**	**8**	**180**	**1,8**	**4,1** (17,5)	**2,6** (16,5)	**6,7** (11,7)	**1,4** (17,3)	**699** *(3,6)*
30	**15**	**8**	**210**	**1,8**	**5,9** (16,7)	**5,1** (15,6)	**11,1** (13,6)	**5,1** (18,8)	**665** *(1,4)*
30	**15**	**11**	**20**	**2,4**	**5,5** (15,4)	**4,1** (10,2)	**7,1** (12,8)	**1,5** (14,9)	**743** *(5,4)*
30	**15**	**11**	**160**	**2,4**	**7,7** (11,1)	**4,2** (18,8)	**9,2** (13,0)	**4,4** (13,6)	**719** *(5,3)*
30	**15**	**11**	**180**	**2,4**	**6,0** (10,2)	**4,4** (10,9)	**7,4** (15,4)	**4,2** (15,1)	**699** *(3,6)*
30	**15**	**11**	**210**	**2,4**	**11,6** (14,8)	**7,6** (17,1)	**12,0** (19,8)	**6,5** (18,7)	**665** *(1,4)*
30	**20**	**4**	**20**	**0,9**	**4,1** (12,0)	**2,7** (16,4)	**5,4** (10,2)	**2,5** (14,0)	**743** *(5,4)*
30	**20**	**4**	**160**	**0,9**	**5,9** (14,3)	**3,8** (17,1)	**11,6** (13,7)	**4,5** (15,6)	**719** *(5,3)*
30	**20**	**4**	**180**	**0,9**	**5,5** (12,7)	**3,2** (18,0)	**3,7** (11,8)	**1,5** (15,8)	**699** *(3,6)*
30	**20**	**4**	**210**	**0,9**	**5,0** (13,5)	**2,6** (12,2)	**4,4** (16,0)	**2,4** (12,6)	**665** *(1,4)*
30	**20**	**8**	**20**	**1,8**	**4,6** (18,5)	**3,4** (13,5)	**8,0** (11,4)	**2,1** (18,6)	**743** *(5,4)*
30	**20**	**8**	**160**	**1,8**	**6,0** (17,1)	**2,6** (16,4)	**9,1** (11,9)	**4,3** (19,8)	**719** *(5,3)*
30	**20**	**8**	**180**	**1,8**	**3,9** (18,6)	**2,5** (12,0)	**7,1** (12,6)	**4,7** (10,4)	**699** *(3,6)*
30	**20**	**8**	**210**	**1,8**	**4,3** (11,0)	**3,0** (14,4)	**6,2** (17,8)	**1,8** (16,4)	**665** *(1,4)*
30	**20**	**11**	**20**	**2,4**	**6,4** (12,1)	**5,6** (15,0)	**8,9** (12,4)	**2,9** (11,8)	**743** *(5,4)*
30	**20**	**11**	**160**	**2,4**	**7,9** (19,5)	**4,2** (19,1)	**8,3** (12,2)	**8,5** (17,3)	**719** *(5,3)*
30	**20**	**11**	**180**	**2,4**	**6,2** (11,2)	**4,5** (16,7)	**5,0** (17,9)	**2,0** (16,6)	**699** *(3,6)*
30	**20**	**11**	**210**	**2,4**	**5,1** (18,9)	**4,0** (10,9)	**10,4** (13,9)	**2,2** (14,5)	**665** *(1,4)*
30	**25**	**4**	**20**	**0,9**	**4,6** (11,1)	**2,6** (11,2)	**4,3** (10,9)	**1,0** (15,2)	**743** *(5,4)*
30	**25**	**4**	**160**	**0,9**	**8,0** (17,8)	**3,9** (12,7)	**8,2** (18,6)	**1,9** (14,9)	**719** *(5,3)*
30	**25**	**4**	**180**	**0,9**	**7,5** (12,1)	**3,3** (13,0)	**5,9** (18,8)	**2,0** (11,4)	**699** *(3,6)*
30	**25**	**4**	**210**	**0,9**	**3,2** (11,3)	**2,3** (10,8)	**3,4** (13,9)	**0,9** (14,2)	**665** *(1,4)*
30	**25**	**8**	**20**	**1,8**	**14,5** (17,3)	**4,5** (16,0)	**12,7** (10,3)	**2,8** (16,8)	**743** *(5,4)*
30	**25**	**8**	**160**	**1,8**	**3,8** (12,6)	**2,4** (10,2)	**8,4** (13,4)	**2,1** (18,4)	**719** *(5,3)*
30	**25**	**8**	**180**	**1,8**	**5,7** (15,4)	**3,1** (15,9)	**7,8** (17,9)	**1,6** (12,5)	**699** *(3,6)*
30	**25**	**8**	**210**	**1,8**	**6,0** (13,4)	**4,3** (10,3)	**9,3** (11,9)	**2,9** (15,8)	**665** *(1,4)*
30	**25**	**11**	**20**	**2,4**	**5,6** (12,7)	**3,9** (10,6)	**7,8** (19,6)	**2,3** (11,2)	**743** *(5,4)*
30	**25**	**11**	**160**	**2,4**	**3,6** (19,0)	**2,4** (12,2)	**6,1** (14,0)	**1,1** (11,9)	**719** *(5,3)*

30	**25**	**11**	**180**	**2,4**	**9,7** (15,2)	**3,8** (13,2)	**8,2** (14,7)	**1,2** (12,2)	**699** *(3,6)*
30	**25**	**11**	**210**	**2,4**	**5,6** (11,8)	**5,0** (18,9)	**10,6** (17,1)	**2,3** (17,8)	**665** *(1,4)*
40	**15**	**4**	**20**	**0,7**	**4,1** (13,6)	**2,4** (19,3)	**5,4** (18,5)	**1,1** (19,3)	**743** *(5,4)*
40	**15**	**4**	**160**	**0,7**	**4,8** (15,9)	**2,4** (17,5)	**7,3** (12,6)	**1,5** (16,3)	**719** *(5,3)*
40	**15**	**4**	**180**	**0,7**	**4,7** (13,9)	**3,1** (12,5)	**5,7** (19,7)	**1,5** (16,5)	**699** *(3,6)*
40	**15**	**4**	**210**	**0,7**	**5,2** (11,1)	**3,8** (13,3)	**3,6** (1,3)	**1,6** (17,7)	**665** *(1,4)*
40	**15**	**8**	**20**	**1,3**	**6,0** (17,1)	**3,8** (10,3)	**6,5** (15,9)	**1,7** (15,1)	**743** *(5,4)*
40	**15**	**8**	**160**	**1,3**	**5,5** (10,5)	**3,3** (17,6)	**5,5** (16,8)	**2,1** (15,0)	**719** *(5,3)*
40	**15**	**8**	**180**	**1,3**	**3,5** (14,3)	**2,3** (12,9)	**7,3** (12,2)	**2,8** (15,4)	**699** *(3,6)*
40	**15**	**8**	**210**	**1,3**	**4,4** (14,6)	**3,9** (16,3)	**5,5** (18,4)	**2,0** (19,7)	**665** *(1,4)*
40	**15**	**11**	**20**	**1,8**	**3,9** (20,1)	**2,1** (16,6)	**7,4** (12,1)	**2,0** (19,2)	**743** *(5,4)*
40	**15**	**11**	**160**	**1,8**	**5,9** (18,2)	**3,4** (12,4)	**8,3** (15,9)	**5,3** (16,5)	**719** *(5,3)*
40	**15**	**11**	**180**	**1,8**	**5,2** (18,0)	**4,0** (12,7)	**4,7** (19,7)	**4,2** (10,1)	**699** *(3,6)*
40	**15**	**11**	**210**	**1,8**	**9,6** (15,4)	**3,4** (11,9)	**7,1** (14,2)	**2,3** (17,3)	**665** *(1,4)*
40	**20**	**4**	**20**	**0,7**	**5,8** (13,0)	**4,0** (17,9)	**8,3** (16,0)	**1,7** (12,2)	**743** *(5,4)*
40	**20**	**4**	**160**	**0,7**	**4,7** (13,1)	**3,2** (12,9)	**8,9** (17,9)	**5,2** (15,9)	**719** *(5,3)*
40	**20**	**4**	**180**	**0,7**	**5,0** (14,1)	**3,3** (14,3)	**3,8** (11,1)	**1,7** (10,4)	**699** *(3,6)*
40	**20**	**4**	**210**	**0,7**	**4,3** (12,7)	**4,0** (11,1)	**6,9** (19,5)	**2,9** (13,8)	**665** *(1,4)*
40	**20**	**8**	**20**	**1,3**	**6,9** (19,8)	**2,6** (14,4)	**6,8** (12,1)	**1,5** (18,3)	**743** *(5,4)*
40	**20**	**8**	**160**	**1,3**	**5,5** (18,7)	**3,1** (11,2)	**5,3** (14,6)	**2,0** (11,5)	**719** *(5,3)*
40	**20**	**8**	**180**	**1,3**	**4,7** (15,7)	**2,2** (12,8)	**4,2** (12,4)	**1,4** (10,2)	**699** *(3,6)*
40	**20**	**8**	**210**	**1,3**	**5,4** (17,3)	**3,4** (10,9)	**9,0** (18,4)	**5,1** (13,2)	**665** *(1,4)*
40	**20**	**11**	**20**	**1,8**	**5,4** (19,4)	**3,6** (10,0)	**6,1** (19,7)	**2,1** (18,5)	**743** *(5,4)*
40	**20**	**11**	**160**	**1,8**	**8,1** (19,8)	**4,1** (16,2)	**5,5** (17,2)	**1,3** (15,0)	**719** *(5,3)*
40	**20**	**11**	**180**	**1,8**	**8,6** (16,7)	**4,7** (13,4)	**12,2** (12,9)	**4,3** (11,3)	**699** *(3,6)*
40	**20**	**11**	**210**	**1,8**	**5,2** (11,5)	**3,5** (13,1)	**6,1** (19,7)	**2,1** (18,5)	**665** *(1,4)*
40	**25**	**4**	**20**	**0,7**	**4,2** (14,1)	**3,0** (16,2)	**4,3** (10,9)	**1,0** (15,2)	**743** *(5,4)*
40	**25**	**4**	**160**	**0,7**	**3,5** (14,9)	**2,6** (11,1)	**6,6** (13,6)	**2,6** (14,0)	**719** *(5,3)*
40	**25**	**4**	**180**	**0,7**	**7,5** (18,0)	**2,9** (18,9)	**5,0** (10,6)	**2,4** (19,9)	**699** *(3,6)*
40	**25**	**4**	**210**	**0,7**	**5,7** (19,1)	**3,0** (16,1)	**7,4** (16,5)	**5,3** (14,8)	**665** *(1,4)*
40	**25**	**8**	**20**	**1,3**	**4,7** (19,1)	**2,8** (17,6)	**12,2** (16,0)	**3,0** (18,0)	**743** *(5,4)*
40	**25**	**8**	**160**	**1,3**	**7,2** (10,7)	**2,9** (17,9)	**5,1** (18,6)	**1,3** (11,3)	**719** *(5,3)*
40	**25**	**8**	**180**	**1,3**	**6,3** (15,3)	**2,7** (10,4)	**4,4** (15,8)	**1,2** (13,4)	**699** *(3,6)*
40	**25**	**8**	**210**	**1,3**	**7,6** (10,0)	**5,0** (14,7)	**10,3** (19,0)	**6,1** (13,7)	**665** *(1,4)*
40	**25**	**11**	**20**	**1,8**	**5,1** (17,7)	**3,6** (18,1)	**8,0** (16,8)	**2,3** (10,0)	**743** *(5,4)*
40	**25**	**11**	**160**	**1,8**	**7,6** (17,6)	**3,1** (14,1)	**10,1** (12,0)	**1,8** (17,3)	**719** *(5,3)*
40	**25**	**11**	**180**	**1,8**	**8,8** (11,8)	**4,5** (14,6)	**5,5** (11,9)	**2,4** (14,0)	**699** *(3,6)*
40	**25**	**11**	**210**	**1,8**	**7,3** (12,0)	**3,8** (18,8)	**7,8** (12,3)	**4,0** (11,2)	**665** *(1,4)*

Tab. 43. Optimální nastavení technických parametrů frézování z hlediska drsnosti, vlnitosti a spotřeby elektrické energie, smrk ztepilý

Pořadí	Řezná rychlost (m/s)	Úhel čela (°)	Posuvná rychlost (m/min)	Teplota (°C)	Posuv na zub (mm)	Wa (µm) Průměr	Ra (µm) Průměr	Spotřeba elektrické energie (W) Průměr
1	20	25	4	20	1,3	3	3	385
2	20	20	4	210	1,3	3	3	405
3	20	20	4	180	1,3	4	3	423
4	30	20	4	180	0,9	4	3	523
5	20	15	4	210	1,3	3	4	600
6	30	20	8	20	1,8	4	3	570
7	30	25	4	160	0,9	5	3	510
8	20	15	4	20	1,3	3	4	641
9	20	15	4	180	1,3	4	3	620
10	20	15	11	210	3,7	4	4	605
11	30	25	8	20	1,8	5	3	513
12	30	20	4	160	0,9	4	3	536
13	30	25	4	180	0,9	4	4	505
14	40	25	4	210	0,7	3	3	1138
15	20	20	4	20	1,3	5	4	444
16	40	25	4	160	0,7	3	3	1183
17	30	25	8	210	1,8	5	4	485
18	30	20	11	210	2,4	4	4	555
19	40	25	4	180	0,7	3	3	1172
20	20	15	8	180	2,7	4	4	633
21	40	25	4	20	0,7	4	3	1237
22	30	20	8	180	1,8	4	4	533
23	30	20	4	210	0,9	6	3	516
24	30	20	8	210	1,8	4	5	523
25	30	20	4	20	0,9	5	3	559
26	30	20	11	180	2,4	4	5	537
27	20	25	4	180	1,3	4	5	365
28	20	20	11	160	3,7	6	4	437
29	20	25	11	210	3,7	5	5	365
30	20	20	8	210	2,7	5	5	405
31	20	25	8	160	2,7	5	5	358
32	30	20	11	160	2,4	5	5	540
33	40	15	11	210	1,8	4	4	1353
34	20	15	8	20	2,7	4	5	648
35	40	20	4	180	0,7	3	4	1208
36	20	20	4	160	1,3	5	5	424
37	40	20	4	20	0,7	4	4	1288

38	40	20	11	210	1,8	4	4	1355
39	20	15	8	160	2,7	5	4	640
40	20	25	11	180	3,7	6	5	353
41	20	15	4	160	1,3	4	5	636
42	20	20	8	160	2,7	5	5	513
43	30	20	11	20	2,4	5	5	557
44	40	20	11	160	1,8	4	4	1400
45	40	25	8	210	1,3	5	4	1040
46	20	25	8	20	2,7	8	4	377
47	30	20	8	160	1,8	6	5	523
48	30	15	8	160	1,8	4	5	767
49	30	25	8	160	1,8	6	5	505
50	40	20	4	160	0,7	4	5	1227
51	40	20	8	20	1,3	5	4	1353
52	30	25	11	20	2,4	6	5	530
53	40	20	8	160	1,3	4	4	1303
54	20	15	8	210	2,7	5	5	613
55	30	15	4	180	0,9	5	5	648
56	30	25	11	180	2,4	6	5	493
57	40	15	4	160	0,7	5	4	1497
58	20	25	4	160	1,3	8	5	367
59	20	25	8	210	2,7	8	5	345
60	40	15	11	180	1,8	5	4	1383
61	30	15	4	210	0,9	5	5	671
62	40	25	11	180	1,8	6	4	1043
63	20	25	11	160	3,7	8	5	357
64	40	15	8	20	1,3	4	5	1383
65	40	25	8	20	1,3	7	4	1100
66	30	15	8	180	1,8	6	5	753
67	40	15	11	160	1,8	5	4	1430
68	40	20	11	180	1,8	5	4	1367
69	20	15	11	20	3,7	6	5	620
70	20	20	11	20	3,7	7	5	443
71	40	15	4	20	0,7	6	4	1517
72	40	25	11	20	1,8	6	5	1067
73	30	15	11	210	2,4	5	6	730
74	20	20	11	180	3,7	7	6	437
75	30	25	4	20	0,9	7	5	534
76	40	15	8	160	1,3	6	4	1380
77	30	25	8	180	1,8	6	6	517
78	20	25	11	20	3,7	8	6	373
79	40	15	4	180	0,7	6	4	1437
80	40	25	8	160	1,3	7	4	1113
81	20	15	11	160	3,7	6	6	610

82	20	25	8	180	2,7	9	6	373
83	30	15	4	160	0,9	6	5	668
84	20	20	8	20	2,7	7	7	440
85	30	15	11	160	2,4	10	4	765
86	20	25	4	210	1,3	18	7	356
87	30	25	11	160	2,4	7	6	507
88	20	15	11	180	3,7	6	5	645
89	20	20	8	180	2,7	13	6	437
90	30	25	4	210	0,9	16	6	502
91	20	20	11	210	3,7	14	11	425
92	40	20	8	210	1,3	8	5	1208
93	30	15	8	210	1,8	7	5	730
94	40	20	4	210	0,7	8	5	1172
95	30	15	8	20	1,8	6	5	775
96	40	20	8	180	1,3	8	5	1303
97	40	25	11	160	1,8	11	5	1047
98	30	25	11	210	2,4	13	7	505
99	40	15	8	210	1,3	6	5	1343
100	40	15	4	210	0,7	7	5	1377
101	30	15	4	20	0,9	7	6	651
102	30	15	11	20	2,4	7	6	767
103	30	15	11	180	2,4	7	7	765
104	40	20	11	20	1,8	6	5	1410
105	40	25	8	180	1,3	7	6	1080
106	40	15	8	180	1,3	8	5	1338
107	40	15	11	20	1,8	6	6	1440
108	40	25	11	210	1,8	21	9	1027

- 10 optimálních nastavení frézování

- 10 nejhorších nastavení frézování

Tab. 44. Optimálních nastavení technických parametrů frézování z hlediska drsnosti, vlnitosti a spotřeby elektrické energie, dub letní

Pořadí	Řezná rychlost (m/s)	Úhel čela (°)	Posuvná rychlost (m/min)	Teplota (°C)	Posuv na zub (mm)	Wa (µm) Průměr	Ra (µm) Průměr	Spotřeba elektrické energie (W) Průměr
1	20	20°	4	180 °C	1,3	3	2	442
2	20	20°	4	160 °C	1,3	4	2	453
3	20	25°	8	210 °C	2,7	4	3	367
4	30	25°	4	210 °C	0,9	3	2	554
5	20	25°	4	210 °C	1,3	3	3	377
6	20	20°	4	20 °C	1,3	4	3	488
7	30	25°	8	160 °C	1,8	4	2	568
8	30	25°	11	160 °C	2,4	4	2	590
9	20	25°	4	180 °C	1,3	5	3	382
10	20	25°	8	180 °C	2,7	5	3	375
11	30	15°	4	20 °C	0,9	3	2	808
12	30	20°	8	180 °C	1,8	4	3	625
13	30	20°	4	210 °C	0,9	5	3	550
14	30	20°	4	20 °C	0,9	4	3	650
15	30	25°	4	20 °C	0,9	5	3	626
16	40	25°	4	160 °C	0,7	3	3	1059
17	30	20°	8	210 °C	1,8	4	3	643
18	30	15°	8	160 °C	1,8	3	3	843
19	30	15°	8	180 °C	1,8	4	3	798
20	20	15°	4	180 °C	1,3	5	3	663
21	30	20°	8	20 °C	1,8	5	3	588
22	40	15°	8	180 °C	1,3	4	2	1450
23	20	20°	4	210 °C	1,3	5	4	450
24	30	20°	4	180 °C	0,9	5	3	545
25	40	20°	8	180 °C	1,3	5	2	1220
26	30	20°	8	160 °C	1,8	6	3	580
27	30	25°	8	180 °C	1,8	6	3	547
28	20	25°	11	20 °C	3,7	6	4	420
29	40	15°	11	20 °C	1,8	4	2	1830
30	40	25°	4	20 °C	0,7	4	3	1130
31	20	25°	4	20 °C	1,3	6	4	410
32	30	20°	11	210 °C	2,4	5	4	557
33	40	15°	4	20 °C	0,7	4	2	1738
34	20	20°	8	160 °C	2,7	6	3	483
35	20	15°	4	20 °C	1,3	4	4	737
36	30	15°	4	210 °C	0,9	5	4	647
37	40	25°	8	20 °C	1,3	5	3	1230
38	40	15°	4	160 °C	0,7	5	2	1624

39	20	25°	4	160 °C	1,3	6	5	384
40	30	25°	4	180 °C	0,9	7	3	561
41	30	25°	11	20 °C	2,4	6	4	613
42	20	25°	11	180 °C	3,7	7	4	390
43	30	20°	4	160 °C	0,9	6	4	563
44	40	20°	4	160 °C	0,7	5	3	1273
45	40	20°	4	180 °C	0,7	5	3	1273
46	40	15°	4	180 °C	0,7	5	3	1603
47	40	25°	11	20 °C	1,8	5	4	1183
48	30	25°	8	210 °C	1,8	6	4	535
49	40	20°	8	160 °C	1,3	5	3	1267
50	30	15°	4	180 °C	0,9	5	5	684
51	30	25°	11	210 °C	2,4	6	5	550
52	40	25°	8	180 °C	1,3	6	3	1160
53	20	25°	8	160 °C	2,7	8	4	407
54	20	15°	11	180 °C	3,7	6	4	673
55	40	25°	4	210 °C	0,7	6	3	1223
56	40	20°	4	210 °C	0,7	4	4	1238
57	20	25°	8	20 °C	2,7	6	5	423
58	40	20°	8	210 °C	1,3	5	3	1338
59	40	20°	8	20 °C	1,3	7	3	1317
60	40	15°	8	210 °C	1,3	4	4	1453
61	40	15°	8	160 °C	1,3	5	3	1503
62	20	20°	8	210 °C	2,7	7	5	463
63	40	20°	11	210 °C	1,8	5	4	1460
64	20	15°	8	20 °C	2,7	6	4	723
65	40	25°	4	180 °C	0,7	8	3	1208
66	30	20°	11	180 °C	2,4	6	4	563
67	30	25°	11	180 °C	2,4	10	4	557
68	40	25°	8	160 °C	1,3	7	3	1230
69	30	25°	4	160 °C	0,9	8	4	578
70	40	25°	11	160 °C	1,8	8	3	1157
71	20	20°	11	180 °C	3,7	8	5	460
72	30	15°	11	20 °C	2,4	6	4	905
73	30	15°	8	20 °C	1,8	6	4	885
74	40	15°	4	210 °C	0,7	5	4	1510
75	20	20°	8	180 °C	2,7	7	6	455
76	20	15°	8	160 °C	2,7	8	4	690
77	20	20°	11	210 °C	3,7	7	6	460
78	20	25°	11	160 °C	3,7	10	5	387
79	40	20°	11	20 °C	1,8	5	4	1620
80	40	15°	11	180 °C	1,8	5	4	1480
81	30	20°	11	160 °C	2,4	8	4	610
82	40	15°	11	160 °C	1,8	6	3	1607
83	40	25°	11	210 °C	1,8	7	4	1087

84	30	15°	11	180 °C	2,4	6	4	817
85	20	25°	11	210 °C	3,7	15	6	390
86	40	20°	4	20 °C	0,7	6	4	1338
87	30	15°	8	210 °C	1,8	6	5	817
88	30	15°	4	160 °C	0,9	8	4	673
89	20	20°	11	20 °C	3,7	11	6	515
90	40	15°	8	20 °C	1,3	6	4	1560
91	20	20°	8	20 °C	2,7	10	6	507
92	30	25°	8	20 °C	1,8	15	4	583
93	20	15°	4	160 °C	1,3	10	4	672
94	30	20°	11	20 °C	2,4	6	6	690
95	30	15°	11	160 °C	2,4	8	4	840
96	20	15°	4	210 °C	1,3	9	5	672
97	20	20°	11	160 °C	3,7	14	8	495
98	20	15°	11	160 °C	3,7	8	6	653
99	40	15°	11	210 °C	1,8	10	3	1510
100	20	15°	8	210 °C	2,7	10	5	635
101	40	25°	8	210 °C	1,3	8	5	1117
102	20	15°	11	210 °C	3,7	9	6	660
103	40	25°	11	180 °C	1,8	9	4	1110
104	20	15°	8	180 °C	2,7	9	6	690
105	40	20°	11	160 °C	1,8	8	4	1535
106	20	15°	11	20 °C	3,7	12	6	790
107	30	15°	11	210 °C	2,4	12	8	815
108	40	20°	11	180 °C	1,8	9	5	1510

- 10 optimálních nastavení frézování

- 10 nejhorších nastavení frézování