



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

KONTINUÁLNÍ ODVALOVACÍ BROUŠENÍ ČELNÍHO OZUBENÍ

CONTINUOUS GENERATING SPUR GEAR GRINDING

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. Štěpán JERMOLAJEV

VEDOUcí PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. Jaroslav PROKOP, CSc.

BRNO 2013

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Štěpán Jermolajev

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Strojírenská technologie (2303T002)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Kontinuální odvalovací broušení čelního ozubení

v anglickém jazyce:

Continuos generating spur gear grinding

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Technologická analýza kontinuálního odvalovacího broušení čelního ozubení, kinematika, technologické podmínky, nástroje, stroje. Dosahované parametry přesnosti broušícího procesu.

Cíle diplomové práce:

1. Konstrukční a technologická charakteristika čelního ozubení
2. Metody broušení čelního ozubení
3. Broušení čelního ozubení metodou Reishauer
4. Technologické podmínky kontinuálního odvalovacího broušení čelního ozubení
5. Dosahované parametry přesnosti broušení čelního ozubení metodou Reishauer

Seznam odborné literatury:

1. CADISCH,J. REISHAUER AG: Endbearbeitung verfahren für Aussenstirnverzahnungen. 1.Ausg. Wallisellen, Schweiz. 2002. 52 s.
2. FOREJT,M. a PÍŠKA,M.: Teorie obrábění, tváření a nástroje. 1.vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. 2006. 226 s. ISBN 80-214-2374-9.
3. KOČMAN,K. a PROKOP,J. Technologie obrábění. 2.vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. 2005. 270 s. ISBN 80-214-1996-2.
4. KŘÍŽ,R. a VÁVRA,P. Strojírenská příručka 7.svazek. 1.vyd. Praha: Scientia, spol. s r.o. 1996. 212 s. ISBN 80-7183-024-0.
5. MÁDL,J. a kol.: Jakost obráběných povrchů. 1.vyd. Ústí nad Labem: UJEP. 2003.180 s. ISBN 80-7044-639-4.
5. MRKVICA,I.: Speciální technologie-Výroba ozubených kol II. VŠB – TU Ostrava. 1.vyd. 2009.118 s. ISBN 78-80-248-2134-4.
6. PÍŠKA,M. a kol.: Speciální technologie obrábění. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Akademické nakladatelství CERM s.r.o. Brno. 2009.252 s. ISBN 978-80-214-4025-8.
7. REISHAUER AG.: Reishauer – Fibel. Verzahnungsschleifen und Honen.2.Ausg. Wallisellen,Schweiz. 2001. 109 s.

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Jaroslav Prokop, CSc.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/2013.

V Brně, dne 26.10.2012

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá obecnou identifikací technologie kontinuálního odvalovacího broušení čelního ozubení. V souvislosti s touto technologií jsou zkoumány vlastnosti používaných brousících nástrojů a strojů. Podrobně se analyzují základní technologické parametry brousícího procesu a jejich vliv na integritu povrchu boků zubů. Za účelem ověření popisovaných zákonitostí je práce doplněna výsledky praktických experimentů.

Klíčová slova

Broušení čelního ozubení, brousící šneky na čelní ozubení, brousící stroje na čelní ozubení, technologické parametry brousícího procesu, integrita povrchu boků zubů, Barkhausenovy šumy.

ABSTRACT

The diploma thesis deals with the technology of continuous generating spur gear grinding. With reference to this technology, used grinding wheels and grinding machines are described. A detailed analysis is devoted to the technological parameters of the grinding process and their influence on the resultant tooth flank surface integrity. In order to verify described rules, the diploma thesis contains results of practical experiments as well.

Key words

Continuous generating gear grinding, cylindrical gear grinding worms, cylindrical gear grinding machines, technological parameters of the cylindrical gear grinding process, tooth flank surface integrity, Barkhausen effect.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

JERMOLAJEV, Štěpán, Bc. *Kontinuální odvalovací broušení čelního ozubení*. Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, 2013. 106 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jaroslav Prokop, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Kontinuální odvalovací broušení čelního ozubení** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Bc. Štěpán Jermolajev

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto vedoucímu diplomové práce, panu doc. Ing. Jaroslavu Prokopovi, CSc., za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce.

Děkuji panu prof. Ing. Bohumilu Bumbálkovi, CSc. za pomoc při plánování měření ozubení metodou detekce Barkhausenova šumu.

Poděkování patří panu Ing. Petru Římákovi za pomoc a trpělivost při realizaci experimentální části diplomové práce.

Děkuji také panu Ing. Jaroslavu Skopalovi, CSc. za pomoc a spolupráci v oblasti geometrie brousicích šneků.

Děkuji panu RNDr. Jiřímu Malcovi za pomoc v oblasti vyhodnocování naměřených hodnot v experimentální části diplomové práce.

Děkuji panu Ing. Josefu Bednářovi, PhD. za pomoc při zpracování regresního modelu na základě naměřených hodnot v experimentální části diplomové práce.

Děkuji panu Ing. Josefu Mikuláškovvi za spolupráci při přípravě brousicích šneků pro realizaci experimentální části diplomové práce.

OBSAH

ABSTRAKT	4
PROHLÁŠENÍ.....	5
PODĚKOVÁNÍ	6
OBSAH.....	7
ÚVOD.....	9
1 KONSTRUKČNÍ A TECHNOLOGICKÁ CHARAKTERISTIKA ČELNÍHO OZUBENÍ.....	11
1.1 Parametry čelního ozubení.....	11
1.1.1 Čelní ozubení s přímými zuby	11
1.1.2 Čelní ozubení se šikmými zuby	13
1.2 Modifikace čelního ozubení.....	17
2 METODY BROUŠENÍ ČELNÍHO OZUBENÍ	19
2.1 Metody odvalovacího broušení.....	19
2.1.1 Diskontinuální odvalovací broušení	19
2.1.2 Kontinuální odvalovací broušení	20
2.2 Metody profilového broušení.....	20
2.2.1 Diskontinuální profilové broušení	20
2.2.2 Kontinuální profilové broušení	20
2.3 Srovnání metod broušení čelního ozubení.....	21
3 BROUŠENÍ ČELNÍHO OZUBENÍ METODOU REISHAUER.....	23
3.1 Kinematika broušícího procesu	23
3.1.1 Broušení s přerušovaným tangenciálním posuvem	28
3.1.2 Broušení s plynulým tangenciálním posuvem.....	29
3.1.3 Diagonální broušení	31
3.1.4 Převodový poměr	33
3.2 Broušící šneky a jejich vlastnosti.....	33
3.2.1 Broušící zrna a jeho druhy	34
3.2.2 Pojivo broušících šneků	38
3.2.3 Póry.....	39
3.2.4 Zkoušení broušících šneků.....	39
3.2.5 Parametry broušících šneků	40
3.2.6 Orovnávání broušících šneků.....	43

3.2.7 Vyvažování brousicích šneků	45
3.3 Odvalovací brusky	47
4 TECHNOLOGICKÉ PODMÍNKY KONTINUÁLNÍHO ODVALOVACÍHO BROUŠENÍ ČELNÍHO OZUBENÍ	49
4.1 Základní pojmy	49
4.2 Pohyby a rychlosti	50
4.3 Veličiny záběru brousicího šneku	53
4.4 Úběr materiálu obrobku a opotřebení brousicího šneku	56
4.5 Veličiny síly a výkonu	59
4.6 Rozsah používaných řezných podmínek	61
5 DOSAHOVANÉ PARAMETRY PŘESNOSTI BROUŠENÍ ČELNÍHO OZUBENÍ METODOU REISHAUER	62
5.1 Specifikace	62
5.2 Geometrická přesnost čelního ozubení	62
5.3 Textura povrchu ozubení	63
5.4 Vlastnosti povrchové vrstvy	64
5.4.1 Experimentální ověření vlivu vybraných řezných podmínek brousicího procesu na výslednou hodnotu <i>MP</i>	68
ZÁVĚR	93
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	95
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	100
SEZNAM PŘÍLOH	107

ÚVOD

Výroba čelního ozubení doznala v posledních letech v souvislosti s širším nasazením CNC obráběcích strojů značných změn. Důsledkem těchto změn je rozšíření výrobních možností, které v minulosti z hlediska dosažitelné kvality obrobené plochy pro technologie výroby čelního ozubení představovaly značné omezení. Tento současný vývoj odpovídá stále přísnějším měřítkům kladeným na funkční vlastnosti ozubení.

Značná důležitost se příkládá počáteční rozvaze, která předchází volbě vhodného způsobu výroby navrženého ozubení. Cílem této rozvahy je zároveň v co největší míře uspokojit dva protichůdné požadavky – na jedné straně vysoká životnost a kvalita výrobku, na druhé straně minimální náklady na jeho výrobu.

Volba technologie výroby čelního ozubení vychází z následujících základních požadavků kladených na čelní ozubení [1, 2]:

- vynikající únosnost a účinnost ozubeného soukolí,
- klidný, plynulý a tichý chod ozubeného převodu,
- snadný a produktivní způsob výroby, kontroly a montáže.

Tyto požadavky lze v menší či větší míře uspokojit řadou výrobních metod. Nejpoužívanější třískové metody výroby čelního ozubení s rozdělením na hrubovací a dokončovací jsou uvedeny v tab. 1.

Tab. 1 Přehled třískových metod výroby čelního ozubení [3, 4].

Přehled třískových metod výroby čelního ozubení	
Hrubování	Dokončování
Frézování: a) dělicím způsobem b) odvalovacím způsobem	Loupací odvalovací frézování
Obrázení: a) kotoučovým nožem b) hřebenovým nožem	Tvrdé loupání
Protahování	Broušení: a) odvalovací (kontinuální, diskontinuální) b) profilové (kontinuální, diskontinuální)
	Ševingování: a) příčné b) diagonální c) zapichovací d) podélné e) diagonálně příčné f) tangenciální
	Honování
	Lapování

Jak uvádí [3, 5], mezi dokončovacími technologiemi výroby čelního ozubení jednoznačně převažuje dokončovací obrábění funkčních ploch ozubení následně po závěrečném

tepelném zpracování, tedy tzv. tvrdé obrábění. Dochází tak k eliminaci nepříznivých jevů nastávajících v důsledku tepelného zpracování (deformace tvaru a změna rozměrů čelního ozubení).

Vysokou míru univerzality s ohledem na požadavky kladené na čelní ozubení mezi dokončovacími metodami vykazuje technologie broušení. V souladu s průzkumem zohledňujícím praktické zkušenosti firmy Reishauer AG [1] lze převažující část výrobního sortimentu čelních ozubených kol rozdělit s uvážením sériovosti výroby a požadavků na flexibilitu broušícího nástroje do dvou základních skupin:

- čelní ozubená kola vyráběná velkosériově a hromadně (např. pro výrobu převodovek osobních a nákladních automobilů), v případě kterých se s výhodou používá jednoúčelový broušící nástroj tvarově odpovídající konkrétnímu hotovenému ozubenému kolu. Vysoká pořizovací cena broušícího nástroje je vyvážena počtem vyráběných kusů. Charakteristickou dokončovací technologií v této skupině je *kontinuální profilové broušení*;
- čelní ozubená kola vyráběná malosériově a středněsériově (např. pro letecký průmysl, větrné elektrárny), v jejichž případě se vyžaduje flexibilní broušící nástroj. Charakteristickou dokončovací technologií v této skupině je *kontinuální odvalovací broušení*.

Tato diplomová práce si klade za cíl poskytnout stručnou charakteristiku technologie kontinuálního odvalovacího broušení čelního ozubení s uvážením evolventní geometrie.

Předmět zkoumání této diplomové práce představuje čelní ozubení s přímými a šikmými zuby. Stručně jsou nastíněna i některá specifika při broušení modifikovaného čelního ozubení. Pozornost není kladena na broušení vnitřního ozubení, stejně jako na broušení neevolventního ozubení. Zanedbává se rovněž vliv korekcí čelního ozubení.

1 KONSTRUKČNÍ A TECHNOLOGICKÁ CHARAKTERISTIKA ČELNÍHO OZUBENÍ

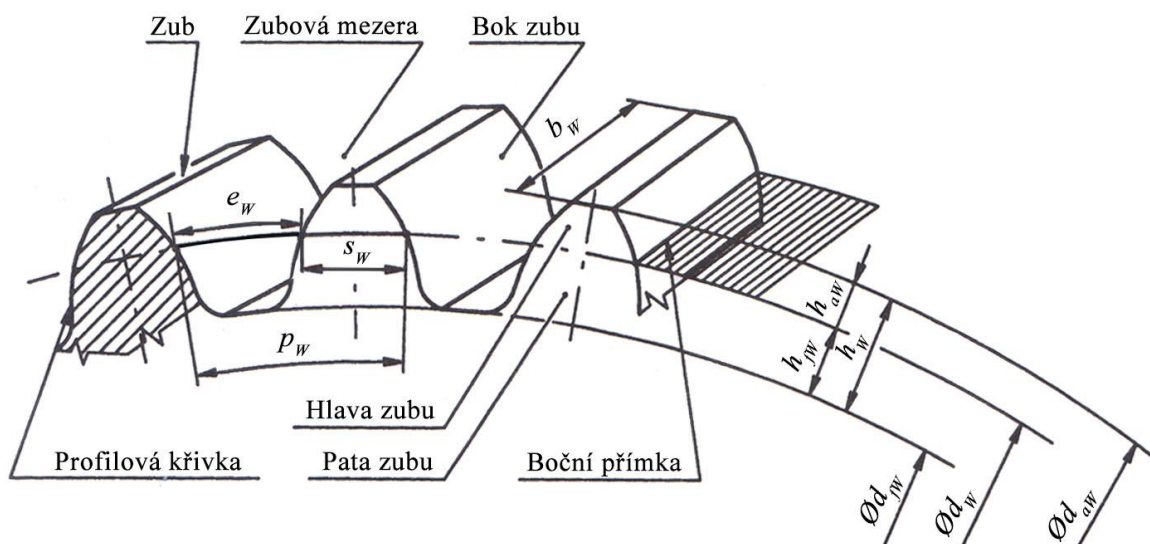
V následujícím textu je sestaven výčet základních parametrů čelního ozubení. Za účelem odlišení parametrů čelního ozubení a parametrů brousícího nástroje se v rámci této diplomové práce parametrům čelního ozubení přiřadí index W, parametrům brousícího nástroje index S.

1.1 Parametry čelního ozubení

Základní pojmy charakterizující čelní ozubení vychází z aktuálně dosud platné normy ČSN 01 4602-2 [6]. Podle informací uvedených v [7] bude tato norma v budoucnosti nahrazena odpovídající mezinárodní normou ISO.

1.1.1 Čelní ozubení s přímými zuby

Základní parametry používané v souvislosti s čelním ozubením s přímými zuby jsou znázorněny na obr. 1.1.



Obr. 1.1 Základní parametry čelního ozubení s přímými zuby [8].

p_w [mm] – rozteč, e_w [mm] – šířka zubové mezery, s_w [mm] – tloušťka zubu, b_w [mm] – šířka ozubení, h_{a_w} [mm] – výška hlavy zubu, h_{f_w} [mm] – výška paty zubu, h_w [mm] – výška zubu, d_{a_w} [mm] – hlavový průměr, d_{f_w} [mm] – patní průměr, d_w [mm] – roztečný průměr.

Modul m_w [mm]

Modul ozubení je podle normy ČSN 01 4602-2 shodný s modulem základního hřebene s přímými zuby.

Roztečný průměr d_w [mm]

Pro ozubení s přímými zuby o počtu zubů z_w a modulu m_w platí základní vztah (1.1).

$$d_w = m_w \cdot z_w \quad (1.1)$$

kde: d_w [mm] - roztečný průměr,
 m_w [mm] - modul,
 z_w [-] - počet zubů.

Hlavový průměr d_{aW} [mm]

Hlavový průměr d_{aW} lze stanovit podle vzorce (1.2).

$$d_{aW} = d_W + 2 \cdot h_{aW} \quad (1.2)$$

kde: d_{aW} [mm] - hlavový průměr,
 d_W [mm] - roztečný průměr,
 h_{aW} [mm] - výška hlavy zuby.

Patní průměr d_{fW} [mm]

Patní průměr d_{fW} se stanoví na základě vztahu (1.3).

$$d_{fW} = d_W - 2 \cdot h_{fW} \quad (1.3)$$

kde: d_{fW} [mm] - patní průměr,
 d_W [mm] - roztečný průměr,
 h_{fW} [mm] - výška paty zuby.

Výška zuby h_W [mm]

Výška zuby h_W se definuje jako radiální vzdálenost mezi jeho hlavovým a patním válcem. Výška zuby h_W je podle výrazu (1.4) dána součtem výšky hlavy zuby h_{aW} a výšky paty zuby h_{fW} .

$$h_W = h_{aW} + h_{fW} \quad (1.4)$$

kde: h_W [mm] - výška zuby,
 h_{aW} [mm] - výška hlavy zuby,
 h_{fW} [mm] - výška paty zuby.

Výška hlavy zuby h_{aW} [mm]

Výška hlavy zuby h_{aW} je dána radiální vzdáleností mezi hlavovým a roztečným válcem ozubení. Zpravidla se rovná modulu m_W , jak plyne z rovnosti (1.5).

$$h_{aW} = m_W \quad (1.5)$$

kde: h_{aW} [mm] - výška hlavy zuby,
 m_W [mm] - modul.

Výška paty zuby h_{fW} [mm]

Výška paty zuby h_{fW} se určí podle vztahu (1.6) jako radiální vzdálenost mezi roztečným a patním válcem ozubení. Lze ji stanovit pomocí modulu m_W zvětšeného o příslušnou hodnotu hlavové vůle sdružených základních profilů c_W (dále jen krátce „hlavové vůle“).

$$h_{fW} = m_W + c_W \quad (1.6)$$

kde: h_{fW} [mm] - výška paty zuby,
 m_W [mm] - modul,
 c_W [mm] - hlavová vůle.

Pro hlavovou vůli zpravidla platí $c_W = 0,25 m_W$.

Šířka ozubení b_w [mm]

Šířkou ozubení se rozumí největší vzdálenost mezi čelními plochami zubů měřená na přímce rovnoběžné s osou ozubení.

Rozteč p_w [mm]

Norma ČSN 01 4602-2 [6] definuje rozteč jako vzdálenost mezi stejnolehlými boky sousedních zubů na roztečném válci ozubení. Rozteč je spjata s modulem ozubení podle vztahu (1.7).

$$m_w = \frac{p_w}{\pi} \quad (1.7)$$

kde: m_w [mm] - modul,
 p_w [mm] - rozteč.

Tloušťka zubu s_w [mm]

Tloušťka zubu s_w je charakterizována jako vzdálenost mezi protilehlými sousedními boky zubu na roztečném válci ozubení.

Šířka zubové mezery e_w [mm]

Šířka zubové mezery e_w se definuje obdobným způsobem jako tloušťka zubu s_w . Jde o vzdálenost mezi nejbližšími protilehlými boky zubů na roztečném válci ozubení.

Jak je patrné z obr. 1.1, rozteč p_w lze získat jako součet tloušťky zubu s_w a šířky zubové mezery e_w . Hodnoty s_w a e_w lze považovat za totožné s výjimkou nástrojů pro výrobu ozubení. Zejména v případech hrubovacích operací je nutno zvětšit šířku zubové mezery na úkor tloušťky zubu, aby na bocích zubu vznikl požadovaný přídavek pro dokončení ozubení.

Úhel záběru α_w [°]

Úhel záběru α_w je charakterizován jako ostrý úhel mezi přímkou záběru (resp. křivkou záběru pro modifikované boky zubů) a přímkou kolmou ke spojnici středů dvou spoluzabírajících ozubení. Úhel záběru ozubení α_w má v systému norem ČSN normalizovanou hodnotu 20°.

Průměr základního válce d_{bw} [mm]

Průměr základního válce d_{bw} se získá z roztečného průměru ozubení a úhlu záběru podle vztahu (1.8).

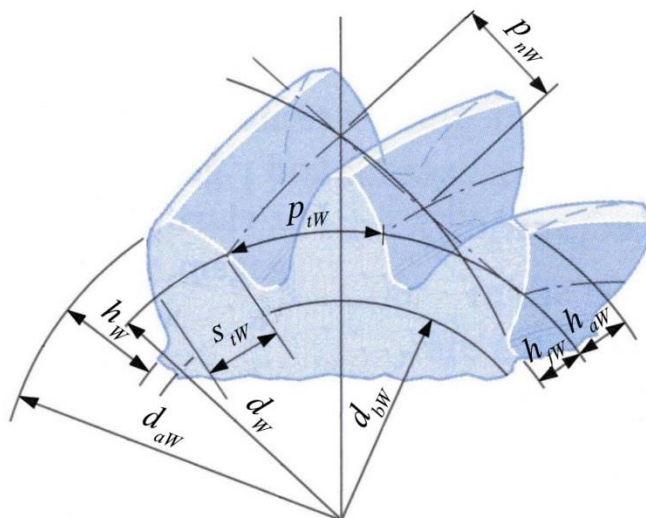
$$d_{bw} = d_w \cdot \cos \alpha_w \quad (1.8)$$

kde: d_{bw} [mm] - průměr základního válce,
 d_w [mm] - roztečný průměr,
 α_w [°] - úhel záběru.

1.1.2 Čelní ozubení se šikmými zuby

V souladu s normou ČSN 01 4602-2 jsou zavedeny indexy příslušné jednotlivým rovinám ozubení se šikmými zuby, přičemž čelní rovině se přiřazuje index t , normální rovině index n a osové rovině index x .

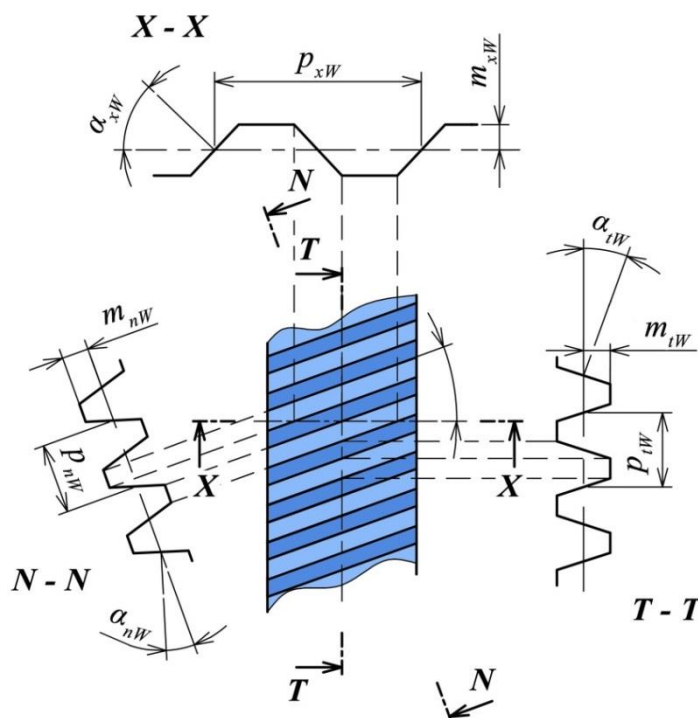
Základní parametry čelního ozubení se šikmými zuby znázorňuje obr. 1.2.



Obr. 1.2 Základní parametry čelního ozubení se šikmými zuby [9].

p_{tW} [mm] – čelní rozteč, p_{nW} [mm] – normální rozteč, s_{tW} [mm] – tloušťka zubu v čelní rovině, h_{aW} [mm] – výška hlavy zubu, h_{tW} [mm] – výška paty zubu, h_W [mm] – výška zubu, d_{aW} [mm] – hlavový průměr, d_W [mm] – roztečný průměr, d_{bW} [mm] – průměr základního válce.

Jako výchozí teoretický model čelního ozubení je často využíván základní hřeben. Parametry základního hřebene se šikmými zuby (dále jen „základního hřebene“) jsou znázorněny na obr. 1.3.



Obr. 1.3 Parametry základního hřebene.

α_{tW} [°] – čelní úhel záběru, α_{nW} [°] – normální úhel záběru, α_{xW} [°] – osový úhel záběru, p_{tW} [mm] – čelní rozteč, p_{nW} [mm] – normální rozteč, p_{xW} [mm] – osová rozteč, m_{tW} [mm] – čelní modul, m_{nW} [mm] – normální modul, m_{xW} [mm] – osový modul.

Normální modul m_{nW} [mm]

Normální modul ozubení je v souladu s normou ČSN 01 4602-2 shodný s modulem základního hřebene. V jednotlivých rovinách základního hřebene, znázorněných na obr. 1.3, lze rozlišovat normální modul m_{nW} v normální rovině, dále čelní modul m_{tW} v čelní rovině a osový modul m_{xW} v osové rovině.

Roztečný průměr d_W [mm]

Pro ozubení se šikmými zuby o počtu zubů z_W a čelním modulem m_{tW} platí vztah (1.9).

$$d_W = m_{tW} \cdot z_W \quad (1.9)$$

kde: d_W [mm] - roztečný průměr,
 m_{tW} [mm] - čelní modul,
 z_W [-] - počet zubů.

Hlavový průměr d_{aW} [mm]

Hlavový průměr lze v případě ozubení se šikmými zuby definovat dříve uvedeným vztahem (1.2).

Patní průměr d_{fW} [mm]

Patní průměr ozubení se šikmými zuby se definuje využitím vztahu (1.3).

Výška zubu h_W [mm]

Výška zubu se stanoví podle vztahu (1.4) obdobným způsobem jako v případě přímých zubů.

Výška hlavy zubu h_{aW} [mm]

Výška hlavy zubu h_{aW} je rovna normálnímu modulem m_{nW} , jak plyne ze vztahu (1.10).

$$h_{aW} = m_{nW} \quad (1.10)$$

kde: h_{aW} [mm] - výška hlavy zubu,
 m_{nW} [mm] - normální modul.

Výška paty zubu h_{fW} [mm]

Výška paty zubu h_{fW} je určena vztahem (1.11).

$$h_{fW} = m_{nW} + c_W \quad (1.11)$$

kde: h_{fW} [mm] - výška paty zubu,
 m_{nW} [mm] - normální modul,
 c_W [mm] - hlavová vůle.

Šířka ozubení b_W [mm]

Definice šířky ozubení se šikmými zuby se shoduje s uvedenou definicí šířky ozubení s přímými zuby (viz kapitola 1.1.1).

Normální rozteč p_{nW} [mm]

Norma ČSN 01 4602-2 definuje normální rozteč jako vzdálenost mezi stejnolehými boky sousedních zubů v normální rovině ozubení. Normální rozteč je spjata s normálním modulem podle vztahu (1.12).

$$m_{nW} = \frac{p_{nW}}{\pi} \quad (1.12)$$

kde: m_{nW} [mm] - normální modul,
 p_{nW} [mm] - normální rozteč.

V případě ozubení se šikmými zuby je v souladu s normou nutno rozlišovat normální rozteč p_{nW} , dále čelní rozteč p_{tW} definovanou obdobným způsobem v čelní rovině a osovou rozteč p_{xW} definovanou v osové rovině.

Tloušťka zubu s_W [mm]

Tloušťka zubu s_W se rovná vzdálenosti mezi protilehlými sousedními boky zubu v čelní (s_{tW}), osové (s_{xW}), případně normální (s_{nW}) rovině.

Šířka zubové mezery e_W [mm]

Šířka zubové mezery e_W je dána vzdáleností mezi nejbližšími protilehlými boky zubů v čelní (e_{tW}), osové (e_{xW}) případně normální (e_{nW}) rovině.

Úhel sklonu zubu β_W [°]

Úhel sklonu zubu β_W je definován jako ostrý úhel svíraný boční křivkou zubu a osovým směrem ozubení. Doplňkový úhel k úhlu sklonu zubu β_W se nazývá úhel stoupání zubu γ_W .

Pomocí úhlu sklonu zubu β_W lze vyjádřit vztah mezi korespondujícími veličinami v čelní, normální, případně osové rovině ozubení. Čelní modul m_{tW} a normální modul m_{nW} spolu souvisí vztahem (1.13).

$$m_{nW} = m_{tW} \cdot \cos \beta_W \quad (1.13)$$

kde: m_{nW} [mm] - normální modul,
 m_{tW} [mm] - čelní modul,
 β_W [°] - úhel sklonu zubu.

Úhel záběru α_W [°]

Úhel záběru α_W se v případě ozubení se šikmými zuby definuje obdobným způsobem jako v případě ozubení s přímými zuby. Na rozdíl od ozubení s přímými zuby je však rozlišován osový úhel záběru α_{xW} , čelní úhel záběru α_{tW} a normální úhel záběru α_{nW} . Normální úhel záběru α_{nW} má v systému norem ČSN normalizovanou hodnotu 20°.

Průměr základního válce d_{bW} [mm]

Průměr základního válce d_{bW} se získá z roztečného průměru a čelního úhlu záběru podle vztahu (1.14).

$$d_{bW} = d_W \cdot \cos \alpha_{tW} \quad (1.14)$$

kde: d_{bW} [mm] - průměr základního válce,

d_w [mm] - roztečný průměr,
 α_{rw} [°] - čelní úhel záběru.

1.2 Modifikace čelního ozubení

Pod pojmem modifikace čelního ozubení se obecně rozumí úmyslně vytvořené úchyly od teoretického tvaru boků zubů [2]. Účelem modifikace je kompenzace vlivu následujících negativních faktorů na záběr ozubeného soukolí:

- deformace boků zubů v důsledku přenosu zatížení,
- teplotní deformace boků zubů,
- deformace v důsledku tepelného zpracování.

Pro označování a charakteristiku modifikací boků zubů byl převzat systém podle [2, 5].

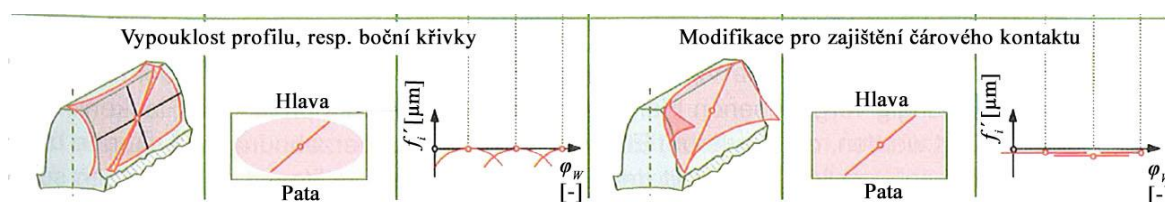
Způsoby modifikace boků zubů lze rozdělit do tří základních skupin:

- *výškové modifikace*, jinak označované jako modifikace profilu či modifikace evolventy,
- *podélné modifikace*, jinak zvané modifikace šířky zubu nebo modifikace boční křivky zubu,
- *topologické modifikace*, jinak zvané také jako 3-D modifikace, které spočívají v definování povrchu boku zubu, příp. přechodové křivky mezi bokem a patou zubu pomocí softwarově zpracované množiny bodů.

Výškové a podélné modifikace se souhrnně označují jako *modifikace prosté*.

Příklady vyjmenovaných druhů modifikací čelního ozubení znázorňuje obr. 1.4.

Prosté modifikace			Topologické modifikace		
Vzhled boku zubu	Aktivní plocha	Kin. úchylka	Vzhled boku zubu	Aktivní plocha	Kin. úchylka
Uhlová modifikace profilu a boční křivky			Diagonální sražení, resp. zaoblení		
Zaoblení, resp. sražení hlavového či patního přechodu			Modifikace podél kontaktní čáry		
Zaoblení, resp. sražení přechodu k čelu			Modifikace tlumení vibrací		



Obr. 1.4 Modifikace čelního ozubení [5] (použito s laskavým povolením společnosti Reishauer AG).

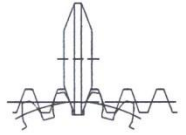
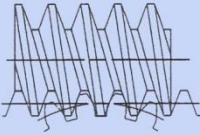
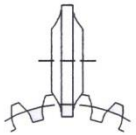

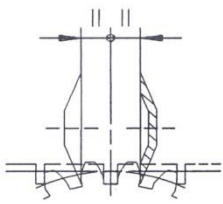
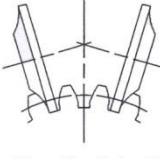
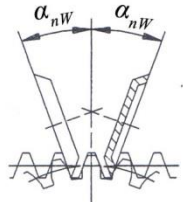
z_w [-] – počet zubů, φ_w [-] – úhlová poloha ozubení, f_i' [μm] – lokální kinematická úchylka.

Ke každému typu modifikace v levém sloupci je vyobrazen rovinný průmět *aktivní plochy zuby* a úchylka převodu, charakterizovaná *lokální kinematickou úchylkou* v rámci jedné rozteče (viz kapitola 4). Zobrazené průběhy odpovídají nezátíženému stavu ozubení.

Aktivní plocha zuby je v souladu s [2] definována jako množina všech poloh kontaktní úsečky, resp. kontaktní čáry (tzv. charakteristiky) na boku zuby.

2 METODY BROUŠENÍ ČELNÍHO OZUBENÍ

Rozdělení metod broušení čelního ozubení respektuje systém používaný v [1], [3], [5] a také [10]. Místo často používaného pojmu „broušení dělicím způsobem“ byl použit obecnější termín „profilové broušení“ (Profilschleifen) – viz obr. 2.1.

Broušení čelních ozubených kol			
Odvalovací broušení		Profilové broušení	
Diskontinuální	Kontinuální	Diskontinuální	Kontinuální
 <p>Broušení kotoučem lichoběžníkového osového profilu (Niles)</p>	 <p>Broušení válcovým šnekem (Reishauer)</p>	 <p>Broušení jedním oboustranně tvarovaným kotoučem</p>	 <p>Broušení globoidním šnekem</p>
 <p>Broušení dvojicí kolmo postavených kotoučů (Maag)</p>		 <p>Broušení dvojicí jednostranně tvarovaných kotoučů</p>	
 <p>Broušení dvojicí kotoučů skloněných pod normálním úhlem záběru (Maag)</p>			

Obr. 2.1 Metody broušení čelního ozubení [1].

α_{nW} [°] – normální úhel záběru obrobku.

V souladu s rozdělením uvedeným na obr. 2.1 lze metody broušení čelního ozubení rozčlenit do dvou základních skupin.

2.1 Metody odvalovacího broušení

Odvalovací broušení čelního ozubení je praktickou aplikací obáلكové věty (viz kapitola 3.1). Boky zubů obrobku vznikají jako obálky jednotlivých poloh geometrické plochy broušícího nástroje. Podle závěrů uvedených v [5] se mezi broušícím nástrojem a obrobkem realizuje bodový kontakt.

2.1.1 Diskontinuální odvalovací broušení

Do kategorie diskontinuálních odvalovacích metod spadá broušení dvojicí talířových kotoučů a broušení kotoučem lichoběžníkového osového profilu. Obě metody spočívají

v realizaci přerušovaného odvalovacího pohybu v rámci jedné, případně dvou zubových mezer. Po dokončení jednoho boku zubu, resp. jedné zubové mezery následuje natočení obrobku o úhlovou rozteč a broušení následujícího boku zubu.

Broušení kotoučem lichoběžníkového osového profilu – systém NILES

Pomocí broušícího kotouče s osovým profilem odpovídajícím základnímu profilu čelního ozubení se brousí boky zubů v rámci jedné zubové mezery. Broušící kotouč může brousit jeden bok zubu, případně oba protilehlé boky zároveň. Druhá ze zmíněných variant v současnosti převažuje z důvodu vyšší produktivity. Podle [10] se obě varianty používají nejčastěji pro dokončování ozubení pastorkových hřídelí v kusové a malosériové výrobě.

Broušení dvojicí kotoučů – systém MAAG

Talířové broušící kotouče (v poloze s rovnoběžnými osami, nebo skloněné pod normálním úhlem záběru α_{nw}) brousí zároveň dva protilehlé boky zubů obrobku. Značnou výhodou systému MAAG je vysoká dosažitelná kvalita obrobenej plochy a možnost dokončovat vnitřní ozubení. Nevýhodou je především nízká produktivita broušícího procesu [10].

2.1.2 Kontinuální odvalovací broušení

Při kontinuálním odvalovacím broušení se úběr materiálu realizuje abrazivním účinkem relativního pohybu obrobku a spoluzabírajícího broušícího nástroje. Bok zubu obrobku vzniká jako obálková plocha jednotlivých poloh boku závitů broušícího nástroje. Tato technologie je blíže objasněna v následujících kapitolách.

2.2 Metody profilového broušení

Charakteristickým rozlišovacím znakem metod profilového broušení je čárový kontakt mezi broušícím kotoučem a obrobkem. Broušící kotouč tvarově odpovídá zubové mezeře broušeného ozubení. Jak uvádí např. [5], z hlediska produktivity broušícího procesu je čárový kontakt oproti bodovému kontaktu u odvalovacích metod značně výhodnější. Nevýhodou představuje výraznější tepelné ovlivnění povrchové vrstvy obrobku a velké ztrátové časy při přestavování broušícího kotouče do následující zubové mezery. Poslední z uvedených nedostatků byl odstraněn zavedením technologie kontinuálního profilového broušení.

2.2.1 Diskontinuální profilové broušení

Podstatou diskontinuálního profilového broušení je zhotovení jedné zubové mezery jedním nebo více zdvihy broušícího kotouče a následné natočení obrobku o úhlovou rozteč [1]. Čelnímu ozubení daných parametrů odpovídá konkrétní tvar broušícího kotouče. Při broušení obrobků se šikmými zuby vzniká odchylka od teoretického tvaru boku zubu, která závisí na průměru broušícího kotouče a úhlu sklonu zubu β_w [10].

2.2.2 Kontinuální profilové broušení

Jedná se o metodu profilového broušení, která eliminuje časové ztráty při přestavování broušícího kotouče do následující zubové mezery obrobku.

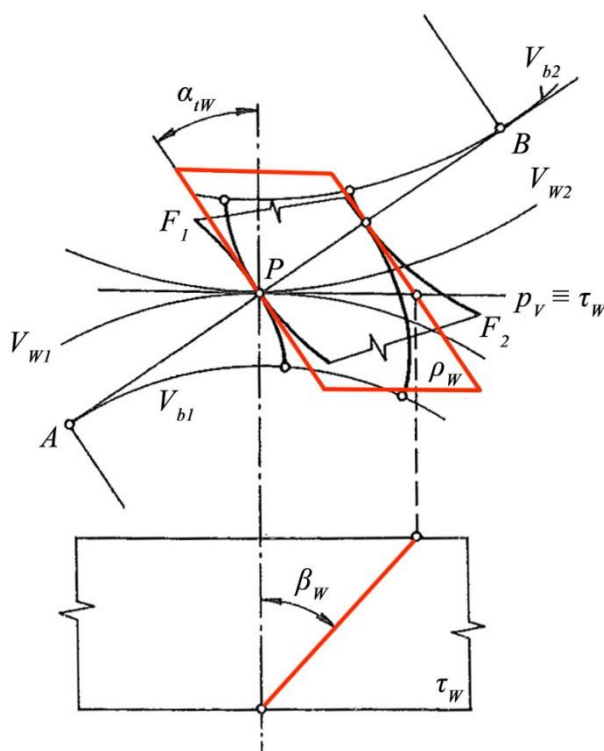
Broušící kotouč z ušlechtilého korundu v keramickém pojivu má tvar rotačního hyperboloidu, do kterého je pomocí speciálního ozubeného kola s galvanicky nanesenou vrstvou syntetického diamantu implementován požadovaný tvar. Broušící kotouč se tvaruje

3 BROUŠENÍ ČELNÍHO OZUBENÍ METODOU REISHAUER

Kontinuální odvalovací broušení čelního ozubení představuje optimální dokončovací metodu z hlediska dosažitelné přesnosti ozubení a produktivity broušícího procesu. Tato technologie dokáže uspokojit požadavky hrající důležitou roli v široké řadě různých strojírenských aplikací. Jedná se např. o možnost zhotovit ozubení s modifikacemi profilu či boční křivky zubů nebo možnost dokončovat kuželová ozubená kola s přímými zuby. Uvedené možnosti jsou v současné době využitelné zejména díky širokému nasazení NC – řídicích systémů [5].

3.1 Kinematika broušícího procesu

Základní princip odvalovacích metod výroby čelního ozubení je podle [2] popsán tzv. *obálkovou větou*. Jsou-li spoluzabírající ozubená kola myšlenkově nahrazena dvojicí roztečných válců V_{W1} , V_{W2} , pak lze společnou površkou těchto válců vést valivou rovinu τ_w , která je k pláštům obou válců tečná (viz obr. 3.1).



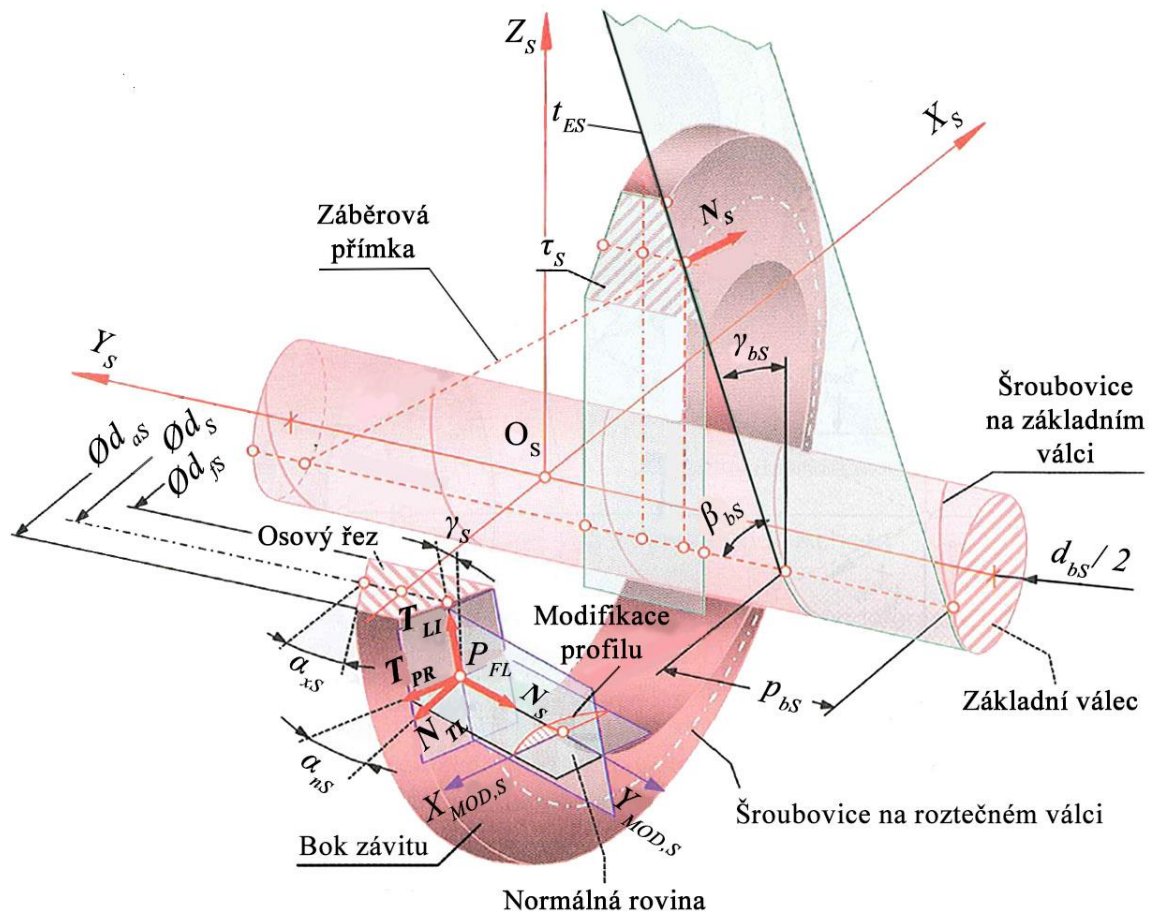
Obr. 3.1 Geometrická interpretace obálkové věty [2].

p_v – valivá přímka (osa valení), τ_w – valivá rovina, ρ_w – tvořící rovina, F_1 , F_2 – evolventní šroubové plochy kol 1, 2, AB – záběrová úsečka, P – valivý bod, $V_{W1, 2}$ – roztečné válce kol 1, 2, $V_{b1, 2}$ – základní válce kol 1, 2, α_{tW} [°] – čelní úhel záběru, β_w [°] – úhel sklonu zubu.

Pomocí valivé roviny τ_w se následně definuje tvořící rovina ρ_w (na obr. 3.1 vyznačena červeně), jejíž polohu vůči τ_w určuje úhel záběru α_{tW} v čelní rovině a úhel sklonu zubů β_w ve valivé rovině τ_w . Bude-li se rovina τ_w odvalovat po roztečném válci V_{W1} kola 1, případně po roztečném válci V_{W2} spoluzabírajícího kola 2, obálka jednotlivých poloh roviny ρ_w vytvoří na kolech 1, 2 plochy F_1 , F_2 , které se při relativním pohybu obou kol vzájemně obalují. Vzniklé plochy F_1 , F_2 se nazývají *evolventními šroubovými plochami*, jejichž čelním řezem jsou evolventní profily se společnou normálou procházející v každém okamžiku záběru pólem relativního pohybu, nazývaným jako valivý bod P .

V souladu s obálkovou větou mají boky zubů spoluzabírajících ozubených kol tvar sdružených evolventních šroubových ploch. Při kontinuálním odvalovacím broušení je nutno tvořící rovinu ρ_w realizovat bokem závitu brousícího nástroje (dále nazývaného jako „brousící šnek“). Podle závěrů uvedených v [2, 5, 11] tomuto požadavku odpovídá *evolventní šnek*, označovaný v teorii šneků symbolem ZI. Přímkový profil evolventního šneku leží v záběrové rovině τ_s , tečně k základnímu válci.

Geometrie evolventního brousícího šneku je znázorněna na obr. 3.2.



Obr. 3.2 Geometrie evolventního brousícího šneku [5] (použito s laskavým povolením společnosti Reishauer AG).

$O_S (X_S, Y_S, Z_S)$ – souřadný systém brousícího šneku, $O_{MOD,S} (X_{MOD,S}, Y_{MOD,S}, Z_{MOD,S})$ – lokální souřadný systém boku závitu brousícího šneku, τ_s – záběrová rovina brousícího šneku, t_{ES} – tvořící přímka evolventní šroubové plochy, d_{aS} [mm] – hlavový průměr brousícího šneku, d_s [mm] – roztečný průměr brousícího šneku, d_{fS} [mm] – patní průměr brousícího šneku, d_{bS} [mm] – průměr základního válce brousícího šneku, N_s – jednotkový normálový vektor boku závitu brousícího šneku, γ_s [°] – úhel stoupání brousícího šneku, α_{xS} [°] – osový úhel záběru brousícího šneku, α_{nS} [°] – normální úhel záběru brousícího šneku, β_{bS} [°] – úhel sklonu tvořící přímky vůči povrchu základního válce brousícího šneku, γ_{bS} [°] – úhel stoupání šroubovice na základním válci brousícího šneku, p_{bS} [mm] – základní rozteč brousícího šneku, P_{FL} – uvažovaný bod šroubovice na roztečném válci brousícího šneku, N_{TL} – jednotkový normálový vektor pláště roztečného válce brousícího šneku, T_{PR} – jednotkový tečný vektor normálního profilu brousícího šneku, T_{LI} – jednotkový tečný vektor šroubovice na roztečném válci brousícího šneku.

Ze zákonitostí odvalu plyne rovnost normálních modulů obrobku m_{nw} a brousicího šneku m_{ns} , rovnost normálních roztečí p_{nw} a p_{ns} , stejně jako rovnost normálních úhlů záběru α_{nw} a α_{ns} .

Na obr. 3.2 je zvolen globální souřadný systém $O_S (X_S, Y_S, Z_S)$, jehož počátek leží na ose brousicího šneku. Modifikace boku závitů brousicího šneku se zpravidla navrhuje v rámci souřadného systému $O_{MOD,S} (X_{MOD,S}, Y_{MOD,S}, Z_{MOD,S})$, jehož ortonormální bázi tvoří jednotkový tečný vektor normálního profilu T_{PR} , jednotkový normálový vektor boku závitů N_S a jednotkový tečný vektor šroubovice na valivém válci T_{LI} ve směru osy $Z_{MOD,S}$. Osa $Z_{MOD,S}$ není na obrázku z důvodu přehlednosti zobrazena [5].

V technické praxi se z důvodu obtížnosti nastavení orovnávacích nástrojů od přesného tvarování evolventního brousicího šneku často upouští. V závislosti na charakteru orovnávacího nástroje a technologických podmínkách orovnávacího procesu lze mnohem snadněji vytvarovat šnek profilu typu A (Archimédův šnek) či šnek profilu typu N (obecný šnek). Je-li úhel stoupání brousicího šneku γ_S malý, tj. není-li jeho hodnota větší než 5° , vliv odchylek tvaru těchto šneků od požadovaného evolventního šneku lze v běžných případech zanedbat [5]. Je však nutno uvážit skutečnost, že při orovnávání kotoučovými nástroji vzniká obálkový šnek typu K, jehož geometrie se obecně odchyluje jak od šneku Archimédova, tak i od obecného šneku.

Při popisu kinematiky procesu kontinuálního odvalovacího broušení se vychází výlučně z geometrie evolventního brousicího šneku, jehož bok závitů má tvar evolventní šroubové plochy. Je-li aplikován brousicí šnek jiného tvaru, lze záběr tohoto brousicího šneku a obrobku přibližně popsat aplikací obálkové věty pouze tehdy, splňuje-li jeho roztečný průměr d_S a úhel stoupání γ_S uvedené podmínky.

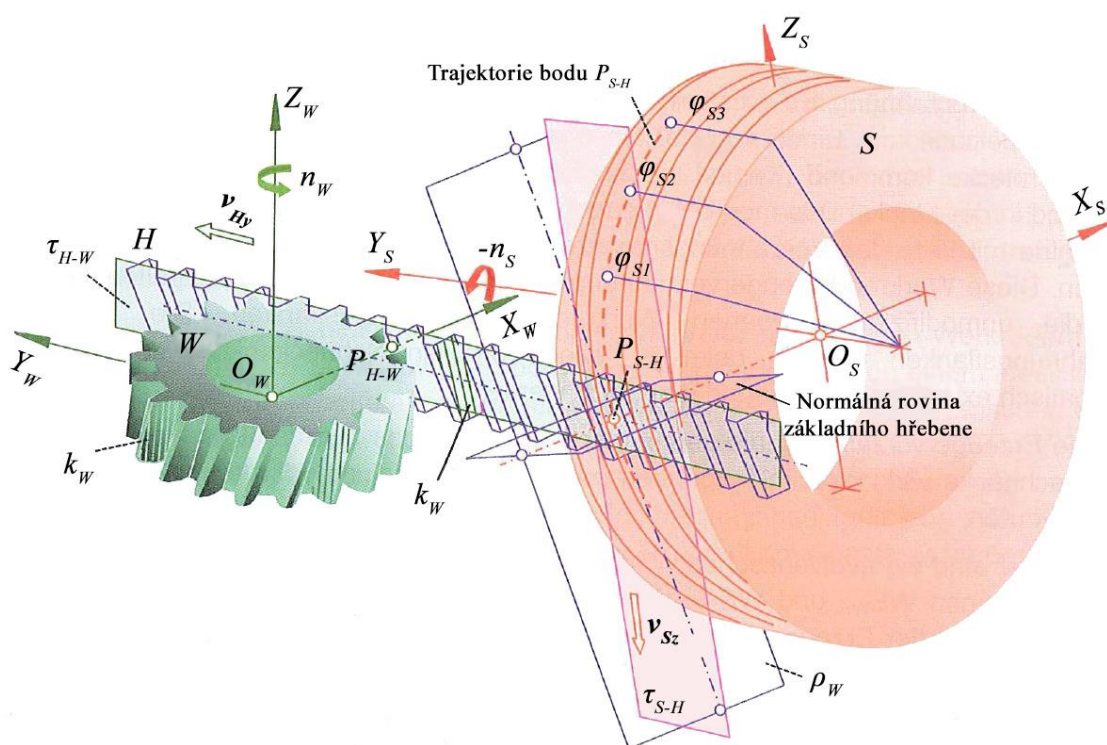
Kinematické poměry při kontinuálním odvalovacím broušení nemodifikovaného čelního ozubení jsou znázorněny na obr. 3.3.

Záběr obrobku s brousicím šnekem je na obr. 3.3 analyzován pomocí vloženého teoretického základního hřebene. Valivý bod záběru základního hřebene s obrobkem P_{H-W} a bod záběru brousicího šneku se základním hřebenem P_{S-H} při přímém záběru obrobku a brousicího šneku splývají ve valivý bod P . Pro lepší znázornění jsou tyto dva body na obr. 3.3 odděleny.

V souladu s obálkovou větou lze záběr obrobku se základním hřebenem myšlenkově nahradit odvalováním roztečného válce obrobku po valivé rovině τ_{H-W} . V jednotlivých fázích záběru se kontaktní úsečka (charakteristika) k_W postupně přemísťuje jak na boku zubu obrobku, tak i na boku zubu základního hřebene. Jednotlivé polohy kontaktní úsečky k_W jsou na obr. 3.3 znázorněny zelenými čarami na bocích zubu základního hřebene, resp. bílými čarami na bocích zubu obrobku.

Bod záběru P_{S-H} se vůči nehybně myšlenému brousicímu šneku pohybuje po trajektorii ve tvaru šroubovice (na obr. 3.3 jsou znázorněny tři úhlové polohy bodu P_{S-H} označené $\varphi_{S1, 2, 3}$). Pro úplnost a soulad s obálkovou větou je znázorněna také myšlená tvořící rovina ρ_W .

Záběr základního hřebene a obrobku se kinematicky charakterizuje tangenciální rychlostí v_{Hy} . Záběr brousicího šneku a základního hřebene je charakterizován složkou rychlosti v_{Sz} brousicího šneku vůči základnímu hřebeni ve směru osy Z_S .



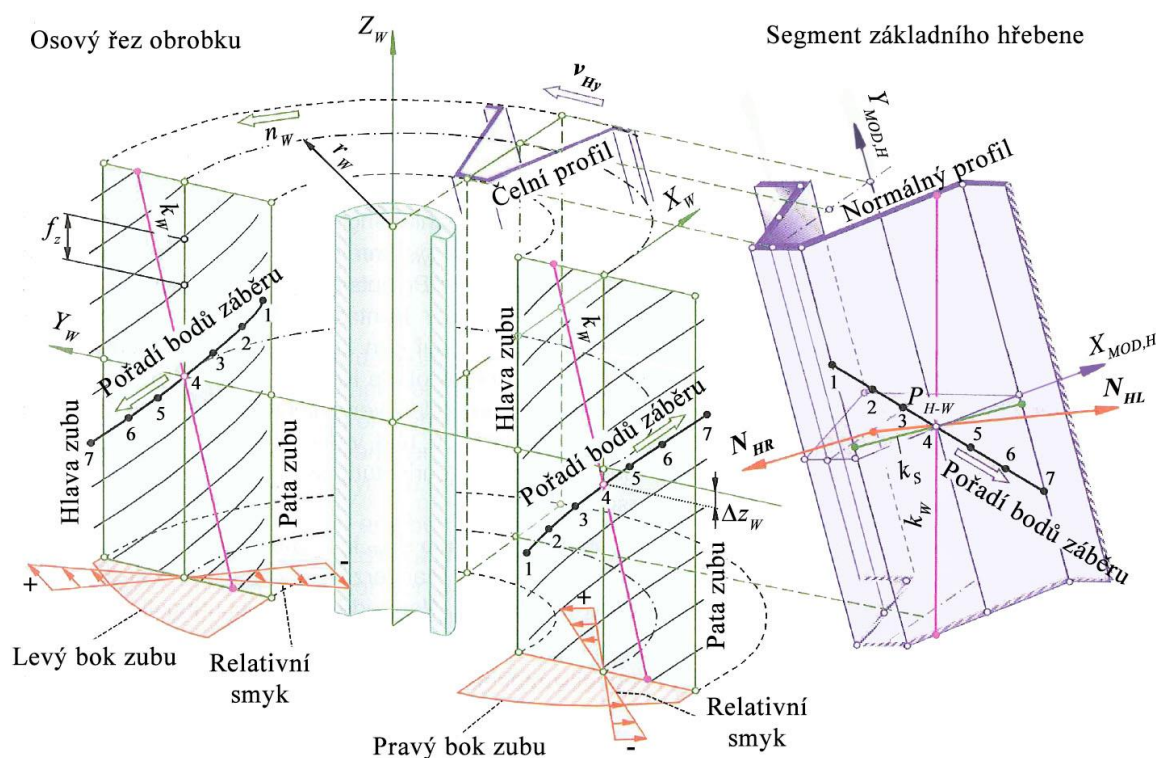
Obr. 3.3 Kinematická charakteristika procesu kontinuálního odvalovacího broušení [5] (použito s laskavým povolením společnosti Reishauer AG).

W – obrobek, S – broušící šnek, H – základní hřeben, O_w (X_w, Y_w, Z_w) – souřadný systém obrobku, O_s (X_s, Y_s, Z_s) – souřadný systém broušícího šneku, τ_{H-W} – valivá rovina základního hřebene a obrobku, τ_{S-H} – valivá rovina broušícího šneku a základního hřebene, ρ_w – tvořící rovina, P_{H-W} – valivý bod záběru základního hřebene s obrobkem, P_{S-H} – bod záběru broušícího šneku se základním hřebenem, $\varphi_{S1, 2, 3}$ – úhlové polohy broušícího šneku v různých okamžicích záběru, k_w – kontaktní úsečka záběru základního hřebene s obrobkem, n_w [min^{-1}] – otáčky obrobku, n_s [min^{-1}] – otáčky broušícího šneku, v_{Hy} [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] – tangenciální rychlost základního hřebene, v_{Sz} [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] – složka rychlosti broušícího šneku vůči základnímu hřebeni ve směru Z_s .

Analogickým způsobem, jakým byl popsán průběh kontaktních úseček záběru základního hřebene s obrobkem, lze přistoupit k vyšetření průběhu kontaktních úseček záběru k_s broušícího šneku se základním hřebenem. Jedná se o čárový kontakt, jak je zřejmé z obr. 3.4.

Na obr. 3.4 je fialovou barvou znázorněna kontaktní úsečka k_w základního hřebene s obrobkem. Zelená čára znázornuje kontaktní úsečku k_s broušícího šneku se základním hřebenem.

V jednotlivých fázích záběru je okamžitý průsečík pohybujících se kontaktních úseček k_s , k_w bodem záběru broušícího šneku s obrobkem. V průběhu broušícího procesu se bod záběru broušícího šneku s obrobkem vzhledem k obrobku pohybuje po stejnoměrně rozložených křivkách (na obr. 3.4 je v průmětu do osové roviny znázorněno na každém boku zubu 7 různých poloh bodu záběru). Tyto křivky, tzv. *stopy záběru* (podle [2] nazvané jako aktivní křivky zubu), jsou ve směru osy Z_w vzdáleny o hodnotu axiálního posuvu broušícího šneku f_z vztaženého na otáčku obrobku.



Obr. 3.4 Kontaktní úsečky a stopy záběru [5] (použito s laskavým povolením společnosti Reishauer AG).

$O_W (X_W, Y_W, Z_W)$ – souřadný systém obrobku, $O_{MOD,H} (X_{MOD,H}, Y_{MOD,H}, Z_{MOD,H})$ – lokální souřadný systém boku zuby základního hřebene, N_{HL} – jednotkový normálový vektor levého boku zuby základního hřebene (směr tohoto vektoru je shodný se směrem $Z_{MOD,H}$), N_{HR} – jednotkový normálový vektor pravého boku zuby základního hřebene, P_{H-W} – valivý bod záběru základního hřebene s obrobkem (považuje se za totožný s valivým bodem P), 1, 2, ..., 7 – body záběru brousícího šneku se základním hřebem, resp. s obrobkem, v_{Hy} [m.s⁻¹] – tangenciální rychlost základního hřebene, n_W – otáčky obrobku, r_W [mm] – poloměr roztečného válce obrobku, f_z [mm] – axiální posuv na otáčku obrobku, Δz_W [mm] – axiální posunutí stop záběru na protilehlých bocích zuby obrobku, k_W – kontaktní úsečka záběru základního hřebene s obrobkem, k_S – kontaktní úsečka záběru brousícího šneku se základním hřebem.

Na boku zuby základního hřebene lze stopy záběru považovat za úseky přibližně přímkového charakteru. Zanedbá se přitom vliv relativního smyku, který je na obr. 3.4 rozložen do směru souřadných os Y_W, Z_W obrobku. Definici a způsob výpočtu relativního smyku podrobně podává např. [2].

Tvar stop záběru na bocích zubů obrobku se získá aplikací obávkové věty, tj. na základě známého průběhu normál v bodech záběru s brousícím šnekem (společná normála v bodě záběru vždy prochází valivým bodem P). Není však možné v tomto případě zanedbat účinek relativního smyku, jehož průběh má na charakter stop záběru zásadní vliv. Zatímco v okolí hlavy zuby obrobku má relativní smyk stejné znamení ve směru Y_W i Z_W , v okolí paty zuby nabývá jeho velikost extrémní hodnoty s opačnými znameními v obou směrech. To znamená, že dochází k zakřivení stopy záběru ve směru šířky zuby obrobku. Lze si také všimnout, že stopy záběru na protilehlých bocích zuby obrobku jsou v důsledku plynulého axiálního pohybu vzájemně posunuty o hodnotu Δz_W .

Záběrová přímka je dle [2, 5] dána průsečnicí záběrových rovin obrobku a brousícího šneku.

Záběrovou přímku lze popsat řadou charakteristických vlastností:

- záběrová přímka v každém okamžiku záběru obrobku a brousicího šneku prochází valivým bodem P . Množina všech bodů záběru brousicího šneku a obrobku v souřadném systému $O_M (X_M, Y_M, Z_M)$ spojeném pevně se základem stroje představuje záběrovou úsečku;
- záběrová přímka je v každém okamžiku záběru obrobku a brousicího šneku tečná k základnímu válci obrobku. Její vzdálenost od osy obrobku je rovna poloměru základního válce r_{bw} ;
- poloha záběrové přímky vůči brousicímu šneku závisí na tvaru brousicího šneku. V případě teoretického ideálního evolventního šneku (typ I) je záběrová přímka tečná k základnímu válci o průměru d_{bs} . V případě Archimédova šneku (typ A) přechází základní válec v osu šneku, a záběrová přímka tudíž prochází touto osou. V případě obecného šneku (typ N) je záběrová přímka tečná k základnímu válci šneku o průměru d_{bns} .

V závislosti na zvoleném druhu výškové, resp. podélné modifikace přechází záběrová přímka v obecnou prostorovou křivku.

V následujících odstavcích jsou stručně popsány základní metody kontinuálního odvalovacího broušení čelního ozubení:

- broušení s přerušovaným tangenciálním posuvem,
- broušení s plynulým tangenciálním posuvem,
- diagonální broušení.

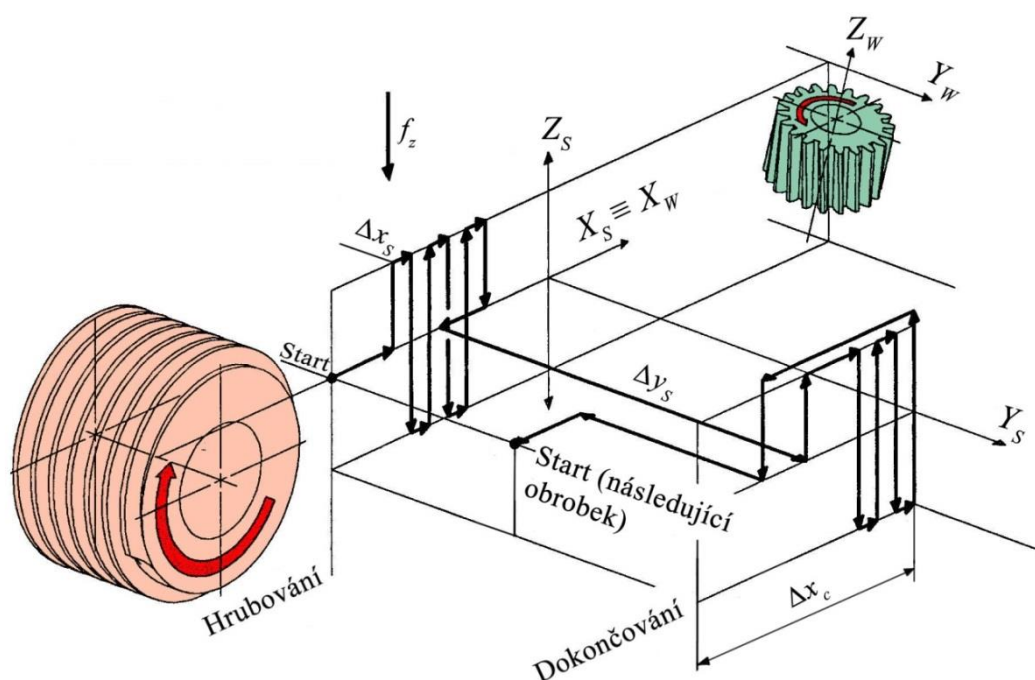
Vyjmenované metody se liší charakterem relativních pohybů realizovaných v průběhu brousicího procesu. Tyto pohyby může v závislosti na konstrukci brousicího stroje (dále nazývaného jako „odvalovací bruska“) konat obrobek, nebo brousicí šnek. Uvedené rozdělení respektuje [1, 3, 5, 11].

3.1.1 Broušení s přerušovaným tangenciálním posuvem

Broušení s přerušovaným tangenciálním posuvem (shiftingem) je nejstarší a původní technologickou variantou kontinuálního odvalovacího broušení (podle [3] nazvanou jako výkyvné nebo axiální broušení). Přerušovaný tangenciální posuv představoval v minulosti jediný možný způsob využití dosud neopotřebených částí brousicího šneku. Přestavení brousicího šneku, resp. obrobku v tangenciálním směru se v závislosti na požadavcích z hlediska přesnosti broušeného čelního ozubení realizovalo buď před nasazením nového obrobku, nebo před dokončovacím zdvihem brousicího šneku.

V současnosti se varianta kontinuálního odvalovacího broušení s přerušovaným tangenciálním posuvem používá výjimečně. Důvodem je nejčastěji konstrukční řešení odvalovací brusky, které neumožňuje realizovat kontinuální tangenciální posuv. Ve většině případů bylo broušení s přerušovaným tangenciálním posuvem nahrazeno v mnoha ohledech výhodnější variantou s plynulým tangenciálním posuvem.

V souladu s popsávanými zákonitostmi lze na obr. 3.5 označit směr osy X_S , která je totožná s osou X_W , jako radiální směr vůči obrobku (dále jen „radiální směr“, nebude-li řečeno jinak). Směr osy Z_W je dále označován jako axiální směr. Směr osy Y_S se nazve tangenciálním směrem.



Obr. 3.5 Princip broušení s přerušovaným tangenciálním posuvem [1].

$O_S (X_S, Y_S, Z_S)$ – souřadný systém brousícího šneku, $O_W (X_W, Y_W, Z_W)$ – souřadný systém obrobku, Δx_s [mm] – radiální inkrement, Δx_c [mm] – celkový radiální inkrement, Δy_s [mm] – tangenciální přestavení, f_z [mm] – axiální posuv na otáčku obrobku.

Uspořádání na obr. 3.5 vychází ze zjednodušujícího předpokladu, že všechny pohyby vyjma rotace obrobku koná brousící šnek.

Princip kontinuálního odvalovacího broušení s přerušovaným tangenciálním posuvem spočívá v přestavení brousícího šneku o hodnotu radiálního inkrementu Δx_s v okamžiku dosažení úvratě v axiálním směru. Na konci hrubovací fáze brousícího procesu vykazuje část brousícího šneku jistý stupeň opotřebení, který se projeví tvarovou nepřesností boku jeho závitu. Aby byla zajištěna odpovídající kvalita obrobeneé plochy, dochází před dokončovací fází k přestavení brousícího šneku Δy_s v tangenciálním směru. Tím se zajistí, aby v záběru s boky zubů obrobku byla nová, dosud neopotřebovaná část brousícího šneku.

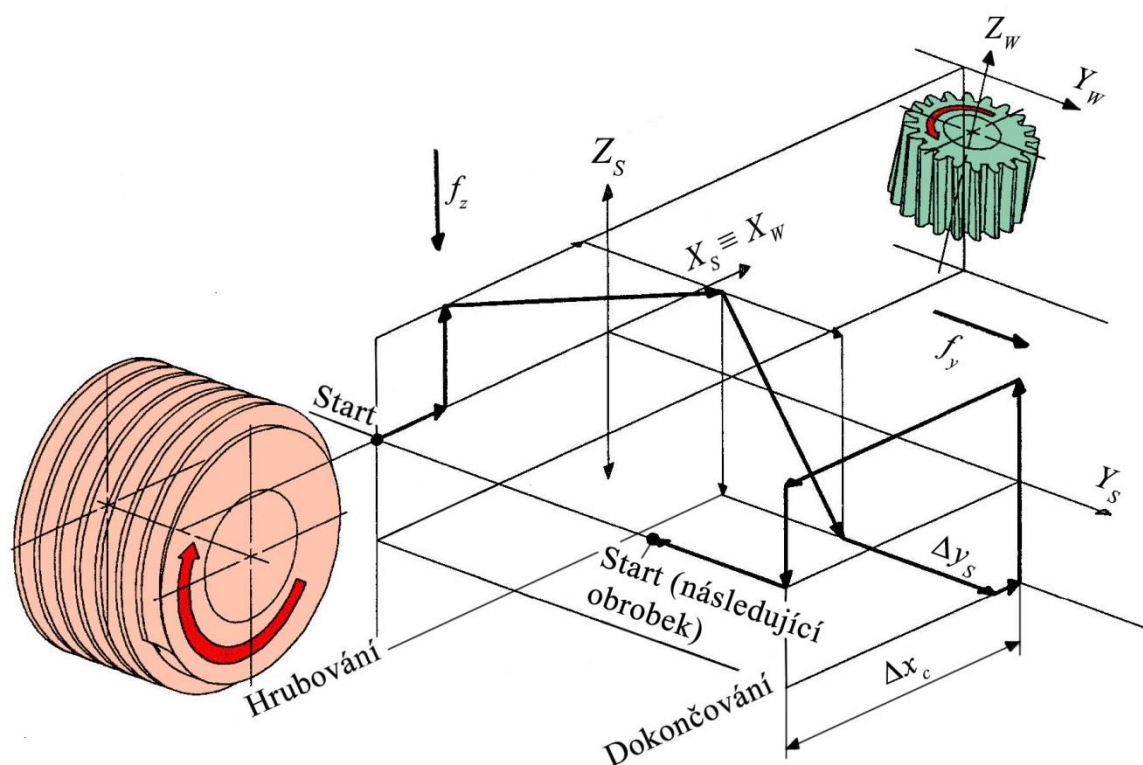
Na obr. 3.5 je vyznačena počáteční poloha brousícího šneku pro hrubovací fázi následujícího obrobku. V rámci hrubovací fáze následujícího obrobku může přicházet do záběru již dříve využitá část brousícího šneku. Velikost tangenciálního přestavení Δy_s se stanoví s využitím optimalizačních postupů.

3.1.2 Broušení s plynulým tangenciálním posuvem

Metoda kontinuálního odvalovacího broušení s plynulým tangenciálním posuvem byla vyvinuta na základě nutnosti zvýšit produktivitu brousícího procesu. V porovnání s broušením s přerušovaným tangenciálním posuvem dochází k tangenciálnímu posuvovému pohybu brousícího šneku při záběru s obrobkem. Plynulý tangenciální posuv umožňuje snížit celkový počet hrubovacích a dokončovacích zdvihů a významně omezit vliv opotřebení brousícího šneku na kvalitu obrobeneé plochy. Variantu broušení s plynulým tangenciálním posuvem lze realizovat pouze na moderních odvalovacích

bruskách s dostatečnou dynamickou tuhostí všech jejích částí. Nedostatečná dynamická tuhost odvalovací brusky je podle závěrů uvedených v [5, 12] primární příčinou zhoršení parametrů přesnosti ve směru profilu a boční křivky zubu obrobku.

Princip broušení s plynulým tangenciálním posuvem je znázorněn na obr. 3.6. Vychází se z předpokladu, že všechny pohyby vyjma rotace obrobku kolem osy Z_W koná brousící šnek.



Obr. 3.6 Princip broušení s plynulým tangenciálním posuvem [1].

$O_S (X_S, Y_S, Z_S)$ – souřadný systém brousícího šneku, $O_W (X_W, Y_W, Z_W)$ – souřadný systém obrobku, Δx_c [mm] – celkový radiální inkrement, Δy_s [mm] – tangenciální přestavení, f_y [mm] – tangenciální posuv na otáčku obrobku, f_z [mm] – axiální posuv na otáčku obrobku.

Brousící šnek nejprve rychloposuvem zaujme polohu pro začátek hrubovacího cyklu – té je dosaženo přestavením do roviny rovnoběžné s rovinou $X_S - Y_S$ a pohybem po přímkové trajektorii v rámci této roviny. Počáteční poloha brousícího šneku musí být volena s ohledem na potřebnou velikost náběhu, aby nedošlo ke kolizi brousícího šneku s obrobkem. Podle [5] však již během pohybu v rámci roviny rovnoběžné s rovinou $X_S - Y_S$ může docházet k úběru třísky, čímž lze dosáhnout další časové úspory. Následuje pracovní posuv v axiálním a tangenciálním směru, během kterého se uskutečňuje hrubovací fáze brousícího procesu. Hrubovací fázi lze realizovat jedním, případně více zdvihy brousícího šneku. Volbou nenulového tangenciálního posuvu je kompenzován účinek opotřebení brousícího šneku.

Klíčovou roli hraje poměrná velikost tangenciálního posuvu f_y na otáčku obrobku vůči axiálnímu posuvu f_z na otáčku obrobku, která se podle [12] nejčastěji charakterizuje diagonálním poměrem D daným vztahem (3.1).

$$D = \frac{f_y}{f_z} \quad (3.1)$$

kde: D [-] - diagonální poměr,
 f_y [mm] - tangenciální posuv na otáčku obrobku,
 f_z [mm] - axiální posuv na otáčku obrobku.

Diagonální poměr nabývá pro broušení s plynulým tangenciálním posuvem řádově hodnoty 0,01 [12]. Pomocí diagonálního poměru lze značnou měrou ovlivnit topografii obrobeného povrchu, zejména pak hodnotu parametrů profilu drsnosti. Nevhodně zvolená velikost diagonálního poměru se promítne v podobě zvýšené hlučnosti zabírajícího ozubeného soukolí [5].

V závislosti na pohybu broušícího šneku v dokončovací fázi lze rozlišovat dvě varianty:

- broušící šnek se pohybuje pouze v axiálním směru, jak znázorňuje obr. 3.6,
- broušící šnek se pohybuje v obecném směru v rámci roviny $Y_S - Z_S$, který lze charakterizovat diagonálním poměrem D .

Druhá z uvedených variant, nazývaná podle [3] jako krokovací broušení s vysokou výkonností, zajišťuje v porovnání s první variantou vyšší kvalitu obrobených ploch. Krokovací broušení s vysokou výkonností představuje u současných moderních strojů (např. Reishauer RZ 150, RZ 400) součást základního nastavení. Obecným požadavkem pro jeho realizaci je automatické upínání a polohování obrobků [1].

3.1.3 Diagonální broušení

Diagonální broušení reprezentuje nejpokrokovější metodu kontinuálního odvalovacího broušení, která doznala značného vývoje s nasazením moderních odvalovacích brusek.

Přestože je z pohledu kinematických zákonitostí princip diagonálního broušení podobný dříve popsánému krokovému broušením s vysokou výkonností, liší se tyto dvě varianty svým zaměřením. Jak uvádí např. [5, 12], broušení s plynulým tangenciálním posuvem bylo postupně vyvíjeno za cílem zlepšení dosahovaných parametrů přesnosti broušeného ozubení. Diagonální broušení vzniklo z důvodu nutnosti rozšířit dosavadní technologické možnosti kontinuálního odvalovacího broušení do oblasti modifikací profilu, boční křivky, resp. obecných 3-D modifikací zubů, dále také do oblasti dokončování kuželových ozubených kol s přímými zuby.

Modifikovaný bok zubu obrobku vzniká jako obálka jednotlivých poloh boku závitů broušícího šneku. Tvar profilu a boční křivky zubu v obecném případě 3-D modifikace nelze vystihnout aplikací obáلكové věty. Obecná 3-D modifikace, kterou je možno chápat jako zobecnění modifikace profilu, resp. modifikace boční křivky zubu, se definuje s využitím základního hřebene (viz obr. 3.4). V lokálním souřadném systému $O_{MOD,H}$ ($X_{MOD,H}$, $Y_{MOD,H}$, $Z_{MOD,H}$) se každému bodu boku zubu o souřadnicích $x_{MOD,H}$, $y_{MOD,H}$ přiřadí hodnota úhlyky ve směru $z_{MOD,H}$, totožném se směrem jednotkového normálového vektoru \mathbf{N}_{HR} , resp. \mathbf{N}_{HL} . Analogicky lze definovat tvar modifikace boku zubu v lokálním souřadném systému broušícího šneku $O_{MOD,S}$ ($X_{MOD,S}$, $Y_{MOD,S}$, $Z_{MOD,S}$) (viz obr. 3.2), nebo v lokálním souřadném systému obrobku $O_{MOD,W}$ ($X_{MOD,W}$, $Y_{MOD,W}$, $Z_{MOD,W}$) [5].

Nejčastějším řešením problémem je přiřazení geometrie broušícího šneku požadované známé geometrii boku zubu obrobku. Výpočtový postup v tomto případě vychází

ze základního předpokladu, že normály modifikovaného boku zubu základního hřebene podél stopy záběru vždy leží v normálné rovině nemodifikovaného (výchozího) základního hřebene. Tento předpoklad se z důvodu velmi malých hodnot modifikací s minimální nepřesností považuje za platný pro většinu v současnosti vyráběných ozubení [5, 13]. Je-li uvedený předpoklad splněn, lze známé geometrii boku zubu obrobku přiřadit geometrii brousicího šneku s využitím vztahu (3.2).

$$\frac{x_P - x_D}{N_{Dx}} = \frac{y_P - y_D}{N_{Dy}} = \frac{z_P - z_D}{N_{Dz}} \quad (3.2)$$

kde: x_P, y_P, z_P [mm] - souřadnice valivého bodu,
 x_D, y_D, z_D [mm] - souřadnice bodu záběru,
 N_{Dx}, N_{Dy}, N_{Dz} - složky společného jednotkového normálového vektoru v bodě záběru.

Uvedená rovnost vychází ze základní vlastnosti obálky, tj. dotyk prvního řádu s tvořící plochou ve všech jejích polohách [14]. Normála v každém bodě obálky tudíž musí být totožná s normálou tvořící plochy v příslušné poloze. Společný jednotkový normálový vektor N_D v bodě záběru boku závitů brousicího šneku a boku zubu obrobku známé geometrie proto musí být násobkem vektoru daného rozdílem souřadnic valivého bodu (index P) a souřadnic bodu záběru (index D). Hledanou neznámou je úhlová poloha obrobku, při které souřadnice bodu záběru x_D, y_D, z_D splňují rovnost (3.2).

Stručně popsany postup určení geometrie brousicího šneku se značně zjednodušuje v případě, je-li ozubení modifikováno pouze ve směru profilu. V takovém případě lze při broušení uplatnit popsané kinematické zákonitosti bez realizace dodatečných posuvových pohybů. Bok závitů brousicího šneku má ve směru normály implementován požadovaný tvar, který koresponduje s tvarem modifikace obrobku.

Aplikací vztahu (3.2) lze rovněž určit geometrii brousicího šneku pro podélně modifikované ozubení. I zde je možno za stejných předpokladů aplikovat popsaný postup určení tvaru boku závitů brousicího šneku, který však bude v závislosti na axiální poloze brousicího šneku vůči obrobku proměnný. Aby byl požadovaný tvar boku zubu obrobku zajištěn, musí se osový profil brousicího šneku v tangenciálním směru plynule měnit. Změní-li se axiální poloha brousicího šneku o stanovenou hodnotu Δz_s , musí zároveň dojít k jeho natočení $\Delta \varphi_s$ a tangenciálnímu přestavení Δy_s v souřadném systému $O_S (X_S, Y_S, Z_S)$. NC-řízením uvedených veličin se dosáhne toho, že bok zubu obrobku bude v každé axiální poloze brousicího šneku rozvalován příslušným úsekem závitů brousicího šneku.

Nevýhodou popsaného postupu je vysoká provázanost jednotlivých kinematických veličin, která klade značné nároky na hlavní a vedlejší pohony odvalovacích brusek. Brousicí šnek modifikované proměnné geometrie v tangenciálním směru se stává jednoúčelovým nástrojem vytvarovaným pro konkrétní modifikovanou geometrii boku zubu obrobku. Je rovněž velmi citlivý na změny osové vzdálenosti. Z důvodu těchto skutečností proto ve většině případů výroby pouze podélně modifikovaného ozubení nejsou brousicí šneky s modifikovanou tangenciálně proměnnou geometrií používány. Přibližně stejného výsledku se mnohem hospodárněji dosáhne pomocí brousicího šneku s nemodifikovanou geometrií a proměnného radiálního posuvu f_x ve směru X_S vztaženého na otáčku obrobku [5].

Pro obecný případ diagonálního broušení může diagonální poměr nabývat hodnot ze širokého intervalu. Od nulové hodnoty lze velikost D plynule zvětšovat až po hodnotu číselně rovnou využitelné části celkové šířky brousicího šneku b_S (zpravidla 80 až 90 % celkové šířky brousicího šneku T_S). Je-li D v extrémním případě číselně rovno šířce b_S , dochází v rámci posuvu v axiálním směru o hodnotu f_z k posuvu v tangenciálním směru o celou využitelnou část celkové šířky brousicího šneku.

3.1.4 Převodový poměr

Převodový poměr se stanoví ze vztahu (3.3).

$$i_{S-W} = \frac{\omega_S}{\omega_W} = \frac{n_S}{n_W} \quad (3.3)$$

kde: $i_{S-W} [-]$ - převodový poměr,
 $\omega_S [\text{min}^{-1}]$ - úhlová rychlost brousicího šneku,
 $\omega_W [\text{min}^{-1}]$ - úhlová rychlost obrobku,
 $n_S [\text{min}^{-1}]$ - otáčky brousicího šneku,
 $n_W [\text{min}^{-1}]$ - otáčky obrobku.

Vztah (3.3) pro výpočet převodového poměru lze zpřesnit uvážením geometrie brousicího šneku a obrobku pomocí vztahu (3.4), jak doporučují např. [5, 15].

$$i_{S-W} = \frac{d_W \cdot \cos \beta_W}{d_S \cdot \sin \gamma_S} \quad (3.4)$$

kde: $i_{S-W} [-]$ - převodový poměr,
 $d_S [\text{mm}]$ - roztečný průměr brousicího šneku,
 $d_W [\text{mm}]$ - roztečný průměr obrobku,
 $\beta_W [^\circ]$ - úhel sklonu zubů obrobku,
 $\gamma_S [^\circ]$ - úhel stoupání brousicího šneku.

Je-li v průběhu brousicího procesu realizován proměnný radiální posuv na otáčku obrobku f_x za účelem vytvoření podélné modifikace čelního ozubení, musí být roztečné průměry d_W a d_S ve vztahu (3.4) nahrazeny odpovídajícími proměnnými valivými průměry.

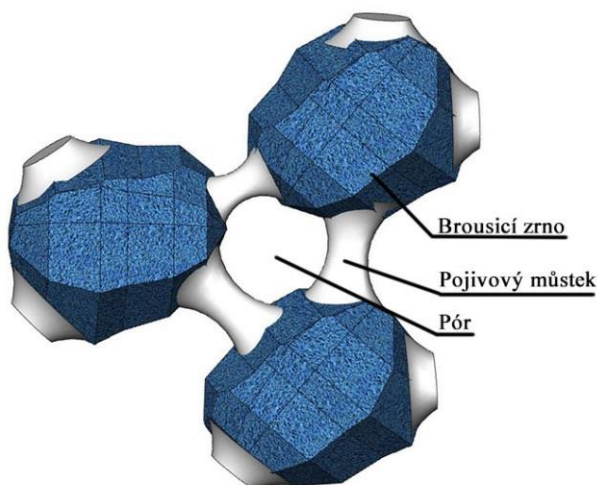
3.2 Brousicí šneky a jejich vlastnosti

Kontinuální odvalovací broušení se řadí do způsobů obrábění s nedefinovanou geometrií břítu nástroje. Brousicí proces je realizován úběrem třísek velmi malých rozměrů vlivem abrazivního účinku brousicích zrn při interakci boku závitů brousicího šneku s povrchem obrobku. Aby brousicí proces v dostatečné míře odpovídal požadavkům hospodárnosti, musí vlastnosti brousicího šneku splňovat řadu kritérií [16]:

- materiál brousicího šneku musí vykazovat takovou tvrdost a houževnatost, aby byl zajištěn efektivní úběr materiálu obrobku při zároveň co nejmenší rychlosti opotřebení,
- materiál brousicího šneku musí být dostatečně odolný vůči vysokým teplotám a teplotním výkyvům,
- materiál brousicího šneku musí mít dostatečnou chemickou odolnost, aby v důsledku extrémních podmínek brousicího procesu (koncentrace silového zatížení, vysoké

teploty, vliv chemických vlastností procesní kapaliny a okolního prostředí) nedocházelo k jeho rychlé degradaci.

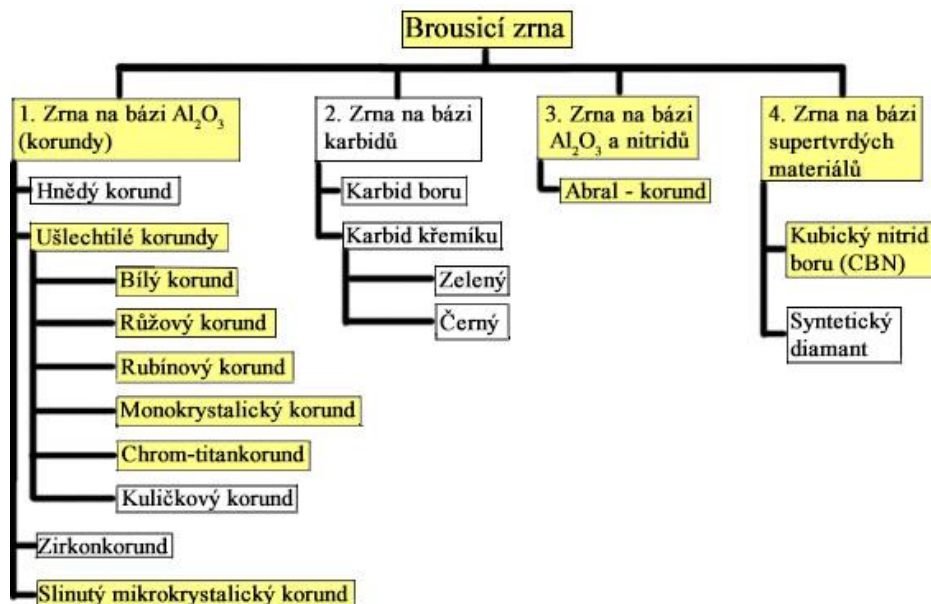
Výsledných technologických vlastností brousícího šneku se dosáhne vhodnou kombinací tří základních strukturních složek, tj. brousících zrn, pojiva a pórů (viz obr. 3.7).



Obr. 3.7 Hlavní složky struktury brousícího šneku [17].

3.2.1 Brousící zrno a jeho druhy

Druhy brousících zrn jsou přehledně znázorněny na obr. 3.8.



Obr. 3.8 Druhy brousících zrn (žlutě vyznačeny druhy brousících zrn používané pro výrobu brousících šneků).

Pozornost se věnuje pouze těm druhům brousících zrn, které jsou běžně používány při výrobě brousících šneků pro kontinuální odvalovací broušení (na obr. 3.8 vyznačeny žlutě).

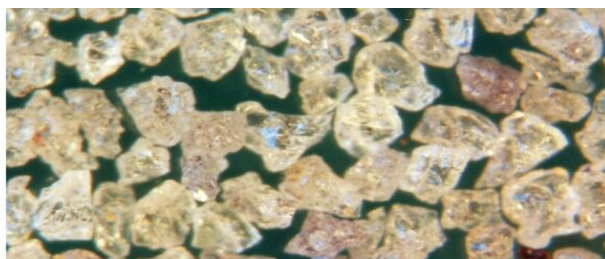
Mezi nejdůležitější vlastnosti brousícího zrna se řadí jeho tvrdost, houževnatost, tepelná vodivost a geometrický tvar, který lze charakterizovat pomocí úhlu špičky.

Ušlechtilé korundy

Ušlechtilé korundy patří do skupiny tzv. tavených korundů, jinak zvaných jako elektrokorundy. Výchozí surovinou pro jejich výrobu je práškový oxid hlinitý o čistotě až 99,90 %, který se získá rafinací bauxitu Bayerovým procesem. Princip výroby spočívá v tavbě oxidu hlinitého v Higginsově či sklopné elektrické obloukové peci za teplot kolem 2050 °C. Tavba v Higginsově elektrické obloukové peci představuje převládající metodu výroby ušlechtilých korundů [16].

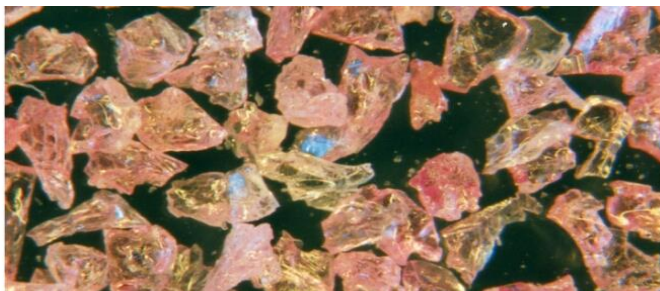
Ze skupiny ušlechtilých korundů se v případě brousicích šneků lze nejčastěji setkat s bílým korundem, růžovým, rubínovým, monokrystalickým či chrom-titankorundem.

Bílý korund (obr. 3.9) představuje univerzální brousicí zrna použitelné pro většinu přesných dokončovacích operací. Čistota bílého korundu se pohybuje v hodnotách 99,8 % Al_2O_3 , tvrdost v mezích 2000 až 2160 HK [18]. Bílý korund je vhodný pro kalené oceli do tvrdosti 62 HRC [19].

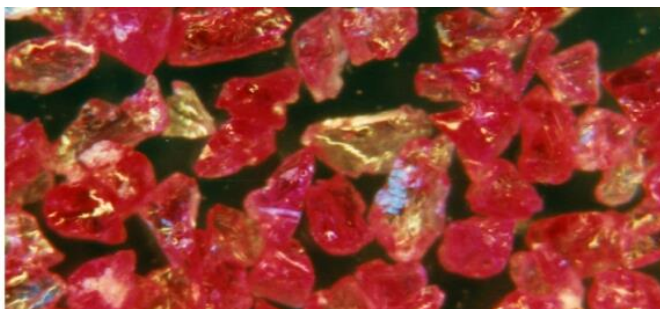


Obr. 3.9 Bílý korund [20].

Růžový korund (obr. 3.10) se od bílého korundu liší obsahem 0,25 % Cr_2O_3 . Zrna růžového korundu jsou obvykle tvrdší a vykazují nižší hodnoty úhlu špičky.



Obr. 3.10 Růžový korund [20].



Obr. 3.11 Rubínový korund [20].

Rubínový korund (obr. 3.11) obsahuje podíl 2,5 % Cr_2O_3 . Oxid chromitý značně přispívá k jeho tvrdosti a křehkosti. Brousicí zrna rubínového korundu mají charakteristický ostrý tvar s malými úhly špičky. Nevýhodná extrémní křehkost však způsobuje rychlé otupení

brousicího nástroje. Rubínový korund se používá např. pro ostření nástrojů, broušení ořezavzdorných ocelí či austenitických korozivzdorných ocelí [21].

Monokrystalický korund se obvykle řadí do skupiny ušlechtilých korundů, ačkoliv jeho výroba nespočívá v tavbě čistého rafinovaného oxidu hlinitého, nýbrž v krystalizaci ze směsi tvořené výchozím bauxitem, podílem koksu a sulfidů železa [16]. Jak popisuje [17], za dostatečně vysokých teplot vzniká roztok tvořený oxidem hlinitým a sulfidem železa, ze kterého řízeným ochlazením krystalizují jednotlivá zrna monokrystalického korundu o čistotě 99 % Al_2O_3 . Snížená poruchovost krystalické mřížky je dle [18] hlavním důvodem vyšší houževnatosti monokrystalického korundu oproti ostatním ušlechtilým korundům. Monokrystalický korund se hodí pro všechny aplikace s vysokými požadavky na kvalitu obrobené plochy [20].

Chrom-titankorund vzniká podobně jako rubínový korund legováním taveniny čistého oxidu hlinitého. Má charakteristickou světle fialovou barvu. V případě kontinuálního odvalovacího broušení je jeho použití méně časté.

Slinutý mikrokrystalický korund

Slinutý mikrokrystalický korund je výsledkem dlouholetého vývoje předních světových výrobců brousicích zrn. Jeho rovnoměrná jemná struktura pozitivně ovlivňuje rychlost opotřebení brousicího zrna v průběhu brousicího procesu. Obvykle se rozlišují dva druhy slinutého mikrokrystalického korundu.

Slinutý bauxitkorund je získáván ze směsi drceného bauxitu, vody a dalších aditiv [16]. Pečlivým promícháním získaná pastovitá hmota se následně vytlačuje, dělí na úseky požadované délky a spéká. Vzniklé brousicí zrna mají charakteristický válcovitý tvar (Spagetti-Korn). Tento druh slinutého mikrokrystalického korundu však pro kontinuální odvalovací broušení nenachází uplatnění.

Sol-Gel-korund (obr. 3.12), označovaný zkratkou „SG“, umožňuje v současné době náhradou brousicích kotoučů elektrokorundovými brousicími zrny dosáhnout výrazného zvýšení životnosti [16]. Brousicí zrna SG bylo patentováno americkou firmou Norton v roce 1986 [22]. Z hlediska svých vlastností tvoří sol-gel korund přechod mezi konvenčními brousicími materiály a superabrazivy (kubický nitrid boru, syntetický diamant). Hlavní výhodou SG brousicích zrn představuje tzv. samoostřicí schopnost, která spočívá v tvorbě nových ostrých břitů v důsledku příznivého lomového chování brousicího zrna během brousicího procesu. Nevýhodou je vysoká cena zapříčiněná náročností výrobního procesu.

Uspokojivé vysvětlení chování brousicího zrna SG v průběhu brousicího procesu podává [16, 23]. Brousicí zrna SG ve svém objemu obsahuje mikrozrna o velikosti řádově 0,5 μm . Tato zrna brání rozvoji makrolomu v charakteristických směrech, které byly pozorovány u brousicích zrn vyrobených metodou tavby výchozích surovin. To propůjčuje brousicímu zrnu SG vynikající houževnatost, odolnost vůči opotřebení a odolnost vůči působení vysokých teplot. K lomům dochází pouze v rámci rozměrů mikrozm, v důsledku čehož si brousicí zrna SG po delší dobu ponechávají svou ostrost.

Z důvodu vysoké ceny a optimálního využití brousicího zrna SG se v současné době používá jeho kombinace s elektrokorundovými brousicími zrny v hmotnostních poměrech 10 %, 30 %, resp. 50 až 60 % SG brousicích zrn.

Broušící nástroje s podílem broušících zrn SG se doporučují pro broušení kalených a zušlechtěných ocelí do tvrdosti 64 HRC [20].



Obr. 3.12 Broušící zrna SG-korundu (nalevo) a broušící zrna abral-korundu (napravo) [5].

Abral-korund

Broušící zrna abral-korundu (obr. 3.12, obchodní označení např. Vortex, LA) je získáváno tavbou čistého oxidu hlinitého s příměsí tzv. aionu. Broušící zrna abral-korundu obohacená směsí nitridů se vyznačují především značnou odolností vůči vysokým teplotám a nesmáčivostí oceli [24]. V důsledku toho dochází k ulpívání materiálu třísky na povrchu broušícího zrna v mnohem menší míře než v případě ušlechtilých korundů. V porovnání s popsaným SG broušícím zrnem má broušící zrna abral-korundu vyšší odolnost vůči opotřebení za vysokých teplot. Minimální potřebná síla působící na broušící zrna potřebná k přechodu z oblasti tření, resp. plastického vytlačování materiálu do oblasti efektivního úběru třísky je podle [24] celkově nižší než v případě ostatních korundových broušících zrn. To znamená, že v průběhu broušícího procesu se při téže koncentraci broušících zrn sníží tepelné ovlivnění povrchové vrstvy.

Abral-korund je vhodný pro širokou škálu oblastí přesného broušení (např. ostření nástrojů) [20].

Broušící šneky s broušícími zrny na bázi korundu jsou v dalším textu souhrnně označeny jako „konvenční broušící šneky“.

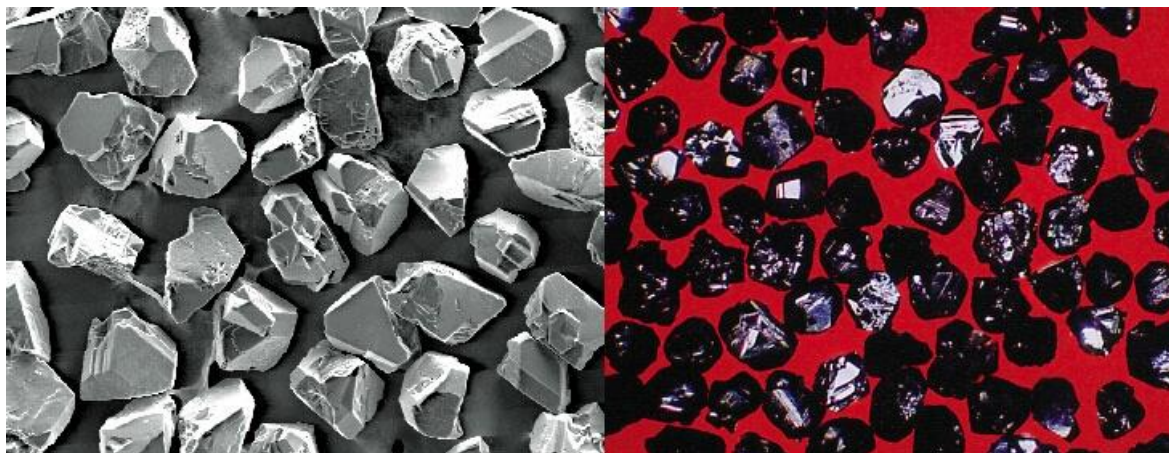
Kubický nitrid boru

Přestože broušící nástroje s broušícími zrny kubického nitridu boru byly na americkém trhu dostupné již v roce 1969, představuje dosud aplikace tohoto materiálu při broušení ozubení předmět současného výzkumu [25].

Broušící zrna kubického nitridu boru (obr. 3.13) má tvrdost přibližně 4700 HK. V porovnání s elektrokorundy je tepelná vodivost tohoto broušícího zrna výrazně vyšší, což vede k příznivějšímu odvodu tepla z oblasti objemu broušícího zrna v blízkosti styku s povrchem obrobku, resp. s odcházející třískou [16]. To přispívá ke snížení rychlosti opotřebení a snížení tepelného ovlivnění povrchové vrstvy obrobku. Vysokou životnost broušících zrn lze také zdůvodnit výsledky provedených laboratorních pozorování [16]. Působením vysušeného horkého vzduchu o teplotě 1200 °C došlo na povrchu broušícího zrna ke tvorbě vrstvy oxidu boritého B_2O_3 . Oxidická vrstva B_2O_3 podle [16] přispívá ke zvýšení odolnosti broušícího zrna vůči opotřebení. Naopak přítomnost vodní páry způsobila po dosažení teploty v místě řezu přibližně 1000 °C v důsledku chemické reakce kubického nitridu boru zrychlené opotřebení broušících zrn. Tím lze vysvětlit nevhodnost

procesních kapalin na bázi vody při broušení zrný kubického nitridu boru, jak uvádí např. [22].

Kubický nitrid boru je vodný pro broušení těžkoobrobitelných ocelí do tvrdosti 55 HRC. Jeho rozšíření však v současné době stále omezuje značně vysoká cena [16].



Obr. 3.13 Kubický nitrid boru [20].

Brousící šneky z kubického nitridu boru se vyrábí ve dvou základních variantách:

- nosné tělo z konstrukční oceli (případně ze slitiny hliníku) s galvanicky nanesenou vrstvou kubického nitridu boru v kovovém pojivu, jehož hlavní složku tvoří nikl. Tyto brousící šneky představují většinu aplikací kubického nitridu boru v kontinuálním odvalovacím broušení [5]. Jejich nevýhodou je nemožnost orovnění. Nosné tělo s opotřebenou vrstvou kubického nitridu boru se obvykle zasílá výrobci k obnovení;
- nosné tělo z konstrukční oceli (případně ze slitiny hliníku) s celistvou nebo segmentovanou vrstvou kubického nitridu boru v keramickém pojivu. Oproti předchozí variantě umožňuje keramické pojivo opakované orovnění, avšak z důvodu nevhodného využití velmi drahého kubického nitridu boru se s těmito brousícími šneky lze setkat pouze ojediněle.

Zvýšení produktivity hrubovací fáze brousícího procesu zároveň se zvýšením přesnosti obrobené plochy lze dosáhnout dvojicí tvořenou hrubovacím a dokončovacím brousícím šnekem s galvanicky nanesenou vrstvou kubického nitridu boru. Oba brousící šneky jsou upevněny na jednom brousícím vřeteně, přičemž hrubovací šnek je vyměnitelný a dokončovací šnek je pevně spojen s brousícím vřetenem [5].

Obecně lze konstatovat, že nasazení brousících šneků s brousícími zrný kubického nitridu boru je v České republice výjimečné. Hlavní důvod představují pořizovací náklady, které v případě konvenčního brousícího šneku činí řádově 10 000 až 20 000,- Kč, v případě brousícího šneku z kubického nitridu boru přibližně 100 000 až 175 000,- Kč.

3.2.2 Pojivo brousících šneků

Pojivo brousícího šneku má za úkol vázat brousící zrna odebírající třísku v průběhu brousícího procesu až do maximálního přípustného stupně opotřebení (otupení). Ve stavu otupení již brousící zrna neodebírají třísku a dochází pouze ke tření, resp. plastickému vytlačování materiálu povrchové vrstvy obrobku. Aby brousící proces mohl dále efektivně pokračovat, musí dojít k uvolnění otupěného brousícího zrna z okolního pojiva a obnažení

nového neopotřebeného brousicího zrna. Vlastnosti pojiva proto hrají při kontinuálním odvalovacím broušení klíčovou roli z hlediska výsledné kvality obrobené plochy.

Brousicí šneky mohou být vázány dvěma druhy pojiva, tj. keramickým a kovovým pojivem.

V případě konvenčních brousicích šneků se prosadilo keramické pojivo, které odpovídá požadavku dostatečné pevnosti pojivových můstků při zároveň co největším objemovém podílu pórů [5]. Kovové pojivo nachází své uplatnění v případě brousicích šneků s brousicími zrny kubického nitridu boru. V následujícím textu se zaměřuje pozornost na vlastnosti keramického pojiva, jehož použití je nejčastější.

V závislosti na podílu skelných částic a slinovací teplotě lze keramická pojiva rozdělit do dvou skupin [16, 17, 22].

Slinovaná pojiva jsou charakteristická hmotnostním podílem živce jako tavidla usnadňujícího slinovací proces. Pojivové můstky vznikají spékáním částí okrajů sousedních keramických částic. Aby bylo dosaženo požadované pevnosti pojivových můstků, je nutno z důvodu malého hmotnostního podílu tavidla aplikovat vysoký objemový podíl pojiva a realizovat slinovací proces v rozmezí teplot 1100 až 1300 °C.

Tavená pojiva se vyznačují podílem skelných částic, které umožňují snížit slinovací teplotu do oblasti pod 1000 °C. Pojivové můstky vznikají tuhnutím skelné fáze, která obklopuje neroztavené částice pojivové směsi [23]. Stejných pevnostních charakteristik pojivových můstků se v porovnání se slinovaným pojivem dosáhne mnohem hospodárněji a s nižším objemem pojivové směsi.

V současnosti přetrvává snaha výrobců brusiva dosáhnout požadovaných vlastností struktury brousicích šneků slinováním za co nejnižších teplot. Důvodem jsou především vysoké náklady na energie a degradace vlastností brousicího zrna v důsledku působení vysokých teplot. Teplotní účinek se projeví zaoblováním hran brousicího zrna, nežádoucí difuzí prvků pojivových látek do struktury brousicího zrna a v případě SG-korundu za teplot nad 1100 °C rekrystalizací mikrostruktury, která způsobí ztrátu samoostřicí schopnosti [23].

3.2.3 Póry

Póry představují prázdný prostor mezi brousicími zrny, který není vyplněn pojivem [26]. Póry mají funkci odvodu třísek z místa řezu a přívod procesní kapaliny do místa řezu. Jejich požadované velikosti se docílí vhodně zvoleným objemovým poměrem pojiva, případně přidáním pórotvorných látek do pojivové směsi (koks, parafin).

3.2.4 Zkoušení brousicích šneků

Požadavky na vlastnosti brousicích šneků z hlediska bezpečnosti a způsoby jejich ověřování jsou stanoveny normou ČSN EN 12413 [27] vztahující se na brousicí nástroje z pojeného brusiva a normou ČSN EN 13236 pro nástroje ze superabraziva. Doplňující charakter k těmto předpisům mají směrnice Federace evropských výrobců brusiva (FEPA) [28].

V následujícím textu se věnuje pozornost nejdůležitějším a nejčastěji prováděným zkouškám brousicích šneků, tj. zkoušce tvrdosti a zkoušce maximální obvodové rychlosti.

Zkouška tvrdosti

Existuje řada zkušebních postupů pro stanovení tvrdosti brousících nástrojů obecně. Patří mezi ně např. zkouška tvrdosti podle Zeisse a Mackensena, akustická zkouška grindsonic, upravená zkouška tvrdosti podle Rockwella nebo zkouška navrtáváním podle německé firmy Winterling. Z důvodu vysokého počtu odlišných zkoušek prováděných jednotlivými výrobci brusiva nelze mezi sebou zjištěné hodnoty tvrdosti srovnávat. V současné době se v největší míře rozšířila zkouška tvrdosti podle Zeisse a Mackensena a akustická zkouška tvrdosti grindsonic [16].

Zkouška tvrdosti podle Zeisse a Mackensena (Zeiss-Mackensen Sandstrahlprüfverfahren) spočívá v abrazivním účinku proudu křemičitého písku, který je urychlován vzduchem o definovaném tlaku a po definované dobu. Dopadající zrna křemičitého písku vytvoří na povrchu brousícího nástroje výmol, jehož hloubka je rozhodujícím kritériem stanovení stupně tvrdosti [16].

Akustická zkouška tvrdosti grindsonic byla vyvinuta na základě nutnosti spolehlivějšího stanovení tvrdosti brousících nástrojů. V průběhu sedmdesátých a osmdesátých let minulého století byla provedena řada studií za účelem porovnat vypovídací schopnost jednotlivých běžných zkoušek tvrdosti. Z těchto studií vyplynula hlavní výhoda akustické zkoušky grindsonic, která spočívá v její přesnosti a spolehlivosti. Akustická zkouška grindsonic vychází z korelace stupňů tvrdosti s hodnotami Youngova modulu pružnosti. Brousící šnek se položí na čtyři bodové podpěry o vymezené vzájemné poloze. Poklepáním pomocí elektromagnetického kladiva ve stanoveném bodě na čele brousícího šneku je vyvoláno mechanické vlnění, jehož periodu snímá přiložený piezoelektrický snímač. Pomocí zjištěné hodnoty periody podélných vln se vypočítá vlastní frekvence brousícího šneku a následně Youngův modul pružnosti [16]. Uvedená metodika vede ke stanovení stupně tvrdosti se spolehlivostí, které ostatními jmenovanými metodami nelze dosáhnout [29].

Zkouška maximální obvodové rychlosti

V rámci zkoušek maximální obvodové rychlosti se brousící šneky testují za obvodových rychlostí rovných 1,2 až 1,5-ti násobku maximální povolené obvodové rychlosti. Testování brousících šneků je realizováno uvnitř opacerovaného pracovního prostoru zkušební stolice. Potřebná zkušební obvodová rychlost brousícího šneku se stanoví na základě požadavků normy ČSN EN 12413. Rozhodujícím kritériem je především vnější průměr brousícího šneku D_S a poměr jeho celkové šířky T_S k vnějšímu průměru D_S .

3.2.5 Parametry brousících šneků

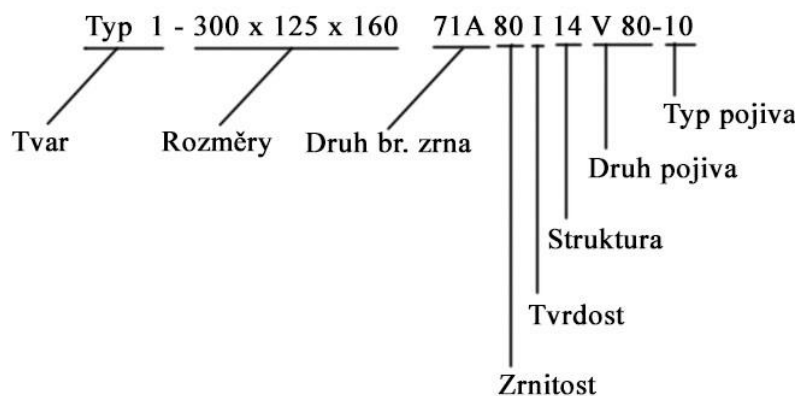
Označování konvenčních brousících šneků respektuje normu ČSN ISO 525 [19]. Příklad označení brousícího šneku je znázorněn na obr. 3.14.

Celkové označení brousícího šneku lze rozdělit na čtyři části, ke kterým patří označení tvaru, označení rozměrů, specifikace složení, maximální obvodová rychlost a ostatní doplňující údaje [19].

Označení tvaru brousícího šneku

V závislosti na tom, zdali tvarování brousícího šneku probíhá již u výrobce, či přímo u koncového zákazníka, lze objednat nevytvarovaný brousící kotouč plochý, označovaný podle normy ČSN ISO 525 jako „typ 1“, nebo brousící šnek s vytvarovaným závitem, označovaný např. podle [30] jako „typ 1sp“. Většina zákazníků v současné době z důvodu

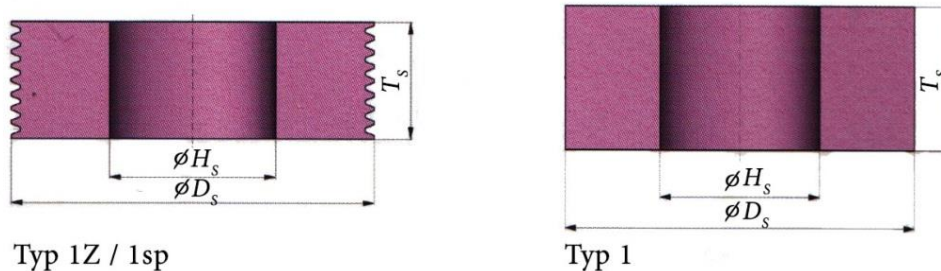
vysokých nákladů na ořnávací nástroje volí variantu brousicího šneku s vytvarovaným závitem, který je po nasazení brousicího šneku na brousící vřeteno odvalovací brusky dodatečně ořvnán.



Obr. 3.14 Značení brousicích šneků.

Rozměry brousicího šneku

Rozměry brousicího šneku se v nevytvarované i vytvarované podobě označují stejným způsobem podle normy ČSN ISO 525 (viz obr. 3.15).



Obr. 3.15 Rozměry brousicích šneků [31].

D_s [mm] – vnější průměr brousicího šneku, T_s [mm] – celková šířka brousicího šneku, H_s [mm] – průměr díry brousicího šneku.

Tolerance vnějšího průměru D_s , celkové šířky T_s a průměru díry H_s spolu s tolerancemi radiálního a axiálního házení stanovuje norma ISO 13942:2000 [32].

Specifikace brousicího šneku

Specifikace brousicího šneku sestává dle ČSN ISO 525 ze sedmi symbolů [19].

Druh brousicího zrna se označuje písmenem a číslem. Písmeno udává základní informaci o druhu použitého brousicího zrna, resp. směsi brousicích zrn. Číslo charakterizuje chemické složení brousicího zrna, případně spolu s písmenem dále specifikuje použitou směs brousicích zrn. Označení používaná jednotlivými výrobci brusiva jsou shrnuta v tab. 3.1. Uvažují se pouze brousící zrna používaná pro výrobu brousicích šneků.

Tab. 3.1 Označování druhů brousicích zrn a směsí brousicích zrn pro brousící šneky.

Druh brousicího zrna / směsi brousicích zrn	Označení používaná některými výrobci
Bílý korund	35A / 42A / 2A
Monokrystalický korund	31A / 27A / 8A

Růžový korund	40A / 57A / 4A
Rubínový korund	47A / 68A / 6A
Bílý korund + SG-korund	70A / 93A / 82A
Abral-korund	LA

Zrnitost konvenčního brousicího šneku se označuje číslem, které roste úměrně střednímu rozměru zrna. Značení zrnitosti konvenčních brousicích šneků je přehledně znázorněno v příloze 1. Jednotkou zrnitosti je *mesh*, definovaný jako počet ok příslušného kontrolního síta vztažený na délkový palec [21]. V případě brousicích šneků se zrnitost pohybuje v rozmezí 80 až 120. Zrnitost brousicího šneku zásadně ovlivňuje hodnoty dosahovaných parametrů profilu drsnosti obrobeneho povrchu.

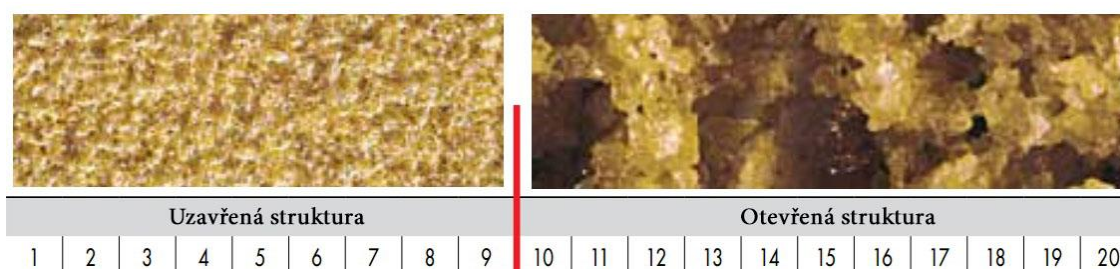
Tvrдость brousicího šneku se nejčastěji charakterizuje jako pevnost pojivových vazeb mezi brousicími zrny. Výslednou tvrdost brousicího šneku lze ovlivnit řadou faktorů, mezi které patří poměrný objem pojiva, druh brousicího zrna, druh pojiva a parametry lisovacího procesu při výrobě brousicího šneku. Podle normy ČSN ISO 525 se stupeň tvrdosti brousicího nástroje označuje písmeny A až Z (používané stupně tvrdosti brousicích nástrojů jsou shrnuty v tab. 3.2). Tvrдость brousicích šneků dosahuje nejčastěji stupňů tvrdosti G (velmi měkký) až L (střední).

Tab. 3.2 Označování tvrdosti dle ČSN ISO 525 [20].

Označení	Tvrдость
D E F G	Velmi měkký
H I J K	Měkký
L M N O	Střední
P Q R S	Tvrдый
T U V Z	Velmi tvrdý

S rostoucí tvrdostí brousicího šneku narůstá pevnost ukotvení brousicích zrn v okolním pojivu, což do vysoké míry přispívá ke stabilitě tvaru. Nevýhodou je pokles poměrného objemu pórů a celkově vyšší dosahovaný stupeň opotřebení brousicích zrn, který může vést k nežádoucímu tepelnému ovlivnění povrchové vrstvy obrobku.

Struktura brousicího šneku koresponduje s poměrným objemem brousicích zrn. Značí se podle ČSN ISO 525 číslem v rozmezí 1 až 20 (viz obr. 3.16).



Obr. 3.16 Hodnocení struktury brousicího šneku [33].

Otevřená, tj. porézní struktura znamená vysoký poměrný objem pórů a větší střední vzdálenosti mezi brousicími zrny. Porezita brousicího šneku usnadňuje odvod třísek a přívod procesní kapaliny do místa řezu. S rostoucí porezitou se však zvyšuje zatížení jednotlivých brousicích zrn v průběhu brousicího procesu, což vede k horší stabilitě tvaru a menší životnosti brousicího šneku.

Druh pojiva brousicího šneku se podle ČSN ISO 525 označuje písmenem, případně dvojicí písmen a doplňujícím číslem. Konvenční brousicí šneky s keramicky vázanými brousicími zrny jsou označeny jednotným symbolem „V“ pro keramické pojivo. Doplňující číslo v případě keramického pojiva poskytuje informaci o tom, zdali se jedná o slinované nebo tavené pojivo.

Typ pojiva se nejčastěji charakterizuje číslem odděleným pomlčkou za označením druhu pojiva. Význam čísla je v závislosti na zvyklostech konkrétního výrobce odlišný. V případě brousicích šneků s obsahem SG-korundu označuje číslo hmotnostní podíl SG-korundu.

Maximální obvodová rychlost

Obvodová rychlost brousicího šneku se stanoví základním vztahem (3.5).

$$v_s = \frac{\pi \cdot d_s \cdot n_s}{60000} \quad (3.5)$$

kde: v_s [m.s⁻¹] - obvodová rychlost brousicího šneku,
 d_s [mm] - roztečný průměr brousicího šneku,
 n_s [min⁻¹] - otáčky brousicího šneku.

Maximální obvodová rychlost je v souladu se směrnicemi FEPA na brousicím šneku vyznačena pruhem příslušné barvy (viz tab. 3.3).

Tab. 3.3 Maximální obvodová rychlost brousicího šneku [20].

Barevné označení	Maximální obvodová rychlost [m.s ⁻¹]
	50
	63
	80

Doplňující údaje

Mimo údaje předepsané normou ČSN ISO 525, resp. příslušnými směrnicemi FEPA se na brousicím šneku obvykle vyznačuje také symbol ověření příslušnými zkouškami dle ČSN EN 12413 a identifikační číslo. Brousicí šneky vytvarované již u výrobce mají zpravidla vyznačen normální modul m_{ns} , normální úhel záběru α_{ns} a počet chodů z_s .

3.2.6 Orovňávání brousicích šneků

Orovňávání brousicích nástrojů je obecně široký pojem, který v sobě zahrnuje řadu značně rozdílných procesů. Terminologie v oblasti orovňávání brousicích nástrojů není ustálená. Podle [34] je vhodné zavést tři základní pojmy:

- *orovňávání* brousicího nástroje v užším slova smyslu představuje sesouhlasení jeho osy s osou brousicího vřetena. Jako orovňávání lze označit také obnovení schopnosti brousicího nástroje odebírat materiál, tj. obnažení nových neotupených brousicích zrn [34];
- *oživování* brousicího nástroje je odstranění přebytečného pojiva v okolí brousicích zrn;
- *tvarování* lze chápat jako tvorbu geometrické plochy požadovaného tvaru na čele, resp. na obvodu brousicího nástroje.

V následujícím textu je pojem „orovnávání“ používán jako obecný termín, kterým se rozumí jak vlastní proces orovnávání v užším smyslu, tak i proces ožívování a tvarování.

Orovnávání brousicích šneků lze v souladu s [5] rozdělit do dvou variant:

- *orovnávání na speciálním stroji*, kde se nejčastěji využívá nůž s přímkovým ostřím, jehož řeznou část tvoří pájená břitová destička z polykrystalického diamantu;
- *orovnávání pomocí integrovaného orovnávacího zařízení odvalovací brusky*, které využívá rotujícího nástroje ve tvaru kotouče s galvanicky nanesenou vrstvou syntetického diamantu [35].

Na základě závěrů shrnutých v [11] je možno parametricky vyjádřit šroubové plochy, které tvoří boky závitů brousicích šneků (viz kapitola 3.1). V souladu s touto prací lze konstatovat, že v případě orovnávání pomocí nože s přímkovým ostřím mohou vzniknout brousicí šneky následujícího charakteru:

- je-li přímkové ostří nastaveno do osové roviny brousicího šneku, vzniká Archimédův šnek s přímkovým profilem v osové rovině. Při běžně používaných roztečných průměrech brousicích šneků d_S (zpravidla 220 – 400 mm) a hodnotách úhlu stoupání γ_S (zpravidla ne větších než 4°) lze tento šnek považovat za dostatečnou náhradu požadovaného evolventního šneku;
- je-li přímkové ostří nastaveno do normální roviny brousicího šneku, tj. vykloněno o úhel stoupání šneku γ_S , vzniká obecný šnek s přímkovým profilem v normální rovině. S klesající hodnotou úhlu γ_S a rostoucím roztečným průměrem d_S se jeho tvar přibližuje evolventnímu šneku ve větší míře, než v případě Archimédova šneku.

Při orovnávání pomocí orovnávacího kotouče závisí výsledný tvar boku závitů brousicího šneku zejména na poloze osy orovnávacího kotouče vůči ose brousicího šneku a na vrcholovém úhlu kuželové geometrické plochy orovnávacího kotouče [11].

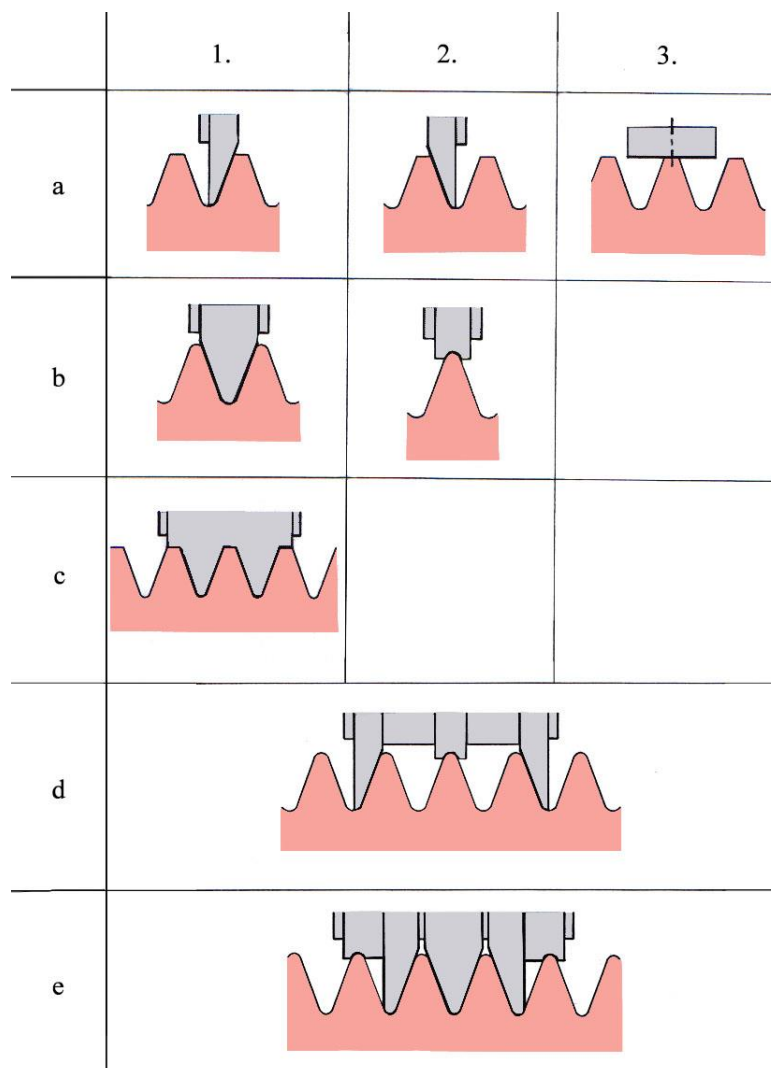
V následujícím textu se klade pozornost především na orovnávání brousicích šneků přímo v pracovním prostoru odvalovací brusky s využitím orovnávacích kotoučů.

Nejobvyklejší varianty uspořádání orovnávacích kotoučů jsou přehledně znázorněny na obr. 3.17.

Orovnávání víceprofilovým kotoučem (viz obr. 3.17, varianta c) je výhodné z hlediska úspory času, avšak neexistuje možnost přizpůsobit orovnávací kotouč rozdílným geometrickým parametrům brousicího šneku. Proto se častěji využívá trojice orovnávacích nástrojů (viz obr. 3.17, varianta a), z nichž dva NC-řízené kotouče orovnávají protilehlé boky závitů brousicího šneku a třetí ručně stavitelný orovnávač umožňuje dodatečné orovnání hlavy.

Současná orovnávací zařízení umožňují vyklonění orovnávacího kotouče okolo osy rovnoběžné s osou brousicího šneku Y_S , stejně jako okolo osy rovnoběžné s osou Z_S . Podle [11] se však jako nejvýhodnější jeví dodržet rovnoběžnost os brousicího šneku a orovnávacího kotouče, poněvadž orovnaný bok závitů se v takovém případě nejvíce přibližuje evolventní šroubové ploše. Bok závitů ve tvaru evolventní šroubové plochy lze orovnááním ve výsledku získat pouze tehdy, ztotožňuje-li se tvořící přímka kuželové geometrické plochy orovnávacího kotouče s tvořící přímkou evolventní šroubové plochy t_{ES} (viz obr. 3.2). Tato podmínka vyžaduje mimo rovnoběžnosti os brousicího šneku

a orovnávacího kotouče rovněž ztotožnění úhlu sklonu tvořící přímky β_{bs} a polovičního vrcholového úhlu kuželové geometrické plochy orovnávacího kotouče.



Obr. 3.17 Tvary a uspořádání orovnávacích kotoučů [1].

3.2.7 Vyvažování brousících šneků

Cílem procesu vyvažování brousících nástrojů je ztotožnit osu rotace brousícího nástroje s osou hlavního centrálního souřadného systému (dále jen „hlavní osou“). Vyvažovací procesy lze rozdělit do dvou kategorií [5, 36]:

- *statické vyvažování* je realizováno pouze v jedné rovině brousícího nástroje. Eliminuje se silový účinek nevyváženosti. Statické vyvážení dostačuje v případě, nepřesáhne-li šířka brousícího nástroje desetinu jeho vnějšího průměru [36]. Princip statického vyvažování brousícího nástroje v klidu spočívá v nastavení soustavy závaží na přírubě brousícího nástroje do takové polohy, aby se výsledná poloha těžiště ztotožnila s osou rotace;
- *dynamické vyvažování* brousících nástrojů je nutno realizovat ve dvou rovinách, aby bylo možno eliminovat momentový účinek v důsledku odlišné polohy hlavní osy od osy rotace [37]. Na rozdíl od statického vyvažování je nezbytné provádět dynamické vyvažování za rotace brousícího nástroje. Podle [37] a v souladu s normou

ČSN ISO 1925 [38] lze dynamickou nevyváženost popsat jako stav, kdy hlavní osa zaujímá vůči ose rotace obecnou mimoběžnou polohu. Speciální případ dynamické nevyváženosti představuje tzv. dvojicová nevyváženost, kdy hlavní osa protíná osu rotace brousicího šneku v jeho těžišti.

V případě brousicích šneků lze celkovou nevyváženost rotující hmoty popsat jako dynamickou nevyváženost, která může způsobit nežádoucí rozkmitání obráběcího systému a zhoršení parametrů přesnosti obrobeneé plochy.

V technické praxi se za účelem eliminace statické a zároveň dynamické nevyváženosti využívá vyvažovacích zařízení (obr. 3.18). V současnosti používaná vyvažovací zařízení snímají vibrace rotujícího vřetena s brousicím šnekem nejčastěji využitím piezoelektrického jevu. Samotné vyvážení se provede manuálně přesouváním dvojice, resp. trojice závaží na protilehlých čelech příruby brousicího šneku. Cílem vyvažovacího procesu je vytvořit pomocí systému závaží takovou silovou soustavu, která svým působením eliminuje účinky dynamické nevyváženosti v průběhu brousicího procesu, tj. vytvoří dvojici stejně velkých a opačně orientovaných setrvačných odstředivých sil. Na začátku procesu vyvažování se jednotlivá závaží ustavují zpravidla v úhlových roztečích 120°. Na základě údajů vyvažovacího zařízení pak pracovník symetricky přestavuje jednotlivá závaží požadovaným směrem.



Obr. 3.18 Vyvažovací zařízení.

Popsaný způsob statického a dynamického vyvažování se provádí před nasazením brousicího šneku na brousicí vřeteno odvalovací brusky. V průběhu brousicího procesu dochází k automatickému vyvažování pomocí integrovaného vyvažovacího zařízení, které je součástí brousicího vřetena. Toto vyvažování se realizuje pouze v jedné rovině pomocí dvojice přestavitelných válcových segmentů. Pokud však nevyváženost brousicího šneku překročí únosnou mez, nedokáže ji automatické vyvažovací zařízení vyrovnat. V takovém případě je nutno provést opětovné vyvážení mimo pracovní prostor odvalovací brusky [5].

Dynamickou nevyváženost charakterizuje statický moment U , který se v případě brousicích šneků určí podle vztahu (3.6) jako součet dílčích statických momentů v rovinách 1, 2, které se ztotožňují s protilehlými čelními rovinami brousicího šneku [5].

$$U = U_1 + U_2 = 1000 \cdot (e_1 + e_2) \cdot m_s \quad (3.6)$$

- kde: U [mm.g] - celkový statický moment nevyváženosti,
 U_1 [mm.g] - statický moment nevyváženosti v rovině 1,
 U_2 [mm.g] - statický moment nevyváženosti v rovině 2,
 e_1 [mm] - excentricita v rámci roviny 1,
 e_2 [mm] - excentricita v rámci roviny 2,
 m_s [kg] - hmotnost brousícího šneku.

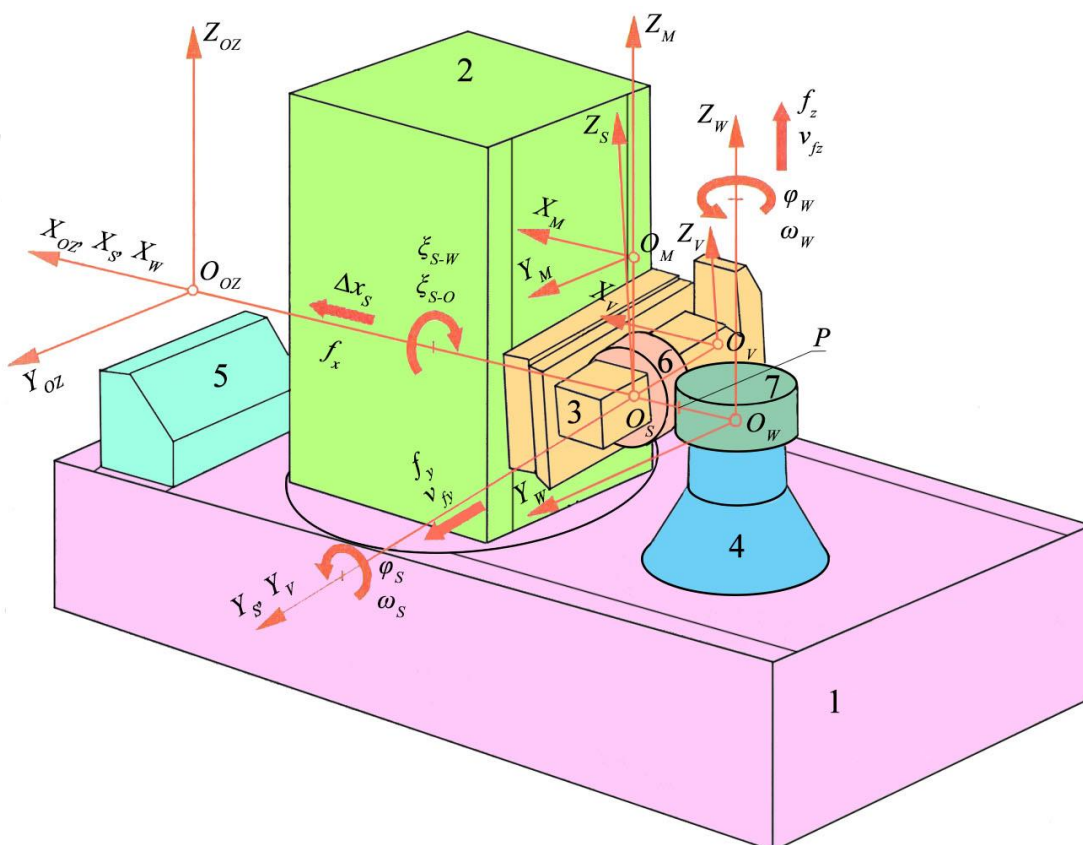
Excentricity e_1 , e_2 se stanoví nahrazením brousícího šneku dvojicí hmotných bodů, které leží v průsečících hlavní osy s rovinami 1, 2. Excentricita e_1 , resp. e_2 je rovna vzdálenosti hmotného bodu v příslušné rovině od osy rotace.

Vyvažovací proces je ukončen v okamžiku, kdy celkový statický moment nevyváženosti U brousícího šneku nepřekračuje maximální přípustnou hodnotu, která se stanoví výpočtem podle normy ČSN ISO 1940-1 [39].

3.3 Odvalovací brusky

Moderní odvalovací brusky lze charakterizovat jako osmi- a víceosé CNC brousící stroje. Každá z NC-řízených os je vybavena vlastním nezávislým servopohonem a odměřovacím systémem, jehož výstupní signál zpracovává centrální řídicí jednotka.

Příklad koncepce odvalovací brusky je s označením hlavních částí a obvykle zaváděných souřadných systémů znázorněn na obr. 3.19.



Obr. 3.19 Koncepce odvalovací brusky dle [5] (použito s laskavým povolením společnosti Reishauer AG).

1 – lože, 2 – stojan, 3 – brousící vřeteník, 4 – unašecí vřeteník, 5 – orovnávací zařízení, 6 – brousící šnek, 7 – obrobek, O_M (X_M , Y_M , Z_M) – souřadný systém odvalovací brusky,

$O_S (X_S, Y_S, Z_S)$ – souřadný systém brousícího šneku, $O_W (X_W, Y_W, Z_W)$ – souřadný systém obrobku, $O_V (X_V, Y_V, Z_V)$ – souřadný systém brousícího vřeteníku, $O_{OZ} (X_{OZ}, Y_{OZ}, Z_{OZ})$ – souřadný systém orovnávacího zařízení, $\zeta_{S-W} [^\circ]$ – úhel sklonu os Z_S, Z_W , $\zeta_{S-O} [^\circ]$ – úhel sklonu os Y_S, Y_O , $\varphi_W [-]$ – úhlová poloha obrobku, $\varphi_S [-]$ – úhlová poloha brousícího šneku, $\omega_W [\text{min}^{-1}]$ – úhlová rychlost obrobku, $\omega_S [\text{min}^{-1}]$ – úhlová rychlost brousícího šneku, $\Delta x_S [\text{mm}]$ – radiální inkrement, $f_x [\text{mm.}]$ – radiální posuv na otáčku obrobku, $f_y [\text{mm}]$ – tangenciální posuv na otáčku obrobku, $v_{fy} [\text{mm.min}^{-1}]$ – tangenciální posuvová rychlost, $f_z [\text{mm}]$ – axiální posuv na otáčku obrobku, $v_{fz} [\text{mm.min}^{-1}]$ – axiální posuvová rychlost.

Mezi známé světové výrobce odvalovacích brusek patří společnosti Reishauer (Švýcarsko), Kapp – Niles (Německo), Gleason (USA), Liebherr (Švýcarsko) a Samputensilli (Itálie).

Stručné srovnání odvalovacích brusek jednotlivých výrobců poskytuje tab. 3.4.

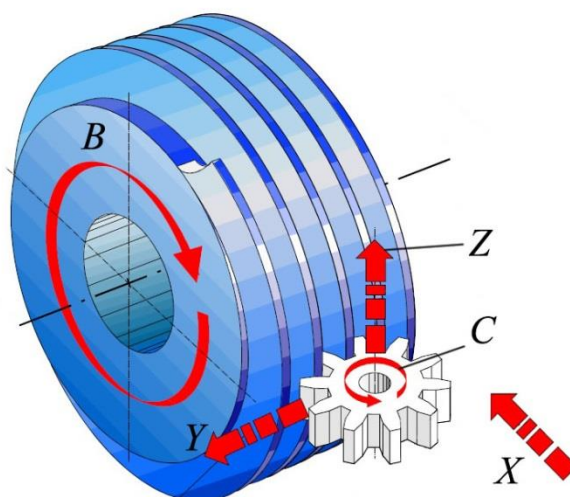
Tab. 3.4 Srovnání parametrů odvalovacích brusek.

Výrobce	Model	Rozsah modulů [mm]	Max. průměr br. šneku [mm]	Max. zdvih br. šneku [mm]	Max. průměr obrobku [mm]	Max. obv. rychlost br. šneku [m.s^{-1}]
Reishauer	RZ 60	0,5 až 3	275	180	80	100
	RZ 160	0,5 až 4	275	180	160	100
	RZ 260	0,5 až 5	275	180	260	80
	RZ 550	0,5 až 8	300	300	560	80
	RZ 1000	1 až 8	300	300	1000	80
Kapp-Niles	KX 1	max. 10	–	–	250	–
	KX 100	0,5 až 3	–	–	125	–
	KX 150	max. 3	–	–	150	–
	KX 160	0,5 až 4,5	–	–	170	–
	KX 260	0,5 až 5	–	–	260 (280)	–
	KX 300	max. 8	–	–	300	–
	KX 500	max. 8	–	–	500	–
Gleason	P 90 G	max. 3	100	400	125	35
	160 TWG	0,5 až 3	240	350	160	75
	300 TWG	0,5 až 3	–	–	300	–
Liebherr	LCS 150	max. 5	240	600	150	150
	LCS 200	max. 8	240	1000	200	150
	LCS 300	max. 8	240	1000	300	150
	LCS 380	max. 8	240	1000	380	150
Samputensilli	G 250	0,5 až 7	250	400	250	80
	G 400	0,7 až 8	220	400	380	140
	GT 500 H	0,5 až 22	300	900	500	160

4 TECHNOLOGICKÉ PODMÍNKY KONTINUÁLNÍHO ODVALOVACÍHO BROUŠENÍ ČELNÍHO OZUBENÍ

Z důvodu vysokého počtu NC-řízených os a souřadných systémů jednotlivých funkčních prvků odvalovací brusky (viz obr. 3.19) se ustálil zjednodušený systém značení hlavních pěti NC-řízených os (viz obr. 4.1):

- B – osa rotace broušícího šneku (rotace kolem osy Z_S),
- C – osa rotace obrobku (rotace kolem osy Z_W),
- X – radiální osa (její směr se shoduje se směrem X_W , X_S , resp. X_{OZ}),
- Y – tangenciální osa (její směr se shoduje se směrem Y_S , resp. Y_{OZ}),
- Z – axiální osa (její směr se shoduje se směrem Z_W).



Obr. 4.1 Hlavní osy při kontinuálním odvalovacím broušení.

B – osa rotace broušícího šneku, C – osa rotace obrobku, X – radiální osa, Y – tangenciální osa, Z – axiální osa [31].

4.1 Základní pojmy

Při definici základních pojmů se vychází přednostně z normy ČSN ISO 3002-5 [40].

Vnější průměr broušícího šneku D_S [mm]

Vnější průměr broušícího šneku D_S je totožný s jeho hlavovým průměrem d_{aS} .

Celková šířka broušícího šneku T_S [mm]

Celková šířka broušícího šneku T_S je jeho šířka měřená ve směru osy Y . Při kontinuálním odvalovacím broušení hraje důležitou roli využitelná část celkové šířky broušícího šneku b_S , kterou lze využít přerušovaným či plynulým tangenciálním posuvem broušícího šneku. Využitelná část celkové šířky broušícího šneku činí zpravidla 80 až 90 % celkové šířky T_S .

Průměr díry broušícího šneku H_S [mm]

Průměr díry broušícího šneku musí respektovat průměr broušícího vřetena odvalovací brusky (viz kapitola 3.2.5).

Geometrická plocha brousicího šneku

Geometrickou plochou brousicího šneku se rozumí část brousicího šneku upravená k odebrání materiálu [40]. Geometrickou plochou brousicího šneku je bok závitů ve tvaru šroubové plochy. Ve výjimečných případech lze brousit i hlavou závitů brousicího šneku.

Geometrická styková plocha brousicího šneku

Geometrická styková plocha vychází ze zidealizovaného modelu styku brousicího šneku s obrobkem se zanedbáním posuvového pohybu, vlivu deformací obrobku, vlivu opotřebení brousicího šneku, vlivu struktury brousicího šneku a vlivu textury povrchu obrobku [40].

Kinematická styková plocha brousicího šneku

Kinematická styková plocha brousicího šneku s obrobkem vychází z modelu zanedbávajícího vliv deformací obrobku, opotřebení brousicího šneku, vliv jeho struktury a textury povrchu obrobku. V porovnání s geometrickou stykovou plochou je zahrnut vliv posuvového pohybu [40].

Uvažovaný bod záběru brousicího šneku s obrobkem U

Uvažovaný bod záběru brousicího šneku s obrobkem U je libovolně zvolený bod geometrické plochy brousicího šneku, vzhledem ke kterému se definují základní složky rychlostí a řezných sil [44]. Bod U leží na průměru brousicího šneku d_{SU} , jehož velikost se v průběhu brousicího procesu pohybuje mezi hlavovým průměrem d_{as} a patním průměrem d_{fs} brousicího šneku.

4.2 Pohyby a rychlosti

Popis pohybů a rychlostí respektuje spolu se zavedenými zvyklostmi podle [5] také terminologii zavedenou normou ČSN ISO 3002-5 [40].

Hlavní pohyb

Hlavním pohybem se rozumí rotace brousicího šneku kolem osy B a související odvalovací pohyb, který je realizován spoluzabírajícími boky zubů obrobku a boky závitů brousicího šneku [5].

Řezná rychlost v_c [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]

Vektor řezné rychlosti má v uvažovaném bodě záběru U v souřadném systému brousicího šneku obecný směr. Složky řezné rychlosti je nutno vyjádřit vzhledem k souřadným osám brousicího šneku.

Složka řezné rychlosti ve směru Z_S , kolmém na osu rotace brousicího šneku B , se podle [5] určí ze vztahu (4.1).

$$v_{cz} = \frac{\pi \cdot d_{SU} \cdot n_S}{60000} \quad (4.1)$$

kde: v_{cz} [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] - složka řezné rychlosti ve směru Z_S ,
 d_{SU} [mm] - průměr brousicího šneku v uvažovaném bodě záběru,
 n_S [min^{-1}] - otáčky brousicího šneku.

Složka řezné rychlosti v_{cz} je totožná s obvodovou rychlostí brousicího šneku v_s . Obvodovou rychlost v_s lze přibližně odhadnout náhradou průměru d_{SU} ve vztahu (4.1) vnějším průměrem brousicího šneku D_s .

Složka vektoru řezné rychlosti ve směru osy Y se podle [5] vyjádří vztahem (4.2).

$$v_{cy} = \frac{\pi \cdot m_{ns} \cdot z_s \cdot n_s}{60000 \cdot \cos \gamma_s} \quad (4.2)$$

kde: v_{cy} [m.s⁻¹] - složka řezné rychlosti ve směru Y ,
 m_{ns} [mm] - normální modul brousicího šneku,
 z_s [-] - počet chodů brousicího šneku,
 n_s [min⁻¹] - otáčky brousicího šneku,
 γ_s [°] - úhel stoupání brousicího šneku.

Složka řezné rychlosti ve směru osy X se stanoví výrazem (4.3) s přihlédnutím k normálnímu úhlu záběru brousicího šneku α_{ns} [5].

$$v_{cx} = \frac{\pi \cdot m_{ns} \cdot z_s \cdot n_s \cdot \sin \alpha_{ns} \cdot \cos \alpha_{ns}}{60000} \quad (4.3)$$

kde: v_{cx} [m.s⁻¹] - složka řezné rychlosti ve směru X ,
 m_{ns} [mm] - normální modul brousicího šneku,
 z_s [-] - počet chodů brousicího šneku,
 n_s [min⁻¹] - otáčky brousicího šneku,
 α_{ns} [°] - normální úhel záběru brousicího šneku.

Řezná rychlost se získá podle výrazu (4.4) jako součet druhých mocnin velikostí jejich jednotlivých složek [5].

$$v_c = \sqrt{v_{cx}^2 + v_{cy}^2 + v_{cz}^2} = \frac{\pi \cdot n_s}{60000} \cdot \sqrt{d_{SU}^2 + (m_{ns} \cdot z_s)^2 \cdot \left[\frac{1}{(\cos \gamma_s)^2} + (\sin \alpha_{ns} \cdot \cos \alpha_{ns})^2 \right]} \quad (4.4)$$

kde: v_c [m.s⁻¹] - řezná rychlost,
 v_{cx} [m.s⁻¹] - složka řezné rychlosti ve směru X ,
 v_{cy} [m.s⁻¹] - složka řezné rychlosti ve směru Y ,
 v_{cz} [m.s⁻¹] - složka řezné rychlosti ve směru Z_s ,
 n_s [min⁻¹] - otáčky brousicího šneku,
 d_{SU} [mm] - průměr brousicího šneku v uvažovaném bodě záběru,
 m_{ns} [mm] - normální modul brousicího šneku,
 z_s [-] - počet chodů brousicího šneku,
 γ_s [°] - úhel stoupání brousicího šneku,
 α_{ns} [°] - normální úhel záběru brousicího šneku.

Posuvový pohyb

Podle definice uvedené ve [41] lze na posuvový pohyb pohlížet jako na relativní pohyb mezi brousicím šnekem a obrobkem, který spolu s hlavním pohybem umožňuje plynulý, resp. přerušovaný úběr třísky.

Při kontinuálním odvalovacím broušení čelního ozubení má posuvový pohyb zpravidla obecný směr. Rozhodující roli hraje axiální složka posuvového pohybu ve směru osy Z a tangenciální složka posuvového pohybu ve směru osy Y .

Axiální posuv na otáčku obrobku f_z [mm] a axiální posuvová rychlost v_{fz} [mm.min⁻¹]

Složka posuvového pohybu v axiálním směru se popisuje axiálním posuvem na otáčku obrobku f_z a axiální posuvovou rychlostí v_{fz} [5]. Vztah pro výpočet axiální posuvové rychlosti má tvar (4.5).

$$v_{fz} = f_z \cdot n_W \approx f_z \cdot n_S \cdot \frac{z_S}{z_W} \quad (4.5)$$

kde: v_{fz} [mm.min⁻¹] - axiální posuvová rychlost,
 f_z [mm] - axiální posuv na otáčku obrobku,
 n_W [min⁻¹] - otáčky obrobku,
 n_S [min⁻¹] - otáčky brousicího šneku,
 z_S [-] - počet chodů brousicího šneku,
 z_W [-] - počet zubů obrobku.

Tangenciální posuv na otáčku obrobku f_y [mm] a tangenciální posuvová rychlost v_{fy} [mm.min⁻¹]

Tangenciální posuv se u odvalovacích brusek zadává nejčastěji v podobě faktoru tangenciálního posuvu f_{sh} , definovaného jako tangenciální posuv na otáčku obrobku f_y vztažený na korespondující hodnotu axiálního posuvu na otáčku obrobku f_z . Faktor tangenciálního posuvu f_{sh} je číselně roven diagonálnímu poměru D (viz kapitola 3.1.2). Faktor tangenciálního posuvu může být stanoven jako bezrozměrná veličina definovaná vztahem 4.6, nebo častěji v jednotkách mm tangenciálního posuvu na 10 mm axiálního posuvu na otáčku obrobku. V takovém případě se hledaná hodnota f_{sh} určí jako desetinásobek hodnoty určené vztahem 4.6.

$$f_{sh} = \frac{f_y}{f_z} \quad (4.6)$$

kde: f_{sh} [-] - faktor tangenciálního posuvu,
 f_y [mm] - tangenciální posuv na otáčku obrobku,
 f_z [mm] - axiální posuv na otáčku obrobku.

Tangenciální posuvová rychlost v_{fy} se určí nahrazením axiálního posuvu na otáčku obrobku f_z ve vztahu 4.5 tangenciálním posuvem na otáčku obrobku f_y .

Poměr rychlostí q [-]

Při výpočtu poměru rychlostí q doporučuje [5] dosazovat posuvovou rychlost v_{ft} v tečném směru k boční křivce zubu obrobku, kterou lze stanovit z výrazu (4.7).

$$v_{ft} = \frac{v_{fz}}{\cos \beta_W} \quad (4.7)$$

kde: v_{ft} [mm.min⁻¹] - posuvová rychlost v tečném směru k boční křivce zubu obrobku,
 v_{fz} [mm.min⁻¹] - axiální posuvová rychlost,
 β_W [°] - úhel sklonu zubu obrobku.

Je-li známá velikost posuvové rychlosti v tečném směru k boční křivce obrobku, lze přímo ze vzorce (4.8) vypočítat poměr rychlostí q [40].

$$q = \frac{60\,000 \cdot v_c}{v_{ft}} \quad (4.8)$$

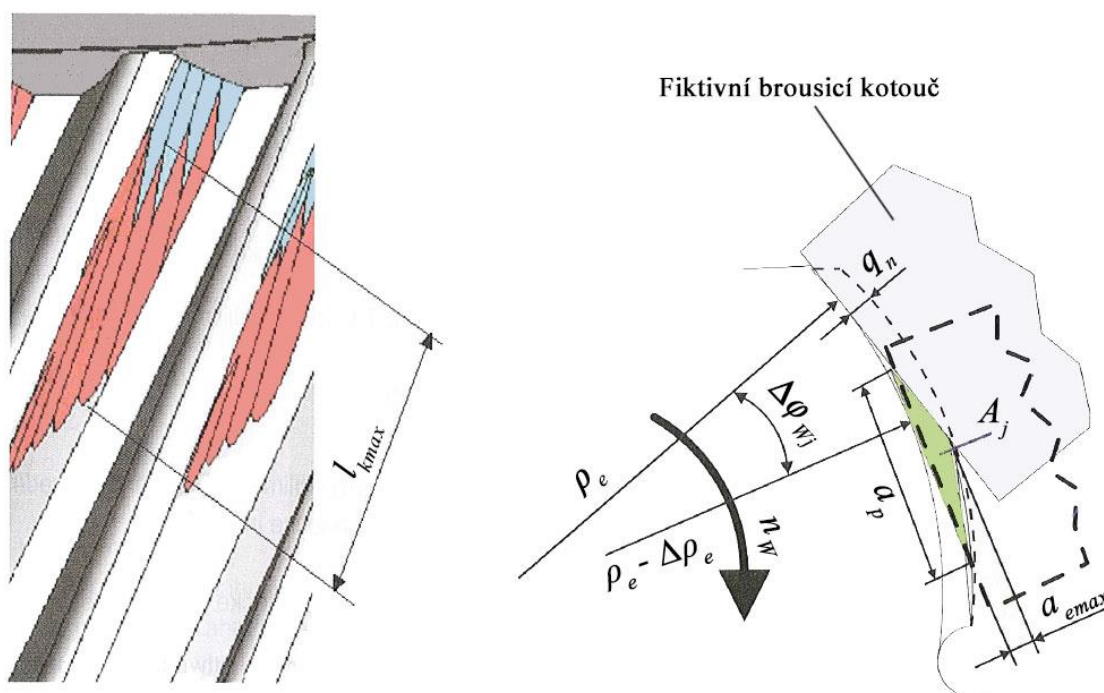
kde: q [-] - poměr rychlostí,
 v_c [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] - řezná rychlost,
 v_{ft} [$\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$] - posuvová rychlost v tečném směru k boční křivce zubu obrobku.

Zvýšením poměru rychlostí q lze zlepšit hodnoty parametrů profilu drsnosti povrchu a snížit opotřebení broušícího šneku, avšak dochází k nárůstu průměrné teploty v místě řezu [22].

4.3 Veličiny záběru broušícího šneku

Popis veličin záběru broušícího šneku při kontinuálním odvalovacím broušení respektuje spolu se zavedenými zvyklostmi podle [5, 15] také terminologii zavedenou normou ČSN ISO 3002-5 [40].

Veličiny záběru broušícího šneku se popisují na základě modelu znázorněného na obr. 4.2. Model vychází z náhrady broušícího šneku fiktivním plochým broušícím kotoučem o vnějším průměru rovném ekvivalentu průměru broušícího šneku d_{eq} a šířce dané axiálním záběrem a_p .



Obr. 4.2 Veličiny záběru při kontinuálním odvalovacím broušení [5] (použito s laskavým povolením společnosti Reishauer AG).

n_w [min^{-1}] – otáčky obrobku, l_{kmax} [mm] – maximální kinematická délka styku, ρ_e [mm] – poloměr křivosti normálního profilu boku zubu obrobku v uvažovaném bodě záběru, $\Delta\varphi_{wj}$ [-] – jednotkové natočení obrobku, $\Delta\rho_e$ [mm] – změna poloměru křivosti normálního profilu boku zubu při jednotkovém natočení obrobku, a_p [mm] – axiální záběr, a_{emax} [mm] – maximální hodnota radiálního záběru, q_n [mm] – odebíraná část celkového přírůstku na jeden zdvih broušícího šneku, A_j [mm^2] – průřez vrstvy odebíraného materiálu při jednotkovém natočení obrobku.

Ekvivalent průměru brousicího šneku d_{eq} [mm]

Ekvivalent průměru brousicího nástroje d_{eq} obecně slouží k porovnávání rozdílných brousicích operací z hlediska kontaktních poměrů v oblasti úběru třísky [21]. Pro kontinuální odvalovací broušení doporučuje [5] převést brousicí proces na jednodušší model rovinného obvodového broušení s uvážením fiktivního plochého brousicího kotouče. Nositelka společného jednotkového normálového vektoru N_D boku zubu obrobku a obvodové válcové plochy brousicího kotouče v každém okamžiku záběru prochází osou rotace brousicího kotouče. Tuto skutečnost lze využít pro stanovení ekvivalentu průměru d_{eq} na základě vztahu (4.9).

$$d_{eq} = \frac{d_{SU}}{\sin \alpha_{nW}} \quad (4.9)$$

kde: d_{eq} [mm] - ekvivalent průměru brousicího šneku,
 d_{SU} [mm] - průměr brousicího šneku v uvažovaném bodě záběru,
 α_{nW} [°] - normální úhel záběru obrobku.

Podle [5] je vhodné popsat úběr třísky při kontinuálním odvalovacím broušení pomocí veličin vztahených na natočení brousicího šneku odpovídající délce 1 mm šroubovice na průměru brousicího šneku d_{SU} v uvažovaném bodě záběru. S tímto pootočením koresponduje jednotkové natočení obrobku $\Delta\varphi_{Wj}$.

Délku části šroubovice l_{SU} na průměru brousicího šneku d_{SU} korespondující s jednou otáčkou brousicího šneku o úhel 360° lze podle [5] získat pomocí vztahu (4.10).

$$l_{SU} = \sqrt{(\pi \cdot d_{SU})^2 + (\pi \cdot m_{xS} \cdot z_S)^2} \quad (4.10)$$

kde: l_{SU} [mm] - délka části šroubovice na průměru brousicího šneku d_{SU} na otáčku brousicího šneku,
 d_{SU} [mm] - průměr brousicího šneku v uvažovaném bodě záběru,
 m_{xS} [mm] - osový modul brousicího šneku,
 z_S [-] - počet chodů brousicího šneku.

Jednotkové natočení obrobku $\Delta\varphi_{Wj}$ (viz obr. 4.2) se podle [5] získá vydělením úhlové rozteče obrobku délkou l_{SU} a vynásobením počtem chodů brousicího šneku z_S , jak ukazuje vztah (4.11). Přestože jednotka veličiny $\Delta\varphi_{Wj}$ plynoucí ze vztahu (4.11) má tvar mm^{-1} , pracuje se s jednotkovým natočením obrobku v dalších výpočtech v souladu s konvencemi podle [5] jako s bezrozměrnou veličinou.

$$\Delta\varphi_{Wj} = \frac{2 \cdot \pi \cdot z_S}{z_W \cdot l_{SU}} \quad (4.11)$$

kde: $\Delta\varphi_{Wj}$ [-] - jednotkové natočení obrobku,
 z_S [-] - počet chodů brousicího šneku,
 z_W [-] - počet zubů obrobku,
 l_{SU} [mm] - délka části šroubovice na průměru brousicího šneku d_{SU} na otáčku brousicího šneku.

Poloměr křivosti ρ_e normálního profilu boku zubu obrobku v uvažovaném bodě záběru (viz obr. 4.2) lze v případě čelního ozubení s přímými zuby ztotožnit s poloměrem křivosti čelního profilu boku zubu podle vztahu (4.12).

$$\rho_e = \sqrt{\left(\frac{1}{2} \cdot d_{wu}\right)^2 - \left(\frac{1}{2} d_{bw}\right)^2} \quad (4.12)$$

- kde: ρ_e [mm] - poloměr křivosti normálního profilu zubu obrobku v uvažovaném bodě záběru,
 d_{wu} [mm] - průměr obrobku v uvažovaném bodě záběru,
 d_{bw} [mm] - průměr základního válce obrobku.

V případě čelního ozubení se šikmými zuby je nutno stanovit poloměr křivosti normálního profilu boku zubu obrobku v uvažovaném bodě záběru výpočtem pomocí Meusnierovy věty [2], nebo s využitím CAD - softwaru.

Axiální záběr a_p [mm]

Axiální záběr a_p (viz obr. 4.2) se odhadne s využitím poloměru křivosti ρ_e normálního profilu boku zubu obrobku v uvažovaném bodě záběru a odebírané části q_n celkového přídávku na jeden zdvih brousicího šneku. Výsledný vztah má podle [5] tvar (4.13).

$$a_p \approx \sqrt{\frac{2 \cdot \rho_e \cdot q_n}{1000}} \quad (4.13)$$

- kde: a_p [mm] - axiální záběr,
 ρ_e [mm] - poloměr křivosti normálního profilu zubu obrobku v uvažovaném bodě záběru,
 q_n [μ m] - odebíraná část celkového přídávku na jeden zdvih brousicího šneku.

Radiální záběr a_e [mm]

Radiální záběr a_e má ve směru axiálního záběru a_p proměnnou velikost, jak plyne z obr. 4.2. Pro výpočet průřezu vrstvy odebíraného materiálu při jednotkovém natočení obrobku A_j má stěžejní význam maximální hodnota radiálního záběru a_{emax} [5]. Tato hodnota se přibližně určí pomocí vztahu (4.14).

$$a_{emax} \approx \left(a_p - \frac{1}{2} \cdot \rho_e \cdot \Delta\varphi_{Wj}\right) \cdot \Delta\varphi_{Wj} \quad (4.14)$$

- kde: a_{emax} [mm] - maximální hodnota radiálního záběru,
 a_p [mm] - axiální záběr,
 ρ_e [mm] - poloměr křivosti normálního profilu zubu obrobku v uvažovaném bodě záběru,
 $\Delta\varphi_{Wj}$ [-] - jednotkové natočení obrobku.

Maximální kinematická délka styku l_{kmax} [mm]

Maximální kinematická délka styku l_{kmax} (obr. 4.2) koresponduje s maximální hodnotou radiálního záběru a_{emax} . Jedná se o délku oblouku daného průnikem kinematické stykové plochy a roviny kolmé na osu fiktivního brousicího kotouče [40]. Hodnotu l_{kmax} lze podle [5] určit vztahem (4.15).

$$l_{kmax} \approx \sqrt{a_{emax} \cdot d_{eq}} + \frac{f_z}{2} \quad (4.15)$$

- kde: l_{kmax} [mm] - maximální kinematická délka styku,
 a_{emax} [mm] - maximální hodnota radiálního záběru,
 d_{eq} [mm] - ekvivalent průměru brousicího šneku,
 f_z [mm] - axiální posuv na otáčku obrobku.

Maximální kinematická délka styku hraje z hlediska výsledku brousicího procesu zásadní roli. Jak zdůrazňuje např. [42], s rostoucí maximální kinematickou délkou styku vzrůstá průměrná teplota v místě řezu a velikost normální síly F_n (viz kapitola 4.5). Naopak klesají hodnoty parametrů profilu drsnosti povrchu.

Průřez vrstvy odebíraného materiálu při jednotkovém natočení obrobku A_j [mm²]

Průřez vrstvy A_j odebíraného materiálu při jednotkovém natočení obrobku $\Delta\varphi_{wj}$ se podle [5] stanoví vztahem (4.16).

$$A_j \approx \frac{1}{2} \cdot a_{emax} \cdot a_p \approx \frac{q_n \cdot \rho_e \cdot \Delta\varphi_{wj}}{1000} \quad (4.16)$$

- kde: A_j [mm²] - průřez vrstvy odebíraného materiálu při jednotkovém natočení obrobku,
 a_{emax} [mm] - maximální hodnota radiálního záběru,
 a_p [mm] - axiální záběr,
 q_n [μm] - odebíraná část celkového přídávku na jeden zdvih brousicího šneku.
 ρ_e [mm] - poloměr křivosti normálního profilu zubu obrobku v uvažovaném bodě záběru,
 $\Delta\varphi_{wj}$ [-] - jednotkové natočení obrobku.

Ve vztahu (4.16) je součin maximální hodnoty radiálního záběru a_{emax} a axiálního záběru a_p převeden na součin veličin q_n , ρ_e a $\Delta\varphi_{wj}$ se zanedbáním členu obsahujícího druhou mocninu $\Delta\varphi_{wj}$. Ze zjednodušeného vztahu plyne, že průřez vrstvy odebíraného materiálu při jednotkovém natočení obrobku roste ve směru výšky zubu obrobku. Jeho hodnota dosahuje minima v oblasti paty a maxima v oblasti hlavy zubu obrobku.

Postupem uvedeným v [15] lze vypočítat průřez vrstvy odebíraného materiálu vztažený na jednotku axiálního záběru. Jeho hodnota se přímo dosadí do výpočtu objemového výkonu Q'_w vztaženého na jednotku axiálního záběru. Postup podle [15] však neumožňuje analyzovat závislost veličin záběru na poloze bodu záběru ve směru výšky zubu obrobku.

4.4 Úběr materiálu obrobku a opotřebení brousicího šneku

Popis veličin úběru materiálu obrobku a opotřebení brousicího šneku při kontinuálním odvalovacím broušení respektuje spolu se zvyklostmi podle [5, 15] také terminologii zavedenou normou ČSN ISO 3002-5 [40].

Odebraný materiál V_w [mm³]

Odebraný materiál je materiál obrobku odstraněný v podobě třísek během uvažovaného časového úseku.

Objemový výkon Q_W [$\text{mm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$]

Objemový výkon je podle [40] definován vztahem (4.17).

$$Q_W = \frac{V_W}{\Delta t} = \frac{A_j \cdot v_{ft}}{z_S} \quad (4.17)$$

kde:	Q_W [$\text{mm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$]	-	objemový výkon,
	V_W [mm^3]	-	odebraný materiál,
	Δt [min]	-	délka časového úseku,
	A_j [mm^2]	-	průřez vrstvy odebíraného materiálu při jednotkovém natočení obrobku,
	v_{ft} [$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$]	-	posuvová rychlost v tečném směru k boční křivce zubu obrobku,
	z_S [-]	-	počet chodů brousícího šneku.

Při kontinuálním odvalovacím broušení vícechodým brousícím šnekem dochází k úběru materiálu ve více bodech boku závitu brousícího šneku. Tuto skutečnost je nutno do vztahu (4.17) zahrnout dělením hodnoty objemového výkonu počtem chodů brousícího šneku z_S . Vztah (4.17) se však používá výjimečně, a sice z důvodu obtížnosti vyhodnocení střední hodnoty průřezu A_j v rámci daného časového úseku.

Objemový výkon na jednotku axiálního záběru Q'_W [$\text{mm}^3 \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$]

Objemový výkon na jednotku axiálního záběru Q'_W se získá výpočtem podle vztahu (4.18) pomocí průřezu vrstvy odebíraného materiálu při jednotkovém natočení obrobku A_j a posuvové rychlosti v_{ft} v tečném směru k boční křivce zubu obrobku [5].

$$Q'_W = \frac{A_j \cdot v_{ft}}{a_p \cdot z_S} \approx \frac{q_n \cdot v_{ft}}{1000 \cdot z_S} \quad (4.18)$$

kde:	Q'_W [$\text{mm}^3 \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$]	-	objemový výkon na jednotku axiálního záběru,
	A_j [mm^2]	-	průřez vrstvy odebíraného materiálu při jednotkovém natočení obrobku,
	v_{ft} [$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$]	-	posuvová rychlost v tečném směru k boční křivce zubu obrobku,
	a_p [mm]	-	axiální záběr,
	z_S [-]	-	počet chodů brousícího šneku,
	q_n [μm]	-	odebíraná část celkového přídávku na jeden zdvih brousícího šneku.

Ze vztahu (4.18) lze vypočítat množství odebraného materiálu V_W . Principem výpočtu je dle [5] vynásobení hodnoty Q'_W délkou normálního, resp. osového profilu boku zubu obrobku a následně vynásobení délkou časového úseku Δt . Pro čelní ozubení s přímými zuby má výsledný vztah tvar (4.19).

$$V_W = Q'_W \cdot \frac{(d_{aW}^2 - d_{bW}^2) - (d_{fW}^2 - d_{bW}^2)}{4 \cdot d_{bW}} \cdot \Delta t \quad (4.19)$$

kde:	V_W [mm^3]	-	odebraný materiál,
	Q'_W [$\text{mm}^3 \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$]	-	objemový výkon na jednotku axiálního záběru,

d_{aw} [mm]	-	hlavový průměr obrobku,
d_{fw} [mm]	-	patní průměr obrobku,
d_{bw} [mm]	-	průměr základního válce obrobku,
Δt [min]	-	délka časového úseku.

Ekvivalentní tloušťka třísky h_{eq} [mm]

Ekvivalentní tloušťka třísky se vypočítá pomocí vztahu (4.20) jako podíl objemového výkonu Q'_w na jednotku axiálního záběru a řezné rychlosti v_c [44].

$$h_{eq} = \frac{Q'_w}{60 \cdot v_c} \quad (4.20)$$

kde: h_{eq} [μm]	-	ekvivalentní tloušťka třísky,
Q'_w [$\text{mm}^3 \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$]	-	objemový výkon na jednotku axiálního záběru,
v_c [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]	-	řezná rychlost.

Ekvivalentní tloušťka třísky významným způsobem ovlivňuje množství tepla předaného obrobku v průběhu broušicího procesu, stejně jako přesnost obrobené plochy.

Objemové opotřebení broušicího šneku V_S [mm^3]

Objemové opotřebení broušicího šneku se rovná objemu jeho materiálu opotřeбенému za daný časový úsek. Existují vztahy pro přibližný výpočet objemového opotřebení V_S , které vychází z geometrie evolventního broušicího šneku. Za účelem vyhodnocení je nutno nejprve experimentálně stanovit průměrnou hloubku opotřebení ve směru normály boku závitů broušicího šneku. Její hodnota se stanovuje velmi obtížně, poněvadž závisí na mnoha faktorech.

Rychlost opotřebení broušicího šneku Q_S [$\text{mm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$]

Rychlost opotřebení broušicího šneku se v souladu s [40] stanoví podle vztahu (4.21).

$$Q_S = \frac{V_S}{\Delta t} \quad (4.21)$$

kde: Q_S [$\text{mm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$]	-	rychlost opotřebení broušicího šneku,
V_S [mm^3]	-	objemové opotřebení broušicího šneku,
Δt [min]	-	délka časového úseku.

Koeficient broušení G [-]

Koeficient broušení lze vyhodnotit s využitím vztahu (4.22) jako poměr odebraného materiálu V_W a objemového opotřebení broušicího šneku V_S [40].

$$G = \frac{V_W}{V_S} \quad (4.22)$$

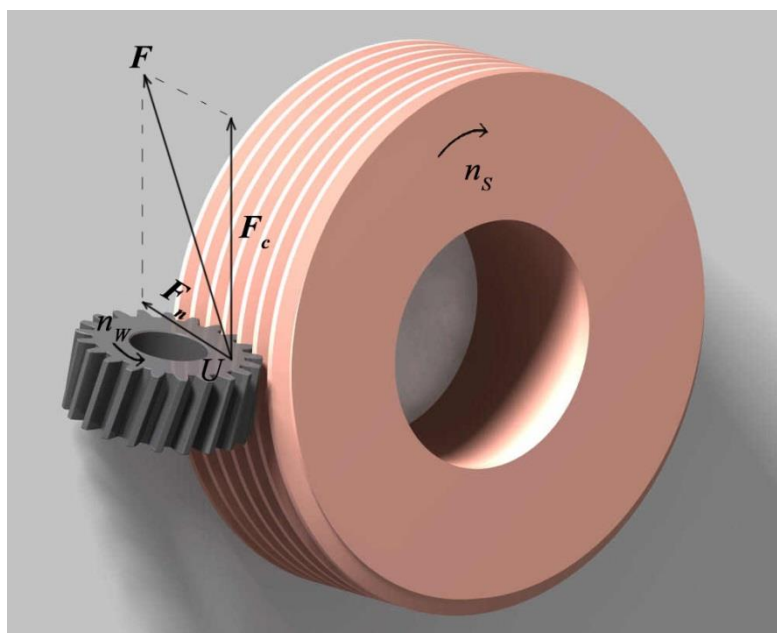
kde: G [-]	-	koeficient broušení,
V_W [mm^3]	-	odebraný materiál,
V_S [mm^3]	-	objemové opotřebení broušicího šneku.

Podrobnější vztahy pro výpočet koeficientu broušení uvádí např. [5].

4.5 Veličiny síly a výkonu

V kapitole 4.3 byl záběr brousícího šneku s obrobkem převeden na model obvodového rovinného broušení fiktivním plochým brousícím kotoučem o průměru d_{eq} a šířce rovné axiálnímu záběru a_p . Z tohoto modelu se vychází rovněž při popisu silových poměrů kontinuálního odvalovacího broušení.

Celková řezná síla F , působící v uvažovaném bodě záběru U , má v souřadném systému brousícího šneku, resp. v souřadném systému obrobku obecný směr. Podle závěrů uvedených v [5] je možné zanedbat složku celkové řezné síly ve směru axiálního záběru a_p . Celkovou řeznou sílu F lze totiž vnímat jako součet velkého množství jejich dílčích elementů, kterými působí jednotlivá statisticky náhodně orientovaná brousící zrna na obrobek. Poněvadž k úběru materiálu dochází pouze obvodem fiktivního brousícího kotouče, lze očekávat, že složky jednotlivých silových elementů se v axiálním směru vzhledem k fiktivnímu brousícímu kotouči vzájemně vyruší. Na základě této úvahy se celková řezná síla F rozloží do dvou směrů (viz obr. 4.3).



Obr. 4.3 Síly při kontinuálním odvalovacím broušení.

U – uvažovaný bod záběru, F [N] – celková řezná síla, F_c [N] – řezná síla, F_n [N] – normální síla, n_s [min^{-1}] – otáčky brousícího šneku, n_w [min^{-1}] – otáčky obrobku.

Vhodným způsobem určení velikosti řezných sil je měření zatížení brousícího či unášecího vřetena pomocí dynamometrů. Nemí-li potřebné vybavení pro realizaci tohoto měření k dispozici, lze velikost řezných sil přibližně odhadnout empirickými vztahy. I v jejich případě je však nezbytné nejprve experimentálně stanovit hodnoty koeficientů a exponentů, které v těchto vztazích figurují.

Normální síla F_n [N]

Normální síla F_n působí ve směru společné normály v uvažovaném bodě záběru. Její velikost lze podle [5] odhadnout empirickým vztahem (4.23).

$$F_n = k_n \cdot h_{eq}^{\varepsilon_1} \cdot l_{kmax}^{\varepsilon_2} \cdot a_p \quad (4.23)$$

kde:	F_n [N]	-	normální síla,
	k_n [N.mm ⁻²]	-	specifická normální síla,
	h_{eq} [μm]	-	ekvivalentní tloušťka třísky,
	ε_1 [-]	-	exponent vlivu ekvivalentní tloušťky třísky,
	l_{kmax} [mm]	-	maximální kinematická délka styku,
	ε_2 [-]	-	exponent vlivu maximální kinematické délky styku,
	a_p [mm]	-	axiální záběr.

Podle [5] je vhodné volit hodnoty exponentů $\varepsilon_1 \approx 4/6$ a $\varepsilon_2 \approx 5/6$. Hodnota specifické normální síly k_n závisí především na materiálu brousicího šneku, materiálu obrobku a parametrech chlazení.

Řezná síla F_c [N]

Řezná síla F_c působí ve směru řezné rychlosti v_c . Její velikost se odhadne vztahem (4.24) na základě normální síly F_n .

$$F_c = \mu_F \cdot F_n \quad (4.24)$$

kde:	F_c [N]	-	řezná síla,
	μ_F [-]	-	faktor poměru řezné síly a normální síly,
	F_n [N]	-	normální síla.

Faktor poměru řezné síly a normální síly μ_F závisí v největší míře na materiálu obrobku, parametrech chlazení a řezné rychlosti v_c [5]. Jeho hodnotu je nutno stanovit experimentálně.

Celková řezná síla F [N]

Velikost celkové řezné síly F lze určit pomocí výrazu (4.25).

$$F = \sqrt{F_c^2 + F_n^2} \quad (4.25)$$

kde:	F [N]	-	celková řezná síla,
	F_c [N]	-	řezná síla,
	F_n [N]	-	normální síla.

Stanovení velikosti řezných sil při kontinuálním odvalovacím broušení ztežuje především proměnná velikost parametrů vstupujících do výpočtu podle vztahu (4.23), dále počet bodů záběru mezi brousicím šnekem a obrobkem, který zpravidla nebývá konstantní. Počet bodů záběru plyne z hodnoty celkového součinitele záběru ε_γ [43]. Je-li jeho hodnota neceločíselná, mění se v průběhu odvalu silové zatížení unášecího vřetena, což zvyšuje riziko nežádoucího rozkmitání obráběcího systému.

Výkon na brousicím vřetenu odvalovací brusky P_S [kW]

Výkon na brousicím vřetenu odvalovací brusky lze přibližně spočítat zjednodušeným vztahem (4.26).

$$P_S = \frac{\pi \cdot F_c \cdot d_S \cdot n_S}{6 \cdot 10^7} \quad (4.26)$$

kde:	P_S [kW]	-	výkon na brousicím vřetenu odvalovací brusky,
	F_c [N]	-	řezná síla,

d_s [mm] - roztečný průměr broušícího šneku,
 n_s [min⁻¹] - otáčky broušícího šneku.

Výkon na unašecím vřetenu odvalovací brusky lze vyčíslit analogickým způsobem s uvážením otáček obrobku n_w a průmětů řezných sil do směru osy Y_w .

4.6 Rozsah používaných řezných podmínek

Doporučené hodnoty řezných podmínek jsou shrnuty v tab. 4.1. Podle [31] při nastavení těchto řezných podmínek lze v rámci hrubovací fáze broušícího procesu očekávat objemový výkon na jednotku axiálního záběru Q_w' řádově 120 – 240 mm³.mm⁻¹.min⁻¹, v rámci dokončování pak 60 – 120 mm³.mm⁻¹.min⁻¹.

Tab. 4.1 Doporučené hodnoty řezných podmínek při kontinuálním odvalovacím broušení.
 v_s [m.s⁻¹] – obvodová rychlost broušícího šneku, Δx_s [mm] – radiální inkrement,
 f_z [mm] – axiální posuv na otáčku obrobku.

Řezné podmínky při kontinuálním odvalovacím broušení čelního ozubení			
	v_s [m.s ⁻¹]	Δx_s [mm]	f_z [mm]
Hrubování	30 - 60	0,03 - 0,5	1 - 2
Dokončování	30 - 60	0,03-0,1	<1

5 DOSAHOVANÉ PARAMETRY PŘESNOSTI BROUŠENÍ ČELNÍHO OZUBENÍ METODOU REISHAUER

5.1 Specifikace

Výsledné parametry broušeného ozubení, které podléhají požadavkům příslušných norem spolu s požadavky specifikovanými v rámci přejímky hotových výrobků, tvoří ucelený systém, který lze označit jako *integritu obrobeného povrchu* [44]. V rámci integrity obrobeného povrchu lze rozlišit tři základní hlediska jeho posouzení:

- geometrická přesnost,
- textura povrchu,
- vlastnosti povrchové vrstvy.

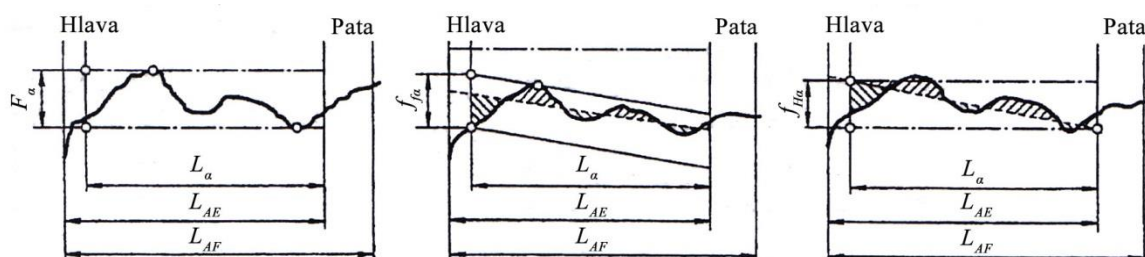
5.2 Geometrická přesnost čelního ozubení

Normy ČSN ISO 1328-1 [45] a ČSN ISO 1328-2 [46] (dosud ve stavu návrhu), které v budoucnosti plně nahradí dřívější normu ČSN 01 4682, rozlišují následující parametry geometrické přesnosti:

- úchylka čelní rozteče f_{pt} [μm], která se vyhodnocuje v rámci jedné čelní rozteče,
- součtová úchylka (k) roztečí kola F_{pk} [μm], vyhodnocovaná na oblouku o délce rovné k -násobku čelní rozteče,
- součtová úchylka roztečí kola F_p [μm] stanovená pro celý obvod ozubeného kola,
- úchylka profilu F_α [μm] (viz obr. 5.1),
- úchylka tvaru profilu $f_{f\alpha}$ [μm] (viz obr. 5.1),
- úchylka úhlu profilu $f_{H\alpha}$ [μm] (viz obr. 5.1),
- úchylka sklonu zubu F_β [μm] (viz obr. 5.2)
- úchylka tvaru sklonu zubu $f_{f\beta}$ [μm] (viz obr. 5.2),
- úchylka úhlu sklonu zubu $f_{H\beta}$ [μm] (viz obr. 5.2),
- kinematická úchylka kola F_i' [μm], zjištěná pomocí kontroly jednobokým odvalem,
- lokální kinematická úchylka kola f_i' [μm], zjištěná pomocí kontroly jednobokým odvalem,
- celková radiální součtová úchylka F_i'' [μm], zjištěná pomocí kontroly dvoubokým odvalem,
- jednotlivá radiální součtová úchylka f_i'' [μm], zjištěná pomocí kontroly dvoubokým odvalem,
- radiální házení ozubeného kola F_r [μm], měřené pomocí válcového, resp. kulového měřicího doteku.

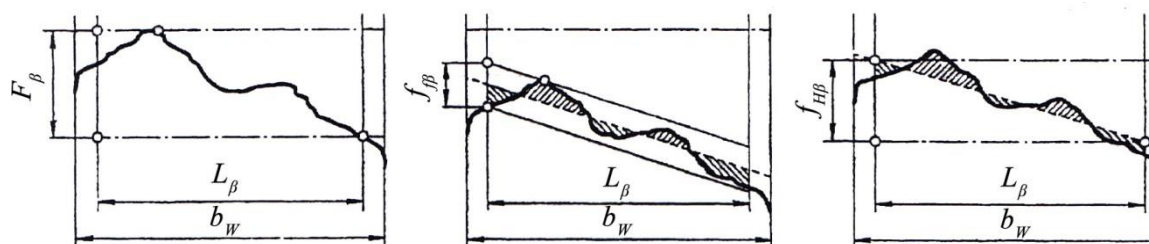
V rámci normy ČSN ISO 1328-1 jsou tolerance uvedených úchylek rozčleněny do třinácti stupňů přesnosti (0 – 12). Koncepce soustavy přesnosti čelního ozubení v systému norem ISO vychází ze stanovení hodnoty dané mezní úchylky na základě výpočtu pro stupeň přesnosti 5. Do výpočtu se dosadí střední geometrická hodnota vztážného rozsahu

parametrů ozubení. Norma připouští také dosazovat přímo parametry konkrétního ozubení, tj. roztečný průměr d_w , normální modul m_{nW} a šířku b_w . Hodnoty tolerancí v rámci jednotlivých stupňů přesnosti tvoří geometrickou posloupnost s kvocientem $\sqrt{2}$. Mezní úchylna pro nejbližší nižší, resp. vyšší stupeň přesnosti se tudíž získá vynásobením, resp. vydělením vypočítané hodnoty kvocientem [45].



Obr. 5.1 Úchylny profilu [45].

F_α [μm] – úchylna profilu, f_{fa} [μm] – úchylna tvaru profilu, f_{Ha} [μm] – úchylna úhlu profilu, L_α [mm] – rozsah vyhodnocení profilu, L_{AF} [mm] – použitelná délka profilu, L_{AE} [mm] – činná délka profilu (bližší definice viz norma ČSN ISO 1328-1). Čerchovaná čára odpovídá teoretickému profilu (stanoven na základě konstrukčních požadavků), čárkovaná čára střednímu profilu a plná čára skutečnému profilu.



Obr. 5.2 Úchylny sklonu zubu [45].

F_β [μm] – úchylna sklonu zubu, $f_{f\beta}$ [μm] – úchylna tvaru sklonu zubu, $f_{H\beta}$ [μm] – úchylna úhlu sklonu zubu, L_β [mm] – délka vyhodnocení boční křivky zubu, b_w [mm] – šířka ozubení. Čerchovaná čára odpovídá teoretické boční křivce zubu (stanovena na základě konstrukčních požadavků), čárkovaná čára střední boční křivce zubu a plná čára skutečné boční křivce zubu.

V rámci kontinuálního odvalovacího broušení se ozubení zhotovuje nejčastěji ve stupních přesnosti 3 – 7.

5.3 Textura povrchu ozubení

Doporučení k hodnocení textury povrchu boků zubů podává technická zpráva ISO/TR 10064-4:1998 [47]. V souladu s doporučeními této technické zprávy a podle závěrů v [48] lze konstatovat, že významnou roli při hodnocení jednotlivých složek topografie povrchu boků zubů hraje filtrace snímaného signálu. Poněvadž norma ČSN ISO 1328-1 nestanovuje hodnoty střední aritmetické úchylny profilu drsnosti R_a , resp. maximální výšky profilu drsnosti R_z v závislosti na daném stupni přesnosti, byla v ISO/TR 10064-4:1998 vypracována doporučení předepsaných hodnot parametrů R_a a R_z v závislosti na modulu ozubeného kola a stupni přesnosti podle ČSN ISO 1328-1.

Aby naměřené charakteristiky měly potřebnou vypovídací hodnotu, je nutno zvolit adekvátní velikost základní délky l_r (cut-off), která se číselně rovná charakteristické délce profilového filtru λ_c . Vliv základní délky l_r na měřený parametr drsnosti byl podrobně

zdokumentován v [48]. Vhodnou základní délku lze stanovit podle doporučení uvedených v rámci ISO/TR 10064-4:1998.

V současné době podle [5] převažuje měření parametrů Ra , Rz kontaktním způsobem pomocí normalizovaných měřicích doteků. Snímání lze realizovat buď lineárním pohybem měřicího doteku, nebo pomocí souřadnicového měřicího stroje, který zajistí pohyb měřicího doteku po evolventní trajektorii. Tato trajektorie je paralelní vzhledem k čelnímu profilu kontrolovaného boku zubu.

Hodnoty střední aritmetické úchylky profilu drsnosti Ra boků zubů obrobku broušených kontinuálním odvalovacím způsobem se zpravidla pohybují v mezích 0,3 až 0,8 μm , maximální výška profilu drsnosti Rz dosahuje hodnot nejčastěji 2 až 4 μm [5].

5.4 Vlastnosti povrchové vrstvy

Mimo požadovaných parametrů geometrické přesnosti spolu s parametry profilu drsnosti a profilu vlnitosti jsou rovněž kladeny požadavky na vytvoření, případně zachování povrchové vrstvy boku zubu požadovaných vlastností. Struktura povrchové vrstvy musí být taková, aby zhotovené zuby vykazovaly dostatečnou pevnost v dotyku a zároveň pevnost v ohybu s uvažováním reálných provozních podmínek [5].

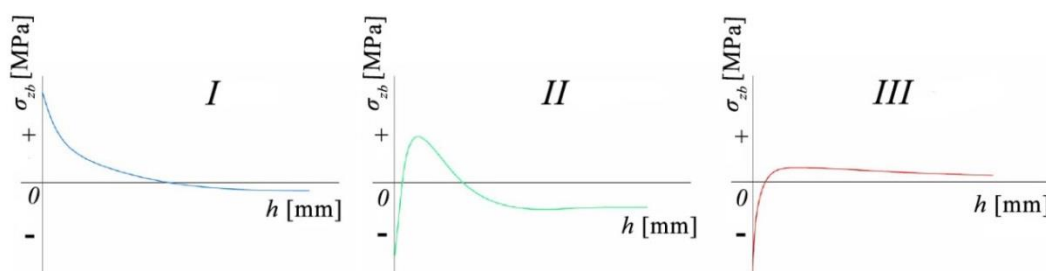
Požadavky na vlastnosti povrchové vrstvy lze shrnout podle [5, 44] do čtyř bodů:

- tvrdost povrchové vrstvy,
- strukturní stav povrchové vrstvy,
- chemické složení povrchové vrstvy,
- zbytková napětí v povrchové vrstvě.

Z důvodu limitovaného rozsahu této diplomové práce se v následujících částech klade pozornost zejména na zbytková napětí v povrchové vrstvě boků zubů po broušení, která v současnosti představují jednu z nejčastěji sledovaných veličin.

Zbytková napětí lze podle [5, 44] považovat za hodnotící kritérium funkčnosti čelního ozubení. Poněvadž se výsledná zbytková napětí v provozních podmínkách superponují s napětími vyvolanými vnějším zatížením, může jejich přítomnost pozitivním či negativním způsobem ovlivnit únavovou pevnost čelního ozubení.

Vliv broušicího procesu na vlastnosti povrchové vrstvy obrobku lze na základě shrnutí závěrů uvedených v [5, 44] popsat pomocí kombinace mechanického a tepelného účinku. Podle [49] je možno specifikovat tři základní typy hloubkových profilů zbytkových napětí po broušení (obr. 5.3).



Obr. 5.3 Typy hloubkových profilů zbytkových napětí v povrchové vrstvě obrobku po broušení [49].

σ_{zb} [MPa] – zbytkové napětí, h [mm] – vzdálenost od povrchu obrobku.

Typ *I* představuje výsledný průběh napětí při převažujícím tepelném účinku v rámci brousicího procesu. Tahová napětí v blízkosti obrobeného povrchu mohou v extrémních případech dosahovat až meze pevnosti materiálu obrobku, v důsledku čehož dochází k nežádoucímu rozvoji mikrotrhlin. Podle [5] jsou tyto mikrotrhliny orientovány převážně ve směru kolmém na směr řezné rychlosti brousicího šneku. Typ *I* se v případě kontinuálního odvalovacího broušení vyskytuje pouze ojediněle. Lze se s ním častěji setkat u metod profilového broušení, při kterých je mezi brousicím kotoučem a obrobkem realizován čárový kontakt [5, 49].

Typ *II* představuje průběh napětí při kombinovaném mechanickém a tepelném účinku brousicího procesu. Jde o nejčastější typ průběhu zbytkových napětí po kontinuálním odvalovacím broušení čelního ozubení. Maximální zbytkové napětí se vyskytuje v určité hloubce pod povrchem. Podle zvolených řezných podmínek může zbytkové napětí v celém rozsahu mít pouze charakter tlaku, což je z hlediska únosnosti ozubení obvykle považováno jako příznivější, než varianta znázorněná na obr. 5.3. Velikost maximálního napětí závisí především na vzájemném poměru mechanického a tepelného účinku brousicího procesu. Při nevhodně zvolených řezných podmínkách může maximální tahové napětí v dané hloubce pod povrchem dosáhnout meze pevnosti materiálu obrobku a způsobit rozvoj mikrotrhlin, které se rychle šíří směrem k obrobenému povrchu [5, 49].

Typ *III* představuje v případě kontinuálního odvalovacího broušení teoretický průběh napětí za podmínky dominantního mechanického účinku a zanedbatelného tepelného účinku v rámci brousicího procesu [5, 49].

Metody měření zbytkových napětí lze rozdělit do dvou skupin:

- *destruktivní metody* spočívají v postupném odstraňování povrchových vrstev zkoumané součásti a měření její deformace. Pomocí zjištěných deformací a na základě znalosti modulu pružnosti se stanoví velikost, případně směr zbytkových napětí. Mezi destruktivní metody patří např. odleptávání povrchu a vrtání povrchové vrstvy s využitím tenzometrické růžice [44];
- *nedestruktivní metody* reprezentuje např. měření zbytkových napětí pomocí rentgenové difrakce, ultrazvukové metody a měření zbytkových napětí metodou detekce Barkhausenova šumu [44].

V případě čelního ozubení se v poslední době značně rozšířilo měření zbytkových napětí metodou detekce Barkhausenova šumu. V porovnání s ostatními metodami nabízí tato metoda možnost spolehlivé a rychlé kontroly, kterou lze realizovat v rámci výrobního procesu [50]. Měření zbytkových napětí metodou detekce Barkhausenova šumu se v následujícím textu věnuje bližší pozornost.

Měření zbytkových napětí metodou detekce Barkhausenova šumu se řadí ke skupině tzv. mikromagnetických měřicích metod. Fyzikální podstata této metody spočívá v nespojitostech během procesu magnetizace feromagnetického materiálu (např. železo Fe_α) [51].

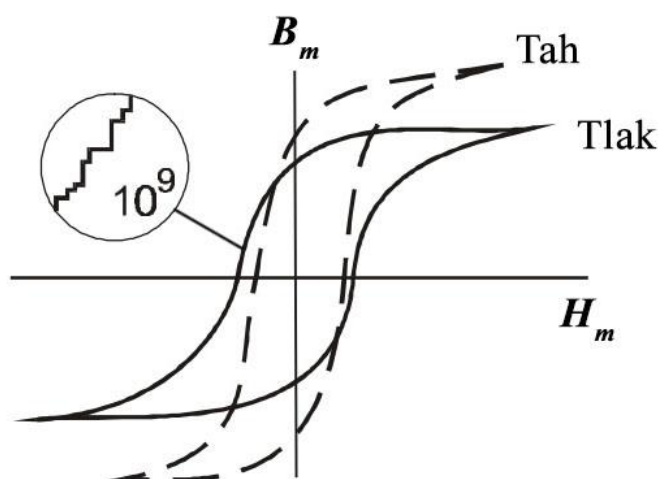
Feromagnetický materiál je v ideálním stavu bez působení vnitřních, případně vnějších napětí tvořen značným počtem velmi malých oblastí, tzv. magnetických domén, z nichž každá se vyznačuje nenulovým náhodně orientovaným magnetickým dipólovým momentem. Sousedící magnetické domény jsou ohraničeny tzv. Blochovými stěnami, jejichž poloha sleduje rozložení strukturních poruch krystalické mřížky materiálu

a mezifázová rozhraní. V důsledku náhodné orientace jednotlivých magnetických domén se magnetické dipólové momenty v nezátženém stavu navzájem vyruší.

Jak vysvětluje např. [52], přítomnost zbytkových napětí v povrchové vrstvě má za následek přeuspořádání magnetických domén pohybem Blochových stěn. Tento jev je nazýván jako magnetoelastická odezva na mechanické napětí. Magnetoelastická odezva feromagnetického materiálu se vysvětluje snahou zaujmout stav s nejnižší možnou energetickou hladinou. V závislosti na charakteru zbytkového napětí (tlakové, resp. tahové) převažuje v orientaci jednotlivých magnetických dipólových momentů jistý směr. To se ve výsledku projeví nenulovým magnetickým dipólovým momentem.

Je-li v blízkosti povrchu zkoumaného vzorku vybuzeno proměnné magnetické pole (např. pomocí cívky s proměnným proudem), dochází k pohybu Blochových stěn a jejich natáčení do směru korespondujícího s budícím magnetickým polem. Tento proces se navenek projeví způsobem, který charakterizuje *hysterezní křivka* materiálu vzorku (obr. 5.4).

Změna magnetizace vzorku neprobíhá kontinuálně, nýbrž skokově v důsledku nutnosti překonávání překážek v podobě zmíněných poruch krystalické mřížky. Skokové změny magnetizace vzorku vyvolávají v elektrickém obvodu měřicí sondy nepřetřívavé pulzy, jinak zvané jako tzv. Barkhausenův signál. Účinek vnějšího magnetizačního signálu se superponuje s účinkem působícího zbytkového napětí. Tahové napětí způsobuje zvětšování magnetických domén orientovaných ve směru tohoto napětí. Tlakové napětí podporuje růst magnetických domén orientovaných kolmo na jeho směr. Ve výsledku způsobí tahové napětí zesílení Barkhausenova signálu, tlakové napětí jeho zeslabení. Účinek zbytkových napětí se projevuje deformací hysterezní křivky, jak ukazuje obr. 5.4 [53].



Obr. 5.4 Vliv zbytkového napětí na tvar hysterezní křivky materiálu [53].
 B_m [T] – magnetická indukce, H_m [$A \cdot m^{-1}$] – intenzita magnetického pole.

Klíčovým prvkem systému pro detekci Barkhausenova šumu je snímací sonda. Snímací sonda sestává z budicí cívky, která vytváří magnetizační signál požadovaného průběhu (např. sinusoida, pilovitý signál atd.), a snímací cívky, která zaznamenává časový průběh Barkhausenova signálu. Snímací sonda je propojena s analyzátozem, jehož úkol spočívá ve tvorbě budicího signálu daného tvaru, frekvence a vlnové délky, dále

zpracování a filtrace Barkhausenova signálu. Analyzátor Rollscan 300 firmy Stresstech patří k moderním představitelům přístrojové techniky v oblasti detekce Barkhausenova šumu (obr. 5.5).



Obr. 5.5 Analyzátor Rollscan 300 firmy Stresstech [54].

Výstupním parametrem měření Barkhausenova signálu je magnetoelastický parametr, označovaný zkratkou MP (na obr. 5.5 zobrazen číslem v levém horním rohu displeje). Jedná se o efektivní hodnotu výstupního napětí v milivoltech, detekovaného snímací cívkou. Výpočet magnetoelastického parametru přibližuje vztah (5.1).

$$MP \approx \sqrt{\frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} U_{výst}^2(\tau) d\tau} \quad (5.1)$$

kde: MP [mV] - magnetoelastický parametr,
 Δt [s] - délka časového úseku,
 $U_{výst}$ [mV] - napětí odezvového Barkhausenova signálu.

Poněvadž v důsledku působení proměnného magnetického pole na materiál vzorku dochází k indukci vířivých proudů, nastává s rostoucí vzdáleností od povrchu vzorku útlum Barkhausenova signálu. Hloubka, ve které se realizuje snímání signálu, závisí na nastavení základních parametrů budicího signálu [54]:

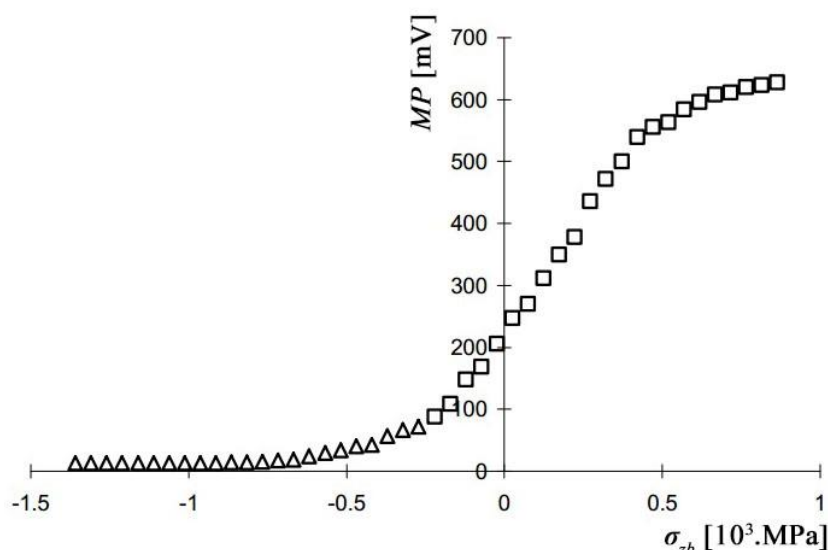
- tvar magnetizačního signálu (nejčastěji sinusoida),
- magnetizační frekvence (rozsah nastavení 1 až 1000 Hz, výchozí hodnota 125 Hz),
- magnetizační napětí (rozsah 0 až 16 V),
- maximální magnetizační napětí (rozsah 0 až 16 V),
- automatická demagnetizace (režim „zapnuto“ / „vypnuto“),
- filtr (nastavitelné hodnoty 10 až 70, 70 až 200, 200 až 450 KHz, výchozí rozsah 70 až 200 kHz).

Magnetizační frekvence spolu s nastavením filtru určují výslednou hloubku měření [53]. Magnetizační napětí by mělo být zvoleno takovým způsobem, aby se na měřeném Barkhausenovu signálu v důsledku příliš nízké intenzity budicího signálu výrazně neprojevovaly parazitní šумы, např. magnetické pole blízkého počítače. Naopak příliš

vysoké magnetizační napětí způsobí saturaci vzorku a pokles citlivosti snímací sondy. Demagnetizace v případě potřeby eliminuje zbytkový magnetismus (na obr. 5.4 při poklesu intenzity magnetického pole H_m z maxima na nulu zůstává nenulová hodnota magnetické indukce B_m , podle [53] tzv. remanence).

Analyzátor Rollscan 300 spolu se snímací sondou je nutno v pravidelných časových intervalech kontrolovat. Kalibrace analyzátoru spočívá v nastavení optimálních parametrů magnetizačního signálu postupem uvedeným v [54]. Za účelem zajištění opakovatelnosti měření se provádí tzv. denní kontrola, která spočívá v proměření referenčního vzorku denního nastavení o známé hodnotě MP . Odchyluje-li se aktuální naměřená hodnota od dřívějších měření, následuje série kontrolních měření s využitím dvou kontrolních vzorků o známé hodnotě MP .

Nevýhodou metody měření zbytkových napětí metodou detekce Barkhausenova šumu je skutečnost, že výstup měření přímo neposkytuje hodnotu zbytkového napětí. Aby bylo možno stanovit velikost a charakter zbytkového napětí na základě naměřených hodnot MP , musí se provést měření s využitím kalibračního vzorku. Podklady k postupu kalibračního měření pásku plechu poskytuje např. [55]. Pásek je v průběhu měření zatěžován známým jednoosým tahovým napětím. Podle [55] lze rovněž uskutečnit měření pro hodnocení dvouosé napjatosti. Postup stanovení závislosti mezi zbytkovým napětím v povrchové vrstvě boku zubu a hodnotou MP byl aplikován v [50]. Dané hodnotě zbytkového napětí σ_{zb} , zjištěné metodou rentgenové difrakce, byla přiřazena hodnota MP stanovená metodou detekce Barkhausenova šumu. Výstupem srovnávacího měření je kalibrační křivka materiálu vzorku (příklad na obr. 5.6). Průběh kalibrační křivky závisí především na chemickém složení a strukturním stavu materiálu vzorku.



Obr. 5.6 Příklad bodové reprezentace kalibrační křivky materiálu [56].
 σ_{zb} [MPa] – zbytkové napětí, MP [mV] – magnetoelastický parametr.

5.4.1 Experimentální ověření vlivu vybraných řezných podmínek broušení procesu na výslednou hodnotu MP

Následující část této diplomové práce je zaměřena na experiment provedený v českém výrobním závodě. Při experimentu byl využit analyzátor Rollscan 300 pro stanovení hodnoty MP boků zubů broušených ozubených kol

Cíl experimentu

V rámci zmíněného výrobního závodu jsou ozubená kola a pastorkové hřídele dokončovány kontinuálním odvalovacím broušením na CNC-řízených odvalovacích bruskách firmy Gearspect Group s. r. o.

Cíl experimentu spočívá v posouzení vlivu řezných podmínek hrubovací fáze broušení procesu na výslednou hodnotu *MP*. Experiment je realizován při neměnných řezných podmínkách ostatních fází broušení procesu.

Metodika experimentu je založena na dvouúrovňovém faktorovém experimentu, jehož vstupní faktory tvoří řezné podmínky hrubovací fáze broušení procesu. Na základě naměřených dat se následně určí tvar regresního modelu a vlivy jednotlivých řezných podmínek na hodnotu *MP*.

Obrobek a jeho parametry

Obrobkem je ozubené kolo s následujícími základními parametry:

- normální modul $m_{nW} = 4,5$ mm,
- počet zubů $z_W = 35$,
- úhel sklonu zubů $\beta_W = 0^\circ$ (přímé zuby),
- požadovaný stupeň přesnosti: 7 dle ČSN ISO 1328-1,
- roztečný průměr $d_W = 157,5$ mm,
- celkový radiální inkrement $\Delta x_c = 0,5$ mm,
- materiál ozubeného kola 20MnCr5 (chemické složení v tab. 5.1).

Další parametry broušeného ozubeného kola jsou shrnuty na výkrese v příloze 2. Technologický postup výroby ozubeného kola poskytuje příloha 3.

Materiálem ozubeného kola je nízkolegovaná nikl-chrom molybdenová ocel k cementování, označená dle EN 10027-1 jako 20MnCr5, resp. dle ČSN EN 10027-2 jako 1.6523 [57].

Tab. 5.1 Chemické složení oceli 20MnCr5 [57].

Prvek	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
Obsah [%]	0,17-0,23	max. 0,40	0,65-0,95	max. 0,035	max. 0,035	0,35-0,70	0,15-0,23	0,40-0,70

Podle požadavků výkresové dokumentace má cementační vrstva hloubku $CHD = 1,10 - 1,30$ mm, tvrdost cementační vrstvy po kalení dosahuje hodnot 60 ± 2 HRC.

Polotovarem ozubeného kola je výkovek o stupni přesnosti F dle ČSN EN 10 243-1, skupiny obtížnosti kování M1 a členitosti tvaru S2. Boky zubů se před konečným tepelným zpracováním hrubují odvalovacím frézováním.

Odvalovací bruska a její parametry

Experiment je realizován na odvalovací brusce Gearspect SBO 400 CNC (obr. 5.7). Odvalovací bruska umožňuje brousit čelní ozubení v následujícím rozsahu parametrů:

- maximální hlavový průměr obrobku $d_{aW} = 320$ mm,

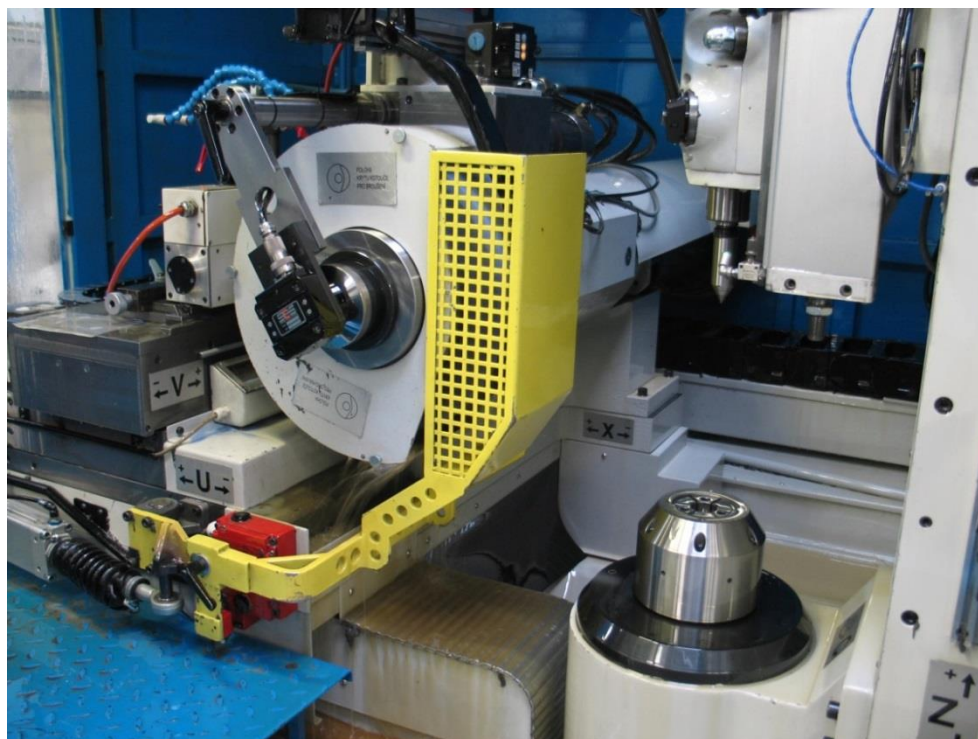
- maximální úhel sklonu zubu obrobku $\beta_w = 45^\circ$,
- normální modul obrobku $m_{nW} = 1$ až 7 mm,
- hmotnost obrobku maximálně 30 kg.



Obr. 5.7 Odvalovací bruska Gearspect SBO 400 CNC.

Celkový příkon odvalovací brusky Gearspect SBO 400 CNC činí 58 kW, maximální přípustné otáčky brousícího šneku dosahují hodnoty 3500 min^{-1} . Vnější průměr brousícího šneku D_S nesmí přesáhnout hodnotu 350 mm.

Pohled do pracovního prostoru odvalovací brusky poskytuje obr. 5.8.



Obr. 5.8 Pracovní prostor odvalovací brusky Gearspect SBO 400 CNC.

Broušící šnek se orovnáva dvojicí kotoučů výrobce Dr. Kaiser s kuželovou geometrickou plochou, jak ukazuje obr. 5.9. Vnější průměr orovnávacích kotoučů je 123 mm, površky kuželové geometrické plochy svírají s radiální osou X normální úhel záběru $\alpha_{nS} = 20^\circ$.



Obr. 5.9 Orovnávací kotouče výrobce Dr. Kaiser.

Ozubené kolo je upnuto ručně pomocí rozpínacího trnu. V souladu s běžným nastavením odvalovací brusky se experiment realizuje s upnutou kleštinou unášecího vřetena během celého broušícího procesu. Podle informací v [58] představuje tento režim (na ovládacím panelu odvalovací brusky označen jako „RUČNÍ REŽIM I“) nejčastější způsob broušení čelního ozubení.

V rámci kinematického uspořádání odvalovací brusky Gearspect SBO 400 CNC jsou veškeré pohyby v radiálním směru realizovány broušícím šnekem, v tangenciálním a axiálním směru obrobkem. V dalším textu je s vědomím této skutečnosti nadále aplikována zavedená konvence, že vyjmenované relativní pohyby realizuje výlučně broušící šnek.

Broušící šnek a jeho parametry

Při experimentu je používán broušící šnek výrobce Winterthur T1SP 350 x 104 x 160 MOD 4,5 EW 20GRD 1GG 93A 120 H 18 V PLF29/601W.

Procesní kapalina

Použitou procesní kapalinou je syntetický řezný olej Dascolene 598 DB-R.

Řezné podmínky experimentu

Řezné podmínky nastavené během experimentu shrnuje tab. 5.2.

Tab. 5.2 Řezné podmínky experimentu.

n_S [min^{-1}] – otáčky broušícího šneku, Δx_S [mm] – radiální inkrement, f_x [mm] – radiální posuv na otáčku obrobku, f_z [mm] – axiální posuv na otáčku obrobku, f_{sh} [-] – faktor tangenciálního posuvu, Δy_S [mm] – tangenciální přestavení, j_S [-] – počet zdvihů broušícího šneku.

Krok [-]	n_S [min^{-1}]	Δx_S [mm]	f_x [mm]	f_z [mm]	f_{sh} [-]	Δy_S [mm]	Kleština [-]	j_S [-]
1	2100	0,02	0,03	2,00	-0,05	0,00	1	1
2		0,05	0,03	2,00	-0,06	0,00	1	8
3		0,05	0,03	1,80	-0,05	-10,00	1	1
4		0,03	0,03	1,00	0,00	10,00	1	1

Krok v prvním sloupci tab. 5.2 označuje fázi brousicího procesu. V rámci brousicího procesu lze rozlišit následující fáze:

- odstranění nerovnoměrností celkového přídavku v důsledku deformací při tepelném zpracování (krok č. 1),
- hrubovací fáze, která zahrnuje 8 zdvihů brousicího šneku (krok č. 2),
- „přebroušení“ boků zubů dosud neopotřebenou částí brousicího šneku (krok č. 3),
- dokončení boků zubů (krok č. 4).

V rámci experimentu je kladena pozornost na hrubovací fázi brousicího procesu (krok č. 2), která podle [5] v největší míře ovlivňuje rozložení zbytkových napětí v povrchové vrstvě boků zubů (v tab. 5.2 vyznačena žlutě). Řezné podmínky pro tuto fázi se volí v souladu s metodikou, která je popsána v následujícím textu. Ostatní fáze jsou ponechány ve stálém nastavení podle tab. 5.2. Poněvadž otáčky brousicího šneku n_s nelze měnit jednotlivě, nastavuje se jejich velikost stejná pro všechny fáze brousicího procesu.

Hodnotu radiálního inkrementu Δx_s je nutno volit zároveň s počtem zdvihů brousicího šneku j_s tak, aby součet jednotlivých radiálních inkrementů byl roven celkovému radiálnímu inkrementu $\Delta x_c = 0,5$ mm. Poněvadž lze vliv radiálního posuvu na otáčku obrobku f_x z hlediska výsledku brousicího procesu považovat za nepodstatný, zůstává jeho hodnota v rámci experimentu neměnná.

V zadávaných řezných podmínkách nefiguruje tangenciální posuv na otáčku obrobku f_y , nýbrž pouze faktor tangenciálního posuvu f_{sh} , který závisí kromě tangenciálního posuvu f_y také na axiálním posuvu na otáčku obrobku f_z . Z tohoto důvodu jsou v rámci provedeného experimentu voleny takové hodnoty f_{sh} , aby výsledný tangenciální posuv f_y nabýval požadované hodnoty nezávisle na velikosti posuvu f_z . Záporné hodnoty faktoru tangenciálního posuvu a tangenciálního přestavení vyjma kroku č. 4 respektují doporučení výrobce odvalovací brusky, aby tyto pohyby byly realizovány směrem k obsluze stroje.

Řezné podmínky procesu orovnávaní

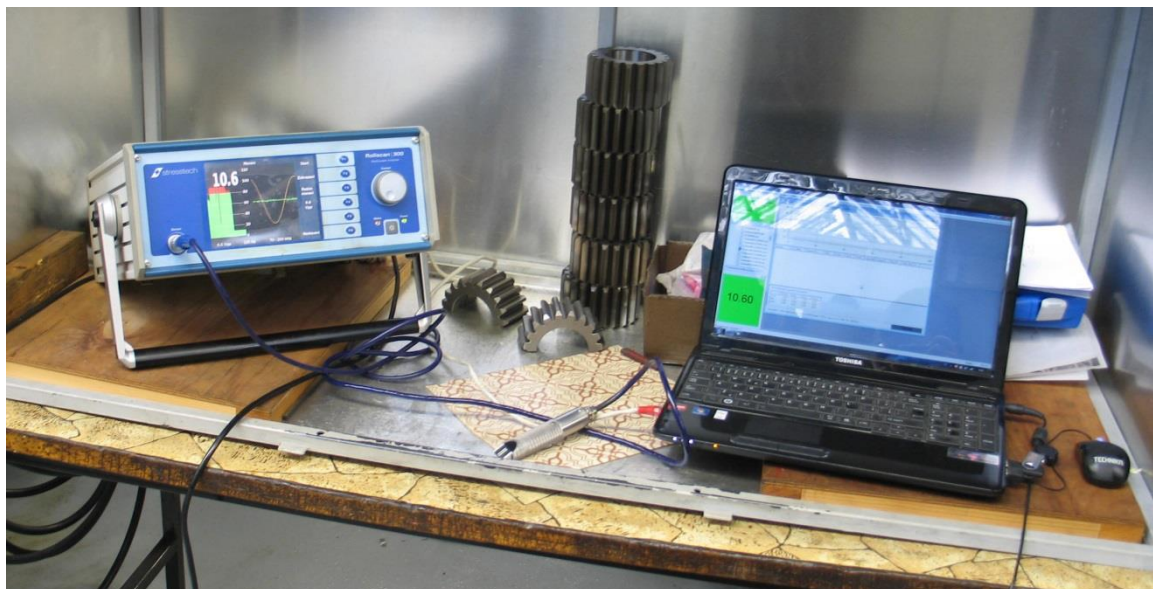
Základní řezné podmínky procesu orovnávaní lze shrnout následujícím výčtem:

- otáčky brousicího šneku při orovnávaní $n_s = 35 \text{ min}^{-1}$,
- otáčky orovnávacího kotouče $n_o = 3000 \text{ min}^{-1}$,
- v rámci hrubovací fáze realizuje orovnávací kotouč 24 zdvihů ve směru osy brousicího šneku Y_s ,
- celkový radiální inkrement orovnávacího kotouče při hrubování činí 0,4 mm,
- během dvou dokončovacích zdvihů je odebrán radiální inkrement 0,015 mm,
- při dodatečném orovnávaní hlavového průměru rotuje brousicí šnek otáčkami 1500 min^{-1} .

Orovnávací proces realizovaný za uvedených podmínek trvá přibližně 20 min, což koresponduje s dvojnásobkem obvyklého jednotkového strojního času broušení popsaného ozubeného kola.

Nastavení analyzátoru Rollscan 300

Měření metodou detekce Barkhausenova šumu je realizováno na měřicím stanovišti zachyceném na obr. 5.10. Komunikaci s PC zajišťuje ethernetové rozhraní a software Viewscan firmy Stresstech pro zpracování výstupu z analyzátoru Rollscan 300.



Obr. 5.10 Měřicí stanoviště vybavené analyzátozem Rollscan 300 a snímací sondou pro měření ozubení.

Analyzátor Rollscan 300 je nastaven následujícím způsobem:

- magnetizační signál sinusového tvaru,
- magnetizační napětí 6,6 V,
- magnetizační frekvence 125 Hz,
- rozsah napětí 0 - 10 V,
- rozsah frekvencí 10 – 1000 Hz,
- automatická demagnetizace ve stavu „vypnuto“,
- filtr 70 – 200 KHz,
- mez vyřazení $MP_{max} = 80$ mV.

Popis metodiky experimentu

Metodika experimentu respektuje doporučení podle [59] a také [60].

Platnost hledaného regresního modelu je podle [60] podmíněna normalitou měřené veličiny MP . Předpoklad normality lze podle praktických zkušeností firmy Stresstech považovat za platný, pokud se naměřená hodnota nenachází v blízkosti nuly, tj. v rámci intervalu $\langle 0; 10 \rangle$.

Výběr skupiny měřených ozubených kol je proveden v rámci statistického souboru pocházejícího z jedné dávky tepelného zpracování.

Za významné faktory byly zvoleny následující řezné podmínky:

- otáčky broušícího šneku n_s (vyšetřovaný rozsah 2100 – 2500 min^{-1}),
- axiální posuv na otáčku obrobku f_z (vyšetřovaný rozsah 1,8 – 2,2 mm),
- tangenciální posuv na otáčku obrobku f_y (vyšetřovaný rozsah 0,01 – 0,018 mm),
- radiální inkrement hrubovací fáze Δx_s (vyšetřovaný rozsah 0,04 – 0,067 mm),
- místo měření (levý, resp. pravý bok zubu).

Poněvadž je experiment realizován v rámci výroby, musí zvolené rozsahy řezných podmínek respektovat požadavky na výslednou přesnost ozubení. Velikost radiálního inkrementu Δx_s respektuje požadavek, aby součet radiálních inkrementů v rámci všech hrubovacích zdvihů broušícího šneku dosahoval velikosti 0,4 mm. Tomu odpovídá 6 zdvihů broušícího šneku pro hodnotu $\Delta x_s = 0,067$ mm, resp. 10 zdvihů pro hodnotu $\Delta x_s = 0,04$ mm.

Jelikož místo měření má charakter kvalitativní veličiny (viz [60]), není v plánu experimentu přímo zahrnuto. Byla zvolena vhodnější varianta, tj. měřit samostatně průběh hodnoty MP na pravém a levém boku zubu a následně zpracovat dva samostatné regresní modely.

Poněvadž v rámci experimentu nabývají vstupující proměnné (n_s , f_z , f_y , Δx_s) diskrétních hodnot, ztotožní se tyto hodnoty s mezemi jejich rozsahů (vyjma centrálních a axiálních bodů). Přestože [60] doporučuje nejprve hledat lineární regresní model, resp. neúplný kvadratický regresní model (neobsahuje druhé mocniny příslušných faktorů) a následně pomocí statistických testů ověřovat nutnost použití úplného kvadratického regresního modelu, byl přímo zvolen úplný kvadratický regresní model. Důvodem této volby je problematičnost dodatečného doměřování centrálních a axiálních bodů plánu experimentu, které by v důsledku významných rušivých vlivů (jiná dávka tepelného zpracování, jiný materiál ozubení, jiné parametry ozubení) neměly dostatečnou vypovídací hodnotu.

Plán experimentu sestavený v softwaru Minitab 16 znázorňuje tab. 5.3. Jednotlivé řádky, označené číslem pozorování, představují kombinaci řezných podmínek, které jsou nastaveny v rámci hrubovací fáze broušícího procesu (krok č. 2 v tab. 5.2). Hodnota tangenciálního posuvu f_y v tab. 5.3 se před zadáním do řídicího systému odvalovací brusky dodatečně přepočítá na korespondující hodnotu faktoru tangenciálního posuvu f_{sh} .

Tab. 5.3 Plán experimentu.

n_s [min^{-1}] – otáčky broušícího šneku, f_z [mm] – axiální posuv na otáčku obrobku, f_y [mm] – tangenciální posuv na otáčku obrobku, Δx_s [mm] – radiální inkrement.

Č. pozorování [-]	Druh bodu [-]	n_s [min^{-1}]	f_z [mm]	f_y [mm]	Δx_s [mm]
1	0	2300	2,0	0,014	0,05
2	-1	2300	2,0	0,018	0,05
3	0	2300	2,0	0,014	0,05
4	-1	2300	1,8	0,014	0,05
5	-1	2300	2,0	0,014	0,067
6	-1	2300	2,0	0,014	0,04
7	-1	2300	2,2	0,014	0,05
8	-1	2300	2,0	0,010	0,05
9	-1	2100	2,0	0,014	0,05

10	-1	2500	2,0	0,014	0,05
11	1	2500	2,2	0,018	0,04
12	1	2500	1,8	0,018	0,067
13	1	2100	2,2	0,018	0,067
14	0	2300	2,0	0,014	0,05
15	1	2500	1,8	0,018	0,04
16	1	2500	2,2	0,018	0,067
17	1	2100	1,8	0,018	0,04
18	1	2100	2,2	0,010	0,04
19	1	2100	2,2	0,010	0,067
20	0	2300	2,0	0,014	0,05
21	0	2300	2,0	0,014	0,05
22	1	2100	1,8	0,010	0,067
23	1	2100	1,8	0,018	0,067
24	1	2500	1,8	0,010	0,067
25	1	2500	1,8	0,010	0,04
26	1	2100	1,8	0,010	0,04
27	1	2500	2,2	0,010	0,067
28	1	2100	2,2	0,018	0,04
29	0	2300	2,0	0,014	0,05
30	1	2500	2,2	0,010	0,04

Ve sloupci tab. 5.3 označeném jako „druh bodu“ se krychlovým bodům plánu přiřadí hodnota „1“, centrálním bodům hodnota „0“ a axiální bodům hodnota „-1“. Charakter a význam těchto bodů je osvětlen v následujících odstavcích.

Po sestavení plánu experimentu je z celkového počtu dávky 150 ks ozubených kol náhodně vybráno 30 ks, přičemž každému z nich se v souladu s tab. 5.3 přiřadí číslo pozorování a příslušné nastavení řezných podmínek hrubovacího procesu.

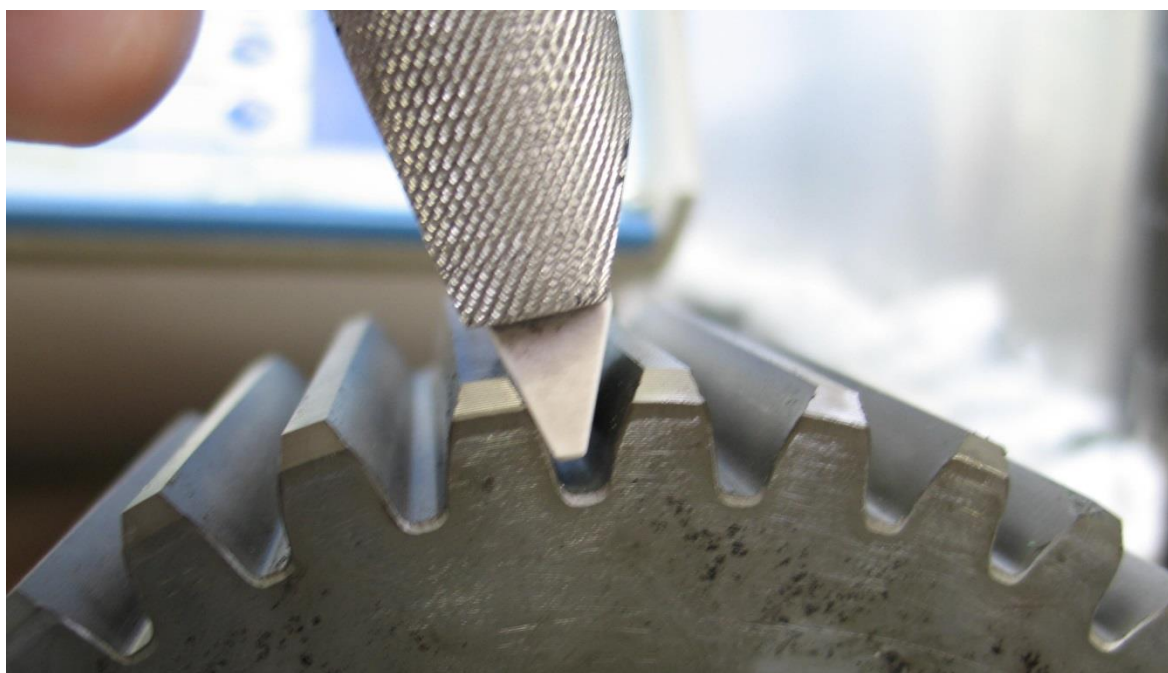
Po upnutí každého z ozubených kol na rozpínací trn je před zahájením broušicího procesu na čelní plochu vyznačeno číslo pozorování, se kterým korespondují řezné podmínky nastavené podle tab. 5.3, dále značka pro rozlišení levého a pravého boku kola při broušení.

Po broušení se ozubené kolo očistí a přenesse na měřicí stanoviště. Z celkového počtu 35 zubů je v pravidelných rozestupech zvoleno sedm levých a pravých boků zubů. Pomocí snímací sondy a analyzátoru Rollscan 300 propojeného s PC se na každém z těchto boků proměří průběh hodnoty *MP* podél šířky ozubení (způsob měření přibližuje obr. 5.11). Výsledné průběhy *MP* zaznamenává PC software Viewscan 3.14.2 firmy Stresstech. Příklad výsledného průběhu hodnoty *MP* na výstupu softwaru Viewscan poskytuje obr. 5.12.

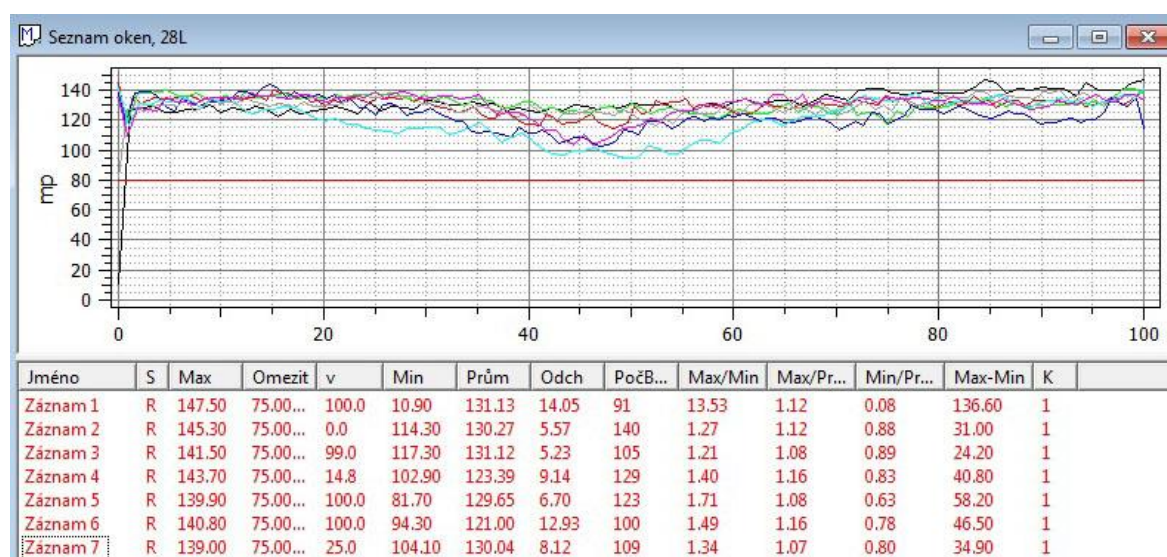
Z uvedeného postupu plyne, že každému broušenému ozubenému kolu, označenému číslem pozorování podle tab. 5.3, je přiřazeno celkem 14 průběhů hodnoty *MP* podél šířky ozubení. Z těchto hodnot vždy 7 náleží levým bokům a zbylých 7 pravým bokům. V celkovém počtu je třeba zpracovat 420 měření.

Pro další výpočet se z každého naměřeného průběhu *MP* odečte maximální dosažená hodnota (třetí sloupec na obr. 5.12). Na základě takto stanovených sedmi hodnot *MP*

pro levý a pravý bok zubu je stanoven bodový odhad střední hodnoty MP levého a pravého boku zubu kola.



Obr. 5.11 Měření průběhu hodnoty MP podél šířky ozubení.



Obr. 5.12 Průběh hodnot MP podél šířky ozubení pro 7 levých boků zubů v softwaru Viewscan.

Vypočítané odhady střední hodnoty MP slouží jako vstupní parametry pro výpočet regresního modelu pomocí softwaru Minitab 16. Výstupem softwaru Minitab je tvar hledaného regresního modelu a jeho grafické znázornění.

Úplný kvadratický regresní model a jeho adekvátnost

Princip nalezení úplného kvadratického regresního modelu spočívá v minimalizaci jeho reziduálních odchylek, tj. rozdílů mezi empiricky zjištěnými hodnotami závislé proměnné a teoretickými hodnotami, plynoucími z dosazení příslušné kombinace vstupních proměnných do rovnice modelu. Hledaný kvadratický regresní model lze podle [60]

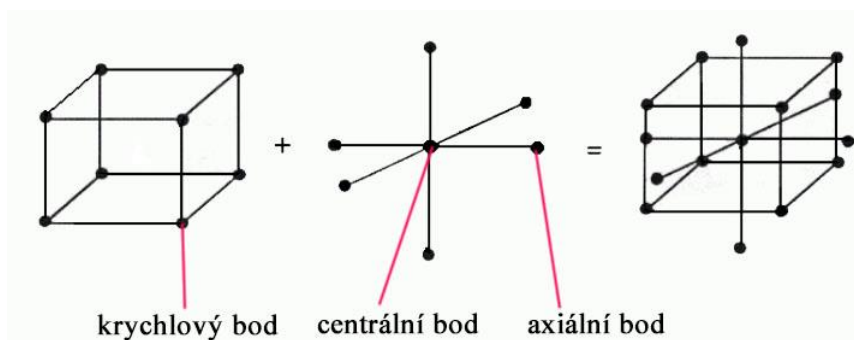
převést na lineární regresní model, popsany rovnicí (5.2). Číslo pozorování se označí indexem i ($i = 1, 2, \dots, n$), jednotlivé nezávisle proměnné a příslušné regresní koeficienty jsou odlišeny indexem j ($j = 0, 1, \dots, k$).

$$y_i = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_{ij} + \varepsilon_i \quad (5.2)$$

kde: y_i [-] - pozorovaná i -tá hodnota závislé proměnné,
 β_j [-] - regresní koeficient j -té nezávisle proměnné,
 x_{ij} [-] - hodnota j -té nezávisle proměnné v i -tém pozorování,
 ε_i [-] - reziduální odchylka při i -tém pozorování.

Jednotlivé hodnoty nezávisle proměnných x_{ij} lze přehledně uspořádat do matice, která tvoří plán experimentu. Každý z faktorů reprezentuje v rámci experimentu jedna nezávisle proměnná X_j . Hodnota závisle proměnné y_i pro i -té pozorování je aritmetickým průměrem skupiny hodnot y_{il} pro $l = 1, 2, \dots, m$, kde m označuje počet měření závisle proměnné Y_i v rámci jednoho pozorování (např. sedm boků zubů).

Jsou-li kombinace vstupních nezávislých proměnných zvoleny vhodně, lze na základě stanoveného počtu pozorování specifikovat nejen samostatný vliv každé z nich, ale rovněž vliv jejich vzájemných interakcí. Tato skutečnost je hlavní výhodou faktorového experimentu. Pro nalezení úplného kvadratického regresního modelu lze aplikovat několik metod sestavení plánu experimentu. Patří mezi ně např. kombinovaný plán, tříúrovňový plán nebo Box-Benkenův plán [59]. V dalším textu je z důvodu největší vypovídací schopnosti zaměřena pozornost na kombinovaný plán, jehož strukturu pro případ tří rozhodujících faktorů znázorňuje obr. 5.13.



Obr. 5.13 Kombinovaný plán pro trojici faktorů [59].

Jednotlivé kombinace nezávisle proměnných při i -tém pozorování lze chápat jako souřadnice bodu v k -rozměrném prostoru, kde k označuje počet faktorů experimentu. Nabývají-li nezávisle proměnné v rámci experimentu pouze dvou hodnot (tzv. dvojúrovňový experiment), je plán experimentu pro $k = 3$ graficky interpretován trojrozměrnou krychlí na obr. 5.13. Tuto krychli doplňuje množina dalších bodů. V celkovém plánu se rozeznávají tři druhy bodů [59]:

- *krychlové body*, jejichž počet je 2^k , slouží k výpočtu *efektů* jednotlivých faktorů (tj. účinků změny jedné nezávisle proměnné na hodnotu závisle proměnné),
- *centrální bod*, který je dán souřadnicemi rovnými středním hodnotám jednotlivých nezávisle proměnných,

- *axiální body*, které jsou podle [59] voleny nejčastěji jako body ležící na kulové ploše opsané krychli.

Význam centrálních bodů spočívá v odhadu rozptylu závisle proměnné Y_i . V rámci experimentu se doporučuje náhodně provést 3 až 5 měření centrálního bodu. Axiální body v počtu $2k$ umožňují výpočet regresních koeficientů úplného kvadratického modelu.

Nalezený regresní model má dostatečnou vypovídací hodnotu pouze tehdy, jsou-li splněny základní předpoklady [59]:

- střední hodnota reziduální odchylky ε_i v rámci všech pozorování je nulová,
- rozptyl reziduální odchylky ε_i nezávisí na pozorování i (tzv. heteroskedasticita),
- reziduální odchylky $\varepsilon_a, \varepsilon_b$ jsou pro $a \neq b$ nezávislé (tzv. autokorelace),
- reziduální odchylky ε_i mají normální rozdělení $N(0, \sigma^2)$,
- matice nezávisle proměnných x_{ij} je nenáhodná,
- sloupce matice nezávisle proměnných x_{ij} jsou lineárně nezávislé (tzv. multikolinearita).

Na základě tvaru matice nezávisle proměnných x_{ij} se v rámci této diplomové práce upouští od ověřování posledních dvou uvedených předpokladů, tj. předpokladu nenáhodnosti a nezávislosti.

Vyslovené předpoklady lze ověřovat přímo na hodnotách reziduálních odchylek ε_i , případně na tzv. standardizovaných reziduálních odchylkách ε_{si} , které lze získat jako podíl příslušné reziduální odchylky ε_i a bodového odhadu rozptylu závisle proměnné Y_i .

Hrany krychle na obr. 5.13 lze považovat za osy souřadného systému, které se přiřadí jednotlivým faktorům, resp. nezávisle proměnným. Efekt daného faktoru reprezentuje přechod od jedné stěny k protilehlé stěně krychle ve směru korespondujícím se souřadným směrem příslušné nezávisle proměnné. Je-li na základě výpočtu efektů získán tvar regresního modelu, musí být v dalším kroku provedena série statistických testů, které mimo významnosti jednotlivých faktorů ověřují rovněž adekvátnost nalezeného regresního modelu. Z těchto testů má největší význam test významnosti efektu a test adekvátnosti modelu lack-of-fit [60].

Test významnosti efektu vychází z rozkladu celkového rozptylu modelu na složky příslušné jednotlivým faktorům. Celkový rozptyl modelu SS_T lze rozložit na části SS_j , které korespondují s jednotlivými faktory, resp. s interakcemi těchto faktorů. Reziduální rozptyl SS_e koresponduje s chybami vzniklými v rámci měření a v důsledku volby konkrétního regresního modelu. Rozklad se podle [60] popíše vztahem (5.3).

$$SS_T = \sum_{i=1}^n \sum_{l=1}^m (y_{il} - \bar{y})^2 = \sum_{j=1}^k SS_j + SS_e \quad (5.3)$$

kde:	SS_T [-]	-	celkový rozptyl modelu,
	y_{il} [-]	-	hodnota závisle proměnné při l -tém měření v rámci i -tého pozorování,
	\bar{y} [-]	-	aritmetický průměr y_i ze všech pozorování,
	SS_j [-]	-	složka rozptylu modelu příslušející j -tému faktoru,
	SS_e [-]	-	reziduální rozptyl.

Testovací kritérium pro stanovení významnosti efektu daného faktoru spočívá v porovnání části celkové variability souboru hodnot y_{il} příslušející zkoumanému faktoru vůči reziduálnímu rozptylu SS_ε . Testovací kritérium se řídí rozdělením $F(DF_j, DF_\varepsilon)$, kde DF_j značí počet stupňů volnosti zkoumaného faktoru, DF_ε pak počet stupňů volnosti příslušející reziduálnímu rozptylu SS_ε . Nulová hypotéza má tvar $H_0: \beta_j = 0$. Testovací kritérium má tvar (5.4).

$$F_{0vj} = \frac{SS_j}{SS_\varepsilon} \cdot \frac{DF_\varepsilon}{DF_j} \quad (5.4)$$

kde: F_{0vj} [-] - testovací kritérium významnosti j -tého faktoru,
 SS_j [-] - složka rozptylu modelu příslušející j -tému faktoru,
 SS_ε [-] - reziduální rozptyl,
 DF_j [-] - počet stupňů volnosti j -tého faktoru,
 DF_ε [-] - počet stupňů volnosti příslušející reziduálnímu rozptylu.

Počet stupňů volnosti j -tého faktoru DF_j je pro dvojúrovňový experiment roven jedné. Počet stupňů volnosti DF_ε se stanoví z celkového počtu stupňů volnosti $n - 1$ (n je počet pozorování) odečtením stupňů volnosti DF_j všech figurujících faktorů a interakcí. Nulová hypotéza se zamítá v případě, je-li hodnota testovacího kritéria f_{0j} větší než kvantil $f_{1-\alpha/2, DF_j, DF_\varepsilon}$, kde α označuje zvolenou hladinu významnosti.

Test lack-of-fit slouží k posouzení, zdali navržený regresní model dobře vystihuje skutečné chování závisle proměnné Y_i . Podle [60] se vychází z rozkladu reziduálního rozptylu SS_ε na složku odpovídající chybě měření SS_P (pure error) a chybě modelu SS_{LOF} (lack-of-fit), jak naznačuje vztah (5.5).

$$SS_\varepsilon = \sum_{i=1}^n \sum_{l=1}^m (y_{il} - \hat{Y}_i)^2 = SS_P + SS_{LOF} \quad (5.5)$$

kde: SS_ε [-] - reziduální rozptyl,
 y_{il} [-] - hodnota závisle proměnné při l -tém měření v rámci i -tého pozorování,
 \hat{Y}_i [-] - teoretická hodnota závisle proměnné příslušná i -tému pozorování,
 SS_P [-] - složka reziduálního rozptylu odpovídající chybě měření,
 SS_{LOF} [-] - složka reziduálního rozptylu odpovídající chybě modelu.

Teoretická hodnota \hat{Y}_i je hodnota získaná dosazením i -té kombinace závisle proměnných x_{ij} do regresního modelu. Složka SS_P odpovídá odchylkám naměřených hodnot y_{il} od aritmetického průměru y_i pro m měření v rámci jednoho pozorování, složka SS_{LOF} koresponduje s odchylkami průměrných hodnot y_i od teoretických hodnot \hat{Y}_i [60].

Testovací kritérium srovnává složky reziduálního rozptylu SS_P a SS_{LOF} podle vztahu (5.6).

$$F_{0LOF} = \frac{SS_{LOF}}{SS_P} \cdot \frac{n \cdot (m - 1)}{n - 2} \quad (5.6)$$

kde: F_{0LOF} [-] - testovací kritérium lack-of-fit,
 SS_P [-] - složka reziduálního rozptylu odpovídající chybě měření,
 SS_{LOF} [-] - složka reziduálního rozptylu odpovídající chybě modelu,

- n [-] - počet pozorování,
 m [-] - počet měření v rámci jednoho pozorování.

Nulová hypotéza, že regresní model je správný, se zamítá v případě, překročí-li hodnota testovacího kritéria f_{0LOF} kvantil $f_{1-\alpha/2, n-2, mn-n}$.

Výsledky experimentu

Naměřené hodnoty parametru MP přehledně znázorňuje tab. 5.4.

Tab 5.4 Naměřené hodnoty MP .

MP_L [mV] – hodnota MP na levém boku zubu,

MP_R [mV] – hodnota MP na pravém boku zubu.

Č. pozorování [-]	Druh bodu	MP_L [mV]	MP_R [mV]
1	0	133,91	138,09
2	-1	130,69	136,19
3	0	135,01	140,82
4	-1	96,31	112,51
5	-1	151,49	153,37
6	-1	111,24	116,51
7	-1	137,16	145,71
8	-1	141,23	146,77
9	-1	122,41	82,64
10	-1	120,41	139,00
11	1	129,47	131,04
12	1	140,76	143,83
13	1	121,73	136,76
14	0	121,33	140,24
15	1	161,14	139,87
16	1	130,53	132,33
17	1	72,99	104,89
18	1	129,93	142,73
19	1	144,71	139,41
20	0	129,63	137,00
21	0	143,40	132,49
22	1	130,60	137,09
23	1	120,96	115,69
24	1	150,36	141,24
25	1	122,49	114,89
26	1	110,93	117,57
27	1	143,39	125,94
28	1	74,53	94,40
29	0	122,01	120,59
30	1	140,79	137,20

Výsledky v tab. 5.4 jsou zpracovány softwarem Minitab 16 v režimu kódovaných proměnných, tj. po přepočtu stanovených hodnot nezávisle proměnných na hodnoty -1, 0, 1.

Při stanovení koeficientů regresního modelu je zároveň realizován test významnosti zvolených faktorů a jejich interakcí. Faktory či interakce ohodnocené na základě tohoto testu jako nevýznamné se následně odstraní a následuje přepočítání koeficientů regresního modelu. Uvedený postup je opakován až do odstranění všech nevýznamných faktorů a nevýznamných interakcí. Záznam jednotlivých kroků výpočtu regresního modelu pro levý i pravý bok zubu je uveden v příloze 4. Jako hodnotící kritérium významnosti slouží p -hodnota příslušná jednotlivým faktorům a jejich interakcím. Tato hodnota vyplývá z přepočtu hodnoty testovacího kritéria F_{OVj} na příslušnou hladinu významnosti α , na které lze zamítnout nulovou hypotézu. Hladina významnosti α se v rámci všech provedených statistických testů uvažuje 5 %.

Pro úplnost jsou v příloze 4 jednotlivým pozorováním přiřazeny meze konfidenčních a predikčních intervalů. Způsob výpočtu konfidenčních a predikčních intervalů podrobně podává [60].

Výsledný regresní model pro levý bok zubu vykazuje hodnotu součinitele determinance $R^2 \approx 61,90$ %. Testovací kritérium F_{OLOF} nabývá hodnoty 1,20, což odpovídá p -hodnotě 0,365. Existují 2 pozorování, která vykazují významně odlišnou standardizovanou reziduální odchylku, a sice pozorování č. 4 a 15. Na základě těchto výstupů lze regresní model pro levý bok zubu považovat za adekvátní.

Významnost jednotlivých faktorů a interakcí je hodnocena pomocí koeficientu příslušného faktoru, resp. interakce v kódované podobě. Výsledky shrnuje tab. 5.5 (interakce dvou faktorů je označena jejich součinem).

Z tab. 5.5 vyplývá, že s nárůstem otáček brousicího šneku n_s se zvyšuje hodnota MP . Stejným účinkem se projevuje nastavení vyššího radiálního inkrementu Δx_s . Zvýšení tangenciálního posuvu f_y naopak přispívá k poklesu výsledné hodnoty MP . Významný vliv má rovněž interakce tangenciálního posuvu f_y s otáčkami n_s , která s rostoucí hodnotou obou těchto parametrů přispívá k nárůstu hodnoty MP . Zatímco samostatný nárůst radiálního inkrementu Δx_s vede ke zvýšení hodnoty MP , v interakci s rostoucími otáčkami n_s lze očekávat zmírnění jejího celkového nárůstu.

Tab. 5.5 Významné faktory regresního modelu pro levý bok zubu. n_s [min^{-1}] – otáčky brousicího šneku, Δx_s [mm] – radiální inkrement, f_y [mm] – tangenciální posuv na otáčku obrobku, β_j^* [-] – koeficient regresního modelu pro kódované hodnoty nezávisle proměnných.

Faktor	β_j^* [-]
n_s	11,497
Δx_s	9,725
$n_s \cdot f_y$	8,177
f_y	-7,313
$n_s \cdot \Delta x_s$	-6,941

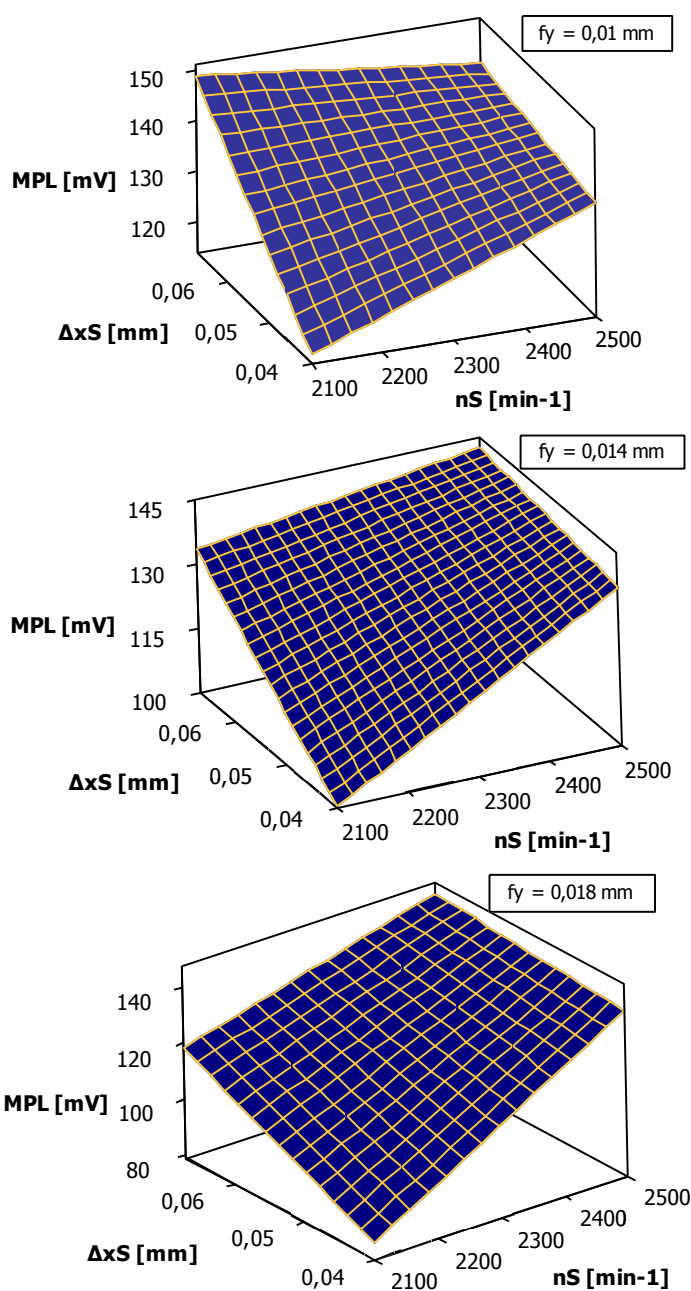
Jako významné byly ohodnoceny otáčky brousicího šneku n_s , radiální inkrement Δx_s a tangenciální posuv na otáčku obrobku f_y . Jako nevýznamný z hlediska výsledné hodnoty MP se jeví axiální posuv na otáčku obrobku f_z . Z tab. 5.5 rovněž plyne, že tangenciální posuv na otáčku obrobku f_y se nejvýrazněji projevuje v interakci s otáčkami brousicího šneku n_s . Tato skutečnost odporuje očekávanému vlivu tangenciálního posuvu f_y .

Výsledný regresní model má pro levý bok zubu tvar daný rovnicí (5.7).

$$MP_L = -3,983 + 0,052 \cdot n_S - 25\,336,700 \cdot f_y + 6633,110 \cdot \Delta x_S + 10,221 \cdot n_S \cdot f_y - 2,571 \cdot n_S \cdot \Delta x_S \quad (5.7)$$

kde: MP_L [mV] - hodnota MP na levém boku zubu,
 n_S [min^{-1}] - otáčky brousícího šneku,
 f_y [mm] - tangenciální posuv na otáčku obrobku,
 Δx_S [-] - radiální inkrement.

Odezvové plochy regresního modelu pro levý bok zubu při pevně zvolených hodnotách $f_y = 0,01, 0,014$ a $0,018$ mm znázorňuje obr. 5.14.



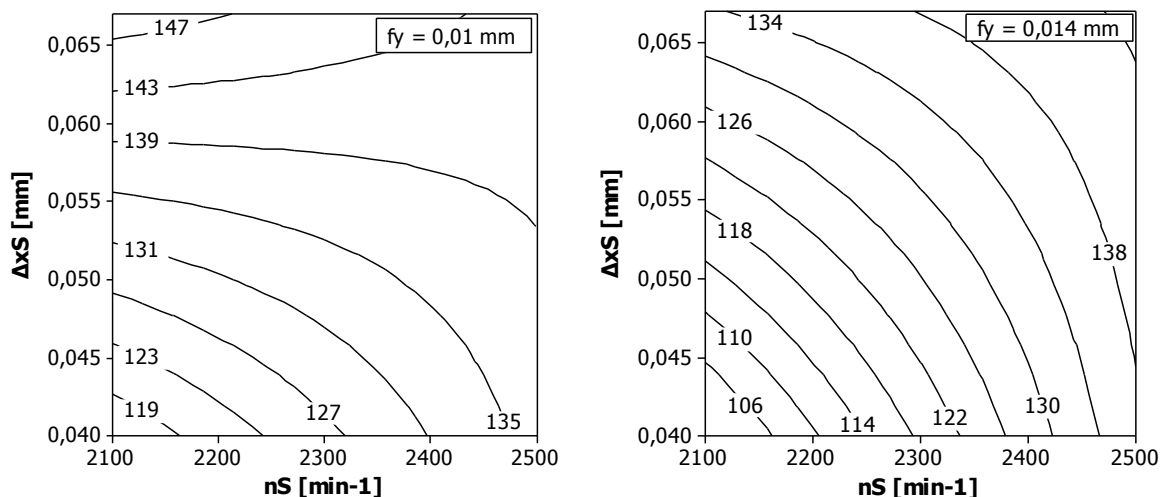
Obr. 5.14 Odezvové plochy regresního modelu pro levý bok zubu (Minitab).
 MP_L [mV] – hodnota MP na levém boku zubu, n_S [min^{-1}] – otáčky brousícího šneku,
 Δx_S [mm] – radiální inkrement, f_y [mm] – tangenciální posuv na otáčku obrobku.

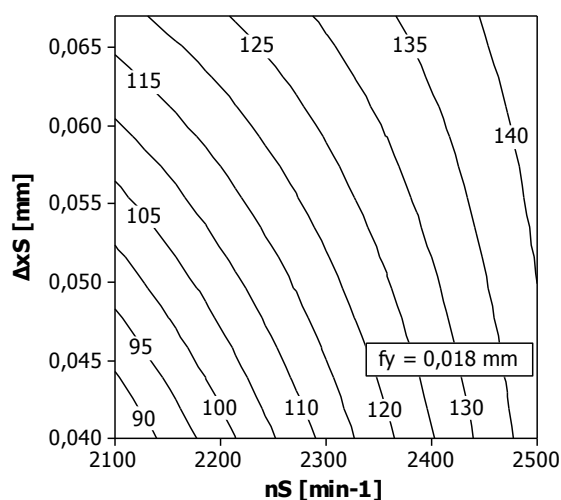
Na základě tvaru odezvových ploch na obr. 5.14 lze konstatovat, že vypočítaný regresní model vykazuje významné zakřivení. Zvětšování tangenciálního posuvu f_y vede k posunu odezvové plochy směrem k nižším hodnotám MP . Tato skutečnost je zdůvodněna snížením účinku opotřebení boku závitů brousicího šneku. S rostoucím tangenciálním posuvem f_y narůstá podíl neopotřebovaných brousicích zrn, která dosud nebyla v záběru s obrobkem.

Účinek zvyšujících se otáček n_s lze zdůvodnit např. s přihlédnutím k závislostem uvedeným v [5]. S nárůstem otáček brousicího šneku se rovněž zvyšuje množství tepla předaného obrobku. Zvýšené množství tepla, které bylo předáno obrobku, lze vysvětlit s využitím pojmu tzv. efektivní tvrdosti brousicího šneku [5]. Poněvadž klesá velikost ekvivalentní tloušťky třísky h_{eq} , dochází také k poklesu řezných sil. Pokles řezných sil vede ke zvýšení podílu brousicích zrn, která v důsledku své orientace či z důvodu vysokého stupně opotřebení nerealizují úběr třísky, nýbrž působí pouze jako zdroj tření, resp. plasticky vytlačují materiál obrobku. Chování brousicího šneku za těchto podmínek lze srovnávat s chováním brousicího šneku o vyšší tvrdosti.

Zvýšení radiálního inkrementu Δx_s samostatně vede k nárůstu hodnoty MP . Příčinu lze hledat ve zvýšení ekvivalentní tloušťky třísky h_{eq} spolu s maximální kinematickou délkou styku l_{kmax} . V interakci s otáčkami brousicího šneku n_s však rostoucí radiální inkrement zmírňuje nárůst výsledných hodnot MP (tento jev je patrný zejména na odezvové ploše pro $f_y = 0,01$ mm). Vysvětlení podle [5] spočívá v poklesu celkové doby, během které se realizuje úběr třísky. Přestože zvýšením radiálního inkrementu Δx_s a zároveň otáček n_s lze dosáhnout příznivějších hodnot MP , není tato varianta z důvodu zhoršující se přesnosti broušení ozubení přípustná.

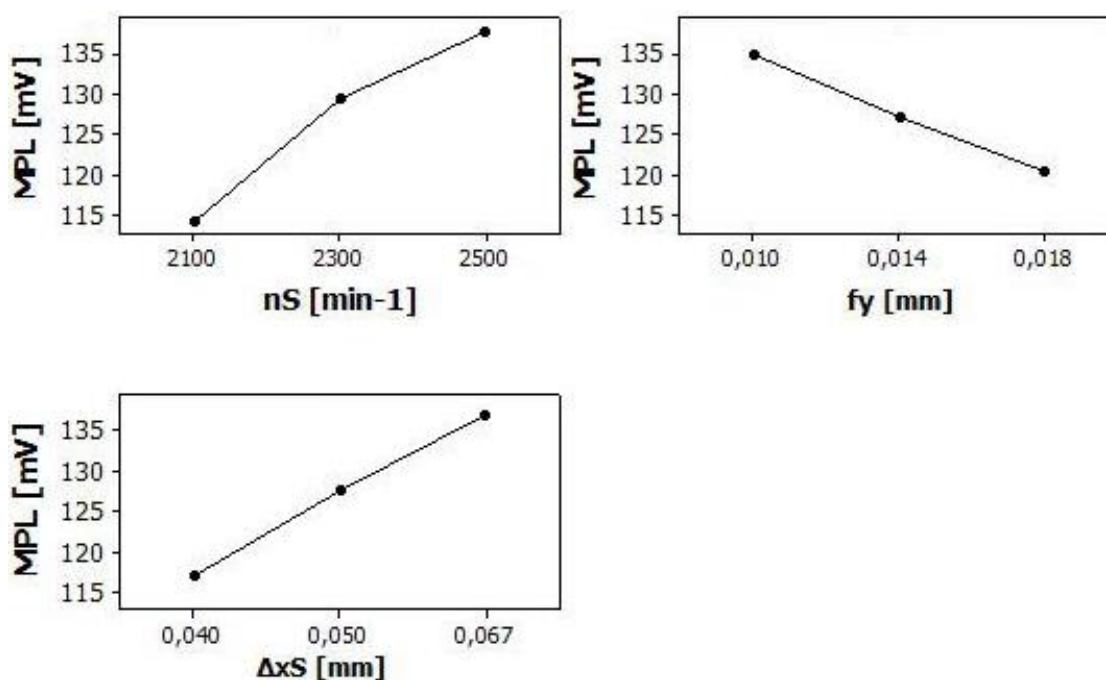
Pro lepší názornost jsou odezvové plochy doplněny vrstevnicovými grafy pro hodnoty $f_y = 0,01, 0,014, 0,018$ mm na obr. 5.15. Každá z křivek reprezentuje množinu bodů na odezvové ploše, které vykazují stejnou hodnotu MP_L .





Obr. 5.15 Vrstevnicové grafy regresního modelu pro levý bok zubu (Minitab).
 MP_L [mV] – hodnota MP na levém boku zubu, n_S [min⁻¹] – otáčky brousícího šneku,
 Δx_S [mm] – radiální inkrement, f_y [mm] – tangenciální posuv na otáčku obrobku.

Efekty jednotlivých faktorů znázorňují grafy na obr. 5.16.



Obr. 5.16 Efekty faktorů regresního modelu pro levý bok zubu (Minitab).
 MP_L [mV] – hodnota MP na levém boku zubu, n_S [min⁻¹] – otáčky brousícího šneku,
 Δx_S [mm] – radiální inkrement, f_y [mm] – tangenciální posuv na otáčku obrobku.

Samostatné vlivy jednotlivých faktorů znázorněné v podobě efektů (tj. aritmetických průměrů změn hodnoty MP při jednom proměnném faktoru a ostatních pevně zvolených faktorech) potvrzují závěry, které byly učiněny v předchozím textu.

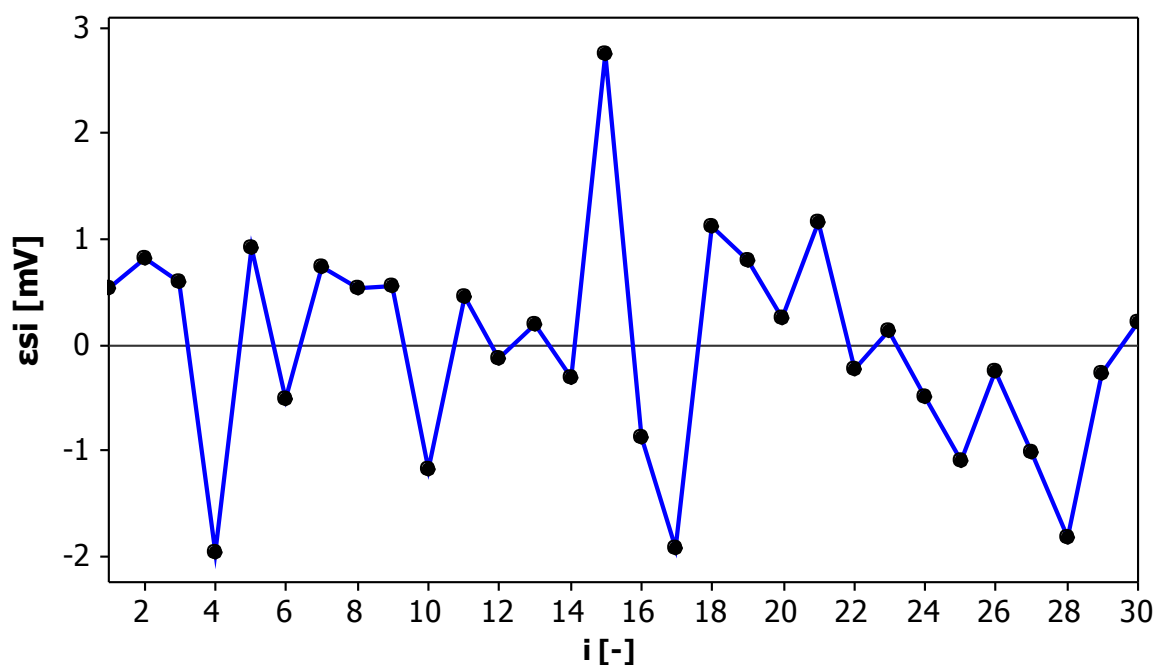
Pro ověření předpokladů správnosti regresního modelu byly využity výstupy softwaru Minitab v příloze 4. Vypočtený bodový odhad střední hodnoty reziduální odchylky ε_i v rámci všech pozorování činí přibližně $-8,68 \cdot 10^{-17}$, což lze považovat za hodnotu

dostatečně blízkou nule. Předpoklad nulové střední hodnoty reziduální odchylky ε_i je tudíž považován za splněný.

Nezávislost rozptylu reziduální odchylky na číse pozorování lze ověřit vynesemím standardizovaných reziduálních odchylek ε_{si} v závislosti na číse pozorování i (viz obr. 5.17).

Na základě grafu závislosti standardizovaných reziduálních odchylek ε_{si} na číse pozorování i je možno konstatovat, že korelace mezi těmito dvěma veličinami není významná. K heteroskedasticitě (tj. závislosti rozptylu reziduálních odchylek na číse pozorování i) tudíž nedochází.

Grafem na obr. 5.17 lze podle [59] posoudit rovněž nezávislost standardizovaných reziduálních odchylek ε_{sa} , ε_{sb} pro $a \neq b$. Náhodné kolísání hodnot ε_{si} v okolí nulové hodnoty vylučuje riziko autokorelace dat (tj. jejich systematický průběh v čase).

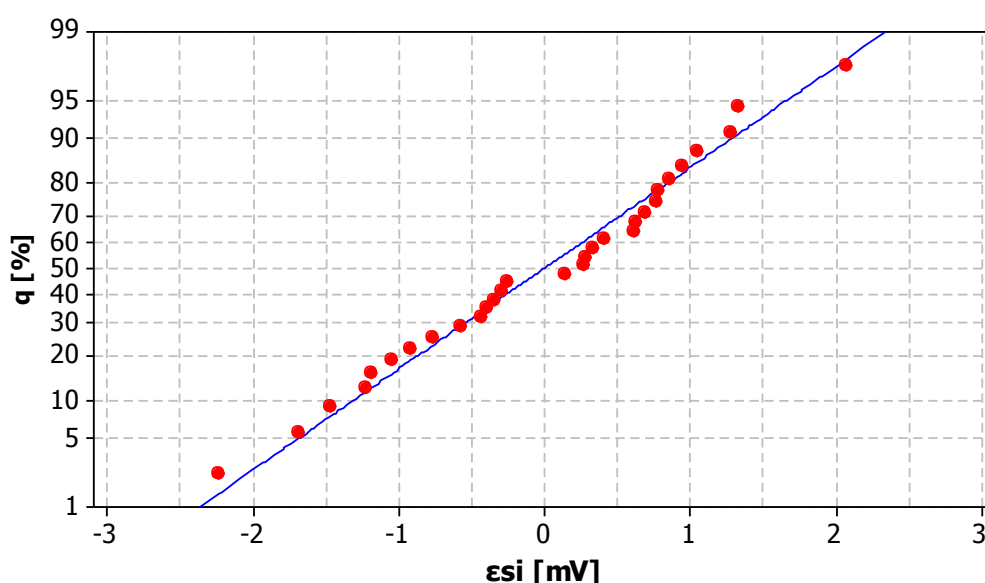


Obr. 5.17 Standardizované reziduální odchylky ε_{si} jednotlivých pozorování pro levý bok zubu (Minitab).

ε_{si} [mV] – standardizovaná reziduální odchylka, i [-] – číslo pozorování.

Předpoklad normality standardizovaných reziduálních odchylek ε_{si} se ověří vykreslením normálního pravděpodobnostního grafu (obr. 5.18).

Princip konstrukce normálního pravděpodobnostního grafu spočívá v sestrojení inverzní distribuční funkce na základě vypočítaných hodnot standardizovaných reziduálních odchylek z naměřených dat. Takto sestrojená inverzní distribuční funkce se porovná s inverzní distribuční funkcí normalizovaného normálního rozdělení $N(0, 1)$. Inverzní distribuční funkci normalizovaného normálního rozdělení v grafu reprezentuje modrá přímka, kolem které jsou náhodně rozloženy body odpovídající kvantilům inverzní distribuční funkce získané z naměřených dat. Čím více se tyto body přibližují k přímce, tím více odpovídá rozdělení pravděpodobností standardizovaných reziduálních odchylek normalizovanému normálnímu rozdělení.



Obr. 5.18 Normální pravděpodobnostní graf standardizovaných reziduálních odchylek regresního modelu pro levý bok zubu (Minitab).

ε_{si} [mV] – standardizovaná reziduální odchylka, q [%] – hodnota kvantilu.

Poněvadž nedochází k výrazným odchylkám jednotlivých bodů od přímky normálního pravděpodobnostního grafu, lze předpoklad normality považovat za ověřený.

Navržený regresní model pro posouzení vlivu zvolených faktorů na hodnotu MP levého boku zubu lze považovat za adekvátní. Za účelem sestrojení přesnějšího modelu o vyšší hodnotě součinitele determinance je vhodné při příštích experimentech vyřadit vliv axiálního posuvu f_z na otáčku obrobku a namísto něho uvážít následující vlivy:

- vliv tepelného zpracování ozubeného kola (např. proměřením hodnoty MP levého boku zubu před broušením),
- vliv radiálního házení F_r a úchylky čelní rozteče f_{pt} ozubeného kola před broušením.

Vypočítaný regresní model pro pravý bok zubu vykazuje hodnotu součinitele determinance $R^2 \approx 37,41$ %. Testovací kritérium F_{OLOF} nabývá hodnoty 2,18, což koresponduje s p -hodnotou 0,083. Přestože na základě statistického testu lack-of-fit nelze zamítnout nulovou hypotézu správnosti regresního modelu, není možno z důvodu nízké hodnoty součinitele determinance považovat regresní model za adekvátní.

Významnost jednotlivých faktorů lze posoudit na základě tab. 5.6 pomocí koeficientů kódovaných proměnných.

Tab. 5.6 Významné faktory regresního modelu pro pravý bok zubu. n_s [min^{-1}] – otáčky broušícího šneku, Δx_s [mm] – radiální inkrement, f_y [mm] – tangenciální posuv na otáčku obrobku, β_j^* [-] – koeficient regresního modelu pro kódované hodnoty nezávisle proměnných.

Faktor	β_j^* [-]
n_s	7,453
$n_s \cdot f_y$	7,054
Δx_s	6,660
f_y	-3,769

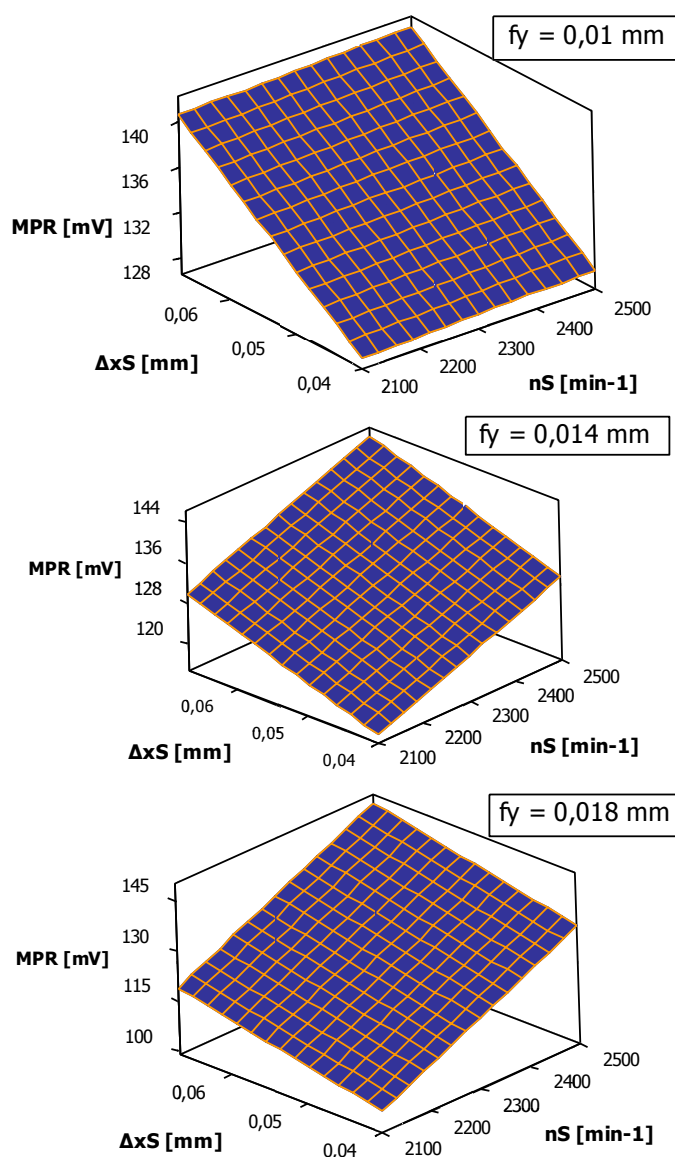
Oproti regresnímu modelu pro levý bok zubu není významná interakce otáček brousícího šneku n_s a radiálního inkrementu Δx_s . Nejvýznamnějším faktorem jsou otáčky brousícího šneku, které ovlivňují výslednou hodnotu MP pravého boku zubu obdobným způsobem jako v případě regresního modelu pro levý bok zubu.

Výsledný regresní model má pro pravý bok zubu tvar daný rovnicí (5.8).

$$MP_R = 315,582 - 0,086 \cdot n_s - 21\,221,800 \cdot f_y + 493,341 \cdot \Delta x_s + 8,817 \cdot n_s \cdot f_y \quad (5.8)$$

kde: MP_R [mV] - hodnota MP na pravém boku zubu,
 n_s [min^{-1}] - otáčky brousícího šneku,
 f_y [mm] - tangenciální posuv na otáčku obrobku,
 Δx_s [-] - radiální inkrement.

Tvary odezvových ploch pro hodnoty $f_y = 0,01$, $0,014$ a $0,018$ mm znázorňuje obr. 5.19.



Obr. 5.19 Odezvové plochy regresního modelu pro pravý bok zubu (Minitab).

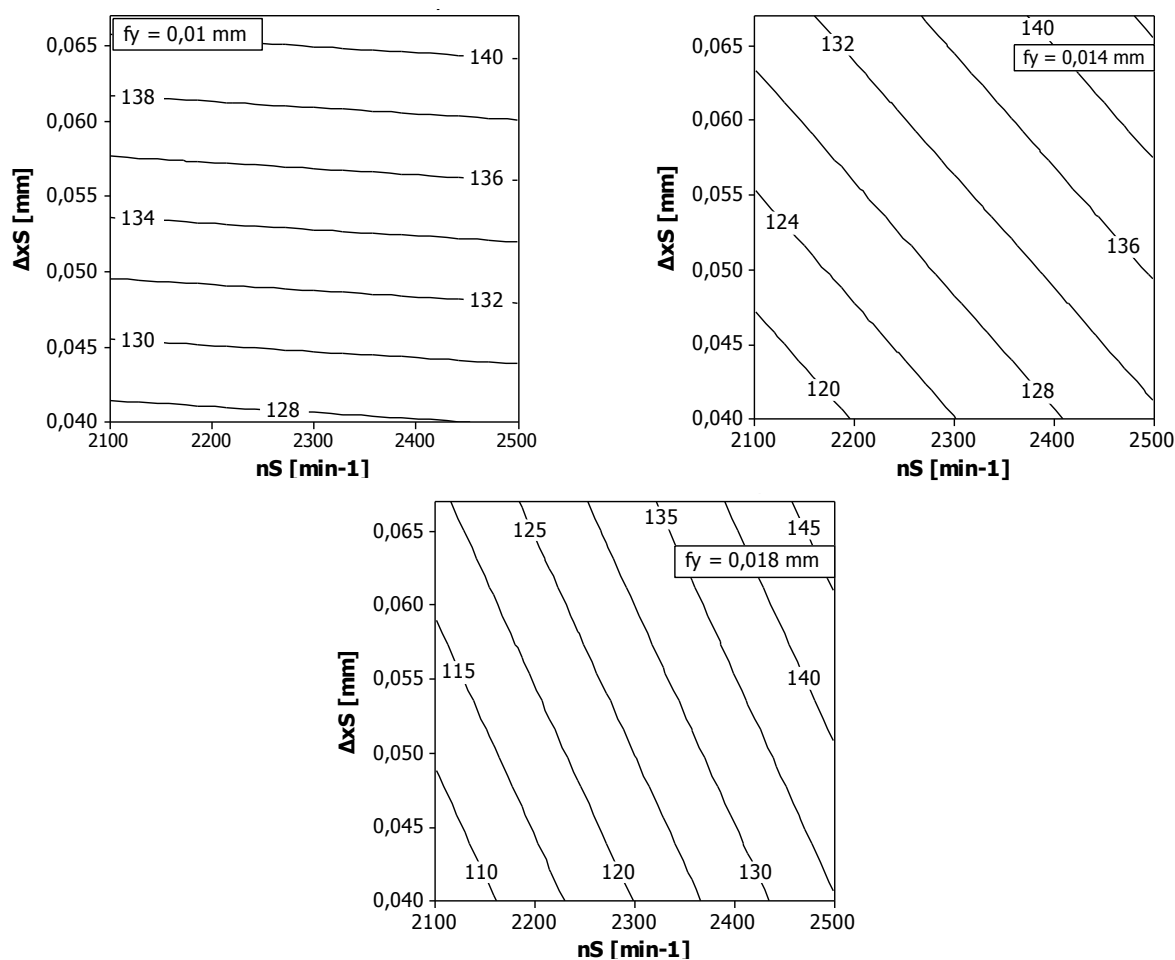
MP_R [mV] – hodnota MP na pravém boku zubu, n_s [min^{-1}] – otáčky brousícího šneku, Δx_s [mm] – radiální inkrement, f_y [mm] – tangenciální posuv na otáčku obrobku.

Vliv tangenciálního posuvu na otáčku obrobku f_y se v případě pravého boku zubu projevuje v podobě „natočení“ odezvové plochy. Samostatný vliv otáček brousicího šneku n_s , který v souladu s rovnicí regresního modelu (5.8) přispívá k poklesu hodnoty MP_R , je vyrovnán účinkem interakce otáček n_s a posuvu f_y . Čím vyšší hodnoty nabývá tangenciální posuv f_y , tím více převažuje vliv interakce n_s a f_y oproti samostatnému vlivu n_s .

Odlíšnost tvaru odezvoových ploch regresního modelu pro levý a pravý bok zubu lze zdůvodnit především vlivem nepřesnosti polohování obrobku při jeho upínání. Při polohování brousicího šneku vůči obrobku se projeví zejména radiální házení F_r a úchylka čelní rozteče f_{pt} , které mohou mít za následek odlišné hodnoty ekvivalentní tloušťky třísky h_{eq} pro jednotlivé boky zubů.

Významnost interakce tangenciálního posuvu na otáčku obrobku f_y a otáček brousicího šneku n_s v případě levého i pravého boku zubu je možno zdůvodnit s ohledem na plynulost záběru brousicího šneku a obrobku. Poněvadž v průběhu záběru zpravidla kolísá počet záběrových bodů podél záběrové úsečky, působí periodické změny silového zatížení brousicího a unášecího vřeteníku jako zdroj kmitání.

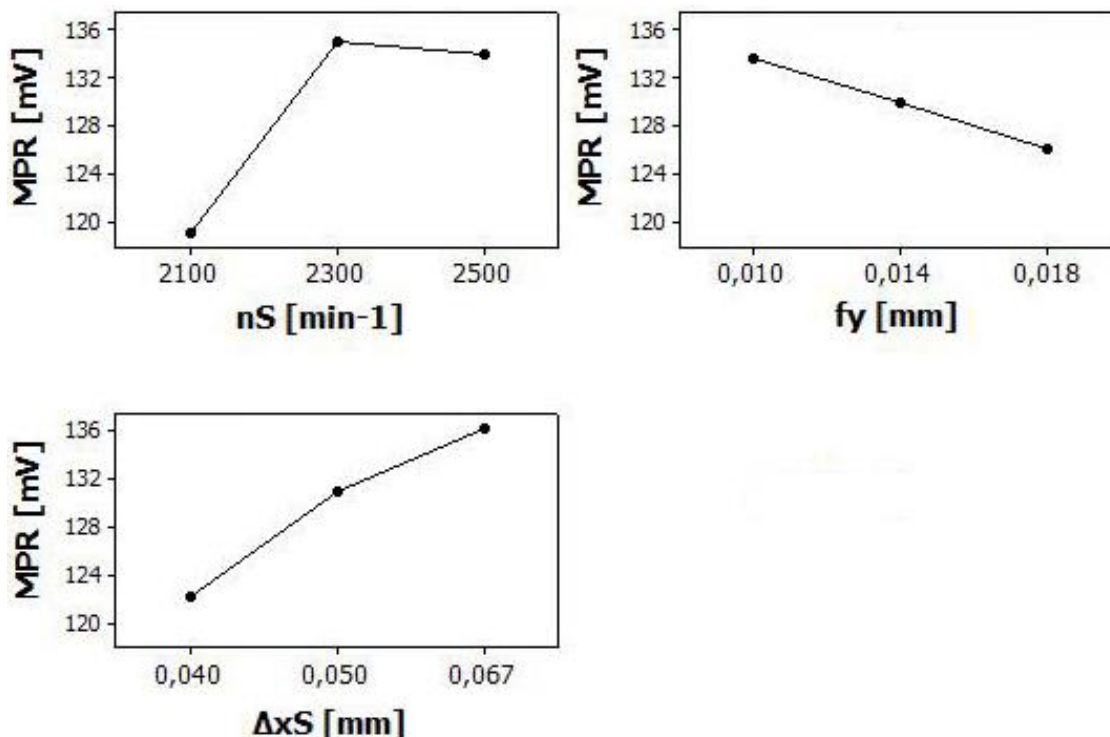
Pro úplnost jsou odezvové plochy regresního modelu pro pravý bok zubu doplněny vrstevnicovými grafy pro hodnoty $f_y = 0,01, 0,014, 0,018$ mm na obr. 5.20.



Obr. 5.20 Vrstevnicové grafy regresního modelu pro pravý bok zubu (Minitab).

MP_R [mV] – hodnota MP na levém boku zubu, n_s [min⁻¹] – otáčky brousicího šneku, Δx_s [mm] – radiální inkrement, f_y [mm] – tangenciální posuv na otáčku obrobku.

Efekty jednotlivých faktorů regresního modelu pro pravý bok zubu jsou znázorněny na obr. 5.21. Jejich výpočet je realizován obdobným způsobem jako v případě regresního modelu pro levý bok zubu.



Obr. 5.21 Efekty faktorů regresního modelu pro pravý bok zubu (Minitab).

MP_R [mV] – hodnota MP na pravém boku zubu, n_S [min⁻¹] – otáčky broušícího šneku, Δx_S [mm] – radiální inkrement, f_y [mm] – tangenciální posuv na otáčku obrobku.

Oproti efektům faktorů regresního modelu pro levý bok zubu je patrný pokles hodnoty MP s nárůstem otáček n_S v rozmezí 2300 – 2500 min⁻¹. Na základě vypočítaného regresního modelu nelze tento pokles z důvodu nízké hodnoty součinitele determinance posoudit.

Poněvadž nebyly splněny podmínky adekvátnosti regresního modelu pro pravý bok zubu (nízká hodnota součinitele determinance, hraniční hodnota testovacího kritéria lack-of-fit), nejsou dále ověřovány předpoklady jeho správnosti.

Návrhy úpravy regresních modelů

Studie [50] poskytuje interpretaci hodnot MP pomocí srovnání s hodnotami zbytkových napětí, zjištěnými metodou rentgenové difrakce. Získaná kalibrační křivka je však omezena na rozsah 30 až 90 mV, v důsledku čehož není v rozsahu hodnot MP v rámci interpretace výsledků experimentu aplikovatelná. Hodnotě 90 mV na kalibrační křivce odpovídá nulové zbytkové napětí, tj. přechod od tlakových k tahovým zbytkovým napětím. Na základě této skutečnosti lze konstatovat, že v rámci experimentu bylo v povrchové vrstvě boků zubů dosaženo tahových zbytkových napětí.

V rámci dalších experimentů je možné regresní modely levého a pravého boku zubu upravit ve dvou krocích:

- snížit velikost reziduálního rozptylu vyloučením rušivých vlivů,
- změnit vyšetřovaný rozsah řezných podmínek.

Rušivý vliv zbytkových napětí po předchozích operacích včetně tepelného zpracování lze vyloučit uvážením rušivého faktoru v podobě naměřené hodnoty MP levého, resp. pravého boku zubu před broušením. Rušivý faktor se podle [60] zahrne do plánu experimentu jako nezávisle proměnná, která v rámci stanoveného rozsahu nabývá libovolných hodnot.

Rušivý vliv radiálního házení F_r , resp. úchytky čelní rozteče f_{pt} lze uvážit proměřením ozubeného kola před zahájením broušicího procesu pomocí souřadnicového měřicího stroje. Jednotlivé zuby je nutno označit takovým způsobem, aby po broušení mohla být měřena hodnota MP na bocích zubu s přibližně stejnou hodnotou F_r , resp. f_{pt} .

Volbu nového rozsahu testovacích řezných podmínek je vhodné realizovat v návaznosti na zpřesnění regresních modelů popsáním postupem. Pro levý bok zubu se jeví účelné zvolit centrální bod nového plánu o hodnotách $n_s = 2100 \text{ min}^{-1}$, $\Delta x_s = 0,04 \text{ mm}$, $f_y = 0,018 \text{ mm}$, $f_z = 2 \text{ mm}$. Jedná se o souřadnice bodu odezvové plochy regresního modelu pro levý bok zubu s nejnižší naměřenou hodnotou MP .

V rámci dalších experimentů je účelné uvážit rovněž vliv tlaku procesní kapaliny. Významnost tohoto faktoru lze posoudit zavedením veličiny tlaku do plánu experimentu, která nabývá stanovených diskrétních hodnot.

Kontrola struktury povrchové vrstvy boků zubů po broušení

Výsledek broušicího procesu v podobě hodnoty MP naměřené na pravém a levém boku zubu významně závisí rovněž na strukturním stavu povrchové vrstvy boků zubů po broušení. Za účelem vyloučení možného nežádoucího vlivu tohoto faktoru byl proveden metalografický výbrus boku zubu ozubeného kola, které bylo broušeno při nastavení řezných podmínek podle tab. 5.2. V rámci hrubovací fáze (krok č. 2) byly nastaveny řezné podmínky, které odpovídají centrálnímu bodu plánu experimentu ($n_s = 2300 \text{ min}^{-1}$, $f_z = 2 \text{ mm}$, $f_y = 0,014 \text{ mm}$, $\Delta x_s = 0,05 \text{ mm}$). Materiál ozubeného kola odpovídá popisu podle tab. 5.1.

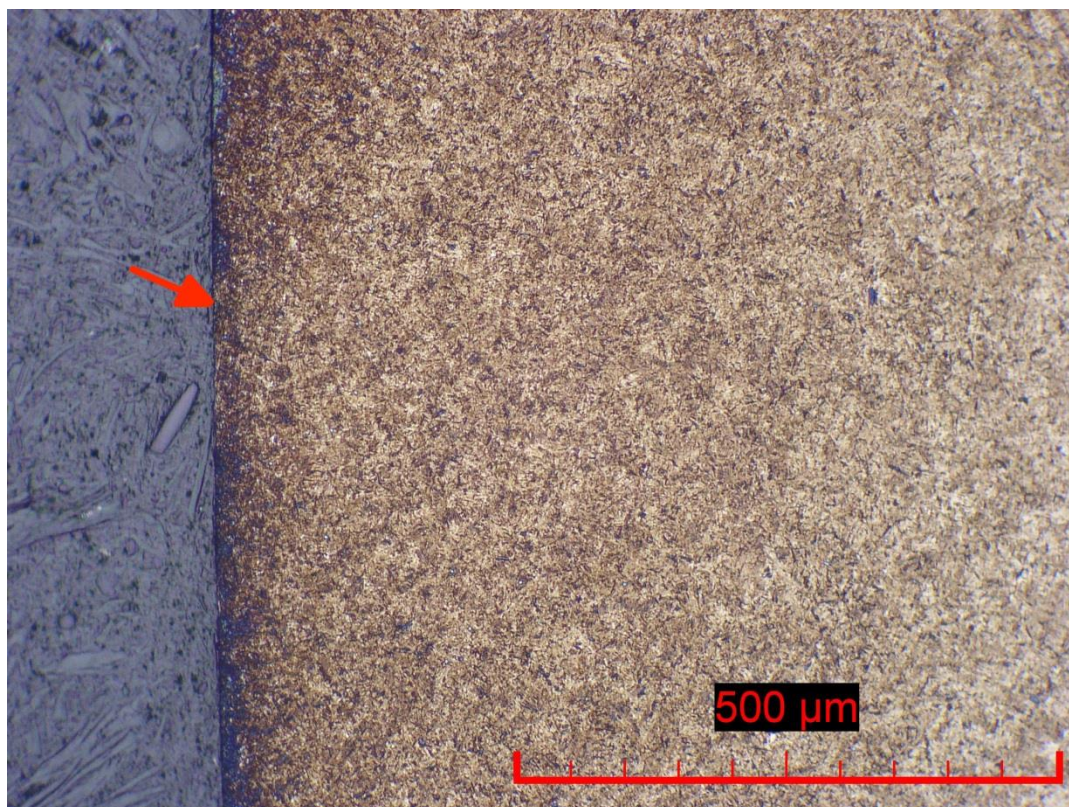
Účel provedení a vyhodnocení metalografického výbrusu spočívá v následujících bodech:

- zjistit, zdali v blízkosti povrchu boku zubu není zvýšený hmotnostní podíl zbytkového austenitu,
- zjistit, zdali v povrchové vrstvě není přítomen sekundární cementit v podobě síťoví.

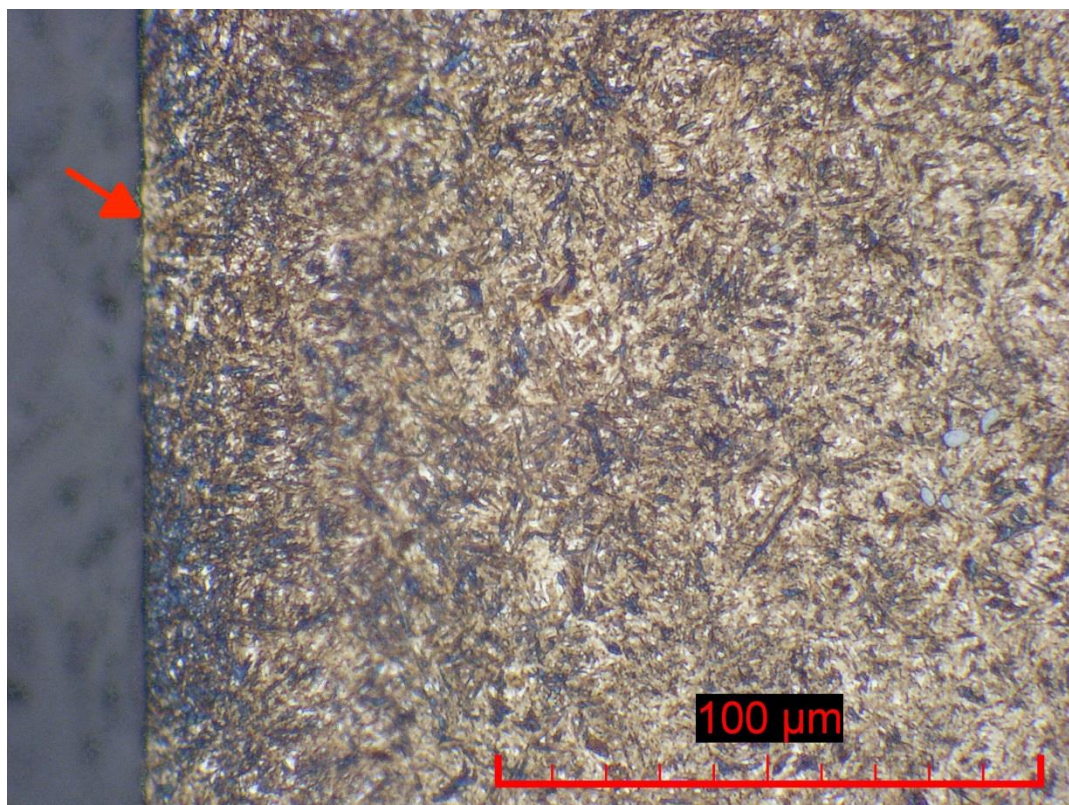
V případě přítomnosti významného hmotnostního podílu zbytkového austenitu v povrchové vrstvě boku zubu narůstá riziko nežádoucího výskytu tetragonálního martenzitu. Výskyt tetragonálního martenzitu po broušení (jako možný důsledek prudkého ochlazení povrchu obrobku působením procesní kapaliny) vede ke dramatickému poklesu únavové pevnosti ozubení.

Přítomnost sekundárního cementitu v podobě síťoví přispívá k nárůstu řezných sil, opotřebení broušicího šneku a průměrné teploty v místě řezu.

Vzhled povrchové vrstvy boku zubu znázorňuje dvojice fotografií na obr. 5.22 a obr. 5.23. Struktura povrchové vrstvy na těchto fotografiích odpovídá oblasti boku zubu v okolí roztečného válce ozubeného kola.



Obr. 5.22 Vzhled povrchové vrstvy boku zubu po naleptání (Nital 2 %, Olympus PMG3, zvětšení 100x). Červená šipka označuje broušený povrch.



Obr. 5.23 Vzhled povrchové vrstvy boku zubu po naleptání (Nital 2 %, Olympus PMG3, zvětšení 500x). Červená šipka označuje broušený povrch.

Povrchová vrstva vykazuje rovnoměrnou strukturu tvořenou kubickým martenzitem, minimálním podílem zbytkového austenitu a drobnými vměstky nečistot. Na základě fotografií na obr. 5.22 a obr. 5.23 lze tedy vyloučit možnost výskytu zvýšeného hmotnostního podílu zbytkového austenitu, stejně jako přítomnost síťoví sekundárního cementitu.

Struktura povrchové vrstvy tudíž nevykazuje známky přítomnosti nežádoucích fází, které by mohly rušivě ovlivnit naměřené hodnoty *MP*.

ZÁVĚR

Kontinuální odvalovací broušení představuje moderní a perspektivní metodu dokončování čelního ozubení, umožňující naplnit rostoucí požadavky na integritu povrchu boků zubů.

Za účelem dosažení požadovaných parametrů přesnosti čelního ozubení je nezbytné respektovat předpoklady realizace obálkové věty. Míra naplnění těchto předpokladů závisí na parametrech broušícího šneku, parametrech odvalovací brusky, stejně jako na technologických podmínkách broušícího procesu. Zásadní význam má především geometrie broušícího šneku, která musí v každém okamžiku záběru s obrobkem zajistit bodový dotyk v rámci tvořící roviny ρ_w . Tomuto požadavku plně vyhovuje evolventní šnek. Je-li geometrie broušícího šneku ve výsledku orovnávacího procesu odlišná, lze odchylku geometrie zanedbat pouze v případě, je-li úhel stoupání broušícího šneku γ_s dostatečně malý a roztečný průměr d_s dostatečně velký s ohledem na požadovanou přesnost konkrétního obrobku.

Jak plyne z dosavadních poznatků, nejvýznamnějšími limitujícími faktory produktivity procesu kontinuálního odvalovacího broušení jsou pracovní přesnost odvalovací brusky, dále pak tepelné ovlivnění povrchové vrstvy obrobku.

Hlavní přínos této diplomové práce spočívá v posouzení vlivu řezných podmínek broušícího procesu na výsledná zbytková napětí v povrchové vrstvě boku zubu obrobku, jejichž velikost koresponduje s hodnotou magnetoelastického parametru MP . Tato hodnota v největší míře závisí na otáčkách broušícího šneku n_s , radiálním inkrementu Δx_s a tangenciálním posuvu na otáčku obrobku f_y .

Experimentem za popsaných podmínek byly pro levý bok zubu zjištěny následující závislosti:

- zvýšení otáček broušícího šneku n_s vede k nárůstu hodnoty MP ,
- zvýšení radiálního inkrementu Δx_s vede k nárůstu hodnoty MP ,
- zvýšení tangenciálního posuvu na otáčku obrobku f_y má za následek pokles hodnoty MP .

Jako významné se rovněž jeví interakce otáček broušícího šneku n_s a tangenciálního posuvu na otáčku obrobku f_y , stejně jako interakce otáček broušícího šneku n_s a radiálního inkrementu Δx_s .

Získaný regresní model pro levý bok zubu s hodnotou součinitele determinance $R^2 \approx 61,90$ % a hodnotou testovacího kritéria $f_{0LOF} = 1,20$ (odpovídá p -hodnotě 0,365) lze považovat za dostatečně adekvátní.

V případě pravého boku zubu nelze regresní model s hodnotou součinitele determinance $R^2 \approx 37,41$ % a hodnotou testovacího kritéria $f_{0LOF} = 2,18$ (odpovídá p -hodnotě 0,083) považovat za adekvátní. Možným vysvětlením je nepřesnost polohování obrobku při jeho upínání. Výsledky experimentu pro pravý bok zubu se od výsledků pro levý bok zubu odlišují v následujících bodech:

- vliv interakce otáček broušícího šneku n_s a radiálního inkrementu Δx_s byl na základě testu významnosti efektu ohodnocen jako zanedbatelný,

- vliv otáček brousicího šneku n_s na výslednou hodnotu MP je významně ovlivněn interakcí s tangenciálním posuvem na otáčku obrobku f_y , přičemž s rostoucí velikostí f_y převažuje interakce těchto dvou veličin oproti samostatnému vlivu otáček n_s .

Interakce otáček brousicího šneku n_s a tangenciálního posuvu na otáčku obrobku f_y ovlivňuje výslednou hodnotu MP opačným způsobem, než jak plyne z dosavadních teoretických poznatků. Zatímco na základě teoretických úvah lze očekávat zmírňující účinek tangenciálního posuvu na otáčku obrobku f_y na celkový nárůst hodnoty MP , s rostoucími otáčkami brousicího šneku n_s naopak posuv f_y tento nárůst posiluje. Jako možné vysvětlení se ukazuje kmitání obráběcího systému a nepřesnost polohování obrobku vůči brousicímu šneku.

Snížení reziduálního rozptylu obou regresních modelů je nutno dosáhnout opakováním experimentu s vyloučením rušivých vlivů v podobě zbytkových napětí po předcházejících operacích a vlivu nepřesnosti čelního ozubení při polohování obrobku vůči brousicímu šneku.

Strukturní stav povrchové vrstvy ozubeného kola po broušení byl dodatečně ověřen metalografickým výbrusem. Na základě výsledků metalografického výbrusu lze vyloučit přítomnost fází, které mohou nežádoucím způsobem ovlivnit výslednou hodnotu MP (tj. zbytkový austenit, síťový cementit).

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. *Reishauer-Fibel: Verzahnungsschleifen und Honen*. 2. Auflage. Wallisellen, 2001. 108 s.
2. ŠALAMOUN, Čestmír. *Čelní a šroubová soukolí s evolventním ozubením*. Praha: SNTL, 1990. 467 s. ISBN 80-030-0532-9.
3. MRKVICA, Ivan. *Speciální technologie: výroba ozubených kol II*. Ostrava: VŠB Ostrava, 2009. 116 s. ISBN 978-80-248-2134-4.
4. KRATOCHVÍL, Tomáš. *Technologie dokončování ozubených kol ševingováním* [online]. Bakalářská práce. Brno: VUT Brno, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, 2011. Vedoucí práce Ing. Oskar Zemčík, CSc. [vid. 2013-04-09]. 42 s. Dostupné z: https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/5156/technologie%20dokoncovani%20ozubenych%20ko%20sevingovanim_kratochvil.pdf?sequence=1
5. SCHRIEFER, H., et al. *Kontinuierliches Wälzschleifen von Verzahnungen*. Wallisellen: Reishauer AG, 2008. 588 s. ISBN 978-3-033-01447-3.
6. ČSN 01 4602. *Názvosloví ozubených převodů: Převody s čelními koly. 2. díl*. Praha: Vydavatelství Úřadu pro normalizaci a měření, 1984. 80 s.
7. SKOPAL, Jaroslav. *Ozubení, ozubená kola a ozubená soukolí v technických normách. MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha: SEND Předplatné s.r.o, roč. 2007, č. 5. [vid. 2013-04-09]. ISSN 1212-2572. Kód článku: 070536. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/ozubeni-ozubena-kola-a-ozubena-soukoli-v-technicky-normach-2.html>
8. SVOBODA, Pavel, et al. *Základy konstruování*. Vyd. 2., dopl. a přeprac. Brno: CERM, 2008. 234 s. ISBN 978-80-7204-584-6.
9. *Konstruování strojů: převody, přednáška 5* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování, 2010. 16 s. [vid. 2013-04-23]. Dostupné z: http://old.uk.fme.vutbr.cz/kestazeni/6C2/prednasky/prednaska5_6c2.pdf
10. CADISCH, J. *Endbearbeitungsverfahren für Aussenstirnverzahnungen*. Wallisellen: Reishauer AG, 2005. 52 s.
11. SKOPAL, Jaroslav. *Zobecnění tvůrčí inženýrsko-badatelské činnosti v technické normalizaci* [online]. Habilitační práce. Praha: ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav strojírenské technologie, 2011. [vid. 2013-04-09]. 70 s. Dostupné z: <http://www.docstoc.com>
12. KARPUSCHEWSKI, B., H. - J. KNOCHE a M. HIPKE. *Gear finishing by abrasive processes. CIRP Annals - Manufacturing Technology* [online]. 2008, roč. 57, č. 2, s. 621-640. [vid. 2013-04-09]. ISSN 00078506. DOI: 10.1016/j.cirp.2008.09.002. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S000785060800187X>
13. DEJL, Zdeněk, Vladimír MORAVEC a Milena HRUDIČKOVÁ. *Teoretický rozbor vlivu deformací na záběr ozubených kol a modifikace ozubení: Závěrečná zpráva dílčí etapy 3.4.1 řešené v rámci Výzkumného centra automobilů a spalovacích motorů Josefa Božka II* [online]. Ostrava: VŠB Ostrava, Fakulta strojní, Katedra

- částí a mechanismů strojů, 2006. 20 s. [cit. 2013-04-09]. Číslo zprávy: D14 – VCJB 3.4.1/2006. Dostupné z: http://www3.fs.cvut.cz/web/fileadmin/documents/12241-BOZEK/publikace/2006/2006_054_01.pdf
14. JUKLOVÁ, Lenka. *Kinematická geometrie* [online]. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, Přírodovědecká fakulta, Katedra algebry a geometrie, 2008. [cit. 2013-04-09]. Dostupné z: <http://kag.upol.cz/juklova/3rocnik/KGE1.html>
 15. DENKENA, B., et al. Kontinuierliches Wälzschleifen von Verzahnungen. *Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren: Verfahren und Maschinen*. Essen: Vulkan-Verlag, roč. 2004, č. 61, s. 65 - 77. ISBN 3-8027-2931-5.
 16. KLOCKE, Fritz. *Fertigungsverfahren 2*. 4., neu bearbeitete Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005. 494 s. ISBN 978-354-0276-999.
 17. *Schleifwerkzeuge*. Bad Karlshafen: Krebs & Riedel Schleifscheibenfabrik, 2006. 18 s.
 18. HUMÁR, Anton. *Materiály pro řezné nástroje*. Praha: MM publishing, 2008. 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2.
 19. ČSN ISO 525. *Označování a značení brousicích nástrojů: Rozmezí vnějších průměrů a tolerance*. Druhé vydání. Praha: Český normalizační institut, 1993. 16 s.
 20. ZOUHAR, Karel. *Technologické aspekty brousicího procesu se zaměřením na brousicí nástroje*. Diplomová práce. Brno: VUT Brno, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, 2006. 89 s. Vedoucí práce doc. Ing. Jaroslav Prokop, CSc.
 21. ZIEBUHR, Thorsten, et al. *ABC der Schleiftechnik*. 2. Auflage. Bad Karlshafen: Krebs & Riedel Schleifscheibenfabrik, 2007. 90 s.
 22. MARINESCU, Ioan D. *Handbook of machining with grinding wheels*. Boca Raton, Fla.: CRC / Taylor, 2007. 596 s. ISBN 978-157-4446-715.
 23. BOT-SCHULZ, Rosemarie. *Untersuchung der Reaktionen an der Schnittstelle Korn-Bindung für Sol-Gel-Korund* [online]. Disertační práce. Aachen: Werkzeugmaschinenlabor RWTH Aachen, 2005. Vedoucí práce Univ.-Prof. Dr.-Ing. F. Klocke. [vid. 2013-04-10]. 140 s. ISBN 38-322-4777-7. Dostupné z: http://darwin.bth.rwth-aachen.de/opus/volltexte/2006/1413/pdf/BotSchulz_Rosemarie.pdf
 24. PEM ABRASIVES & REFRACTAIRES. *Abral: A new approach to precision grinding*. [s.l.], 2008. 5 s.
 25. KÖHLER, Jens, Andreas SCHINDLER a Stephan WOIWODE. Continuous generating grinding - □ Tooth root machining and use of CBN-tools. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* [online]. 2012, roč. 61, č. 1, s. 291-294. [vid. 2013-04-10]. ISSN 00078506. DOI: 10.1016/j.cirp.2012.03.033. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0007850612000352>
 26. *Schleiftechnische Grundlagen*. Butzbach: Naxos - Diskus, 2008. 50 s.

27. ČSN EN 12413+A1. *Bezpečnostní požadavky na nástroje z pojeného brusiva*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011. 56 s.
28. *Safety code for bonded abrasives and precision superabrasives*. Paris: FEPA, 2010. 74 s.
29. RAMMERSTORFER, F. G. a F. HASTIK. Der dynamische E-Modul von Schleifkörpern. *Werkstatt und Betrieb; Zeitschrift für Maschinenbau und Fertigung*. München: Carl Hanser Verlag, 1974, č. 9, s. 527 - 533. ISSN 0043-2792.
30. *Zahnflanken, Schnecken- und Gewindeschleifen*. Reutlingen: Winterthur Schleiftechnik, 2000. 92 s.
31. *Verzahnungsschleifen mit Krebs&Riedel: Zahn für Zahn Präzision*. Bad Karlshafen: Krebs & Riedel Schleifscheibenfabrik, 2011. 10 s.
32. ISO 13942:2000. *Bonded abrasive products: Limit deviations and run-out tolerances*. First edition. Geneva: ISO, 2000. 17 s.
33. *Industrial grinding tools: Vitrified and resin bonded* [online]. Maribor: Swatycomet, d. o. o., 2012. 103 s. Dostupné z: http://www.swatycomet.com/fileadmin/documents/VsiPDF/_IBO_SPE2_GB_.pdf
34. KLOCKE, Fritz a Aaron KUCHLE. *Manufacturing processes*. Berlin: Springer, 2009. 433 s. ISBN 978-354-0922-599.
35. *RZ 260 Wälzschleifmaschine*. Wallisellen: Reishauer AG, 2011. 8 s. Dostupné z: <http://www.reishauer.com/de/Maschine-RZ-260-166,465.html>
36. HRBÁČ, Jaroslav. *Metody vyvažování brousicích kotoučů*. Bakalářská práce. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická, Ústav výrobního inženýrství, 2009. 73 s. Vedoucí práce Ing. Luboš Rokyta.
37. KREJČÍ, P. *Vyvažování rotorů. Dynamika rotorových soustav* [online]. Brno: VUT Brno, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky, 2007. [vid. 2013-02-24]. Dostupné z: http://www.umt-old.fme.vutbr.cz/~pkrejci/opory/dyn_rot/kapitola_9.html
38. ČSN ISO 1925. *Vibrace.: Vyvažování - názvosloví*. Čtvrté vydání. Praha: Český normalizační institut, 2003. 64 s.
39. ČSN ISO 1940-1. *Vibrace - Požadavky na jakost vyvážení rotorů v konstantním (tuhém) stavu - Část 1: Stanovení vyvažovacích tolerancí a ověření nevyváženosti*. Druhé vydání. Praha: Český normalizační institut, 2005. 32 s.
40. ČSN ISO 3002-5. *Základné veličiny pri rezaní a brúsení: Část 5: Základná terminológia brusných operácií používajúcich brúsiace kotúče*. Praha: Český normalizační institut, 1993. 29 s.
41. KOČMAN, Karel a Jaroslav PROKOP. *Technologie obrábění*. Druhé vydání. Brno: Akademické nakladatelství CERM s.r.o., 2005. 270 s. ISBN 80-214-3068-0.
42. KLOCKE, F. *Zerspanung mit geometrisch unbestimmter Schneide - Teil 1: Fertigungstechnik 1, Vorlesung 9* [online]. Aachen: RWTH Aachen, Lehrstuhl für Technologie der Fertigungsverfahren, 2011. 37 s. [cit. 2013-03-09]. Dostupné

- z: http://www.wzl.rwth-aachen.de/cms/www_content/de/629c52491e476b86c1256f580026aef2/fti_v09_geom_unbest_schneide_teil_1.pdf
43. SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R. MISCHKE a Richard G. BUDYNAS. *Konstruování strojních součástí*. Editor Martin Hartl, Miloš Vlk. Brno: VUTIUM, 2010. 1159 s. ISBN 978-80-214-2629-0.
 44. MÁDL, Jan. *Jakost obráběných povrchů*. Ústí nad Labem: UJEP - ÚTRŮV, 2003. 179 s. ISBN 80-704-4539-4.
 45. ČSN ISO 1328-1. *Čelní ozubená kola - soustava přesnosti ISO - Část 1: Definice a mezní úchytky vztažené na stejnohlé boky zubů ozubeného kola*. Praha: Český normalizační institut, 1997. 31 s.
 46. ČSN ISO 1328-2. *Čelní ozubená kola - Soustava přesnosti ISO - Část 2: Definice a mezní hodnoty úchylek relevantní k radiální součtové úchylce a informativně k radiálnímu házení. Návrh*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013. 17 s.
 47. ISO/TR 10064-4:1998. *Cylindrical gears - Code of inspections practice: Part 4: Recommendations relative to surface texture and tooth contact pattern checking*. First edition. Genève: ISO, 1998. 30 s.
 48. BUMBÁLEK, Bohumil, Vladimír ODVODY a Bohuslav OŠŤÁDAL. *Drsnost povrchu*. Praha: SNTL, 1989. 340 s.
 49. DŮMĚNY, Tibor. *Analýza vlivu parametrů procesu broušení na integritu obrobene plochy se zaměřením na zbytková napětí*. Diplomová práce. Brno: VUT Brno, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, 2009. 65 s. Vedoucí práce Ing. Ildikó Putzová, Ph.D. [vid. 2013-04-10]. Dostupné z: https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/12975/2009_DP_Domeny_Tibor_4_9584.pdf?sequence=1
 50. VRKOSLAVOVÁ, L. Hodnocení zbytkových napětí metodou analýzy Barkhausenova šumu v porovnání s RTG diffrakcí na broušených ozubených kolech. *Informační CD firmy PCS s.r.o.* [CD-ROM]. Žďár nad Sázavou: PCS s.r.o., Divize analytika, 2012. 6 s. [vid. 2013-03-27]. Dostupné z: file:///D:/Stresstech/uvod_a_teorie/ozubeni.pdf
 51. MALEC, Jiří. Integrita povrchu, brusné spáleniny a přístrojové možnosti hodnocení. *Informační CD firmy PCS s.r.o.* [CD-ROM]. Žďár nad Sázavou: PCS s.r.o., Divize analytika, 2008. 4 s. [vid. 2013-03-27]. Dostupné z: file:///D:/Stresstech/uvod_a_teorie/integrita-povrchu.pdf
 52. MARTINS, C O D a A REGULY. Micromagnetic stress evaluation of flexible riser tensile armours. *Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring* [online]. 2009, roč. 51, č. 1, s. 8-20. [vid. 2013-04-10]. ISSN 1354-2575. DOI: 10.1784/insi.2009.51.1.8. Dostupné z: <http://www.ingentaconnect.com/content/bindt/insight/2009/00000051/00000001/art00003>
 53. KARPUSCHEWSKI, B. Introduction to micromagnetic techniques. *Informační CD firmy PCS s.r.o.* [CD-ROM]. Žďár nad Sázavou: PCS s.r.o. Divize analytika, 2012.

- 15 s. [vid. 2013-03-27]. Dostupné z: file:///D:/Stresstech/uvod_a_teorie/Mikromagneticke_metody.pdf
54. *Rollscan 300: Uživatelská příručka* [CD-ROM]. Žďár nad Sázavou: PCS s.r.o., Divize analytika, 2012. 40 s.
55. TÖNSHOFF, H. K., B. KARPUSCHEWSKI a I. OBERBECK-SPINTIG. Residual stress determination of ferromagnetic sheets. *Informační CD firmy PCS s.r.o.* [CD-ROM]. Žďár nad Sázavou: PCS s.r.o., Divize analytika, 2012. 14 s. [vid. 2013-03-27]. Dostupné z: file:///D:/Stresstech/uvod_a_teorie/Zbytkova_pnuti.pdf
56. SHAW, B. A., T. R. HYDE a J. T. EVANS. Detection of Grinding Damage in Hardened Steels. *Informační CD firmy PCS s.r.o.* [CD-ROM]. Žďár nad Sázavou: PCS s.r.o., Divize analytika, 2012. 10 s. [cit. 2013-03-27]. Dostupné z: file:///D:/Stresstech/aplikace_ozubeni/Zjisteni_brusneho_poskozeni.pdf
57. Přehled vlastností oceli 20MnCr5 (20MnCrS5). *Bohdan Bolzano s.r.o.* [online]. Kladno, 2013. [vid. 2013-03-30]. Dostupné z: <http://www.bolzano.cz/cz/technicka-prirucka/tycove-oceli-uhlikove-konstrukcni-a-legovane/oceli-k-cementovani-podle-en-10084/prehled-vlastnosti-oceli-20mncr5>
58. *Bruska na ozubení Gearspect - CNC 8*. Čelákovice: Strojírny Čelákovice s.r.o., 2005. 35 s.
59. TOŠENOVSKÝ, Josef. *Plánování experimentů: Učební text* [online]. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2012. 230 s. [vid. 2013-03-31]. ISBN 978-80-248-2592-2. Dostupné z: <http://www.person.vsb.cz/archivcd/FMMI/DOE/Planovani%20experimentu.pdf>
60. MONTGOMERY, Douglas. *Applied statistics and probability for engineers*. Vyd. 1. New York: John Wiley, 2003. 706 s. ISBN 04-712-0454-4.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Jednotka	Popis
CHD	mm	hloubka cementační vrstvy
HK	-	tvrdost dle Knoop
HRC	-	tvrdost dle Rockwella
HV	-	tvrdost dle Vickerse

<i>Symbol</i>	Jednotka	Popis
AB	-	záběrová úsečka
A_j	mm ²	průřez vrstvy odebíraného materiálu při jednotkovém natočení obrobku
B	-	osa rotace brousicího šneku
B_m	T	magnetická indukce
C	-	osa rotace obrobku
D	-	diagonální poměr
DF_j	-	počet stupňů volnosti j-tého faktoru
DF_ε	-	počet stupňů volnosti příslušející reziduálnímu rozptylu
D_S	mm	vnější průměr brousicího šneku
F	N	celková řezná síla
F_{0LOF}	-	testovací kritérium lack-of-fit
F_{ovj}	-	testovací kritérium významnosti j-tého faktoru
F_1	-	evolventní šroubová plocha kola 1
F_2	-	evolventní šroubová plocha kola 2
F_c	N	řezná síla
F'_i	μm	kinematická úchylka
F''_i	μm	celková radiální součtová úchylka
F_n	N	normální síla
F_p	μm	součtová úchylka roztečí kola pro celý obvod
F_{pk}	μm	součtová úchylka roztečí kola
F_r	μm	radiální házení
F_α	μm	úchylka profilu
F_β	μm	úchylka sklonu zubu
G	-	koeficient broušení
H	-	základní hřeben
H_m	A.m ⁻¹	intenzita magnetického pole
H_S	mm	průměr díry brousicího šneku
L_{AE}	mm	činná délka profilu
L_{AF}	mm	použitelná délka profilu
L_α	mm	rozsah vyhodnocení profilu
L_β	mm	délka vyhodnocení boční křivky zubu

MP	mV	magnetoelastický parametr
MP_L	mV	hodnota MP na levém boku zubu
MP_{max}	mV	maximální přípustná hodnota MP
MP_R	mV	hodnota MP na pravém boku zubu
N_D	-	společný jednotkový normálový vektor v bodě záběru
N_{HL}	-	jednotkový normálový vektor levého boku zubu základního hřebene
N_{HR}	-	jednotkový normálový vektor pravého boku zubu základního hřebene
N_S	-	jednotkový normálový vektor boku závitů brousicího šneku
N_{TL}	-	jednotkový normálový vektor pláště roztečného válce brousicího šneku
$O_M (X_M, Y_M, Z_M)$	-	souřadný systém stroje
$O_{MOD,H} (X_{MOD,H}, Y_{MOD,H}, Z_{MOD,H})$	-	lokální souřadný systém boku zubu základního hřebene
$O_{MOD,S} (X_{MOD,S}, Y_{MOD,S}, Z_{MOD,S})$	-	lokální souřadný systém boku závitů brousicího šneku
$O_{MOD,W} (X_{MOD,W}, Y_{MOD,W}, Z_{MOD,W})$	-	lokální souřadný systém boku zubu obrobku
$O_{OZ} (X_{OZ}, Y_{OZ}, Z_{OZ})$	-	souřadný systém integrovaného orovnávacího zařízení
$O_S (X_S, Y_S, Z_S)$	-	souřadný systém brousicího šneku
$O_V (X_V, Y_V, Z_V)$	-	souřadný systém brousicího vřeteníku
$O_W (X_W, Y_W, Z_W)$	-	souřadný systém obrobku
P	-	valivý bod
P_{FL}	-	uvažovaný bod šroubovice na roztečném válci brousicího šneku
P_{H-W}	-	valivý bod záběru základního hřebene s obrobkem
P_S	kW	výkon na brousicím vřetenu odvalovací brusky
P_{S-H}	-	bod záběru brousicího šneku se základním hřebenem
Q'_W	$\text{mm}^3 \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$	objemový výkon na jednotku axiálního záběru
Q_S	$\text{mm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$	rychlost opotřebení brousicího šneku
Q_W	$\text{mm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$	objemový výkon
R^2	%	součinitel determinance
Ra	μm	střední aritmetická úchylka profilu drsnosti
Rz	μm	maximální výška nerovností profilu drsnosti
S	-	brousicí šnek
SS_j	-	složka rozptylu modelu příslušející j-tému faktoru

SS_{LOF}	-	složka reziduálního rozptylu odpovídající chybě modelu
SS_P	-	složka reziduálního rozptylu odpovídající chybě měření
SS_T	-	celkový rozptyl modelu
SS_ε	-	reziduální rozptyl
T_{LI}	-	jednotkový tečný vektor šroubovice na roztečném válci brousicího šneku
T_{PR}	-	jednotkový tečný vektor normálního profilu brousicího šneku
T_S	mm	celková šířka brousicího šneku
U	-	uvažovaný bod záběru brousicího šneku s obrobkem
$U_{výst}$	mV	napětí výstupního Barkhausenova signálu
V_{b1}	-	základní válec kola 1
V_{b2}	-	základní válec kola 2
V_S	mm ³	objemové opotřebenění brousicího šneku
V_W	mm ³	odebraný materiál
V_{W1}	-	roztečný válec kola 1
V_{W2}	-	roztečný válec kola 2
W	-	obrobek
X	-	radiální osa
X_j	-	nezávisle proměnná
Y	-	tangenciální osa
Y_i	-	závisle proměnná
\hat{Y}_i	-	teoretická hodnota závisle proměnné příslušná i -tému pozorování
Z	-	axiální osa
a_e	mm	radiální záběr
a_{emax}	mm	maximální hodnota radiálního záběru
a_p	mm	axiální záběr
b_S	mm	využitelná část celkové šířky brousicího šneku
b_W	mm	šířka ozubení
c_W	mm	hlavová vůle
d_{aS}	mm	hlavový průměr brousicího šneku
d_{aW}	mm	hlavový průměr obrobku
d_{bnS}	mm	průměr základního válce brousicího šneku typu N
d_{bS}	mm	průměr základního válce brousicího šneku
d_{bW}	mm	průměr základního válce obrobku
d_{eq}	mm	ekvivalent průměru brousicího šneku
d_{fS}	mm	patní průměr brousicího šneku
d_{fW}	mm	patní průměr obrobku
d_S	mm	roztečný průměr brousicího šneku

d_{SU}	mm	průměr brousícího šneku v uvažovaném bodě záběru
d_W	mm	roztečný průměr obrobku
d_{WU}	mm	průměr obrobku v uvažovaném bodě záběru
e_1	mm	excentricita v rámci roviny 1
e_2	mm	excentricita v rámci roviny 2
e_{nW}	mm	šířka zubové mezery v normální rovině
e_{tW}	mm	šířka zubové mezery v čelní rovině obrobku
e_W	mm	šířka zubové mezery obrobku
e_{xW}	mm	šířka zubové mezery v osové rovině obrobku
f''_i	μm	jednotlivá radiální součtová úchylka
f'_i	μm	lokální kinematická úchylka
f_{LOF}	-	hodnota testovacího kritéria lack-of-fit
f_{fa}	μm	úchylka tvaru profilu
$f_{f\beta}$	μm	úchylka tvaru sklonu zubu
$f_{H\alpha}$	μm	úchylka úhlu profilu
$f_{H\beta}$	μm	úchylka úhlu sklonu zubu
f_{pt}	μm	úchylka čelní rozteče
f_{sh}	-	faktor tangenciálního posuvu
f_x	mm	radiální posuv na otáčku obrobku
f_y	mm	tangenciální posuv na otáčku obrobku
f_z	mm	axiální posuv na otáčku obrobku
h_{aW}	mm	výška hlavy zubu obrobku
h_{eq}	mm	ekvivalentní tloušťka třísky
h_{fW}	mm	výška paty zubu obrobku
h_W	mm	výška zubu obrobku
i	-	číslo pozorování
i_{s-w}	-	převodový poměr
j	-	číslo nezávisle proměnné
j_s	-	počet zdvihů brousícího šneku
k	-	počet faktorů experimentu
k_S	-	kontaktní úsečka záběru brousícího šneku se základním hřebenem
k_W	-	kontaktní úsečka záběru základního hřebene s obrobkem
l	-	index příslušející l -tému měření v rámci i -tého pozorování
l_{kmax}	mm	maximální kinematická délka styku
l_r	mm	základní délka
l_{SU}	mm	délka části šroubovice na průměru brousícího šneku d_{SU} na otáčku brousícího šneku
m	-	počet měření v rámci jednoho pozorování

m_{nS}	mm	normální modul brousicího šneku
m_{nW}	mm	normální modul obrobku
m_S	kg	hmotnost brousicího šneku
m_{tW}	mm	čelní modul obrobku
m_W	mm	modul obrobku
m_{xS}	mm	osový modul brousicího šneku
m_{xW}	mm	osový modul obrobku
n	-	počet pozorování
n_S	min^{-1}	otáčky brousicího šneku
n_W	min^{-1}	otáčky obrobku
p_{bS}	mm	základní rozteč brousicího šneku
p_{nS}	mm	normální rozteč brousicího šneku
p_{nW}	mm	normální rozteč obrobku
p_{tW}	mm	čelní rozteč obrobku
p_V	-	valivá přímka
p_W	mm	rozteč obrobku
p_{xW}	mm	osová rozteč obrobku
q	%	hodnota kvantilu
q_n	μm	odebíraná část celkového přídavku na jeden zdvih brousicího šneku
r_{bW}	mm	poloměr základního válce obrobku
r_W	mm	poloměr roztečného válce obrobku
s_{nW}	mm	tloušťka zubu v normální rovině obrobku
s_{tW}	mm	tloušťka zubu v čelní rovině obrobku
s_W	mm	tloušťka zubu obrobku
s_{xW}	mm	tloušťka zubu v osové rovině obrobku
t_{ES}	-	tvořící přímka evolventní šroubové plochy
v_c	m.s^{-1}	řezná rychlost
v_{cx}	m.s^{-1}	složka řezné rychlosti ve směru X
v_{cy}	m.s^{-1}	složka řezné rychlosti ve směru Y
v_{cz}	m.s^{-1}	složka řezné rychlosti ve směru Z_S
v_{ft}	mm.min^{-1}	posuvová rychlost v tečném směru k boční křivce zubu obrobku
v_{fy}	mm.min^{-1}	tangenciální posuvová rychlost
v_{Hy}	m.s^{-1}	tangenciální rychlost základního hřebene
v_S	m.s^{-1}	obvodová rychlost brousicího šneku
v_{Sz}	m.s^{-1}	složka rychlosti brousicího šneku vůči základnímu hřebeni ve směru Z_S
x_D	mm	souřadnice bodu záběru ve směru X_W , resp. X_S
x_{ij}	-	hodnota j -té nezávisle proměnné v i -tém pozorování
x_p	mm	souřadnice valivého bodu ve směru X_W , resp. X_S

\bar{y}_l	-	aritmetický průměr y_i ze všech pozorování
y_D	mm	souřadnice bodu záběru směru Y_W , resp. Y_S
y_i	-	pozorovaná i -tá hodnota závisle proměnné
y_{il}	-	hodnota závisle proměnné při l -tém měření v rámci i -tého pozorování
y_p	mm	souřadnice valivého bodu ve směru Y_W , resp. Y_S
z_D	mm	souřadnice bodu záběru ve směru Z_W , resp. Z_S
z_p	mm	souřadnice valivého bodu ve směru Z_W , resp. Z_S
z_S	-	počet chodů brousicího šneku
z_W	-	počet zubů obrobku
Δt	min	délka časového úseku
Δx_c	mm	celkový radiální inkrement
Δx_S	mm	radiální inkrement
Δy_S	mm	tangenciální přestavení
Δz_S	mm	změna axiální polohy brousicího šneku
Δz_W	mm	axiální posunutí stop záběru na protilehlých bocích zubu obrobku
$\Delta \rho_e$	mm	změna poloměru křivosti normálního profilu boku zubu při jednotkovém natočení obrobku
$\Delta \varphi_W$	°	natočení obrobku
$\Delta \varphi_S$	°	natočení brousicího šneku
$\Delta \varphi_{Wj}$	-	jednotkové natočení obrobku
α	-	hladina významnosti statistického testu
α_{nS}	°	normální úhel záběru brousicího šneku
α_{nW}	°	normální úhel záběru obrobku
α_{tW}	°	čelní úhel záběru obrobku
α_W	°	úhel záběru obrobku
α_{xS}	°	osový úhel záběru brousicího šneku
α_{xW}	°	osový úhel záběru obrobku
β_{bS}	°	úhel sklonu tvořící přímky vůči povrchu základního válce brousicího šneku
β_j	-	regresní koeficient j -té nezávisle proměnné
β_j^*	-	koeficient regresního modelu pro kódované hodnoty nezávisle proměnných
β_W	°	úhel sklonu zubů obrobku
γ_{bS}	°	úhel stoupání šroubovice na základním válci brousicího šneku
γ_S	°	úhel stoupání brousicího šneku
γ_W	°	úhel stoupání zubů obrobku
ε_l	-	exponent vlivu ekvivalentní tloušťky třísky

ε_2	-	exponent vlivu maximální kinematické délky styku
ε_i	-	reziduální odchylka při i -tém pozorování
ε_{Si}	mV	standardizovaná reziduální odchylka
ε_γ	-	celkový součinitel záběru
λ_C	mm	charakteristická délka profilového filtru
μ_F	-	faktor poměru řezné síly a normální síly
ζ_{S-W}	°	úhel sklonu os ZS, ZW
ρ_e	mm	poloměr křivosti normálního profilu boku zubu obrobku v uvažovaném bodě záběru
ρ_w	-	tvořicí rovina
σ^2	-	rozptyl reziduálních odchylek
τ_S	-	záběrová rovina brousicího šneku
τ_w	-	valivá rovina
$\tau_{W(H-W)}$	-	valivá rovina základního hřebene a obrobku
$\tau_{W(S-H)}$	-	valivá rovina brousicího šneku a základního hřebene
φ_S	°	úhlová poloha brousicího šneku
φ_w	°	úhlová poloha obrobku
ω_S	min ⁻¹	úhlová rychlost brousicího šneku
ω_w	min ⁻¹	úhlová rychlost obrobku

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 Označování zrnitosti konvenčních brousicích nástrojů dle standardu FEPA.
Příloha 2 Výkres broušeného ozubeného kola.
Příloha 3 Technologický postup výroby broušeného ozubeného kola.
Příloha 4 Záznam výpočtu regresního modelu pro levý a pravý bok zubu.

Pozn.: Z důvodu obsáhlosti je příloha 4 v listinné podobě diplomové práce vyvázána dohromady s hlavní stáří diplomové práce. Přílohy 1, 2, 3 jsou volně vloženy do desek diplomové práce.

PŘÍLOHA 4

Záznam výpočtu regresního modelu pro levý a pravý bok zubu.

29.3.2013 9:28:13

Response Surface Regression: LB (MP) versus Block; ns; fz; fy; dx

The analysis was done using coded units.

Estimated Regression Coefficients for LB (MP)

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	131,739	5,070	25,982	0,000
Block	0,574	3,649	0,157	0,877
ns	11,497	3,381	3,401	0,004
fz	2,505	3,381	0,741	0,471
fy	-7,295	3,381	-2,158	0,049
dx	10,057	3,379	2,976	0,010
ns*ns	-5,811	8,999	-0,646	0,529
fz*fz	-10,486	8,999	-1,165	0,263
fy*fy	8,739	8,999	0,971	0,348
dx*dx	1,647	9,693	0,170	0,868
ns*fz	-4,124	3,584	-1,151	0,269
ns*fy	8,177	3,584	2,281	0,039
ns*dx	-6,941	3,571	-1,944	0,072
fz*fy	-5,252	3,584	-1,465	0,165
fz*dx	-1,164	3,571	-0,326	0,749
fy*dx	0,612	3,571	0,171	0,866

S = 14,3379 PRESS = 16925,1
R-Sq = 74,62% R-Sq(pred) = 0,00% R-Sq(adj) = 47,43%

Analysis of Variance for LB (MP)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Blocks	1	5,4	5,08	5,08	0,02	0,877
Regression	14	8456,9	8456,88	604,06	2,94	0,026
Linear	4	5323,3	5267,56	1316,89	6,41	0,004
ns	1	2462,9	2377,17	2377,17	11,56	0,004
fz	1	116,0	112,88	112,88	0,55	0,471
fy	1	962,6	957,06	957,06	4,66	0,049
dx	1	1781,9	1820,46	1820,46	8,86	0,010
Square	4	545,8	545,79	136,45	0,66	0,627
ns*ns	1	168,4	85,73	85,73	0,42	0,529
fz*fz	1	142,6	279,14	279,14	1,36	0,263
fy*fy	1	228,9	193,85	193,85	0,94	0,348
dx*dx	1	5,9	5,94	5,94	0,03	0,868
Interaction	6	2587,8	2587,76	431,29	2,10	0,119
ns*fz	1	272,2	272,17	272,17	1,32	0,269
ns*fy	1	1069,8	1069,78	1069,78	5,20	0,039
ns*dx	1	776,6	776,61	776,61	3,78	0,072
fz*fy	1	441,3	441,32	441,32	2,15	0,165
fz*dx	1	21,8	21,84	21,84	0,11	0,749
fy*dx	1	6,0	6,04	6,04	0,03	0,866
Residual Error	14	2878,1	2878,07	205,58		
Lack-of-Fit	10	2562,1	2562,06	256,21	3,24	0,134
Pure Error	4	316,0	316,02	79,00		
Total	29	11340,4				

Unusual Observations for LB (MP)

Obs	StdOrder	LB (MP)	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
15	6	161,140	140,759	11,536	20,381	2,39 R

Estimated Regression Coefficients for LB (MP) using data in uncoded units

Term	Coef
Constant	-2407,10
Block	0,573636
ns	0,926452
fz	1413,29
fy	-28101,9
dx	6394,21
ns*ns	-1,45284E-04
fz*fz	-262,159
fy*fy	546165
dx*dx	9037,37
ns*fz	-0,103109
ns*fy	10,2211
ns*dx	-2,57076
fz*fy	-6564,84
fz*dx	-431,138
fy*dx	11339,8

Response Surface Regression: LB (MP) versus ns; fz; fy; dx

The analysis was done using coded units.

Estimated Regression Coefficients for LB (MP)

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	131,433	4,526	29,039	0,000
ns	11,497	3,269	3,517	0,003
fz	2,505	3,269	0,766	0,455
fy	-7,295	3,269	-2,231	0,041
dx	10,057	3,268	3,078	0,008
ns*ns	-5,610	8,613	-0,651	0,525
fz*fz	-10,285	8,613	-1,194	0,251
fy*fy	8,940	8,613	1,038	0,316
dx*dx	1,863	9,278	0,201	0,844
ns*fz	-4,124	3,466	-1,190	0,253
ns*fy	8,177	3,466	2,359	0,032
ns*dx	-6,941	3,453	-2,010	0,063
fz*fy	-5,252	3,466	-1,515	0,150
fz*dx	-1,164	3,453	-0,337	0,741
fy*dx	0,612	3,453	0,177	0,862

S = 13,8640 PRESS = 15759,7
R-Sq = 74,58% R-Sq(pred) = 0,00% R-Sq(adj) = 50,85%

Analysis of Variance for LB (MP)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	14	8457,2	8457,22	604,09	3,14	0,018
Linear	4	5289,5	5267,56	1316,89	6,85	0,002
ns	1	2462,9	2377,17	2377,17	12,37	0,003
fz	1	116,0	112,88	112,88	0,59	0,455
fy	1	962,6	957,06	957,06	4,98	0,041
dx	1	1748,1	1820,46	1820,46	9,47	0,008
Square	4	579,9	579,92	144,98	0,75	0,571
ns*ns	1	202,3	81,54	81,54	0,42	0,525
fz*fz	1	116,7	274,07	274,07	1,43	0,251
fy*fy	1	253,2	207,07	207,07	1,08	0,316
dx*dx	1	7,7	7,75	7,75	0,04	0,844

Interaction	6	2587,8	2587,76	431,29	2,24	0,096
ns*fz	1	272,2	272,17	272,17	1,42	0,253
ns*fy	1	1069,8	1069,78	1069,78	5,57	0,032
ns*dx	1	776,6	776,61	776,61	4,04	0,063
fz*fy	1	441,3	441,32	441,32	2,30	0,150
fz*dx	1	21,8	21,84	21,84	0,11	0,741
fy*dx	1	6,0	6,04	6,04	0,03	0,862
Residual Error	15	2883,2	2883,15	192,21		
Lack-of-Fit	10	2528,7	2528,72	252,87	3,57	0,087
Pure Error	5	354,4	354,43	70,89		
Total	29	11340,4				

Unusual Observations for LB (MP)

Obs	StdOrder	LB (MP)	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
15	6	161,140	140,698	11,149	20,442	2,48 R

Estimated Regression Coefficients for LB (MP) using data in uncoded units

Term	Coef
Constant	-2354,80
ns	0,903306
fz	1393,16
fy	-28454,1
dx	6267,52
ns*ns	-1,40252E-04
fz*fz	-257,127
fy*fy	558745
dx*dx	10221,3
ns*fz	-0,103109
ns*fy	10,2211
ns*dx	-2,57076
fz*fy	-6564,84
fz*dx	-431,138
fy*dx	11339,8

Response Surface Regression: LB (MP) versus ns; fz; fy; dx

The analysis was done using coded units.

Estimated Regression Coefficients for LB (MP)

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	131,433	4,387	29,960	0,000
ns	11,497	3,169	3,628	0,002
fz	2,505	3,169	0,791	0,441
fy	-7,313	3,167	-2,309	0,035
dx	10,057	3,167	3,175	0,006
ns*ns	-5,610	8,348	-0,672	0,511
fz*fz	-10,285	8,348	-1,232	0,236
fy*fy	8,940	8,348	1,071	0,300
dx*dx	1,863	8,993	0,207	0,839
ns*fz	-4,124	3,359	-1,228	0,237
ns*fy	8,177	3,359	2,434	0,027
ns*dx	-6,941	3,347	-2,074	0,055
fz*fy	-5,252	3,359	-1,563	0,138
fz*dx	-1,164	3,347	-0,348	0,733

S = 13,4378 PRESS = 12856,3
R-Sq = 74,52% R-Sq(pred) = 0,00% R-Sq(adj) = 53,82%

Analysis of Variance for LB (MP)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	13	8451,2	8451,18	650,09	3,60	0,009

Linear	4	5289,5	5273,09	1318,27	7,30	0,002
ns	1	2462,9	2377,17	2377,17	13,16	0,002
fz	1	116,0	112,88	112,88	0,63	0,441
fy	1	962,6	962,58	962,58	5,33	0,035
dx	1	1748,1	1820,46	1820,46	10,08	0,006
Square	4	579,9	579,92	144,98	0,80	0,541
ns*ns	1	202,3	81,54	81,54	0,45	0,511
fz*fz	1	116,7	274,07	274,07	1,52	0,236
fy*fy	1	253,2	207,07	207,07	1,15	0,300
dx*dx	1	7,7	7,75	7,75	0,04	0,839
Interaction	5	2581,7	2581,71	516,34	2,86	0,050
ns*fz	1	272,2	272,17	272,17	1,51	0,237
ns*fy	1	1069,8	1069,78	1069,78	5,92	0,027
ns*dx	1	776,6	776,61	776,61	4,30	0,055
fz*fy	1	441,3	441,32	441,32	2,44	0,138
fz*dx	1	21,8	21,84	21,84	0,12	0,733
Residual Error	16	2889,2	2889,20	180,57		
Lack-of-Fit	11	2534,8	2534,77	230,43	3,25	0,102
Pure Error	5	354,4	354,43	70,89		
Total	29	11340,4				

Unusual Observations for LB (MP)

Obs	StdOrder	LB (MP)	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
4	23	96,310	115,859	9,394	-19,549	-2,03 R
15	6	161,140	141,293	10,306	19,847	2,30 R

Estimated Regression Coefficients for LB (MP) using data in uncoded units

Term	Coef
Constant	-2363,24
ns	0,903306
fz	1393,16
fy	-27851,9
dx	6426,28
ns*ns	-1,40252E-04
fz*fz	-257,127
fy*fy	558745
dx*dx	10221,3
ns*fz	-0,103109
ns*fy	10,2211
ns*dx	-2,57076
fz*fy	-6564,84
fz*dx	-431,138

Response Surface Regression: LB (MP) versus ns; fz; fy; dx

The analysis was done using coded units.

Estimated Regression Coefficients for LB (MP)

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	131,692	4,085	32,241	0,000
ns	11,497	3,078	3,735	0,002
fz	2,505	3,078	0,814	0,427
fy	-7,313	3,077	-2,377	0,029
dx	10,121	3,062	3,305	0,004
ns*ns	-5,102	7,751	-0,658	0,519
fz*fz	-9,777	7,751	-1,261	0,224
fy*fy	9,448	7,751	1,219	0,240
ns*fz	-4,124	3,264	-1,264	0,223
ns*fy	8,177	3,264	2,506	0,023
ns*dx	-6,941	3,251	-2,135	0,048
fz*fy	-5,252	3,264	-1,609	0,126
fz*dx	-1,164	3,251	-0,358	0,725

S = 13,0541 PRESS = 11658,4
R-Sq = 74,45% R-Sq(pred) = 0,00% R-Sq(adj) = 56,42%

Analysis of Variance for LB (MP)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	12	8443,4	8443,43	703,62	4,13	0,004
Linear	4	5289,5	5314,25	1328,56	7,80	0,001
ns	1	2462,9	2377,17	2377,17	13,95	0,002
fz	1	116,0	112,88	112,88	0,66	0,427
fy	1	962,6	962,58	962,58	5,65	0,029
dx	1	1748,1	1861,62	1861,62	10,92	0,004
Square	3	572,2	572,18	190,73	1,12	0,369
ns*ns	1	202,3	73,81	73,81	0,43	0,519
fz*fz	1	116,7	271,08	271,08	1,59	0,224
fy*fy	1	253,2	253,19	253,19	1,49	0,240
Interaction	5	2581,7	2581,71	516,34	3,03	0,039
ns*fz	1	272,2	272,17	272,17	1,60	0,223
ns*fy	1	1069,8	1069,78	1069,78	6,28	0,023
ns*dx	1	776,6	776,61	776,61	4,56	0,048
fz*fy	1	441,3	441,32	441,32	2,59	0,126
fz*dx	1	21,8	21,84	21,84	0,13	0,725
Residual Error	17	2896,9	2896,95	170,41		
Lack-of-Fit	12	2542,5	2542,52	211,88	2,99	0,118
Pure Error	5	354,4	354,43	70,89		
Total	29	11340,4				

Unusual Observations for LB (MP)

Obs	StdOrder	LB (MP)	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
4	23	96,310	116,484	8,641	-20,174	-2,06 R
15	6	161,140	141,151	9,989	19,989	2,38 R

Estimated Regression Coefficients for LB (MP) using data in uncoded units

Term	Coef
Constant	-2268,17
ns	0,844831
fz	1342,31
fy	-28741,7
dx	7524,72
ns*ns	-1,27540E-04
fz*fz	-244,415
fy*fy	590524
ns*fz	-0,103109
ns*fy	10,2211
ns*dx	-2,57076
fz*fy	-6564,84
fz*dx	-431,138

Response Surface Regression: LB (MP) versus ns; fz; fy; dx

The analysis was done using coded units.

Estimated Regression Coefficients for LB (MP)

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	131,692	3,985	33,051	0,000
ns	11,497	3,003	3,829	0,001
fz	2,539	3,001	0,846	0,409
fy	-7,313	3,001	-2,436	0,025
dx	10,121	2,987	3,388	0,003
ns*ns	-5,102	7,561	-0,675	0,508
fz*fz	-9,777	7,561	-1,293	0,212

fy*fy	9,448	7,561	1,250	0,227
ns*fz	-4,124	3,184	-1,296	0,212
ns*fy	8,177	3,184	2,569	0,019
ns*dx	-6,941	3,172	-2,188	0,042
fz*fy	-5,252	3,184	-1,650	0,116

S = 12,7340 PRESS = 9868,75
R-Sq = 74,26% R-Sq(pred) = 12,98% R-Sq(adj) = 58,53%

Analysis of Variance for LB (MP)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	11	8421,6	8421,58	765,60	4,72	0,002
Linear	4	5289,5	5317,40	1329,35	8,20	0,001
ns	1	2462,9	2377,17	2377,17	14,66	0,001
fz	1	116,0	116,03	116,03	0,72	0,409
fy	1	962,6	962,58	962,58	5,94	0,025
dx	1	1748,1	1861,62	1861,62	11,48	0,003
Square	3	572,2	572,18	190,73	1,18	0,346
ns*ns	1	202,3	73,81	73,81	0,46	0,508
fz*fz	1	116,7	271,08	271,08	1,67	0,212
fy*fy	1	253,2	253,19	253,19	1,56	0,227
Interaction	4	2559,9	2559,87	639,97	3,95	0,018
ns*fz	1	272,2	272,17	272,17	1,68	0,212
ns*fy	1	1069,8	1069,78	1069,78	6,60	0,019
ns*dx	1	776,6	776,61	776,61	4,79	0,042
fz*fy	1	441,3	441,32	441,32	2,72	0,116
Residual Error	18	2918,8	2918,79	162,15		
Lack-of-Fit	13	2564,4	2564,36	197,26	2,78	0,133
Pure Error	5	354,4	354,43	70,89		
Total	29	11340,4				

Unusual Observations for LB (MP)

Obs	StdOrder	LB (MP)	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
4	23	96,310	116,753	8,397	-20,443	-2,14 R
15	6	161,140	142,281	9,244	18,859	2,15 R

Estimated Regression Coefficients for LB (MP) using data in uncoded units

Term	Coef
Constant	-2222,37
ns	0,844831
fz	1319,42
fy	-28741,7
dx	6662,44
ns*ns	-1,27540E-04
fz*fz	-244,415
fy*fy	590524
ns*fz	-0,103109
ns*fy	10,2211
ns*dx	-2,57076
fz*fy	-6564,84

Response Surface Regression: LB (MP) versus ns; fz; fy; dx

The analysis was done using coded units.

Estimated Regression Coefficients for LB (MP)

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	131,184	3,856	34,019	0,000
ns	11,497	2,959	3,885	0,001
fz	2,539	2,958	0,858	0,401
fy	-7,313	2,958	-2,472	0,023

dx	10,060	2,943	3,419	0,003
fz*fz	-11,909	6,770	-1,759	0,095
fy*fy	7,316	6,770	1,081	0,293
ns*fz	-4,124	3,138	-1,315	0,204
ns*fy	8,177	3,138	2,606	0,017
ns*dx	-6,941	3,126	-2,221	0,039
fz*fy	-5,252	3,138	-1,674	0,111

S = 12,5501 PRESS = 8583,84
R-Sq = 73,61% R-Sq(pred) = 24,31% R-Sq(adj) = 59,72%

Analysis of Variance for LB (MP)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	10	8347,8	8347,8	834,78	5,30	0,001
Linear	4	5289,5	5296,7	1324,18	8,41	0,000
ns	1	2462,9	2377,2	2377,17	15,09	0,001
fz	1	116,0	116,0	116,03	0,74	0,401
fy	1	962,6	962,6	962,58	6,11	0,023
dx	1	1748,1	1840,9	1840,94	11,69	0,003
Square	2	498,4	498,4	249,18	1,58	0,231
fz*fz	1	314,4	487,4	487,45	3,09	0,095
fy*fy	1	183,9	183,9	183,93	1,17	0,293
Interaction	4	2559,9	2559,9	639,97	4,06	0,015
ns*fy	1	272,2	272,2	272,17	1,73	0,204
ns*fy	1	1069,8	1069,8	1069,78	6,79	0,017
ns*dx	1	776,6	776,6	776,61	4,93	0,039
fz*fy	1	441,3	441,3	441,32	2,80	0,111
Residual Error	19	2992,6	2992,6	157,51		
Lack-of-Fit	14	2638,2	2638,2	188,44	2,66	0,143
Pure Error	5	354,4	354,4	70,89		
Total	29	11340,4				

Unusual Observations for LB (MP)

Obs	StdOrder	LB (MP)	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
15	6	161,140	142,670	9,093	18,470	2,14 R

Estimated Regression Coefficients for LB (MP) using data in uncoded units

Term	Coef
Constant	-1787,35
ns	0,258145
fz	1532,69
fy	-25009,4
dx	6657,93
fz*fz	-297,734
fy*fy	457227
ns*fz	-0,103109
ns*fy	10,2211
ns*dx	-2,57076
fz*fy	-6564,84

Response Surface Regression: LB (MP) versus ns; fz; fy; dx

The analysis was done using coded units.

Estimated Regression Coefficients for LB (MP)

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	132,436	3,694	35,856	0,000
ns	11,497	2,972	3,869	0,001
fz	2,539	2,970	0,855	0,403
fy	-7,313	2,970	-2,462	0,023
dx	10,210	2,952	3,459	0,002

fz*fz	-6,654	4,729	-1,407	0,175
ns*fz	-4,124	3,151	-1,309	0,205
ns*fy	8,177	3,151	2,595	0,017
ns*dx	-6,941	3,139	-2,211	0,039
fz*fy	-5,252	3,151	-1,667	0,111

S = 12,6026 PRESS = 8089,62
R-Sq = 71,99% R-Sq(pred) = 28,67% R-Sq(adj) = 59,38%

Analysis of Variance for LB (MP)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	9	8163,8	8163,8	907,09	5,71	0,001
Linear	4	5289,5	5356,4	1339,09	8,43	0,000
ns	1	2462,9	2377,2	2377,17	14,97	0,001
fz	1	116,0	116,0	116,03	0,73	0,403
fy	1	962,6	962,6	962,58	6,06	0,023
dx	1	1748,1	1900,6	1900,59	11,97	0,002
Square	1	314,4	314,4	314,43	1,98	0,175
fz*fz	1	314,4	314,4	314,43	1,98	0,175
Interaction	4	2559,9	2559,9	639,97	4,03	0,015
ns*fz	1	272,2	272,2	272,17	1,71	0,205
ns*fy	1	1069,8	1069,8	1069,78	6,74	0,017
ns*dx	1	776,6	776,6	776,61	4,89	0,039
fz*fy	1	441,3	441,3	441,32	2,78	0,111
Residual Error	20	3176,5	3176,5	158,83		
Lack-of-Fit	15	2822,1	2822,1	188,14	2,65	0,143
Pure Error	5	354,4	354,4	70,89		
Total	29	11340,4				

Unusual Observations for LB (MP)

Obs	StdOrder	LB (MP)	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
4	23	96,310	120,596	4,256	-24,286	-2,05 R
15	6	161,140	141,712	9,088	19,428	2,23 R

Estimated Regression Coefficients for LB (MP) using data in uncoded units

Term	Coef
Constant	-1350,77
ns	0,258145
fz	1007,15
fy	-12207,0
dx	6669,06
fz*fz	-166,350
ns*fz	-0,103109
ns*fy	10,2211
ns*dx	-2,57076
fz*fy	-6564,84

Response Surface Regression: LB (MP) versus ns; fz; fy; dx

The analysis was done using coded units.

Estimated Regression Coefficients for LB (MP)

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	132,436	3,756	35,262	0,000
ns	11,497	3,022	3,805	0,001
fz	2,539	3,021	0,841	0,410
fy	-7,313	3,021	-2,421	0,025
dx	10,210	3,001	3,402	0,003
fz*fz	-6,654	4,809	-1,384	0,181
ns*fy	8,177	3,204	2,552	0,019
ns*dx	-6,941	3,192	-2,175	0,041

fz*fy -5,252 3,204 -1,639 0,116

S = 12,8150 PRESS = 7804,92
R-Sq = 69,59% R-Sq(pred) = 31,18% R-Sq(adj) = 58,00%

Analysis of Variance for LB (MP)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	8	7891,7	7891,7	986,46	6,01	0,000
Linear	4	5289,5	5356,4	1339,09	8,15	0,000
ns	1	2462,9	2377,2	2377,17	14,48	0,001
fz	1	116,0	116,0	116,03	0,71	0,410
fy	1	962,6	962,6	962,58	5,86	0,025
dx	1	1748,1	1900,6	1900,59	11,57	0,003
Square	1	314,4	314,4	314,43	1,91	0,181
fz*fz	1	314,4	314,4	314,43	1,91	0,181
Interaction	3	2287,7	2287,7	762,57	4,64	0,012
ns*fy	1	1069,8	1069,8	1069,78	6,51	0,019
ns*dx	1	776,6	776,6	776,61	4,73	0,041
fz*fy	1	441,3	441,3	441,32	2,69	0,116
Residual Error	21	3448,7	3448,7	164,22		
Lack-of-Fit	16	3094,3	3094,3	193,39	2,73	0,136
Pure Error	5	354,4	354,4	70,89		
Total	29	11340,4				

Unusual Observations for LB (MP)

Obs	StdOrder	LB (MP)	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
4	23	96,310	120,596	4,327	-24,286	-2,01 R
15	6	161,140	137,587	8,668	23,553	2,50 R

Estimated Regression Coefficients for LB (MP) using data in uncoded units

Term	Coef
Constant	-876,468
ns	0,0519267
fz	770,003
fy	-12207,0
dx	6669,06
fz*fz	-166,350
ns*fy	10,2211
ns*dx	-2,57076
fz*fy	-6564,84

Response Surface Regression: LB (MP) versus ns; fz; fy; dx

The analysis was done using coded units.

Estimated Regression Coefficients for LB (MP)

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	128,393	2,409	53,307	0,000
ns	11,497	3,084	3,728	0,001
fz	2,539	3,083	0,824	0,419
fy	-7,313	3,083	-2,372	0,027
dx	9,725	3,042	3,197	0,004
ns*fy	8,177	3,270	2,501	0,020
ns*dx	-6,941	3,258	-2,131	0,045
fz*fy	-5,252	3,270	-1,606	0,122

S = 13,0787 PRESS = 7598,12
R-Sq = 66,82% R-Sq(pred) = 33,00% R-Sq(adj) = 56,26%

Analysis of Variance for LB (MP)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	7	7577,2	7577,2	1082,46	6,33	0,000
Linear	4	5289,5	5203,9	1300,96	7,61	0,001
ns	1	2462,9	2377,2	2377,17	13,90	0,001
fz	1	116,0	116,0	116,03	0,68	0,419
fy	1	962,6	962,6	962,58	5,63	0,027
dx	1	1748,1	1748,1	1748,08	10,22	0,004
Interaction	3	2287,7	2287,7	762,57	4,46	0,014
ns*fy	1	1069,8	1069,8	1069,78	6,25	0,020
ns*dx	1	776,6	776,6	776,61	4,54	0,045
fz*fy	1	441,3	441,3	441,32	2,58	0,122
Residual Error	22	3763,1	3763,1	171,05		
Lack-of-Fit	17	3408,7	3408,7	200,51	2,83	0,127
Pure Error	5	354,4	354,4	70,89		
Total	29	11340,4				

Unusual Observations for LB (MP)

Obs	StdOrder	LB (MP)	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
4	23	96,310	123,333	3,928	-27,023	-2,17 R
15	6	161,140	140,684	8,546	20,456	2,07 R

Estimated Regression Coefficients for LB (MP) using data in uncoded units

Term	Coef
Constant	-213,187
ns	0,0519267
fz	104,602
fy	-12207,0
dx	6633,11
ns*fy	10,2211
ns*dx	-2,57076
fz*fy	-6564,84

Response Surface Regression: LB (MP) versus ns; fz; fy; dx

The analysis was done using coded units.

Estimated Regression Coefficients for LB (MP)

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	128,393	2,490	51,565	0,000
ns	11,497	3,188	3,606	0,001
fz	2,539	3,187	0,797	0,434
fy	-7,313	3,187	-2,295	0,031
dx	9,725	3,145	3,092	0,005
ns*fy	8,177	3,380	2,419	0,024
ns*dx	-6,941	3,368	-2,061	0,051

S = 13,5204 PRESS = 7723,52
R-Sq = 62,92% R-Sq(pred) = 31,89% R-Sq(adj) = 53,25%

Analysis of Variance for LB (MP)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	6	7135,9	7135,9	1189,32	6,51	0,000
Linear	4	5289,5	5203,9	1300,96	7,12	0,001
ns	1	2462,9	2377,2	2377,17	13,00	0,001
fz	1	116,0	116,0	116,03	0,63	0,434
fy	1	962,6	962,6	962,58	5,27	0,031
dx	1	1748,1	1748,1	1748,08	9,56	0,005
Interaction	2	1846,4	1846,4	923,19	5,05	0,015
ns*fy	1	1069,8	1069,8	1069,78	5,85	0,024
ns*dx	1	776,6	776,6	776,61	4,25	0,051
Residual Error	23	4204,4	4204,4	182,80		

Lack-of-Fit	18	3850,0	3850,0	213,89	3,02	0,113
Pure Error	5	354,4	354,4	70,89		
Total	29	11340,4				

Unusual Observations for LB (MP)

Obs	StdOrder	LB (MP)	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
4	23	96,310	123,333	4,061	-27,023	-2,10 R
15	6	161,140	135,432	8,163	25,708	2,39 R

Estimated Regression Coefficients for LB (MP) using data in uncoded units

Term	Coef
Constant	-29,3717
ns	0,0519267
fz	12,6944
fy	-25336,7
dx	6633,11
ns*fy	10,2211
ns*dx	-2,57076

Response Surface Regression: LB (MP) versus ns; fy; dx

The analysis was done using coded units.

Estimated Regression Coefficients for LB (MP)

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	128,393	2,471	51,962	0,000
ns	11,497	3,164	3,634	0,001
fy	-7,313	3,162	-2,312	0,030
dx	9,725	3,121	3,116	0,005
ns*fy	8,177	3,354	2,438	0,023
ns*dx	-6,941	3,342	-2,077	0,049

S = 13,4171 PRESS = 6844,18
R-Sq = 61,90% R-Sq(pred) = 39,65% R-Sq(adj) = 53,96%

Analysis of Variance for LB (MP)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	5	7019,9	7019,9	1404,0	7,80	0,000
Linear	3	5173,5	5087,8	1695,9	9,42	0,000
ns	1	2462,9	2377,2	2377,2	13,21	0,001
fy	1	962,6	962,6	962,6	5,35	0,030
dx	1	1748,1	1748,1	1748,1	9,71	0,005
Interaction	2	1846,4	1846,4	923,2	5,13	0,014
ns*fy	1	1069,8	1069,8	1069,8	5,94	0,023
ns*dx	1	776,6	776,6	776,6	4,31	0,049
Residual Error	24	4320,5	4320,5	180,0		
Lack-of-Fit	9	1804,4	1804,4	200,5	1,20	0,365
Pure Error	15	2516,1	2516,1	167,7		
Total	29	11340,4				

Obs	StdOrder	LB (MP)	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
1	30	133,910	125,872	2,497	8,038	0,61
2	26	130,690	118,559	4,030	12,131	0,95
3	29	135,010	125,872	2,497	9,138	0,69
4	23	96,310	125,872	2,497	-29,562	-2,24 R
5	28	151,490	138,118	4,227	13,372	1,05
6	27	111,240	118,668	3,718	-7,428	-0,58
7	24	137,160	125,872	2,497	11,288	0,86
8	25	141,230	133,185	4,030	8,045	0,63
9	21	122,410	112,575	4,103	9,835	0,77
10	22	120,410	139,169	4,103	-18,759	-1,47

11	8	129,470	137,971	7,457	-8,501	-0,76
12	14	140,760	143,538	7,806	-2,778	-0,25
13	15	121,730	118,072	7,806	3,658	0,34
14	18	121,330	125,872	2,497	-4,542	-0,34
15	6	161,140	137,971	7,457	23,169	2,08 R
16	16	130,530	143,538	7,806	-13,008	-1,19
17	5	72,990	84,740	7,457	-11,750	-1,05
18	3	129,930	115,720	7,457	14,210	1,27
19	11	144,710	149,051	7,806	-4,341	-0,40
20	19	129,630	125,872	2,497	3,758	0,29
21	20	143,400	125,872	2,497	17,528	1,33
22	9	130,600	149,051	7,806	-18,451	-1,69
23	13	120,960	118,072	7,806	2,888	0,26
24	10	150,360	141,810	7,806	8,550	0,78
25	2	122,490	136,243	7,457	-13,753	-1,23
26	1	110,930	115,720	7,457	-4,790	-0,43
27	12	143,390	141,810	7,806	1,580	0,14
28	7	74,530	84,740	7,457	-10,210	-0,92
29	17	122,010	125,872	2,497	-3,862	-0,29
30	4	140,790	136,243	7,457	4,547	0,41
				mean	-8,68441E-17	

Estimated Regression Coefficients for LB (MP) using data in uncoded units

Term	Coef
Constant	-3,98283
ns	0,0519267
fy	-25336,7
dx	6633,11
ns*fy	10,2211
ns*dx	-2,57076

Predicted Response for New Design Points Using Model for LB (MP)

Point	Fit	SE Fit	95% CI	95% PI
1	125,872	2,49726	(120,718; 131,026)	(97,705; 154,039)
2	118,559	4,02957	(110,243; 126,876)	(89,646; 147,473)
3	125,872	2,49726	(120,718; 131,026)	(97,705; 154,039)
4	125,872	2,49726	(120,718; 131,026)	(97,705; 154,039)
5	138,118	4,22666	(129,395; 146,841)	(109,085; 167,151)
6	118,668	3,71815	(110,994; 126,342)	(89,933; 147,404)
7	125,872	2,49726	(120,718; 131,026)	(97,705; 154,039)
8	133,185	4,02957	(124,868; 141,501)	(104,271; 162,098)
9	112,575	4,10250	(104,108; 121,042)	(83,618; 141,532)
10	139,169	4,10250	(130,702; 147,636)	(110,212; 168,126)
11	137,971	7,45733	(122,580; 153,362)	(106,289; 169,652)
12	143,538	7,80632	(127,427; 159,650)	(111,501; 175,576)
13	118,072	7,80632	(101,961; 134,184)	(86,035; 150,110)
14	125,872	2,49726	(120,718; 131,026)	(97,705; 154,039)
15	137,971	7,45733	(122,580; 153,362)	(106,289; 169,652)
16	143,538	7,80632	(127,427; 159,650)	(111,501; 175,576)
17	84,740	7,45733	(69,349; 100,132)	(53,059; 116,422)
18	115,720	7,45733	(100,328; 131,111)	(84,038; 147,401)
19	149,051	7,80632	(132,940; 165,163)	(117,014; 181,089)
20	125,872	2,49726	(120,718; 131,026)	(97,705; 154,039)
21	125,872	2,49726	(120,718; 131,026)	(97,705; 154,039)
22	149,051	7,80632	(132,940; 165,163)	(117,014; 181,089)
23	118,072	7,80632	(101,961; 134,184)	(86,035; 150,110)
24	141,810	7,80632	(125,699; 157,922)	(109,773; 173,848)
25	136,243	7,45733	(120,851; 151,634)	(104,561; 167,924)
26	115,720	7,45733	(100,328; 131,111)	(84,038; 147,401)
27	141,810	7,80632	(125,699; 157,922)	(109,773; 173,848)
28	84,740	7,45733	(69,349; 100,132)	(53,059; 116,422)
29	125,872	2,49726	(120,718; 131,026)	(97,705; 154,039)
30	136,243	7,45733	(120,851; 151,634)	(104,561; 167,924)

29.3.2013 10:18:42

Response Surface Regression: PB (MP) versus Block; ns; fz; fy; dx

The analysis was done using coded units.

Estimated Regression Coefficients for PB (MP)

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	134,479	4,948	27,180	0,000
Block	0,634	3,561	0,178	0,861
ns	7,347	3,299	2,227	0,043
fz	3,150	3,299	0,955	0,356
fy	-3,719	3,299	-1,127	0,279
dx	7,031	3,298	2,132	0,051
ns*ns	-19,588	8,782	-2,231	0,043
fz*fz	-1,298	8,782	-0,148	0,885
fy*fy	11,072	8,782	1,261	0,228
dx*dx	2,905	9,459	0,307	0,763
ns*fz	-3,211	3,498	-0,918	0,374
ns*fy	7,054	3,498	2,017	0,063
ns*dx	-3,708	3,485	-1,064	0,305
fz*fy	-2,765	3,498	-0,790	0,442
fz*dx	-2,388	3,485	-0,685	0,504
fy*dx	1,731	3,485	0,497	0,627

S = 13,9913 PRESS = 15556,1
R-Sq = 64,30% R-Sq(pred) = 0,00% R-Sq(adj) = 26,05%

Analysis of Variance for PB (MP)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Blocks	1	24,09	6,20	6,201	0,03	0,861
Regression	14	4912,34	4912,34	350,881	1,79	0,143
Linear	4	2295,94	2287,62	571,906	2,92	0,060
ns	1	999,94	970,59	970,587	4,96	0,043
fz	1	186,50	178,45	178,450	0,91	0,356
fy	1	255,68	248,73	248,729	1,27	0,279
dx	1	853,81	889,86	889,857	4,55	0,051
Square	4	1171,13	1171,13	292,782	1,50	0,257
ns*ns	1	727,54	973,95	973,955	4,98	0,043
fz*fz	1	44,66	4,28	4,275	0,02	0,885
fy*fy	1	380,47	311,20	311,203	1,59	0,228
dx*dx	1	18,46	18,46	18,459	0,09	0,763
Interaction	6	1445,27	1445,27	240,879	1,23	0,348
ns*fz	1	164,99	164,99	164,994	0,84	0,374
ns*fy	1	796,09	796,09	796,086	4,07	0,063
ns*dx	1	221,60	221,60	221,602	1,13	0,305
fz*fy	1	122,32	122,32	122,324	0,62	0,442
fz*dx	1	91,95	91,95	91,946	0,47	0,504
fy*dx	1	48,32	48,32	48,320	0,25	0,627
Residual Error	14	2740,61	2740,61	195,758		
Lack-of-Fit	10	2514,90	2514,90	251,490	4,46	0,081
Pure Error	4	225,71	225,71	56,427		
Total	29	7677,04				

Unusual Observations for PB (MP)

Obs	StdOrder	PB (MP)	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
9	21	82,640	104,322	10,230	-21,682	-2,27 R

Estimated Regression Coefficients for PB (MP) using data in uncoded units

Term	Coef
Constant	-2957,12

Block	0,633773
ns	2,39991
fz	425,881
fy	-35388,6
dx	3294,21
ns*ns	-4,89693E-04
fz*fz	-32,4432
fy*fy	692017
dx*dx	15937,6
ns*fz	-0,0802813
ns*fy	8,81719
ns*dx	-1,37324
fz*fy	-3456,25
fz*dx	-884,559
fy*dx	32062,3

Response Surface Regression: PB (MP) versus ns; fz; fy; dx

The analysis was done using coded units.

Estimated Regression Coefficients for PB (MP)

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	134,140	4,418	30,364	0,000
ns	7,347	3,191	2,302	0,036
fz	3,150	3,191	0,987	0,339
fy	-3,719	3,191	-1,165	0,262
dx	7,031	3,190	2,204	0,044
ns*ns	-19,365	8,407	-2,303	0,036
fz*fz	-1,075	8,407	-0,128	0,900
fy*fy	11,295	8,407	1,343	0,199
dx*dx	3,143	9,056	0,347	0,733
ns*fz	-3,211	3,383	-0,949	0,358
ns*fy	7,054	3,383	2,085	0,055
ns*dx	-3,708	3,370	-1,100	0,289
fz*fy	-2,765	3,383	-0,817	0,427
fz*dx	-2,388	3,370	-0,709	0,489
fy*dx	1,731	3,370	0,514	0,615

S = 13,5322 PRESS = 14342,4
R-Sq = 64,22% R-Sq(pred) = 0,00% R-Sq(adj) = 30,83%

Analysis of Variance for PB (MP)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	14	4930,23	4930,23	352,159	1,92	0,111
Linear	4	2262,02	2287,62	571,906	3,12	0,047
ns	1	999,94	970,59	970,587	5,30	0,036
fz	1	186,50	178,45	178,450	0,97	0,339
fy	1	255,68	248,73	248,729	1,36	0,262
dx	1	819,89	889,86	889,857	4,86	0,044
Square	4	1222,94	1222,94	305,735	1,67	0,209
ns*ns	1	700,76	971,63	971,634	5,31	0,036
fz*fz	1	81,27	3,00	2,996	0,02	0,900
fy*fy	1	418,85	330,52	330,520	1,80	0,199
dx*dx	1	22,06	22,06	22,056	0,12	0,733
Interaction	6	1445,27	1445,27	240,879	1,32	0,310
ns*fz	1	164,99	164,99	164,994	0,90	0,358
ns*fy	1	796,09	796,09	796,086	4,35	0,055
ns*dx	1	221,60	221,60	221,602	1,21	0,289
fz*fy	1	122,32	122,32	122,324	0,67	0,427
fz*dx	1	91,95	91,95	91,946	0,50	0,489
fy*dx	1	48,32	48,32	48,320	0,26	0,615
Residual Error	15	2746,81	2746,81	183,120		
Lack-of-Fit	10	2458,08	2458,08	245,808	4,26	0,062

Pure Error	5	288,73	288,73	57,745
Total	29	7677,04		

Unusual Observations for PB (MP)

Obs	StdOrder	PB (MP)	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
9	21	82,640	104,855	9,460	-22,215	-2,30 R

Estimated Regression Coefficients for PB (MP) using data in uncoded units

Term	Coef
Constant	-2899,34
ns	2,37434
fz	403,644
fy	-35777,8
dx	3154,24
ns*ns	-4,84134E-04
fz*fz	-26,8838
fy*fy	705916
dx*dx	17245,7
ns*fz	-0,0802812
ns*fy	8,81719
ns*dx	-1,37324
fz*fy	-3456,25
fz*dx	-884,559
fy*dx	32062,3

Response Surface Regression: PB (MP) versus ns; fz; fy; dx

The analysis was done using coded units.

Estimated Regression Coefficients for PB (MP)

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	134,090	4,263	31,456	0,000
ns	7,347	3,091	2,376	0,030
fz	3,150	3,091	1,019	0,323
fy	-3,719	3,091	-1,203	0,246
dx	7,031	3,090	2,275	0,037
ns*ns	-19,683	7,781	-2,530	0,022
fy*fy	10,977	7,781	1,411	0,177
dx*dx	2,802	8,386	0,334	0,743
ns*fz	-3,211	3,277	-0,980	0,342
ns*fy	7,054	3,277	2,152	0,047
ns*dx	-3,708	3,265	-1,136	0,273
fz*fy	-2,765	3,277	-0,844	0,411
fz*dx	-2,388	3,265	-0,731	0,475
fy*dx	1,731	3,265	0,530	0,603

S = 13,1096 PRESS = 12743,4
R-Sq = 64,18% R-Sq(pred) = 0,00% R-Sq(adj) = 35,08%

Analysis of Variance for PB (MP)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	13	4927,23	4927,23	379,02	2,21	0,068
Linear	4	2262,02	2287,62	571,91	3,33	0,037
ns	1	999,94	970,59	970,59	5,65	0,030
fz	1	186,50	178,45	178,45	1,04	0,323
fy	1	255,68	248,73	248,73	1,45	0,246
dx	1	819,89	889,86	889,86	5,18	0,037
Square	3	1219,94	1219,94	406,65	2,37	0,109
ns*ns	1	700,76	1099,78	1099,78	6,40	0,022
fy*fy	1	499,99	342,04	342,04	1,99	0,177
dx*dx	1	19,19	19,19	19,19	0,11	0,743

Interaction	6	1445,27	1445,27	240,88	1,40	0,274
ns*fz	1	164,99	164,99	164,99	0,96	0,342
ns*fy	1	796,09	796,09	796,09	4,63	0,047
ns*dx	1	221,60	221,60	221,60	1,29	0,273
fz*fy	1	122,32	122,32	122,32	0,71	0,411
fz*dx	1	91,95	91,95	91,95	0,53	0,475
fy*dx	1	48,32	48,32	48,32	0,28	0,603
Residual Error	16	2749,80	2749,80	171,86		
Lack-of-Fit	11	2461,08	2461,08	223,73	3,87	0,073
Pure Error	5	288,73	288,73	57,75		
Total	29	7677,04				

Unusual Observations for PB (MP)

Obs	StdOrder	PB (MP)	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
9	21	82,640	104,464	8,673	-21,824	-2,22 R

Estimated Regression Coefficients for PB (MP) using data in uncoded units

Term	Coef
Constant	-2843,12
ns	2,41088
fz	296,109
fy	-35221,7
dx	3354,21
ns*ns	-4,92077E-04
fy*fy	686058
dx*dx	15376,8
ns*fz	-0,0802812
ns*fy	8,81719
ns*dx	-1,37324
fz*fy	-3456,25
fz*dx	-884,559
fy*dx	32062,3

Response Surface Regression: PB (MP) versus ns; fz; fy; dx

The analysis was done using coded units.

Estimated Regression Coefficients for PB (MP)

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	134,556	3,921	34,312	0,000
ns	7,347	3,010	2,441	0,026
fz	3,150	3,010	1,047	0,310
fy	-3,719	3,010	-1,236	0,233
dx	7,137	2,992	2,385	0,029
ns*ns	-18,598	6,884	-2,702	0,015
fy*fy	12,062	6,884	1,752	0,098
ns*fz	-3,211	3,191	-1,006	0,328
ns*fy	7,054	3,191	2,211	0,041
ns*dx	-3,708	3,179	-1,166	0,260
fz*fy	-2,765	3,191	-0,867	0,398
fz*dx	-2,388	3,179	-0,751	0,463
fy*dx	1,731	3,179	0,545	0,593

S = 12,7625 PRESS = 11600,8
R-Sq = 63,93% R-Sq(pred) = 0,00% R-Sq(adj) = 38,47%

Analysis of Variance for PB (MP)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	12	4908,04	4908,04	409,00	2,51	0,041
Linear	4	2262,02	2324,31	581,08	3,57	0,027
ns	1	999,94	970,59	970,59	5,96	0,026

fz	1	186,50	178,45	178,45	1,10	0,310
fy	1	255,68	248,73	248,73	1,53	0,233
dx	1	819,89	926,55	926,55	5,69	0,029
Square	2	1200,75	1200,75	600,38	3,69	0,047
ns*ns	1	700,76	1188,77	1188,77	7,30	0,015
fy*fy	1	499,99	499,99	499,99	3,07	0,098
Interaction	6	1445,27	1445,27	240,88	1,48	0,244
ns*fz	1	164,99	164,99	164,99	1,01	0,328
ns*fy	1	796,09	796,09	796,09	4,89	0,041
ns*dx	1	221,60	221,60	221,60	1,36	0,260
fz*fy	1	122,32	122,32	122,32	0,75	0,398
fz*dx	1	91,95	91,95	91,95	0,56	0,463
fy*dx	1	48,32	48,32	48,32	0,30	0,593
Residual Error	17	2769,00	2769,00	162,88		
Lack-of-Fit	12	2480,27	2480,27	206,69	3,58	0,084
Pure Error	5	288,73	288,73	57,75		
Total	29	7677,04				

Unusual Observations for PB (MP)

Obs	StdOrder	PB (MP)	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
9	21	82,640	105,799	7,494	-23,159	-2,24 R

Estimated Regression Coefficients for PB (MP) using data in uncoded units

Term	Coef
Constant	-2730,34
ns	2,28613
fz	296,109
fy	-37120,0
dx	5007,36
ns*ns	-4,64959E-04
fy*fy	753853
ns*fz	-0,0802812
ns*fy	8,81719
ns*dx	-1,37324
fz*fy	-3456,25
fz*dx	-884,559
fy*dx	32062,3

Response Surface Regression: PB (MP) versus ns; fz; fy; dx

The analysis was done using coded units.

Estimated Regression Coefficients for PB (MP)

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	134,556	3,844	35,003	0,000
ns	7,347	2,950	2,490	0,023
fz	3,150	2,950	1,068	0,300
fy	-3,769	2,949	-1,278	0,217
dx	7,137	2,933	2,433	0,026
ns*ns	-18,598	6,749	-2,756	0,013
fy*fy	12,062	6,749	1,787	0,091
ns*fz	-3,211	3,128	-1,027	0,318
ns*fy	7,054	3,128	2,255	0,037
ns*dx	-3,708	3,116	-1,190	0,250
fz*fy	-2,765	3,128	-0,884	0,388
fz*dx	-2,388	3,116	-0,766	0,453

S = 12,5107 PRESS = 9511,85
R-Sq = 63,30% R-Sq(pred) = 0,00% R-Sq(adj) = 40,88%

Analysis of Variance for PB (MP)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	11	4859,72	4859,72	441,79	2,82	0,025
Linear	4	2262,02	2331,26	582,82	3,72	0,022
ns	1	999,94	970,59	970,59	6,20	0,023
fz	1	186,50	178,45	178,45	1,14	0,300
fy	1	255,68	255,68	255,68	1,63	0,217
dx	1	819,89	926,55	926,55	5,92	0,026
Square	2	1200,75	1200,75	600,38	3,84	0,041
ns*ns	1	700,76	1188,77	1188,77	7,60	0,013
fy*fy	1	499,99	499,99	499,99	3,19	0,091
Interaction	5	1396,95	1396,95	279,39	1,79	0,167
ns*fz	1	164,99	164,99	164,99	1,05	0,318
ns*fy	1	796,09	796,09	796,09	5,09	0,037
ns*dx	1	221,60	221,60	221,60	1,42	0,250
fz*fy	1	122,32	122,32	122,32	0,78	0,388
fz*dx	1	91,95	91,95	91,95	0,59	0,453
Residual Error	18	2817,32	2817,32	156,52		
Lack-of-Fit	13	2528,59	2528,59	194,51	3,37	0,094
Pure Error	5	288,73	288,73	57,75		
Total	29	7677,04				

Unusual Observations for PB (MP)

Obs	StdOrder	PB (MP)	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
9	21	82,640	105,799	7,346	-23,159	-2,29 R

Estimated Regression Coefficients for PB (MP) using data in uncoded units

Term	Coef
Constant	-2754,18
ns	2,28613
fz	296,109
fy	-35417,1
dx	5456,24
ns*ns	-4,64959E-04
fy*fy	753853
ns*fz	-0,0802812
ns*fy	8,81719
ns*dx	-1,37324
fz*fy	-3456,25
fz*dx	-884,559

Response Surface Regression: PB (MP) versus ns; fz; fy; dx

The analysis was done using coded units.

Estimated Regression Coefficients for PB (MP)

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	134,556	3,802	35,389	0,000
ns	7,347	2,918	2,518	0,021
fz	3,219	2,917	1,104	0,284
fy	-3,769	2,917	-1,292	0,212
dx	7,137	2,901	2,460	0,024
ns*ns	-18,598	6,675	-2,786	0,012
fy*fy	12,062	6,675	1,807	0,087
ns*fz	-3,211	3,094	-1,038	0,312
ns*fy	7,054	3,094	2,280	0,034
ns*dx	-3,708	3,082	-1,203	0,244
fz*fy	-2,765	3,094	-0,894	0,383

S = 12,3741 PRESS = 8284,37

R-Sq = 62,10% R-Sq(pred) = 0,00% R-Sq(adj) = 42,16%

Analysis of Variance for PB (MP)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	10	4767,8	4767,8	476,78	3,11	0,016
Linear	4	2262,0	2339,3	584,83	3,82	0,019
ns	1	999,9	970,6	970,59	6,34	0,021
fz	1	186,5	186,5	186,50	1,22	0,284
fy	1	255,7	255,7	255,68	1,67	0,212
dx	1	819,9	926,5	926,55	6,05	0,024
Square	2	1200,8	1200,8	600,38	3,92	0,038
ns*ns	1	700,8	1188,8	1188,77	7,76	0,012
fy*fy	1	500,0	500,0	499,99	3,27	0,087
Interaction	4	1305,0	1305,0	326,25	2,13	0,117
ns*fz	1	165,0	165,0	164,99	1,08	0,312
ns*fy	1	796,1	796,1	796,09	5,20	0,034
ns*dx	1	221,6	221,6	221,60	1,45	0,244
fz*fy	1	122,3	122,3	122,32	0,80	0,383
Residual Error	19	2909,3	2909,3	153,12		
Lack-of-Fit	14	2620,5	2620,5	187,18	3,24	0,100
Pure Error	5	288,7	288,7	57,75		
Total	29	7677,0				

Unusual Observations for PB (MP)

Obs	StdOrder	PB (MP)	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
9	21	82,640	105,799	7,266	-23,159	-2,31 R

Estimated Regression Coefficients for PB (MP) using data in uncoded units

Term	Coef
Constant	-2660,22
ns	2,28613
fz	249,129
fy	-35417,1
dx	3687,12
ns*ns	-4,64959E-04
fy*fy	753853
ns*fz	-0,0802812
ns*fy	8,81719
ns*dx	-1,37324
fz*fy	-3456,25

Response Surface Regression: PB (MP) versus ns; fz; fy; dx

The analysis was done using coded units.

Estimated Regression Coefficients for PB (MP)

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	134,556	3,783	35,569	0,000
ns	7,347	2,903	2,530	0,020
fz	3,219	2,902	1,109	0,280
fy	-3,769	2,902	-1,299	0,209
dx	7,137	2,887	2,472	0,023
ns*ns	-18,598	6,641	-2,800	0,011
fy*fy	12,062	6,641	1,816	0,084
ns*fz	-3,211	3,078	-1,043	0,309
ns*fy	7,054	3,078	2,292	0,033
ns*dx	-3,708	3,067	-1,209	0,241

S = 12,3118 PRESS = 7559,62
R-Sq = 60,51% R-Sq(pred) = 1,53% R-Sq(adj) = 42,74%

Analysis of Variance for PB (MP)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	9	4645,4	4645,4	516,16	3,41	0,011
Linear	4	2262,0	2339,3	584,83	3,86	0,018
ns	1	999,9	970,6	970,59	6,40	0,020
fz	1	186,5	186,5	186,50	1,23	0,280
fy	1	255,7	255,7	255,68	1,69	0,209
dx	1	819,9	926,5	926,55	6,11	0,023
Square	2	1200,8	1200,8	600,38	3,96	0,036
ns*ns	1	700,8	1188,8	1188,77	7,84	0,011
fy*fy	1	500,0	500,0	499,99	3,30	0,084
Interaction	3	1182,7	1182,7	394,23	2,60	0,080
ns*fz	1	165,0	165,0	164,99	1,09	0,309
ns*fy	1	796,1	796,1	796,09	5,25	0,033
ns*dx	1	221,6	221,6	221,60	1,46	0,241
Residual Error	20	3031,6	3031,6	151,58		
Lack-of-Fit	15	2742,9	2742,9	182,86	3,17	0,104
Pure Error	5	288,7	288,7	57,75		
Total	29	7677,0				

Unusual Observations for PB (MP)

Obs	StdOrder	PB (MP)	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
9	21	82,640	105,799	7,229	-23,159	-2,32 R

Estimated Regression Coefficients for PB (MP) using data in uncoded units

Term	Coef
Constant	-2563,44
ns	2,28613
fz	200,741
fy	-42329,6
dx	3687,12
ns*ns	-4,64959E-04
fy*fy	753853
ns*fz	-0,0802812
ns*fy	8,81719
ns*dx	-1,37324

Response Surface Regression: PB (MP) versus ns; fz; fy; dx

The analysis was done using coded units.

Estimated Regression Coefficients for PB (MP)

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	134,556	3,791	35,494	0,000
ns	7,347	2,909	2,525	0,020
fz	3,219	2,908	1,107	0,281
fy	-3,769	2,908	-1,296	0,209
dx	7,137	2,893	2,467	0,022
ns*ns	-18,598	6,655	-2,795	0,011
fy*fy	12,062	6,655	1,812	0,084
ns*fy	7,054	3,084	2,287	0,033
ns*dx	-3,708	3,073	-1,207	0,241

S = 12,3377 PRESS = 7180,12
R-Sq = 58,36% R-Sq(pred) = 6,47% R-Sq(adj) = 42,50%

Analysis of Variance for PB (MP)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	8	4480,5	4480,5	560,06	3,68	0,008
Linear	4	2262,0	2339,3	584,83	3,84	0,017

ns	1	999,9	970,6	970,59	6,38	0,020
fz	1	186,5	186,5	186,50	1,23	0,281
fy	1	255,7	255,7	255,68	1,68	0,209
dx	1	819,9	926,5	926,55	6,09	0,022
Square	2	1200,8	1200,8	600,38	3,94	0,035
ns*ns	1	700,8	1188,8	1188,77	7,81	0,011
fy*fy	1	500,0	500,0	499,99	3,28	0,084
Interaction	2	1017,7	1017,7	508,84	3,34	0,055
ns*fy	1	796,1	796,1	796,09	5,23	0,033
ns*dx	1	221,6	221,6	221,60	1,46	0,241
Residual Error	21	3196,6	3196,6	152,22		
Lack-of-Fit	16	2907,9	2907,9	181,74	3,15	0,105
Pure Error	5	288,7	288,7	57,75		
Total	29	7677,0				

Unusual Observations for PB (MP)

Obs	StdOrder	PB (MP)	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
9	21	82,640	105,799	7,244	-23,159	-2,32 R

Estimated Regression Coefficients for PB (MP) using data in uncoded units

Term	Coef
Constant	-2194,15
ns	2,12557
fz	16,0944
fy	-42329,6
dx	3687,12
ns*ns	-4,64959E-04
fy*fy	753853
ns*fy	8,81719
ns*dx	-1,37324

Response Surface Regression: PB (MP) versus ns; fy; dx

The analysis was done using coded units.

Estimated Regression Coefficients for PB (MP)

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	134,556	3,810	35,314	0,000
ns	7,347	2,924	2,512	0,020
fy	-3,769	2,923	-1,289	0,211
dx	7,137	2,907	2,455	0,022
ns*ns	-18,598	6,689	-2,780	0,011
fy*fy	12,062	6,689	1,803	0,085
ns*fy	7,054	3,100	2,275	0,033
ns*dx	-3,708	3,089	-1,200	0,243

S = 12,4007 PRESS = 6679,97
R-Sq = 55,93% R-Sq(pred) = 12,99% R-Sq(adj) = 41,91%

Analysis of Variance for PB (MP)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	7	4294,0	4294,0	613,4	3,99	0,006
Linear	3	2075,5	2152,8	717,6	4,67	0,011
ns	1	999,9	970,6	970,6	6,31	0,020
fy	1	255,7	255,7	255,7	1,66	0,211
dx	1	819,9	926,5	926,5	6,03	0,022
Square	2	1200,8	1200,8	600,4	3,90	0,035
ns*ns	1	700,8	1188,8	1188,8	7,73	0,011
fy*fy	1	500,0	500,0	500,0	3,25	0,085
Interaction	2	1017,7	1017,7	508,8	3,31	0,055

ns*fy	1	796,1	796,1	796,1	5,18	0,033
ns*dx	1	221,6	221,6	221,6	1,44	0,243
Residual Error	22	3383,1	3383,1	153,8		
Lack-of-Fit	7	1426,2	1426,2	203,7	1,56	0,221
Pure Error	15	1956,9	1956,9	130,5		
Total	29	7677,0				

Unusual Observations for PB (MP)

Obs	StdOrder	PB (MP)	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
9	21	82,640	105,799	7,281	-23,159	-2,31 R
18	3	142,730	120,651	7,278	22,079	2,20 R

Estimated Regression Coefficients for PB (MP) using data in uncoded units

Term	Coef
Constant	-2161,96
ns	2,12557
fy	-42329,6
dx	3687,12
ns*ns	-4,64959E-04
fy*fy	753853
ns*fy	8,81719
ns*dx	-1,37324

Response Surface Regression: PB (MP) versus ns; fy; dx

The analysis was done using coded units.

Estimated Regression Coefficients for PB (MP)

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	134,556	3,847	34,980	0,000
ns	7,453	2,951	2,526	0,019
fy	-3,769	2,951	-1,277	0,214
dx	7,137	2,935	2,431	0,023
ns*ns	-18,598	6,753	-2,754	0,011
fy*fy	12,062	6,753	1,786	0,087
ns*fy	7,054	3,130	2,254	0,034

S = 12,5190 PRESS = 6582,04
R-Sq = 53,05% R-Sq(pred) = 14,26% R-Sq(adj) = 40,80%

Analysis of Variance for PB (MP)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	6	4072,4	4072,4	678,7	4,33	0,005
Linear	3	2075,5	2182,2	727,4	4,64	0,011
ns	1	999,9	999,9	999,9	6,38	0,019
fy	1	255,7	255,7	255,7	1,63	0,214
dx	1	819,9	926,5	926,5	5,91	0,023
Square	2	1200,8	1200,8	600,4	3,83	0,037
ns*ns	1	700,8	1188,8	1188,8	7,59	0,011
fy*fy	1	500,0	500,0	500,0	3,19	0,087
Interaction	1	796,1	796,1	796,1	5,08	0,034
ns*fy	1	796,1	796,1	796,1	5,08	0,034
Residual Error	23	3604,7	3604,7	156,7		
Lack-of-Fit	8	1647,8	1647,8	206,0	1,58	0,212
Pure Error	15	1956,9	1956,9	130,5		
Total	29	7677,0				

Unusual Observations for PB (MP)

Obs	StdOrder	PB (MP)	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
9	21	82,640	106,654	7,316	-24,014	-2,36 R

Estimated Regression Coefficients for PB (MP) using data in uncoded units

Term	Coef
Constant	-1994,21
ns	2,05264
fy	-42329,6
dx	528,657
ns*ns	-4,64959E-04
fy*fy	753853
ns*fy	8,81719

Response Surface Regression: PB (MP) versus ns; fy; dx

The analysis was done using coded units.

Estimated Regression Coefficients for PB (MP)

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	136,620	3,833	35,645	0,000
ns	7,453	3,082	2,418	0,024
fy	-3,769	3,082	-1,223	0,233
dx	7,385	3,063	2,411	0,024
ns*ns	-9,934	4,907	-2,024	0,054
ns*fy	7,054	3,269	2,157	0,041

S = 13,0778 PRESS = 6263,24
R-Sq = 46,53% R-Sq(pred) = 18,42% R-Sq(adj) = 35,39%

Analysis of Variance for PB (MP)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	5	3572,4	3572,4	714,5	4,18	0,007
Linear	3	2075,5	2249,8	749,9	4,38	0,013
ns	1	999,9	999,9	999,9	5,85	0,024
fy	1	255,7	255,7	255,7	1,49	0,233
dx	1	819,9	994,2	994,2	5,81	0,024
Square	1	700,8	700,8	700,8	4,10	0,054
ns*ns	1	700,8	700,8	700,8	4,10	0,054
Interaction	1	796,1	796,1	796,1	4,65	0,041
ns*fy	1	796,1	796,1	796,1	4,65	0,041
Residual Error	24	4104,7	4104,7	171,0		
Lack-of-Fit	9	2147,8	2147,8	238,6	1,83	0,145
Pure Error	15	1956,9	1956,9	130,5		
Total	29	7677,0				

Unusual Observations for PB (MP)

Obs	StdOrder	PB (MP)	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
9	21	82,640	117,318	4,416	-34,678	-2,82 R

Estimated Regression Coefficients for PB (MP) using data in uncoded units

Term	Coef
Constant	-994,966
ns	1,05618
fy	-21221,8
dx	547,009
ns*ns	-2,48339E-04
ns*fy	8,81719

Response Surface Regression: PB (MP) versus ns; fy; dx

The analysis was done using coded units.

Estimated Regression Coefficients for PB (MP)

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	130,584	2,553	51,144	0,000
ns	7,453	3,268	2,281	0,031
fy	-3,769	3,268	-1,153	0,260
dx	6,660	3,225	2,065	0,049
ns*fy	7,054	3,466	2,035	0,053

S = 13,8643 PRESS = 6675,89
R-Sq = 37,41% R-Sq(pred) = 13,04% R-Sq(adj) = 27,39%

Analysis of Variance for PB (MP)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	4	2871,6	2871,6	717,9	3,73	0,016
Linear	3	2075,5	2075,5	691,8	3,60	0,027
ns	1	999,9	999,9	999,9	5,20	0,031
fy	1	255,7	255,7	255,7	1,33	0,260
dx	1	819,9	819,9	819,9	4,27	0,049
Interaction	1	796,1	796,1	796,1	4,34	0,048
ns*fy	1	796,1	796,1	796,1	4,34	0,048
Residual Error	25	4805,4	4805,4	183,4		
Lack-of-Fit	10	2848,6	2848,6	284,9	2,18	0,083
Pure Error	15	1956,9	1956,9	130,5		
Total	29	7677,0				

Obs	StdOrder	PB (MP)	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
1	30	138,090	128,858	2,580	9,232	0,68
2	26	136,190	125,089	4,164	11,101	0,84
3	29	140,820	128,858	2,580	11,962	0,88
4	23	112,510	128,858	2,580	-16,348	-1,20
5	28	153,370	137,244	4,368	16,126	1,23
6	27	116,510	123,924	3,842	-7,414	-0,56
7	24	145,710	128,858	2,580	16,852	1,24
8	25	146,770	132,627	4,164	14,143	1,07
9	21	82,640	121,404	4,164	-38,764	-2,93
10	22	139,000	136,311	4,164	2,689	0,20
11	8	131,040	134,662	6,938	-3,622	-0,30
12	14	143,830	147,983	7,242	-4,153	-0,35
13	15	136,760	118,968	7,242	17,792	1,50
14	18	140,240	128,858	2,580	11,382	0,84
15	6	139,870	134,662	6,938	5,208	0,43
16	16	132,330	147,983	7,242	-15,653	-1,32
17	5	104,890	105,648	6,938	-0,758	-0,06
18	3	142,730	127,294	6,938	15,436	1,29
19	11	139,410	140,614	7,242	-1,204	-0,10
20	19	137,000	128,858	2,580	8,142	0,60
21	20	132,490	128,858	2,580	3,632	0,27
22	9	137,090	140,614	7,242	-3,524	-0,30
23	13	115,690	118,968	7,242	-3,278	-0,28
24	10	141,240	141,413	7,242	-0,173	-0,01
25	2	114,890	128,093	6,938	-13,203	-1,10
26	1	117,570	127,294	6,938	-9,724	-0,81
27	12	125,940	141,413	7,242	-15,473	-1,31
28	7	94,400	105,648	6,938	-11,248	-0,94
29	17	120,590	128,858	2,580	-8,268	-0,61
30	4	137,200	128,093	6,938	9,107	0,76

Estimated Regression Coefficients for PB (MP) using data in uncoded units

Term	Coef
Constant	315,582
ns	-0,0861740

fy -21221,8
dx 493,341
ns*fy 8,81719

Predicted Response for New Design Points Using Model for PB (MP)

Point	Fit	SE Fit	95% CI	95% PI
1	128,858	2,58048	(123,543; 134,172)	(99,813; 157,902)
2	125,089	4,16385	(116,513; 133,664)	(95,275; 154,903)
3	128,858	2,58048	(123,543; 134,172)	(99,813; 157,902)
4	128,858	2,58048	(123,543; 134,172)	(99,813; 157,902)
5	137,244	4,36751	(128,249; 146,239)	(107,307; 167,182)
6	123,924	3,84205	(116,011; 131,837)	(94,294; 153,554)
7	128,858	2,58048	(123,543; 134,172)	(99,813; 157,902)
8	132,627	4,16385	(124,051; 141,202)	(102,813; 162,440)
9	121,404	4,16385	(112,829; 129,980)	(91,590; 151,218)
10	136,311	4,16385	(127,735; 144,887)	(106,497; 166,125)
11	134,662	6,93776	(120,374; 148,951)	(102,733; 166,592)
12	147,983	7,24197	(133,068; 162,898)	(115,768; 180,197)
13	118,968	7,24197	(104,053; 133,884)	(86,754; 151,183)
14	128,858	2,58048	(123,543; 134,172)	(99,813; 157,902)
15	134,662	6,93776	(120,374; 148,951)	(102,733; 166,592)
16	147,983	7,24197	(133,068; 162,898)	(115,768; 180,197)
17	105,648	6,93776	(91,360; 119,937)	(73,719; 137,578)
18	127,294	6,93776	(113,005; 141,582)	(95,364; 159,223)
19	140,614	7,24197	(125,699; 155,529)	(108,399; 172,828)
20	128,858	2,58048	(123,543; 134,172)	(99,813; 157,902)
21	128,858	2,58048	(123,543; 134,172)	(99,813; 157,902)
22	140,614	7,24197	(125,699; 155,529)	(108,399; 172,828)
23	118,968	7,24197	(104,053; 133,884)	(86,754; 151,183)
24	141,413	7,24197	(126,498; 156,328)	(109,198; 173,628)
25	128,093	6,93776	(113,804; 142,381)	(96,163; 160,022)
26	127,294	6,93776	(113,005; 141,582)	(95,364; 159,223)
27	141,413	7,24197	(126,498; 156,328)	(109,198; 173,628)
28	105,648	6,93776	(91,360; 119,937)	(73,719; 137,578)
29	128,858	2,58048	(123,543; 134,172)	(99,813; 157,902)
30	128,093	6,93776	(113,804; 142,381)	(96,163; 160,022)