

Karol Vasilko

**METÓDY A PROSTRIEDKY
BRÚSENIA KOVOV**

Tribológia procesu

Prešov 2020

Monografia rieši problematiku efektívnosti brúsenia z pozície sledovania tribológie tohto procesu. Technologický proces brúsenia kovov možno charakterizovať ako interakciu brúsnych zrn s obrobkom pri vysokej rýchlosti brúsneho kotúča. Táto interakcia vedie k intenzívnemu vývoju tepla trenia a deformácie obrábaného materiálu a prejavuje sa špecifickým mechanizmom vzniku obrobeného povrchu a triesky. Jej dôsledkom je opotrebenie brúsnych zrn oterom a krehkým lomom. Tento zložitý fyzikálny proces autor sleduje špecifickými metódami a prostriedkami v podmienkach mikrometrických rozmerov skúmaných objektov. Výsledkom je odporúčanie k výberu optimálnej zostavy systému rezný – obrábaný materiál a vhodných technologických podmienok pri brúsení vybraných materiálov.

Lektori: Dr.h.c. prof. Ing Milan Žmindák, CSc., prof. Ing. Eudovít Parilák, CSc.

© Dr.h.c., prof. Ing. Karol Vasilko, DrSc.

ISBN 978-80-553-3509-4

OBSAH

Zoznam symbolov	3
ÚVOD	6
1 MECHANIZMUS INTERAKCIE BRÚSNEHO KOTÚČA S OBRÁBANÝM MATERIÁLOM	9
1.1 Topografia pracovného povrchu brúsiaceho nástroja	9
1.2 Interakcia brúsiaceho a obrábaného materiálu	18
1.3 Tvorenie triesky pri brúsení	29
1.3.1 Skenovanie brúseného povrchu	33
1.3.1.1 Metalografické štúdium procesu brúsenia	39
1.4 Vplyv mechanických vlastností materiálu na deformačné spevnenie pri brúsení	50
2 TEPELNÉ JAVY PRI BRÚSENÍ	57
2.1 Teplota kontaktu	57
2.2 Teplotné pole v brúsiacom zrne	66
2.3 Teplotné pole v obrobku	68
2.4 Integrovaná teplota kontaktu	79
3 PEVNOSŤ REZNEJ ČASTI BRÚSIACICH ZŔN	102
3.1 Mechanizmus krehkého porušovania brúsiacich zŕn	102
3.2 Plastická deformácia brúsiacich zŕn	116
3.3 Identifikácia ďalších mechanizmov opotrebenia brúsiacich zŕn	124
3.3.1 Adhézno-únnavové opotrebenie	125
3.3.2 Abrazívne opotrebenie	133
3.3.2 Difúzne opotrebenie	135
4 POŽIADAVKY NA SPOJIVO BRÚSIACICH KOTÚČOV	141
4.1 Druhy opotrebenia brúsiaceho kotúča	141
4.2 Hodnotenie kvality spojiva brúsiaceho kotúča	144
4.3 Požiadavky na spojivo brúsnych kotúčov	148
4.4 Veľkosť vrstvy odoberanej pri ostrení brúsiacich kotúčov	153
5 PRÍKLADY RACIONALIZÁCIE BRÚSIACEHO PROCESU	157
5.1 Brúsenie spekaných karbidov	157
5.2 Brúsenie titánových zliatin	164
5.3 Rýchlostné superfinišovanie krúžkov valivých ložísk	169
6 ZÁVER	173
Literatúra	174

Zoznam symbolov

a	- teplotná vodivosť	$\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
a_p	- hĺbka rezu	mm
B	- šírka rezu	mm
d_o	- priemer obrobenej plochy	mm
D_k	- priemer brúsneho kotúča	mm
E	- modul pružnosti v ťahu	MPa
f	- posuv	mm
F	- sila	N
Fo	- Fourierovo kritérium $\frac{a \cdot \tau}{x^2}$	
g	- exponent	
G	- modul pružnosti v šmyku	MPa
G_{st}	- počet zrn na jednotku dĺžky brúsneho kotúča	
G_{dyn}	- počet dynamických zrn	
h	- hrúbka odrezávanej vrstvy	mm
h_1	- hrúbka triesky	mm
h_s	- hĺbka spevnenia	μm
H	- tvrdosť materiálu	HRc
k	- stlačenie triesky - konštanta - teplotný koeficient	
K_k	- koeficient brúsenia	
K_r	- koeficient reznosti	
l_k	- dráha. prejdená brúsnym kotúčom,	mm
L	- dĺžka	mm
L_k	- dĺžka kontaktu	mm
L_s	- vzdialenosť susedných zrn	mm
m	- počet šmykov	
n	- počet impulzov - koeficient bezpečnosti	
N_{dyn}	- dynamický počet zrn (pri pohybe brúsneho kotúča)	
N_{st}	- statický počet zrn	

Q	- teplo	J
P_v	- rovina metalografického rezu	
r_n	- polomer zaoblenia reznej hrany	μm
r_ε	- polomer zaoblenia hrotu brúsneho zrna	μm
Ra	- stredná aritmetická výška nerovnosti profilu	μm
Rz	- najväčšia výška nerovností profilu	μm
R	- medza šmyku	MPa
R_m	- medza pevnosti pri jednoosovom ťahu	MPa
v_c	- rezná rýchlosť	m.s^{-1}
v_k	- obvodová rýchlosť brúsneho kotúča	m.s^{-1}
v_o	- rýchlosť obrobku	m.min^{-1}
V_m	- objem brúseného materiálu	mm^3
V_{ob}	- objem opotrebeného brusiva	mm^3
x	- hrúbka steny	mm
z	- počet zrn	
	- vzdialenosť od základného profilu kotúča	mm
α	- uhol chrbta	°
	- koeficient lineárnej teplotnej rozťažnosti	mm.K^{-1}
β_n	- uhol rezného klina v normálovej rovine	°
γ	- uhol čela	°
Δ	- gradient	
Δl	- predĺženie	mm
ε	- pomerná šmyková deformácia	
	- uhol hrotu	°
	- rýchlosť deformácie	mm.s^{-1}
θ	- teplota	K
	- uhol hranice plastickej deformácie	°
θ_k	- integrálna teplota	K
λ	- tepelná vodivosť	W.m.K^{-2}
ν	- Poissonova konštanta	
π	- Ludolfovo číslo	
ρ	- hustota	g.mm^{-3}
σ	- napätie	MPa

τ - čas s
 τ_k - tangenciálne napätie MPa
 ∇ - Laplaceov operátor

ÚVOD

Už v dávnej minulosti človek pieskovcom ako abrazívnym nástrojom obrusoval ručné nástroje, zhotovené najskôr z kameňa, potom z bronzu a železa.

Muselo uplynúť veľa storočí, aby sa od ručnej brúsky prešlo k obrábacím strojom s programovým riadením, ktoré používajú brúsiace kotúče zo syntetických diamantov a kubického nitridu bóru.

V súčasnosti má brúsenie v priemysle nezastupiteľnú úlohu. Výroba presných súčiastok sa bezprostredne, alebo nepriamo spája s touto dokončovacou operáciou. Nasvedčuje tomu nepretržitý nárast počtu brúsok v porovnaní s produkčnými obrábacími strojmi. Objem brúsiacich operácií je v priemere asi 25% a často prevyšuje 75% z celkového objemu operácií, realizovaných na obrábacích strojoch.

Výsledkom zdokonaľovania technológie tvárnenia, odlievania, práškovej metalurgie sú dnes polovýrobky s minimálnymi prídavkami na obrábanie, čo vedie k možnosti povrch súčiastky priamo brúsiť.

Široká aplikácia nových vysokopevných zliatin na báze ťažko tavitelných kovov, kovových a kovokeramických spekaných karbidov, žiarupevných ocelí, titánových zliatin, u ktorých je problém aplikovať klasické metódy „hrubovacieho“ obrábania sa dnes realizuje abrazívnymi nástrojmi. Táto skutočnosť, spojená so zdokonaľovaním brúsnych materiálov vedie k reálnemu predpokladu, že význam brúsenia bude aj v budúcnosti narastať.

Oblasti použitia abrazívneho obrábania sú v súčasnosti široké. Brúsenie sa používa prevažne pri dokončovacích operáciách, kde je rozhodujúce zabezpečenie rozmerovej presnosti a kvality povrchu súčiastky. Brúsenie v širšom meradle zahŕňa aj také metódy ako super finišovanie, abrazívne čistenie voľným brúšivom, vodný prúd s abrazívom, hydrofiniš, teda finálne operácie obrábania.

Základnou charakteristikou brúsenia je aplikácia vysokých rezných rýchlostí pri malých prierezoch odrezávanej vrstvy. Trvanlivosť jednotlivých rezných klinov keramických abrazívnych zŕn je pomerne malá, ale v dôsledku veľkého množstva postupne zaberajúcich rezných hrán je sumárna trvanlivosť brúsiaceho nástroja dostatočne vysoká.

Jednou zo základných predností abrazívneho obrábania je možnosť odoberania tenkých vrstiev obrábaného materiálu, hrúbky rádovo niekoľko mikrometrov. Pri malých prierezoch rezu sa rezné sily a deformácie v sústave obrábania znižujú, čo vedie k vyššej presnosti obrobenej plochy. Ak potrebujeme vyššiu kvalitu povrchu súčiastky možno použiť

malé hĺbky rezu a rezné rýchlosti (honovanie, super finišovanie, leštenie, lapovanie). Pri týchto metódach je výrazne nižšia kontaktná teplota, ktorá neovplyvňuje fázové a štruktúrne transformácie, deformáciu povrchovej vrstvy, vznik nepriaznivých zvyškových napätí a ďalšie defekty. Pretože súčasne je v činnosti viac rezných hrán, ktoré vykonávajú zložité trajektórie, dosahuje sa vysoká kvalita obrobeného povrchu.

Pri odoberaní veľkých prídavkov u liatinových a oceľových polovýrobných, najmä z vysoko pevných ocelí, takisto pri polovýrobných s kôrou a nekovovými vtrúseninami v povrchu abrazívne obrábanie úspešne konkuruje (v mnohých prípadoch aj z hľadiska efektívnosti) sústruženiu a frézovaniu. Možno to vysvetliť špecifickosťou tejto technológie, ktorá spočíva v predhrievaní odoberanej vrstvy materiálu, čo vedie k poklesu jeho mechanických vlastností.

Pokúsime sa interpretovať novšie výsledky výskumu, zameraného na problém objasnenia mechanizmu brúsenia a opotrebenia brúsnych nástrojov na báze sledovania tribologických aspektov procesu.

Tribológia, čiže náuka o trení (od gréckeho slova tribos – trieť [2]) zaznamenala v uplynulých rokoch rozvoj a na jej základe sa sformovala aj nová vedná disciplína – tribotechnika. V tribotechnike sa študuje kontaktná interakcia navzájom sa pohybujúcich tuhých telies, v dôsledku čoho medzi nimi vznikajú trecie sily. Sily trenia výrazne ovplyvňujú opotrebenie súčiastok, mechanizmov a strojov a v mnohých prípadoch aj ich prevádzkové charakteristiky. Praktické využitie tribotechniky je v správnom výbere materiálov trúciach sa dvojíc, mazacieho média, konštrukcie súčiastok a uzlov trenia, mikrogeometrie povrchov a fyzikálno-mechanických vlastností kontaktujúcich povrchov.

Treba poznamenať, že proces interakcie medzi obrábaným a rezným materiálom sa výrazne odlišuje od styku povrchov strojárske súčiastok (napr. klzných, alebo valivých ložísk). Je to dané najmä výrazne vyšším merným tlakom, vyššími silami trenia a deformácie a vysokými kontaktnými teplotami. Preto proces obrábania si zaslúži byť samostatnou časťou tribológie.

Proces odoberania triesky pri brúsení sa realizuje veľkým množstvom abrazívnych zrn, ktoré sú súčasne v zábere s obrábaným povrchom pričom jednotlivé zrná majú odlišnú konfiguráciu, orientáciu a rozmery. Táto skutočnosť sa odráža aj na konfigurácii obrobeného povrchu súčiastky. Jednotlivé abrazívne zrná odrezávajú vrstvy materiálu, ktoré sú navzájom odlišné. Rozmery triesok, ktoré vznikajú pred jednotlivými zrnami sú pritom krajne malých rozmerov (mikrometre a desiatky mikrometrov), a počet triesok, vznikajúcich za časovú jednotku je obrovský (tisíce triesok za sekundu). Tieto skutočnosti spôsobujú značné

problémy pri sledovaní procesu odoberania triesky pri brúsení, čo si vyžaduje aplikovať špeciálne metodiky štúdia.

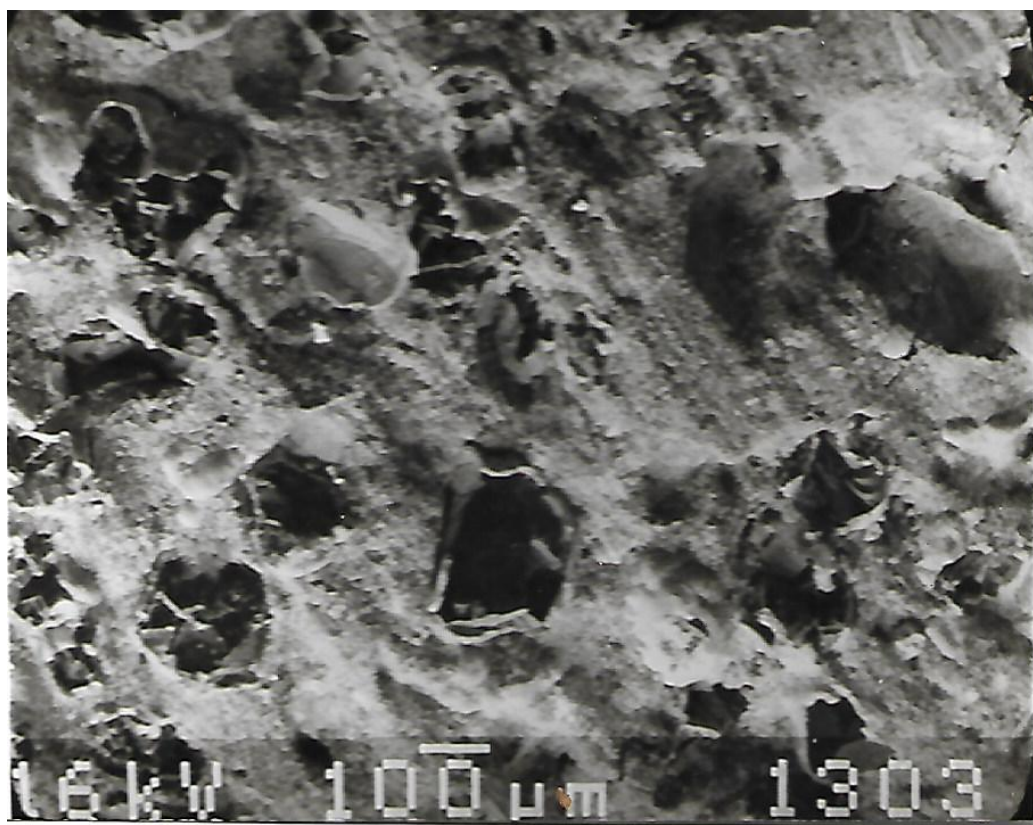
Pri brúsení charakter interakcie v zóne kontaktu nástrojového a obrábaného materiálu veľmi vplyva na kvalitu obrobeného povrchu, opotrebenie a trvanlivosť brúsneho nástroja. Pokúsime sa podrobnejšie sledovať kontaktné javy, ktoré vznikajú pri rozličných podmienkach abrazívneho obrábania. Výsledky tohto štúdia dovolili v prvom priblížení objasniť mechanizmus opotrebenia brúsnych materiálov a klasifikovať druhy ich opotrebenia.

Podľa výsledkov štúdia boli formulované základné požiadavky, ktoré musí splňovať materiál zrn a spojivo brúsneho nástroja. Možno naznačiť metodológiu výberu racionálnych technických charakteristík brúsiacich nástrojov a odporúčania na optimalizáciu procesu brúsenia.

1 MECHANIZMUS INTERAKCIE BRÚSIACEHO NÁSTROJA S OBRÁBANÝM MATERIÁLOM

1.1 Topografia pracovného povrchu brúsiaceho nástroja

Východisková topografia pracovného povrchu brúsiaceho kotúča sa vytvára už pri výrobe abrazívneho nástroja, a následne pri jeho ostrení. Pracovný povrch nástroja sa skladá z jednotlivých zŕn brúsiva, pospájaných spojivom a voľného priestoru medzi nimi, do ktorého sa dostávajú časti vznikajúcej triesky. Pohľad na povrch brusného kotúča pod elektrónovým mikroskopom je na *obr. 1.1*.



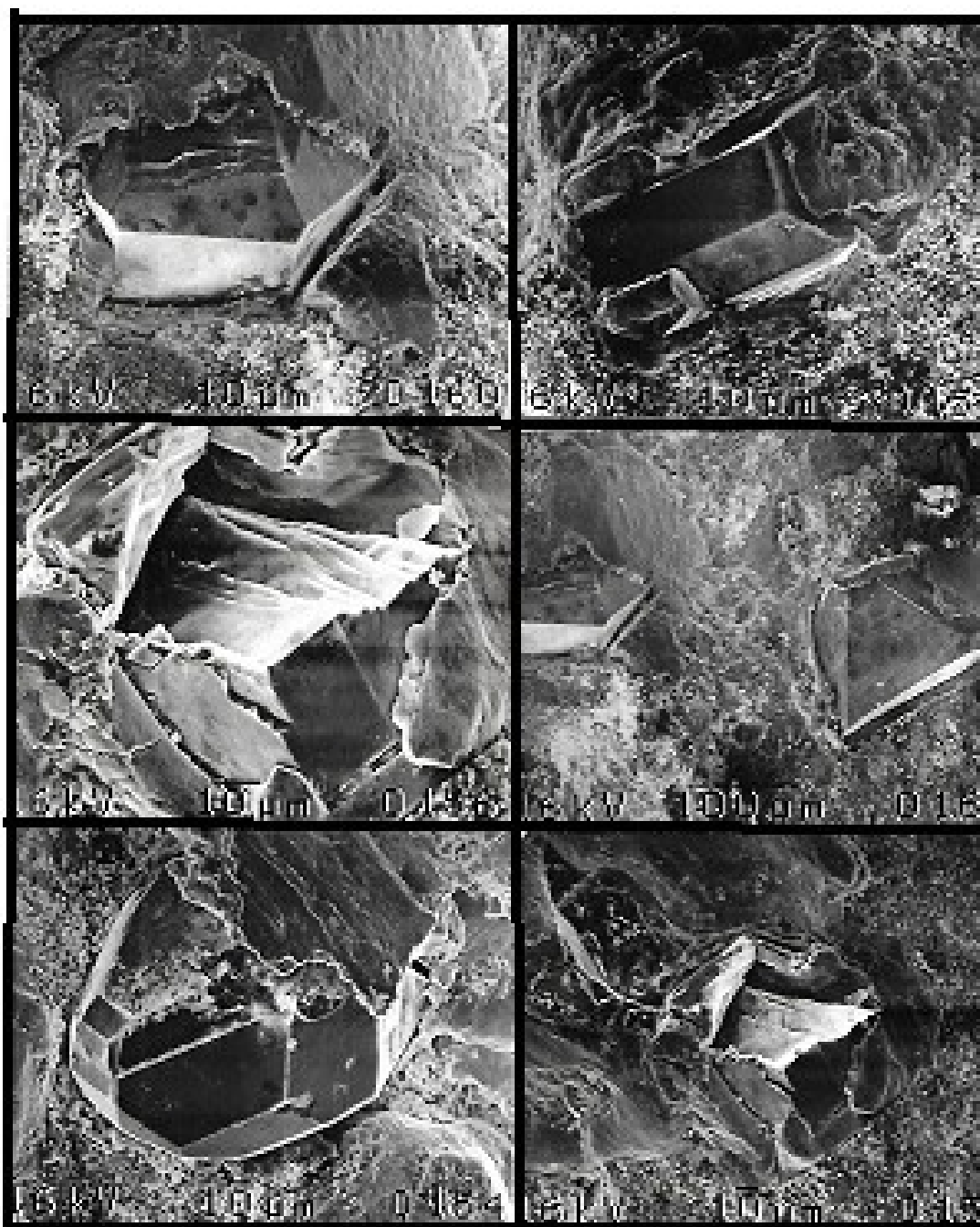
Obr. 1.1 Fotografia povrchu brúsneho nástroja s kryštalickými zrnami z Al_2O_3 .

Vidno, že zrná brúsiva majú rozličnú veľkosť, sú rozlične orientované, majú zložité geometrické tvary, ktorými sa výrazne líšia. Do kontaktu s obrokom teda prichádzajú hrotmi, reznými hranami, alebo aj rovinnými plochami.

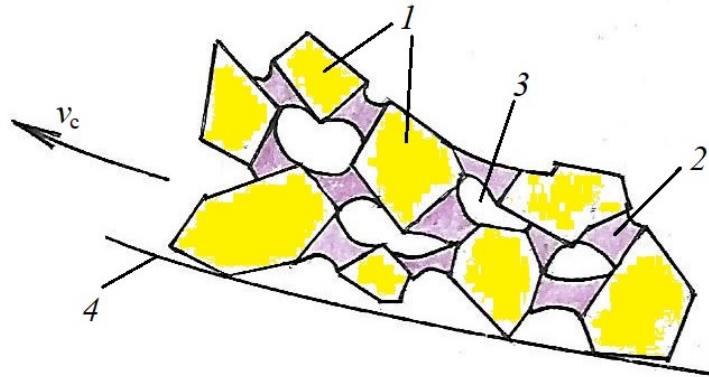
V *tab. 1.1* je niekoľko príkladov brúsnych zŕn rozličného tvaru, upevnených v kotúči spojivom pri väčšom zväčšení, čo detailnejšie dokumentuje uvedené tvrdenie.

Detailný pohľad na jednotlivé brúsne zrná, fixované spojivom v kotíči.

Tab.1.1



Ak vytvoríme radiálny rez brúsnym kotúčom, vytvorí sa nám štruktúra kotúča podľa obr. 1.2.



Obr. 1.2 Schéma radiálneho rezu brúsnym kotúčom. 1 – brúsne zrná, 2 – spojivo, 3 – póry, 4 – menovitý profil kotúča

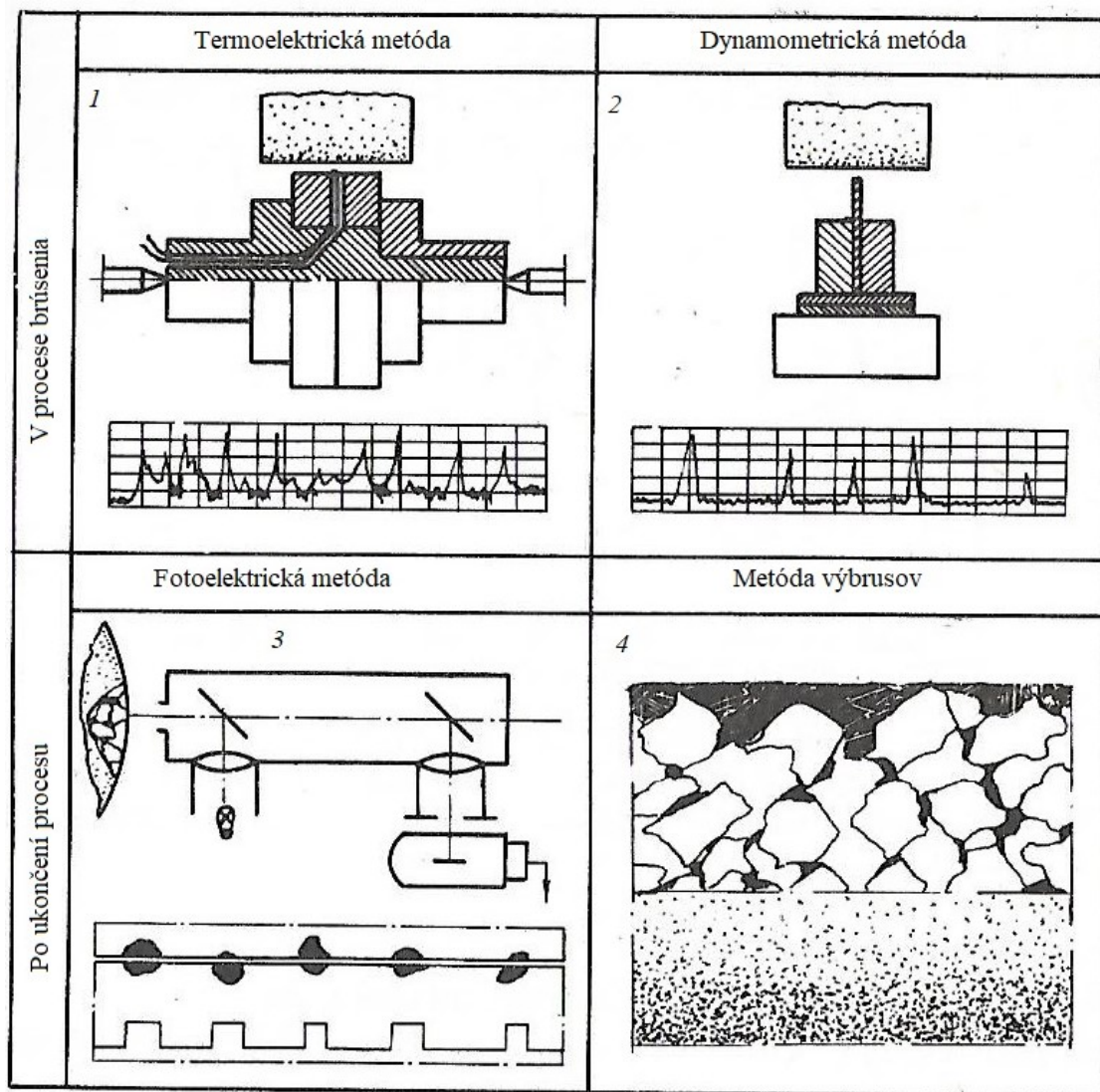
Rozličný tvar a orientácia zrn naznačuje, že aj keby zrná kontaktovali s obrábanou plochu hrotmi, uhly čela budú vždy záporné. Prakticky nemôže nastať prípad zrna s kladným uhlom čela, pretože by došlo k jeho lomu. V porovnaní s nástrojmi s definovanou geometriou sú záberové podmienky pre vznik triesky výrazne nepriaznivejšie. Napriek tomu možno brúsením úspešne obrábať vysoko pevné materiály, kalené ocele, nekovové materiály.

Pri riadení procesu brúsenia a zabezpečení ráznosti nástroja treba poznať reálnu štruktúru kotúča. Pre tento cieľ sa aplikujú rozličné experimentálne metódy. Buď sa hodnotí reliéf brúsneho kotúča v reze (obr. 1.2), alebo topografia pracovného povrchu brúsneho kotúča. Súčasné experimentálne metódy umožňujú sledovať profil brúsiaceho kotúča v statike aj dynamike.

Klasifikácia statických metód štúdia reliéfu brúsneho kotúča je v tab. 1.2.[4].

	Metóda odtlačkov	Profilografická metóda	Metóda mikrovýbrusov
Relief povrchu	<p>1</p>	<p>2</p>	
Topografia povrchu	<p>4</p>	<p>5</p>	<p>6</p>

V tab. 1.3 Sú metódy dynamického sledovania profilu kotúča.



Vo všeobecnom prípade topografia pracovného povrchu kotúča informuje o množstve abrazívnych zŕn na menovitej dĺžke alebo ploche o umiestnení jednotlivých zŕn proti základnému profilu kotúča.

Počet zŕn v hĺbke z od základného profilu kotúča [4]:

$$G_{st}(z) = \frac{1}{L} \sum N_{st}(z), \quad (1.1)$$

kde N_{st} je počet brúsiacich zŕn v statickej polohe.

Počet zŕn, ktoré pripadajú na jednotku povrchu kotúča označíme G_{st}^A .

Pri brúsení sa do kontaktu s obrábaným materiálom dostáva len časť zŕn, ktoré oproti predchádzajúcemu (statickému) počtu označujeme ako „dynamické“ zrná (N_{dyn}). Počet týchto

zrń závisí od geometrických a kinematických parametrov, pružnej deformácie kotúča a obrábaného materiálu v zóne rezania.

Počet dynamických brúsnych zrń sa určí zo vzťahu [12]:

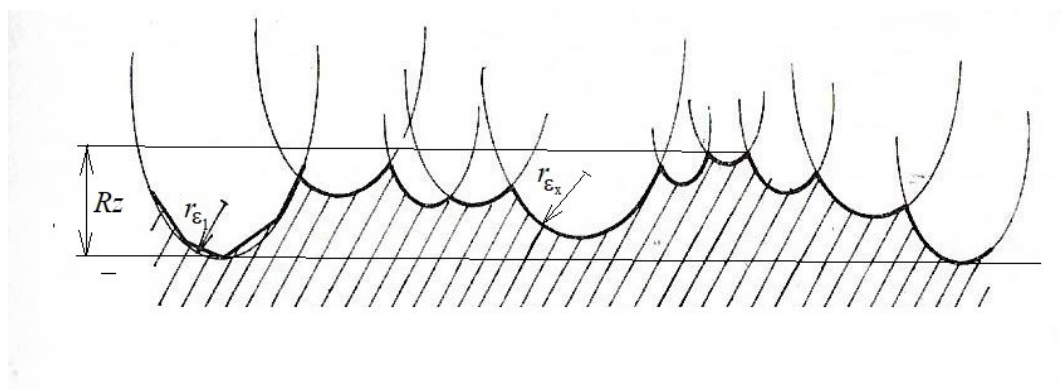
$$G_{\text{dyn}}^A(z) = \frac{1}{L} \sum N_{\text{dyn}}(z \cdot v_k \cdot v_0 \cdot \tau \cdot D_k \cdot d_0) \quad (1.2)$$

(význam parametrov je v zozname symbolov).

Počet dynamických zrń, ktoré pripadajú na jednotku povrchu kotúča bude G_{dyn}^A .

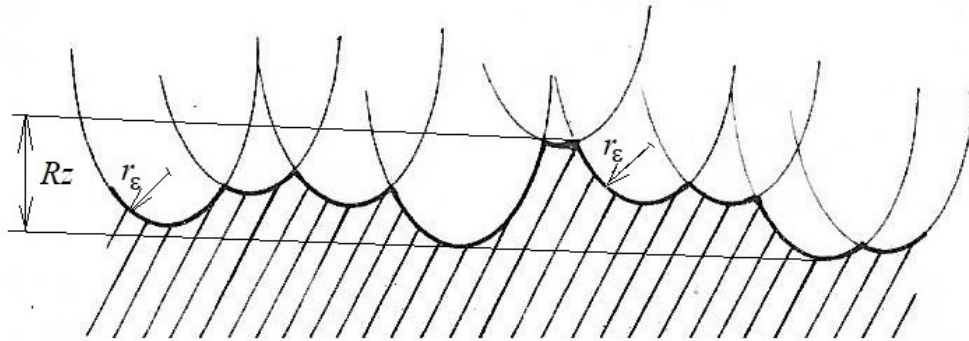
Uvedené geometrické parametre nemôžu v plnej miere objektívne charakterizovať reálnu topografiu pracovného povrchu kotúča, pretože topografia sa musí hodnotiť komplexom charakteristík.

Analýza reliéfu pracovného povrchu kotúčov ukazuje, že profil jednotlivých zrń sa často veľmi odlišuje. Rozdelenie vrcholov zrń v priestore pri zohľadnení ich orientácie v procese brúsenia značne sťažuje určenie uhlov rezného klina a polomerov zaoblenia rezných hrán. Z toho vyplýva, že pre orientačnú teoretickú analýzu možno reliéf povrchu aproximovať zjednodušenými modelmi. Pri modelovaní topografie brúsiaceho kotúča sa obyčajne brúsne zrno nahrádza guľou, alebo elipsoidom. Ak uvažujeme, že vo všeobecnom prípade sa jednotlivé zmá rozmerovo odlišujú, môžeme vytvoriť model vytvárania povrchu v priečnom reze podľa obr. 1.3



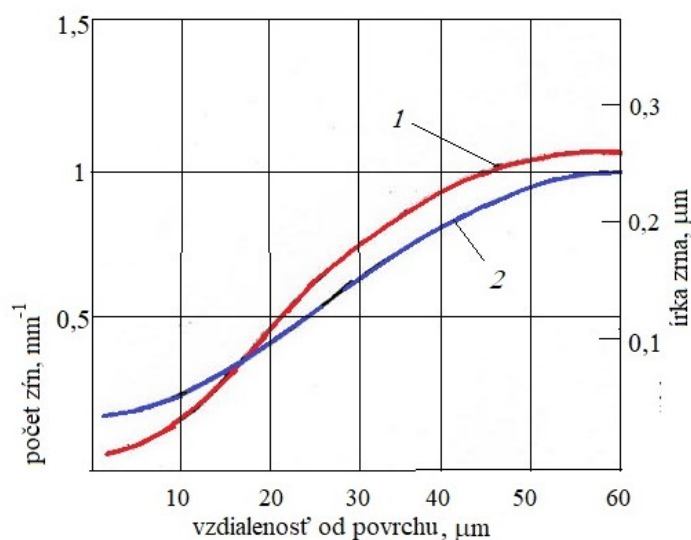
Obr.1.3 Model vytvárania priečného profilu brúseného povrchu. pri rozličnej veľkosti brúsnych zrń.

Pri použití triedených brúsnych zrń rovnakých rozmerov, čo je aktuálne najmä u brúsnych kotúčov zo syntetickým diamantovým brúsivom, alebo brúsivom na báze kubického Nitricu bóru, môže platiť model podľa obr. 1.4.



Obr. 1.4 Model tvorby brúseného povrchu pri brúsení kotúčom s rovnakou veľkosťou brúsnych zrn

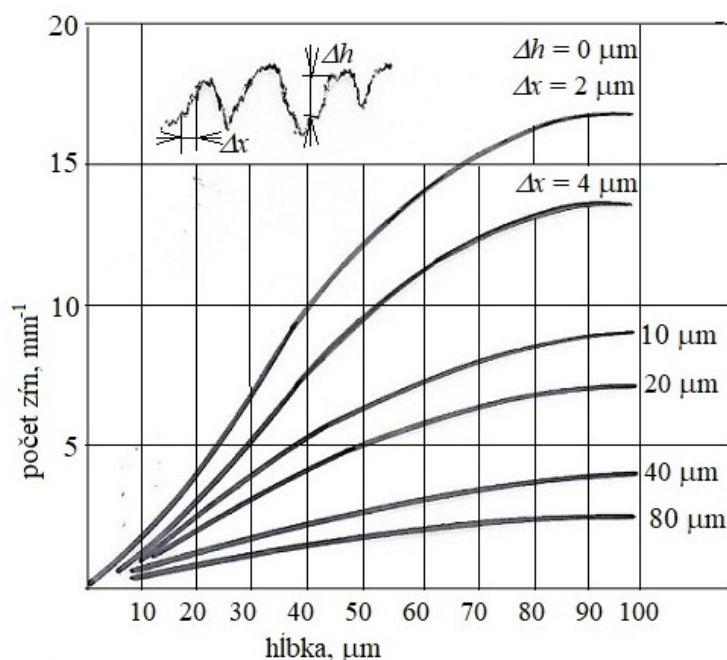
Modelovanie procesu dáva možnosť určiť veľkosť plochy kontaktu, početnosť vrcholov nerovností a ďalšie charakteristiky. Spomedzi uvedených experimentálnych metód je najjednoduchšia metóda odtlačkov na papier (1 z tab. 1.1). Medzi brúsiaci kotúč a leštený kotúč z pružného plastu sa vťahuje list bieleho papiera a tenký kopírovací papier. Brúsiaci kotúč a krúžok pomaly rotujú bez sklzu. Pri rotácii kotúča sa jeho pracovný povrch odtláča na papier. Ak má kotúč miernu kužeľovitost', možno zaznamenať rozdelenie abrazívnych zrn v závislosti na hĺbke pod menovitým povrchom. Po vyhodnotení zápisu každé tmavé miesto na papieri treba chápať ako stopu zrna. Na obr. 1.5 je ako príklad znázornená závislosť počtu abrazívnych zrn a ich šírky na hĺbke preniknutia pri meraní reliéfu kotúča A 99 25K 8V, po ostrení diamantovým hrotom.



Obr. 1.5 Závislosť počtu rezných hrán od hĺbky vniknutia zrna.
 1 – od dĺžky, 2 – od strednej šírky zrna. Brúsiaci kotúč: A99 25K 6V (zrornosť 250 mm), rovnanin diamantovým hrotom pri reznej rýchlosti $v_c = 30 \text{ m.s}^{-1}$, hĺbka odoberanej vrstvy $a_p = 50 \mu\text{m}$ x 3, posuv na otáčku $f = 200 \mu\text{m}$.

Vidno, že so stúpajúcou hĺbkou prieniku počet abrazívnych zrn na jednotke dĺžky pracovného povrchu kotúča rastie, to svedčí o umiestnení brúsiacich zrn v rozličnej výške s ohľadom na menovitý povrch brúsiaceho kotúča. Treba poznamenať, že do hĺbky 10 μm počet zrn rastie málo, potom v rozsahu hĺbok 10 až 40 μm rastie výrazne a p 40 mm sa tento počet stabilizuje. Analogicky so zväčšovaním hĺbky vtlačenia rastie stredná šírka abrazívnych zrn.

Efektívnou metódou na získanie informácie o reliéfe povrchu kotúča je profilografická metóda, pretože pri nej sa používajú meracie prostriedky, ktoré poznáme z merania parametrov mikrogeometrie obrobeného povrchu. V súčasnosti sa metóda zdokonalila. Na určenie menovitého povrchu má snímač oporný dotyk, ktorý sleduje vrcholky brúsiacich zrn. Spoľahlivosť merania zlepšujú diamantové hroty s rozličnými uhlami (tab. 1.1). Získanú informáciu možno vyhodnotiť počítačom, ktorý podľa programu vyhodnotí údaje o počte rezných hrán, ich plošnom a výškovom rozdelení. Na obr. 1.6 sú krivky zmeny počtu statických rezných hrán pre elektrokorundový kotúč A99 25K 6V po ostrení diamantom v závislosti na hĺbke preniknutia hrotu pri rozličných hodnotách elementárnej šírky profilu Δx . Z analýzy vyplýva že so zväčšovaním Δx počet statických rezných hrán klesá. To znamená, že hroty na profilograme sú jednotlivé plochy určitého zrna. Odporúča sa brať $\Delta h = 5 \mu\text{m}$ a $\Delta x = 10\text{-}16 \mu\text{m}$.



Obr. 1.6 Závislosť počtu rezných hrán na dĺžke a šírke vniknutia pri rozličných hodnotách Δx a Δh .

Z obr. 1.6 vyplýva, že parametre reliéfu brúsiaceho kotúča závisia na rozlišovacej schopnosti meracej aparatury. V rade prípadov môže veľká rozlišovacia schopnosť poskytnúť nadbytočnú informáciu, ktorá sťažuje interpretáciu získaných výsledkov o mechanizme interakcie medzi rezným klinom a obrábaným materiálom.

Spomedzi vhodných metód na sledovanie reliéfu povrchu brúsneho kotúča je v tab. 1.1-3 naznačená metóda mikrovýbrusov povrchu kotúča v normálovom reze. Povrchová vrstva sa nasýti epoxidom a vybrúsi sa diamantovým kotúčom, prípadne vyleští diamantovou pastou. Profil sa zviditeľní fotografovaním pod metalografickým mikroskopom so zväčšením 2000-krát.

Na získanie predstavy o profile povrchu kotúča možno do povrchu zaliat ľahkotavitelný kov. Pri orovnávaní kotúča sa odrežú aj zrná. Pri leptaní výbrusu sa javia zrná ako biele a spojivo tmavé.

Mikrostereografickou metódou možno pomocou elektrónového mikroskopu získať stereografické fotografie, z ktorých možno vytvoriť obrysovú mapu zrn na rozličných vzdialenostiach od povrchu. Možno tak zistiť hustotu rozdelenia jednotlivých zrn v rozličných hĺbkach (4, tab.1.1).

Predstavu o topografii pracovného povrchu kotúča možno získať z postupných profilografov (5, *tab.1.1*), alebo postupnými mikrovýbrusmi (3, *tab.1.1*). Táto metóda ukázala, že vytváranie profilu obrobenej plochy vzniká ako výsledok postupného odrezávania obrábaného materiálu aktívnym hranami brúsnych zrn, ktorých počet je pomerne malý. Z tohto aspektu je zaujímavý nasledovný pokus (6, *tab.1.1*). Kotúč sa orovnával diamantom, ktorý mal tvar noža s uhlom hrotu 68° . Orovňavanie prebiehalo priečnym posuvom. Analýza mikrofotografií z postupných rezov kotúča ukázala, že v každom reze vychádzajú na povrch malé úseky rezných hrán (šrafované). Ani v jedno reze sa neobjavili plynulé úseky zrn, ktoré by kopirovali úsek reznej hrany diamantovej platničky. Z toho vyplýva, že pri orovňávaní diamantom sa krehko porušia abrazívne zrná a na zrnách sa kopírujú skôr mikroúseky diamantu.

Profilovanie brúseného povrchu je výsledkom spolupôsobenia pracovného povrchu kotúča s obrábaným materiálom pri daných kinematických parametroch.

Pretože pri brúsení v bežných podmienkach je rezná rýchlosť 50 až 100 krát vyššia ako posuv, na jednotlivé úseky obrobku pôsobí rezný povrch kotúča, ktorý je kinematicky niekoľkokrát väčší. Takto sa zmenou reznej rýchlosti zabezpečuje malá výška nerovností obrobenej plochy, pretože brúsený povrch je mnohonásobne prekrývaný aktívnymi reznými zrnami brúsnych zrn.

Presné určenie počtu dynamických zrn je zložité, preto sa určuje experimentálne (*tab.1.2*).

Počet aktívnych zrn možno určiť termočlánkom (1, *tab. 1.2*), ktorý tvorí termoelektróda a brúsený materiál. Registruje sa počet elektrických impulzov, ktoré vznikajú pri prechode brúsiacich zrn cez spoj termočlánku. Pri brúsení, v závislosti na hĺbke prieniku abrazívneho zrna do materiálu sa tvorí trieska, pružná a plastická deformácia. Preto každý vzniknutý termoelektrický impulz neznamena odrezávanie triesky.

Metóda merania piezoelektrickým dynamometrom sa zakladá na fixovaní dynamickej zložky reznej sily citlivým dynamometrom. Brúsi sa tenký obrobok jednotlivými brúsiacimi zrnami (2, *tab.1.2*), pričom sa predpokladá, že pri malej šírke (hrana žiletky) pri brúsení bude prichádzať do záberu jeden rad zrn a v každom časovom okamžiku je v zábere jedno brúsiace zrno. Takto vzniká v danom okamihu jeden impulz, ktorý zapíše oscilograf.

K dynamickým metódam možno priradiť aj metódy merania počtu zrn po ukončení brúsenia. Sem patrí napr. fotoelektrická metóda. Zakladá sa na skutočnosti, že pri brúsení na vrcholkoch zrn sa tvoria plôšky opotrebenia, akvidištantné povrchu kotúča. Svetelný lúč prechádza od zdroja cez optický systém na povrch pomaly sa otáčajúceho kotúča. Odtiaľ sa

odráža cez úzku štrbinu na fotodiódu (3, *tab. 1.2*). Podľa signálu možno určiť počet aktívnych rezných hrán, pripadajúcich na jednotku povrchu kotúča [12].

Analogicky možno určiť množstvo zrn z mikrofotografie rezu pracovného povrchu kotúča po ukončení brúsenia (4, *tab. 1.2*). Na rozdiel od iných metód metóda mikrovýbrusov dovoľuje nielen študovať dynamiku zmeny reliéfu kotúča, ale študovať aj mechanizmus zaplnenia priestoru medzi zrnami trieskou. Pozorovanie mikrovýbrusov ukazuje, že v procese brúsenia sa topografia pracovného povrchu kotúča výrazne mení.

Výsledky štúdia topografie pracovného povrchu podľa opisovanej metodiky sú do určitej miery odlišné, napriek tomu hlavný prínos je v tom, že so zväčšovaním hĺbky počet abrazívnych zrn rastie. Táto skutočnosť má veľký význam pri analýze procesu tvorenia triesky, tepelných a tepelných javov v zóne brúsenia.

1.2 Interakcia brúsiaceho a obrábaného materiálu

Pretože pracovný povrch brúsiaceho kotúča sa skladá z jednotlivých abrazívnych zrn, ktoré sú rozmiestnené v rozličných vzdialenostiach od východiskovej plochy, bude v ľubovoľnom priereze povrchu kotúča hĺbka prieniku abrazívnych zrn do obrábaného povrchu rôzna. Možno konštatovať, že charakter spolupôsobenia abrazívneho zrna s brúseným materiálom pri rovnakých podmienkach závisí od pomeru:

$$\frac{h}{r_n},$$

kde h je hĺbka prieniku zrna (hrúbka odrezávanej vrstvy),

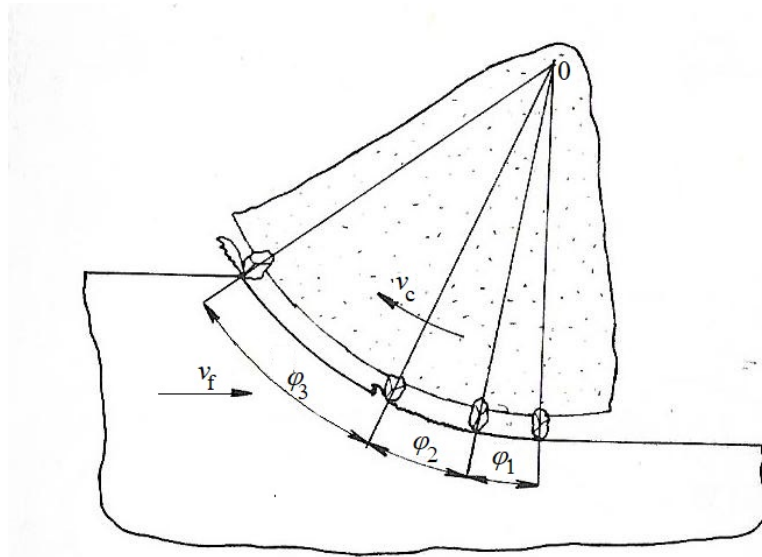
r_n – polomer zaoblenia reznej hrany brúsneho zrna.

V závislosti od veľkosti tohoto pomeru môžu vznikajú tri typy interakcie: rezanie, plastická deformácia a trenie. V prvom priblížení pri $\frac{h}{r_n} \geq 0,5$, nastáva rezanie. Plastické stláčanie

vzniká pri $\frac{h}{r_n} \geq 0,01$ a pružné stláčanie, čiže trenie abrazívneho zrna o obrábaný materiál bez

odoberania triesky vzniká pri $\frac{h}{r_n} \leq 0,01$. Každé brúsne zrno, ktoré odrezáva materiál pri

pohybe v kontaktnej zone, prechádza tromi štádiami: pružná deformácia povrchu, plastická deformácia a odoberanie triesky. Model tohoto procesu je na *obr. 1.7*.



Obr. 1.7 Schéma fáz brúsenia. φ_1 – fáza pružnej deformácie povrchu, φ_2 - fáza plastickej deformácie povrchu pred rezným klinom, φ_3 - fáza tvorenia triesky

Každé zrnó, ktoré odrezáva triesku musí prejsť prvými dvoma štádiami. Pri sklze prejde len jedným štádiom.

Množstvo zrn na pracovnom povrchu brúsiaceho kotúča, ktoré spôsobujú len pružnú deformáciu, pružné a plastické stláčanie a odoberanie triesky, závisí od viacerých faktorov: režimu brúsenia, rezného prostredia, technických charakteristík nástroja, podmienok a režimu orovnávanía.

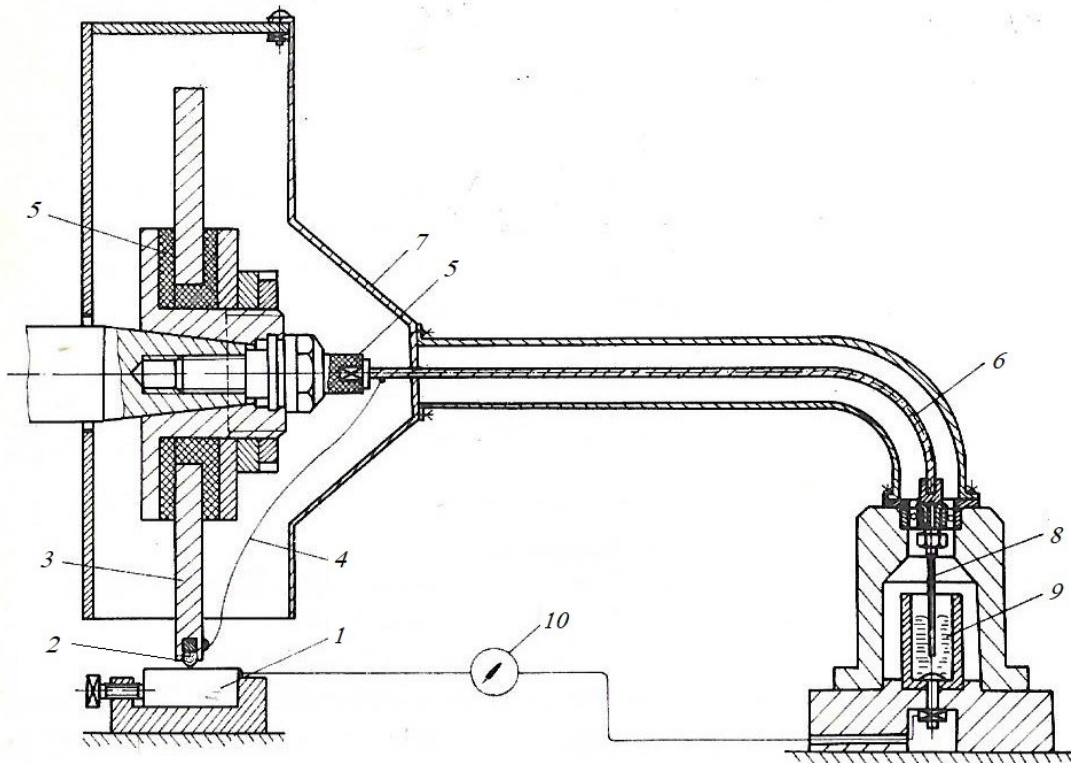
Použitie rozličných prostredí vplýva na veľkosť tohoto pomeru. Na objasnenie vplyvu prostredia sa brúsila nelegovaná oceľ jedným zrnóm z karbidu kremíka s uhlóm hrotu 90° a polomeróm zaoblenia $15 \mu\text{m}$. Rezná rýchlosť bola $35 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ a maximálna hĺbka vrezania $50 \mu\text{m}$. Kontakt trval približne 70 ms. Pri meraní prirodzeným termočlánkom sa zistilo, že teplota kontaktu na zrnách bola blízko teploty tavenia obrábaného materiálu. Na zrnách, ktoré boli vo fáze pružného a plastického stláčania, teplotu charakterizoval dynamický priebeh, pričóm rozdiel maximálnych a minimálnych hodnôt bol niekoľko desiatok až stoviek stupňov. Súčasne bol optickým mikroskopóm sledovaný tvar drážok, ktoré vznikali ako výsledok kontaktu zrna s obrobkom.

Ako rezné prostredie sa použilo CCl_4 , kyselina olejová, benzol a argón. Pri brúsení v prostredí argónu bola zóna obrábania hermeticky uzatvorená a argon bol privádzaný bezprostredne do miesta brúsenia pod tlakom.

Pri experimentoch sa registroval priebeh termoelektrickej sily. Moment dosiahnutej teploty rezania na úrovni teploty tavenia materiálu zodpovedá začiatku oddelenia triesky.

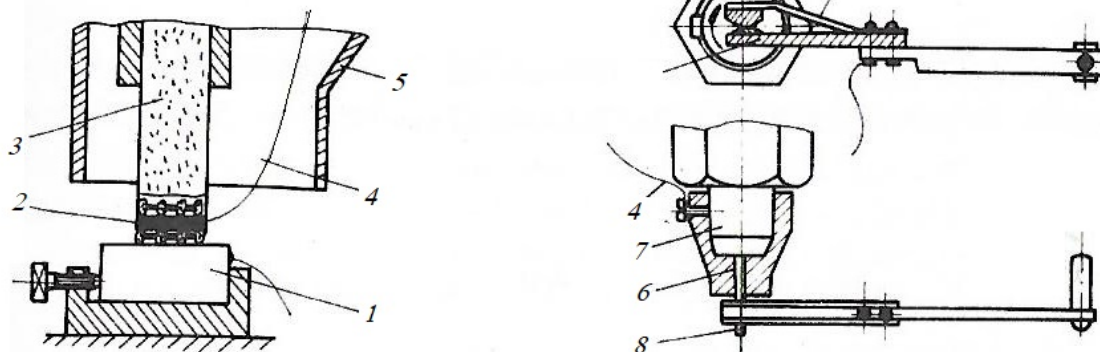
Princíp merania teploty jednotlivého brúsneho zrna je na schéme - obr. 1.8 [4].

Obrobok 1 je upnutý na stole brúsky. Brúsiace zrno 2 je zaliate kovom v kotúči 3, ktorý je odizolovaný od vretena brúsky izoláciou 5. Vodičom je ohybný kábel 6, nastrčený na tyčku 8, ktorá je uložená jedným koncom v ložisku a druhým vo vani s ortuťou 9. Termoelektrickú silu sníma milivoltmeter, alebo oscilograf 10. Podobným spôsobom sa registruje stredná integrálna teplota medzi viacerými brúsiacimi zrnami a obrobkom. Na obr. 1.9 v reálnom kotúči 3 ultrazvukom sa vytvára otvor zaliaty kovom 2 a kotúč je orovnaný na jednu veľkosť brúsiaceho zrna. Vodič 4 sa pripojí ku stopke 6 vretena 7, ukončenej tyčkou 8, ktorá sa vsúva medzi zvierky 9 a 10, pevne pripojené k stabilnej sústave.



Obr. 1.8 Schéma zariadenia na meranie teploty jednotlivého zrna.. 1 – obrobok, 2 – polovodivé brúsiace trno, 3 – kotúč, 4 – vodič, 5 – izolácia, 6 – ohybný hriadel, 7 – ochranný kryt, 8 – tyčka, 9 – ortuť, 10 – merací prístroj

Podľa obr. 1.9 sa v reálnom kotúči vytvorí ultrazvukom otvor, zaliaty kovom 2 a kotúč je orovnaný na jednu veľkosť brúsiaceho zrna. Vodič 4 sa pripojí ku stopke 6 vretena 7, ukončenej tyčkou 8, ktorá sa vsúva medzi zvierky 9 a 10, pevne spojené so stabilnou sústavou.



Obr. 1.9 Schéma merania integrálnej teploty niekoľkých zrn a – snímanie napätia z rotujúceho vretena: 1 – obrobok, 2 – kov, 3 – brúsiaci kotúč, 4 – vodič, 5 – kryt, b – snímač, 6 – stopka, 7 – ukončenie hriadeľa, 8 – tyčka, 9, 10 – zvierky

V tab. 1.4 sú výsledky merania z oscilogramu. Z jej analýzy vyplýva, že čas vrezania pri rovnakých podmienkach závisí od prostredia. Špeciálne miesto má prostredie CCl_4 pri použití ktorého sa netvorí trieska, po celej dĺžke dráhy rezania sa prakticky stláča materiál v drážke a vytvárajú sa nálepy na bokoch drážky. Z toho vyplýva, že v tomto prípade je pomer $\frac{h}{r_n}$ oveľa väčší ako 0,5. Preto celý čas kontaktu nemožno na oscilograme pozorovať teplotné rázy, ktoré sú charakteristické pre trenie zrna o brúsený materiál bez odoberania triesky.

Pri použití kyseliny olejovej v podiele dráhy 65% sa odtláča materiál a až po dosiahnutí potrebnej hĺbky sa trieska oddeľuje. Pri rezaní na vzduchu sa úsek vrezania skrátil na 30%. Najkratší úsek vrezania vznikol pri použití benzolu.

Pomer intervalov vniku zrna do materiálu pri brúsení v rôznych prostrediach. Tab. 1.4

Prostredie	Čas vrezania		Čas rezania	
	ms	%	ms	%
Chlorid uhličitý	70	100	0	0
Kyselina olejová	45	64	25	36
Sulfofrezol	32	46	38	54
Vzduch	22	31	48	69
Argón	8-10	14	60	86
Benzol	0-5	4	65-70	97

Výsledky skúšok ukázali, že na veľkosť pomeru $\frac{h}{r_n}$, pri ktorom začína oddeľovanie materiálu, veľmi vplyvajú vlastnosti prostredia. Pri použití efektívnych prostredí, ktorými sa znižuje trenie, tento pomer rastie. Tým sa zodpovedajúco mení aj mechanizmus interakcie brúsiaceho kotúča s obrábaným materiálom.

Pri použití efektívnych prostredí bude značná časť abrazívnych zŕn na pracovnom povrchu brúsiaceho kotúča pracovať v podmienkach pružného stláčania materiálu. Pri ďalšom premiestňovaní zŕn pozdĺž dráhy kontaktu a pri zväčšovaní hĺbky vrezania na take hodnoty, pri ktorých je $\frac{h}{r_e}$ hraničné, začína sa tvoriť trieska. Pri ďalšom premiestňovaní zŕn pozdĺž dráhy kontaktu stále viac zŕn umiestnených nižšie, ako je periféria kotúča, prichádza do kontaktu s obrábaným materiálom. Tým sa zmenšujú vzdialenosti medzi aktívnymi reznými hranami a zmenšuje sa hrúbka triesky. V tomto prípade určitá časť zŕn, pre ktoré vznikne nepriantivý pomer $\frac{h}{r_n}$, prestane odoberať triesku a znova začína plasticky vytláčať obrábaný materiál. Takto pri použití efektívnych prostredí, pri ostatných rovnakých podmienkach sa zmenšuje úber kovu a zmenšuje sa vývoj tepla v zóne kontaktu.

Pri použití tzv. neefektívnych prostredí, keď je koeficient trenia v kontakte veľký, čas rezania je minimálny a tvorenie triesky začína už na samom začiatku kontaktu zrna s materiálom. Pri ďalšom premiestňovaní zŕn, keď prichádzajú do kontaktu s materiálom ďalšie zrná, stáva sa prechod od rezania k vytláčaniu menej pravdepodobný. Pri použití neefektívnych prostredí brúsenie charakterizuje vysoký merný úber materiálu.

Veľkosť polomeru zaoblenia rezných hrán brúsiacich zrn závisí od fyzikálno-mechanických vlastností abrazívnych materiálov a technológie výroby brúsiva. Sledovaním tohto procesu zaoberalo viacero prác [7], [11], [12] v ktorých sa študovala geometria brúsiacich zrn. Zistilo sa, že polomer zaoblenia brúsiacich zrn klesá zo 100 μm na 0,7 μm , pri znížení zrnitosti z 25 na 28. Osobitne malými polomermi sa vyznačujú diamantové zrná, pri ktorých sa dosahujú hodnoty $r_n = 2\text{-}10 \mu\text{m}$.

Treba poznamenať, že ak v zóne brúsenia prebieha ohrev odoberanej vrstvy na vysoké teploty, veľkosť pomeru $\frac{h}{r_n}$, pri ktorom sa začína tvoriť trieska, sa môže zodpovedajúco znížiť pri zmene podmienok trenia v kontakte.

Ohrev obrábaného materiálu v procese brúsenia musí vplývať na charakter medzi abrazívnym zrnom a obrábaným materiálom.

Štúdium charakteru kontaktu pri malých rezných rýchlostiach ukázalo, že medzi trecími plochami prebieha miestna adhézia – vznikajú adhézne súchyty. Pri periodickom súchyte a odrezávaní elementárnych častíc medzi trieskou a čelom, medzi obrábaným materiálom a chrbtom rezného nástroja sa vytvárajú póry.

Vznik bodového kontaktu pri malých rezných rýchlostiach vytvára podmienky na vnikanie plynov a kvapaliny do trecej zóny, a tým sa vytvárajú absorbné filmy na povrchu nástroja. Pri vysokých rezných rýchlostiach sa charakter kontaktu prudko merní. Metalografické štúdiá koreňov trieok ukazuje, že pri vysokých rezných rýchlostiach, keď v dôsledku ohrevu tvrdosť kontaktných vrstiev klesá sa zodpovedajúce časti plochy kontaktu v dôsledku normálnych tlakov sa zaplnia mikronerovnosti nástroja materiálom, ktorý je v plastickom stave. Vzniká najmä v okolí reznej hrany, kde sú normálne tlaky maximálne. V mieste, kde trieska opúšťa čelo nástroja, veľkosť normálneho tlaku je menšia akokritická a kontakt sa mení na bodový.

V podmienkach, keď na veľkej časti nominálnej plochy kontaktu triesky s čelom zrna vzniká plošný kontakt, process rezania charakterizuje rad špecifik. Preniknutie plynov a kvapalín do zóny trenia je sťažené, preto nemôžu vznikáť absorbné filmy oxidov a plynov, trine prebieha medzi chemicky čistými povrchmi a podmienky kontaktného trenia zodpovedajú treniu vo vákuu.

Pri brúsení závisí charakter kontaktu medzi aktívnymi plochami zrn a obrábaným materiálom od charakteru vzájomnej interakcie. Štúdium zóny kontaktu medzi brúsiacimi zrnami a obrábaným materiálom metalografickým mikroskopom na vzorkách získaných

zastavením procesu brúsenia ukázalo, že medzi zrnami a obrábaným materiálom pri veľkých tlakoch a teplotách vzniká plošný kontakt. Pokým sú to abrazívne zrná, ktoré vykonávajú plastickú deformáciu a trenie, z veľkej časti charakter kontaktu je bodový.

Z analýzy vyplýva, že mechanizmus interakcie abrazívnych zrn brúsiaceho kotúča a obrábaný materiál pri brúsení závisí od mnohých faktorov. Medzi nich dôležitú úlohu má hrúbka zrnou odrezávanej vrstvy.

Väčšina prác venovaných štúdiu brúsenia urobili sa pokusy opísať základné zákonitosti pomocou hrúbky odrezávanej vrstvy jedným zrnom (h_z). Pod touto hrúbkou sa rozumie vzdialenosť v smere normály k brúsenému povrchu, medzi za sebou nasledujúcimi aktívnymi hranami abrazívnych zrn, umiestnených vo vzdialenosti L_s .

Pri zväčšovaní hĺbky rezu vstupuje do kontaktu väčšie množstvo abrazívnych zrn, a tým sa znižuje vzdialenosť medzi zrnami a znižuje sa hrúbka triesky. Okrem toho sa pri brúsení modifikuje aj východisková topografia brúsiaceho kotúča. Predikcia týchto zmien nie je ešte v súčasnosti možná. V dôsledku toho maximálnu hrúbku triesky nemožno použiť na opísanie parametrov procesu brúsenia vhodných pre prax.

V súvislosti s tým sa hľadal taký parameter, ktorý možno ľahko identifikovať a má koreláciu so základnými parametrami brúsenia. Práce v oblasti výskumu brúsenia viedli k záveru, že vhodným parametrom, ktorým možno charakterizovať základné parametre brúsenia, je ekvivalentná hrúbka odrezávanej vrstvy h_e .

Fyzikálnu podstatu tohto parametra možno objasniť zo schémy uvedenej na *obr. 1.10*. Predpokladajme, že sa za čas τ odbrúsi obrábaný materiál hrúbky a_p , šírky B a dĺžky $v_o \cdot \tau$. Jeho objem bude: $a_p \cdot B \cdot v_o \cdot \tau$.

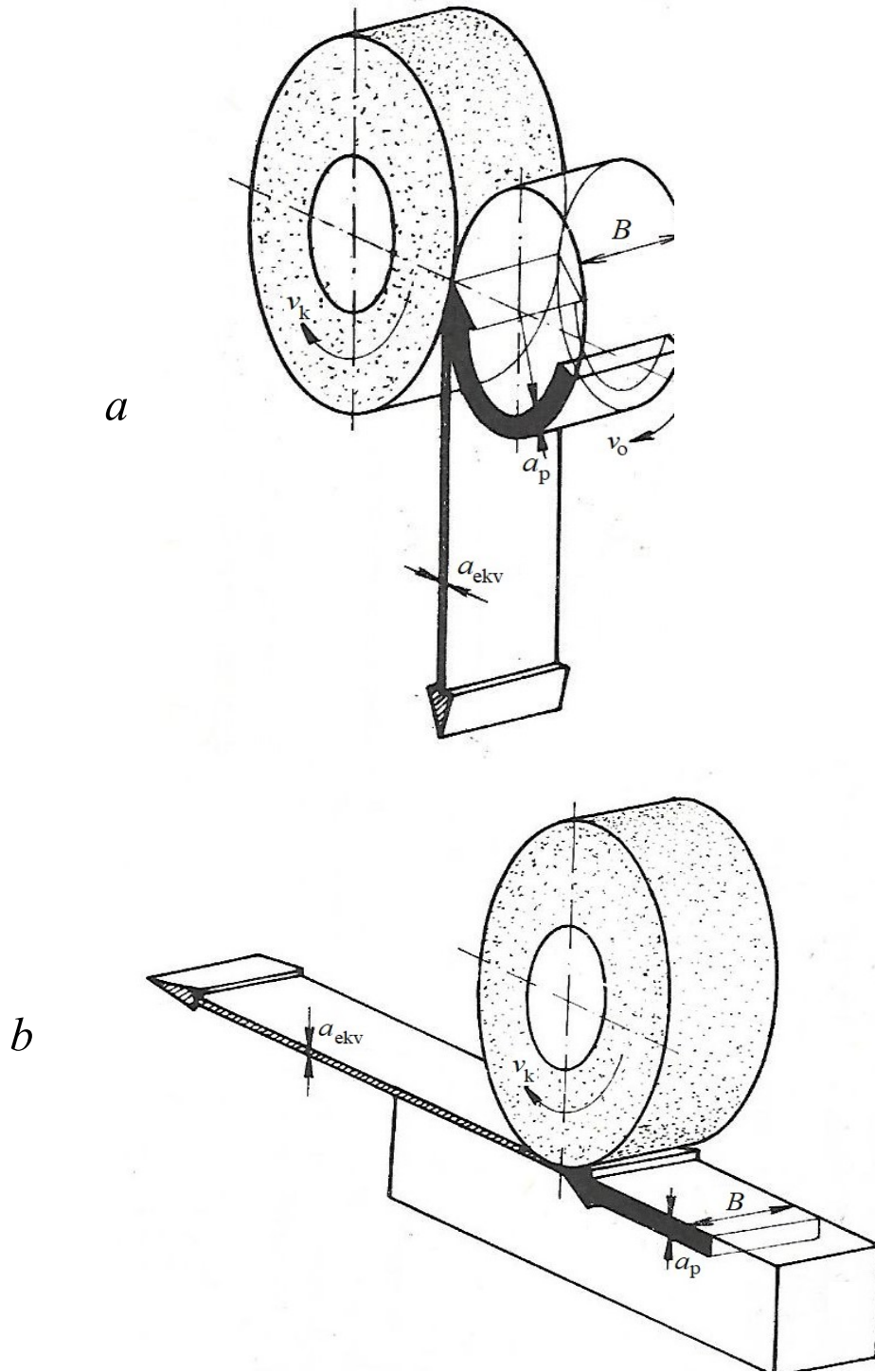
Rovnaký objem materiálu rovnomerne rozvineme po povrchu kotúča, jeho dĺžka za čas τ bude $v_k \cdot \tau$. Pritom hrúbku tejto vrstvy označme h_e .

Pretože obidva uvedené objemy sú rovnaké, platí:

$$a_e \cdot B \cdot \tau \cdot v_k = a_p \cdot B \cdot v_o \cdot \tau \Rightarrow$$

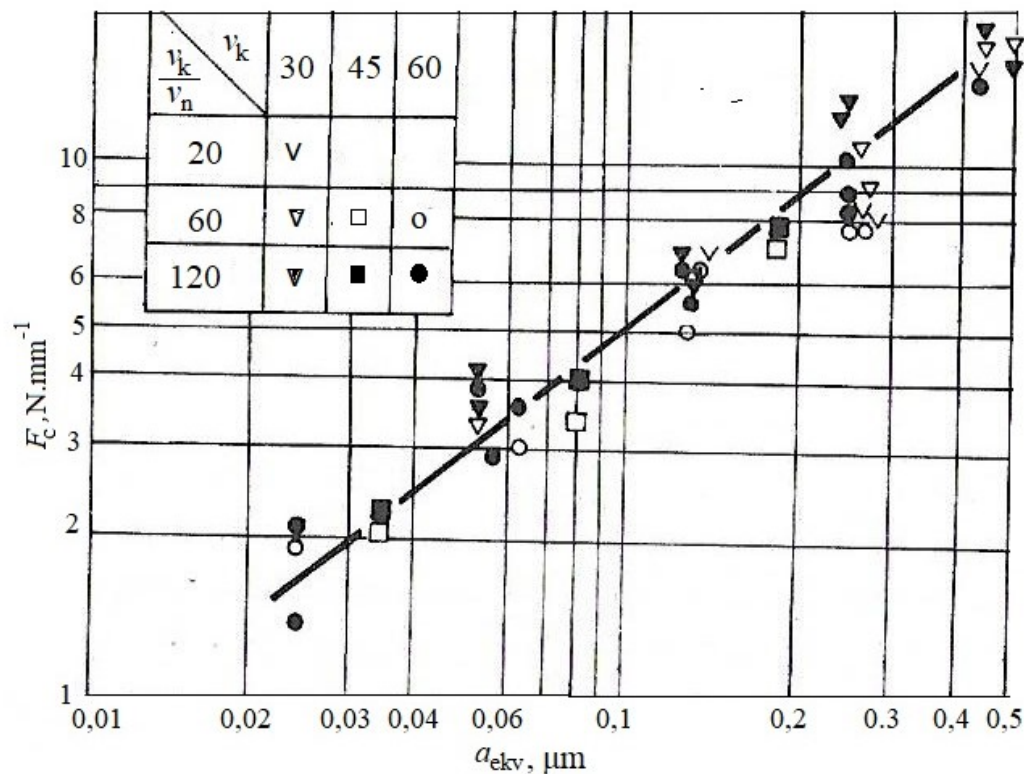
$$a_e = a_p \cdot \frac{v_o}{v_k}. \quad (1.3)$$

Ekvivalentnú hrúbku odrezávanej vrstvy si možno predstaviť ako súčet všetkých okamžitých hrúbok triesok v ľubovoľnom priereze zóna kontaktu.



Obr. 1.10 Ekvivalentná hrúbka odrezávanej vrstvy, *a* – pri vonkajšom valcovom brúsení, *b* – pri plošnom brúsení

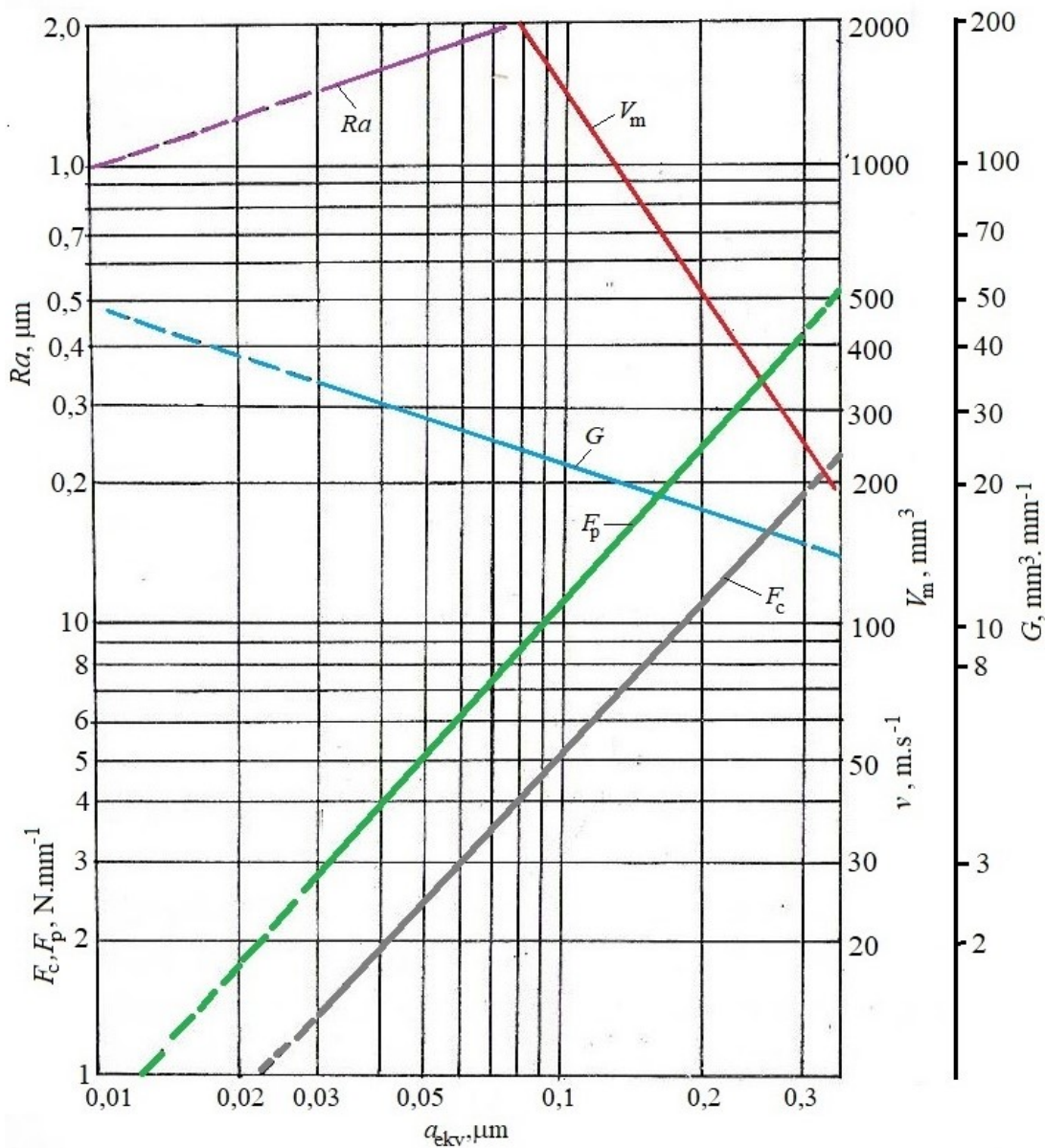
Výsledky merania závislosti tangenciálnej reznej sily, získané na rozličných pracoviskách, ktoré pracujú v skupine pre brúsenie CIRP, sú v dvojitej logaritmickej súradnicovej sústave vynesené do jedného grafu (obr. 1.11).



Obr. 1.11 Závislosť tangenciálnej reznej sily pri brúsení od ekvivalentnej hrúbky odrezávanej vrstvy [16]

Vidno, že v širokom rozsahu reznej rýchlosti a pomerov rýchlosti kotúča a obrobku sa prejavuje pomerne presná závislosť medzi tangenciálnou silou a ekvivalentnou hrúbkou triesky. Tým možno urobiť záver, že ekvivalentnú hrúbku odrezávanej vrstvy ako nezávislú premennú možno použiť ako vstupný parameter na určenie základných závislostí procesu brúsenia.

Vo všeobecnom tvare závislosť medzi ekvivalentnou hrúbkou odrezávanej vrstvy (hlbkou rezu), tangenciálnou a radiálnou reznou silou, kvalitou obrobeného povrchu, koeficientom brúsenia a trvanlivosťou brúsneho kotúča je v logaritmickej sieti na obr. 1.12.



Obr. 1.12 Závislosť tangenciálnej (F_c) a radiálnej (F_p) reznej sily, maximálnej výšky nerovnosti povrchu Rz , koeficientu brúsenia G a objemu odrezávanej vrstvy medzi dvoma orovnávaniami V_m , od ekvivalentnej hrúbky odrezávanej vrstvy [15]

Pri experimentálnych skúškach boli zohľadnené fyzikálno-mechanické vlastnosti obrábaného materiálu, základné technické charakteristiky abrazívneho nástroja, rozmery

obrobku a brúsneho kotúča, objem odrezávanej vrstvy, podmienky chladenia, podmienky orovnávania brúsneho kotúča, tuhosť sústavy obrábania.

Ako vyplýva z obr. 1.12, majú v logaritmickvej súradnicovej sústave všetky závislosti priamkový priebeh. Preto ich možno opísať jednoduchými vzťahmi:

- tangenciálna rezná sila: $F_c = F_1 \cdot a_{\text{ekv}}^f$,
 - radiálna rezná sila: $F_p = \frac{F_1}{\mu} \cdot a_{\text{ekv}}^f$, (1.4)
 - mikronerovnosť obrobenej plochy: $Ra = R_1 \cdot a_{\text{ekv}}^r$,
 - koeficient brúsenia: $G = G_1 \cdot a_{\text{ekv}}^g$
 - trvanlivosť kotúča: $V_m = V_1 \cdot a_{\text{ekv}}^v$.
- kde f , r , g , v sú odpovedajúce koeficienty, určené podľa výsledkov experimentálnych skúšok.

Tieto zovšeobecnené vzťahy majú dôležitý praktický význam. Možno nimi určiť optimálne pracovné režimy brúsenia na danom stroji. Dôležité je aj to, že použitie ekvivalentnej hrúbky triesky ako fundamentálneho parametra dovoľuje zovšeobecniť výsledky experimentálnych skúšok, vykonaných na rôznych pracoviskách, klasifikáciu, analýzu a štatistické spracovanie údajov, vytvorených v rozličných strojárskych prevádzkach.

Ďalšie úlohy v tomto smere je potrebné orientovať na štúdium fyzikálnej podstaty získaných zákonitostí a nájdenie vzťahu medzi ekvivalentnou hrúbkou triesky a mechanizmom opotrebenia brúsneho kotúča, teplotnými a tepelnými javmi v zóne brúsenia, reznými silami, tvorbou triesky a obrobeneho povrchu.

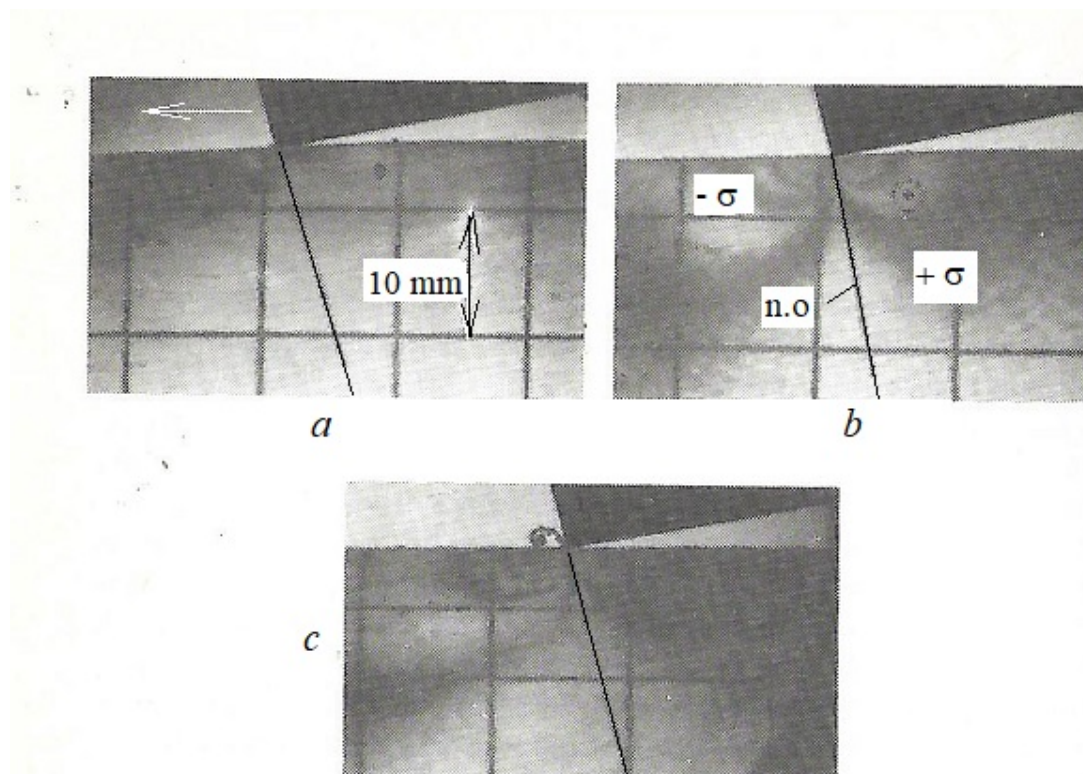
1.3 Tvorenie triesky pri brúsení

Osobitosti topografie povrchu brúsneho kotúča, zmena rozmerov a geometrie brúsiacich zrn, premenlivá hrúbka odrezávanej vrstvy, ohrev obrábaného materiálu v zóne brúsenia sa prejavujú v procese tvorenia triesky pri brúsení.

Spoľahlivú informáciu o špecifikách procesu tvorenia triesky pri brúsení možno získať len experimentálne. Spoľahlivou metódou, ktorá umožňuje detailnejšiu identifikáciu javov tvorenia triesky je fixácia zóny rezania „okamžitým“ zastavením brúsenia. V minulosti bolo vyvinutých viac metód, ktoré zabezpečovali fixáciu zóny tvorenia triesky na pri klasických

metódach obrábania nástrojmi s definovanou geometriou (sústruženie, frézovanie...). [13]. Boli založené na vypnutí obrábacieho stroja, krehkom porušení nástroja vo smere reznej rýchlosti, zastavení rotácie obrobku tvrdým nárazom na prekážku. Všetky boli postavené na vedomom zanedbaní zotrvačnosti obrobku, alebo nástroja v procese prerušenia rezu. V žiadnom prípade nedošlo k „okamžitému“ zastaveniu procesu. Ich aplikácia na proces brúsenia je problematická, pretože pri brúsení sú rezné rýchlosti rádovo vyššie. Podľa zákonov mechaniky teoreticky nie je možné okamžite zastaviť pohyb predmetu, ktorý je v pohybe, zvlášť pri tak vysokých rýchlostiach. Preto mnohí autori predkladali požiadavku vyvinúť metódu fixácie zóny tvorenia triesky, vhodnú pre rýchly proces brúsenia [9], [12], [15].

Na objasnenie mechanizmu tvorenia triesky pri brúsení môže čiastočne pomôcť sledovanie napätia, ktoré vznikajú pod brúseným povrchom. Možno ich čiastočne identifikovať modelovaním procesu, napr. metódami fotoelasticimetrie. Na *obr. 1.13* vidno rozloženie napätí v pružnej oblasti pod povrchom pri modelovaní troch fáz brúsenia, definovaných na *obr. 1.7*.



Obr. 1.13 Napätia pod povrchom pri modelovom pôsobení brúsiaceho zrna na povrch obrobku. *a* – fáza pružnej deformácie, *b* – fáza plastického stlačovania, *c* – fáza tvorenia triesky, *n.o* – neutrálna os (bez napätia)

Vidno, že poloha neutrálnej osi sa v podstate nemení, mení sa veľkosť napätia. Pred rezným klinom je pole tlakových napätí, ktoré v prvých fázach vedú k pružnej (a) a následne plastickej (b) deformácii materiálu. V poslednej fáze vzniká trieska (c).

Treba zdôrazniť, že na modeli je brúsne zrno imitované rezným klinom s negatívnym uhlom čela. Pri reálnom brúsení je geometria brúsneho zrna zložitejšia, ako bude ukázané ďalej. Okrem toho model pracuje na princípe statického zaťažovania, pri rýchlosti nástroja, blízkej nule.

Reálne brúsenie prebieha pri rezných rýchlostiach 30-100 m.s⁻¹. O zastavení tak rýchleho procesu bez skreslenia sa pokúšalo mnoho autorov. Riešenia väčšinou vyústili do zariadení, ktorými možno zastaviť proces brúsenia jedným zrnom. Po prvýkrát sa podarilo získať „korene triesok“ pri brúsení reálnym brúsiacim kotúčom rozpracovaním originálnej metódy, ktorá je založená na vytrhnutí určitej časti obrábaného materiálu vplyvom vnútorných napätí od reznej sily, pri vychádzaní nástroja zo záberu [6]. Metóda bola pôvodne vyvinutá pre metódy obrábania nástrojmi s definovanou geometriou (sústruženie, frézovanie, hobl'ovanie). Jej aplikácia na brúsenie viedla k pozoruhodným výsledkom [17], [18]. Predovšetkým sa dokázalo, že metóda nie je obmedzená reznou rýchlosťou.

Pozn.: Metóda bola ocenená zlatou medailou na svetovej výstave vynálezov a technických novinek v Bruseli (obr).



21

SALON INTERNATIONAL DES INVENTIONS ET DES PRODUITS NOUVEAUX - BRUXELLES

INTERNATIONAAL SALON VOOR UITVINDINGEN EN NIEUWE PRODUCTEN • SALÃO INTERNACIONAL DE INVENÇÕES E NOVOS PRODUTOS
INTERNATIONAL EXHIBITION OF INVENTIONS AND NEW PRODUCTS • EXPOSICIÓN INTERNACIONAL DE INVENCIÓNES Y NUEVOS PRODUCTOS
INTERNATIONALE MESSE FÜR ERFINDDUNGEN UND NEUHEITEN • SALONE INTERNAZIONALE DELLE INVENZIONI E DEI PRODOTTI NUOVI

1972

DIPLÔME

DE Médaille de Vermeil
DÉCERNÉ A M. Ing. Vasilko K. Tchecoslovaquie
POUR Nouveau procédé d'obtention
de racines de copeaux métalliques

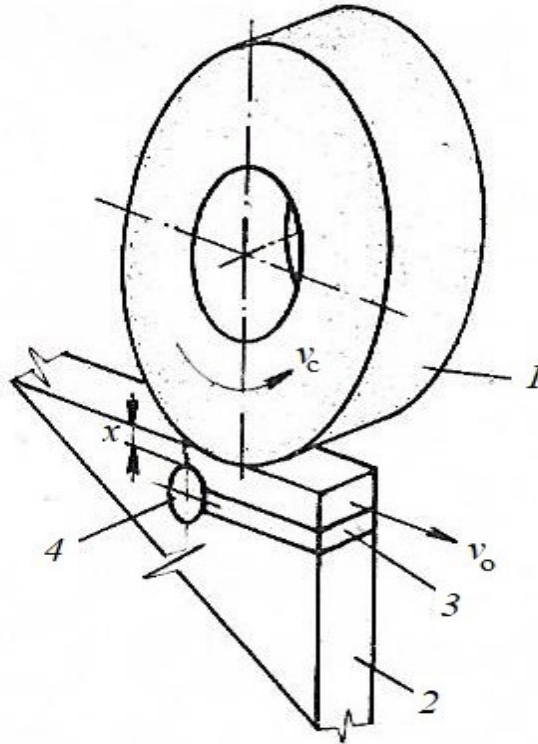
POUR LE JURY

LE PRÉSIDENT ORGANISATEUR



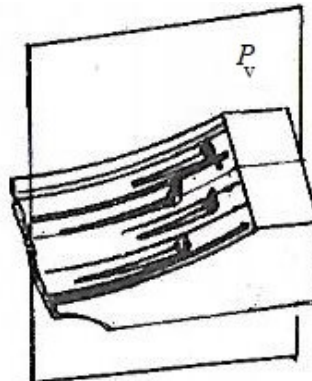
Princíp metódy spočíva v rázovom urýchlení časti obrobku na rýchlosť, prevyšujúcu reznú rýchlosť . Pri pretrhnutí elementu obrobku spolu s trieskou, podobne, ako je to pri ťahovej skúške pevnosti materiálu dôjde k prudkému vymršteniu predpätej vzorky tangenciálne voči brúsnemu kotúču. Na vzorke sa zafixuje okamžitý stav deformácie triesky a povrchu obrobku.

Princíp metódy je na obr. 1.14.



Obr. 1.14 Princíp metódy na okamžité prerušenie procesu brúsenia. 1 – brúsiaci kotúč, 2 – vzorka obrobku, 3 – podložka, 4 – čap v otvore, x – definovaná hrúbka vzorky v mieste pretrhnutia

Na obr. 1.15 je zachytená vzorka, na ktorej sú drážky od brúsiacich zín a zárodky vznikajúcich triesok.

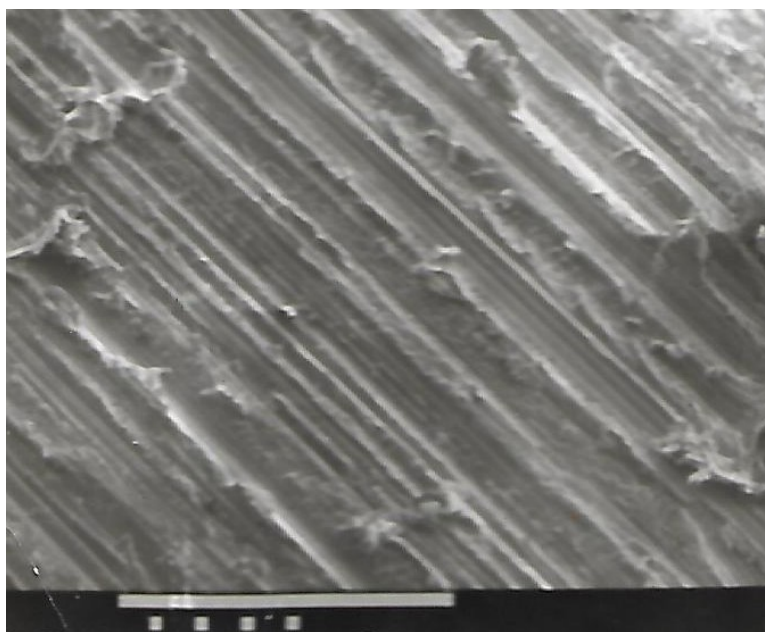


Obr. 1.15 Vzorka, vytrhnutá z obrobku. P_v – rovina metalografického rezu

Takto získané vzorky možno sledovať riadkovacím mikroskopom, kde je zviditeľnený profil povrchu s trieskami, alebo náročnejšou technikou – metalografickým rezom rovinou P_v . V oboch prípadoch možno názorne pozorovať proces plastickej deformácie v okolí brúsiaceho zrna a usudzovať o mechanizme interakcie brúsiacich zŕn a obrábaného materiálu v procese brúsenia.

1.3.1 Skenovanie brúseného povrchu

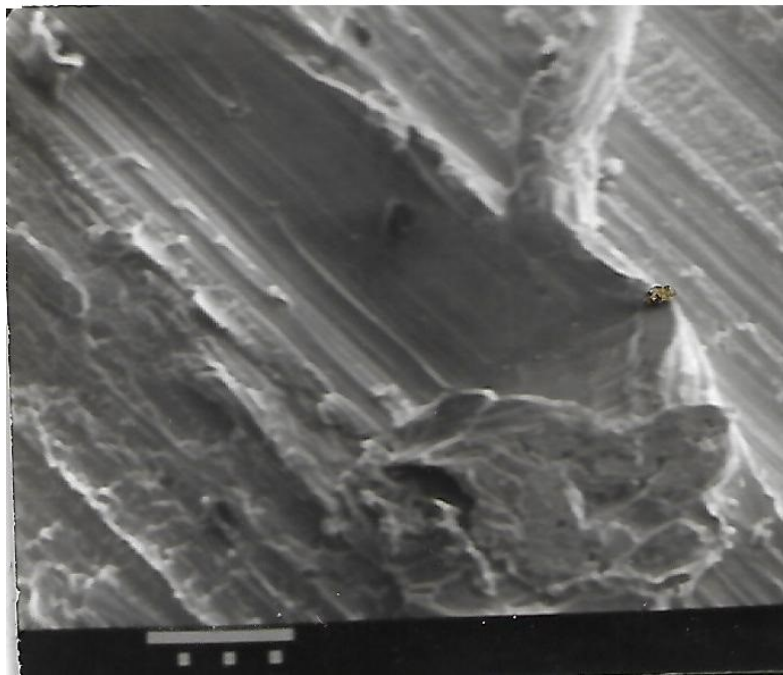
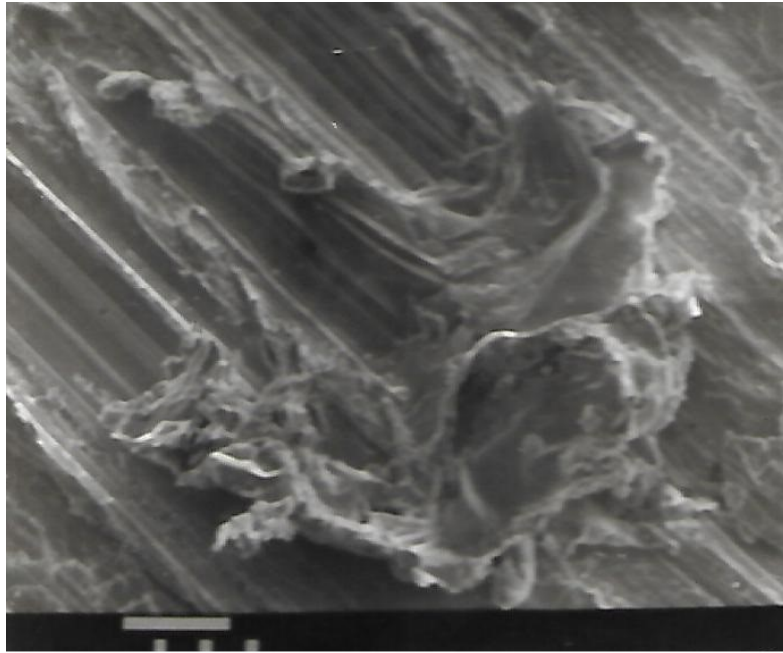
V prvej fáze bol sledovaný obrobený povrch vzoriek po brúsení. Na *obr. 1.16* je pohľad na brúsený povrch pod elektrónovým mikroskopom.



Obr. 1. 17. Celkový pohľad na brúsený povrch po zastavení procesu brúsenia. Materiál brúsneho kotúča: A99 25K 8V, obrobok: C45, rezná rýchlosť: $v_c = 30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Úsečka na fotografii je $100 \mu\text{m}$

Na povrchu obrobku možno pozorovať výraznú plastickeú deformáciu, charakteristickú vytlačaním materiálu do strán, kolmo ku smeru pohybu zrna. Výsledkom je vznik hrebienkov pozdĺž rýh. Vidno, že jednotlivé zrná sa vrezávajú do povrchu, vytvoreného predchádzajúcimi zrnami, ktorého priečny teoretický profil je na *obr. 1.3*, ale je výrazne modifikovaný vytlačeným materiálom do strán.

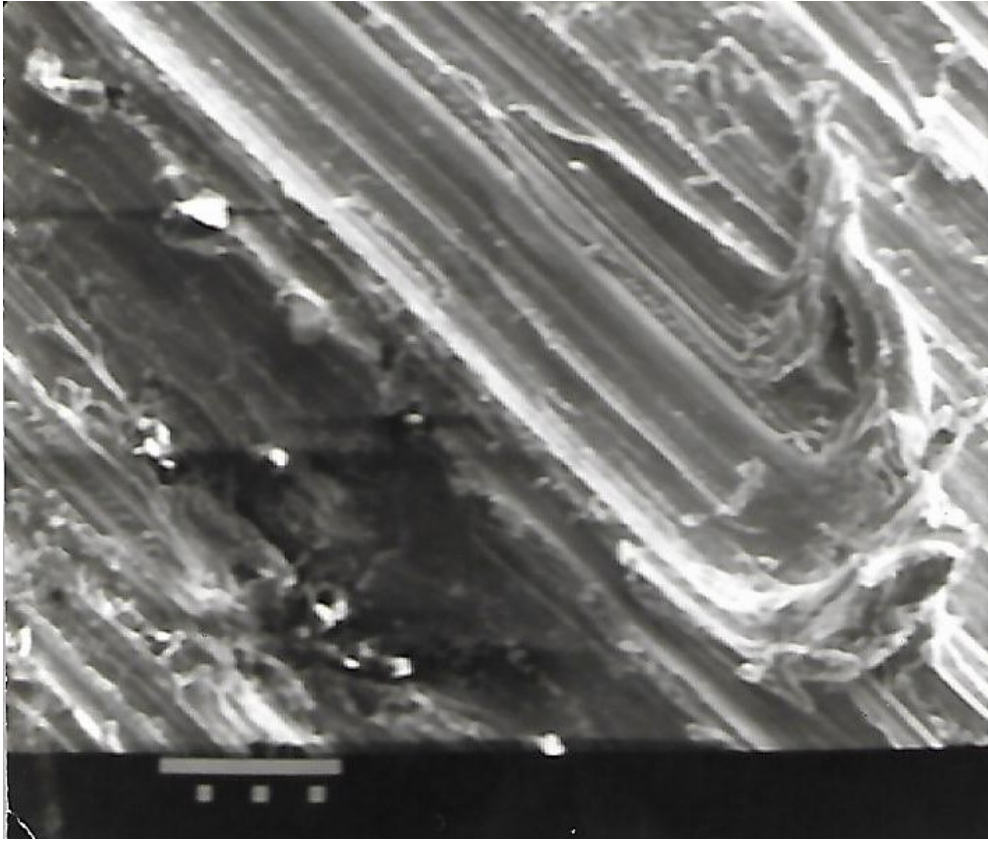
Na *obr. 1.17* sú zväčšené pohľady na oblasť bezprostredne pred brúsnymi zrnami.



Obr. 1.17 Zväčšené pohľady na konce dráhy brúsnych zrn na povrchu obrobku.

Vidno, že trieska odchádza rôznymi smermi, podľa konkrétnej orientácie čelných plôch brúsneho zrna. Od jedného brúsneho zrna môže teda vzniknúť viac triesok, ktoré odchádzajú rôznymi smermi.

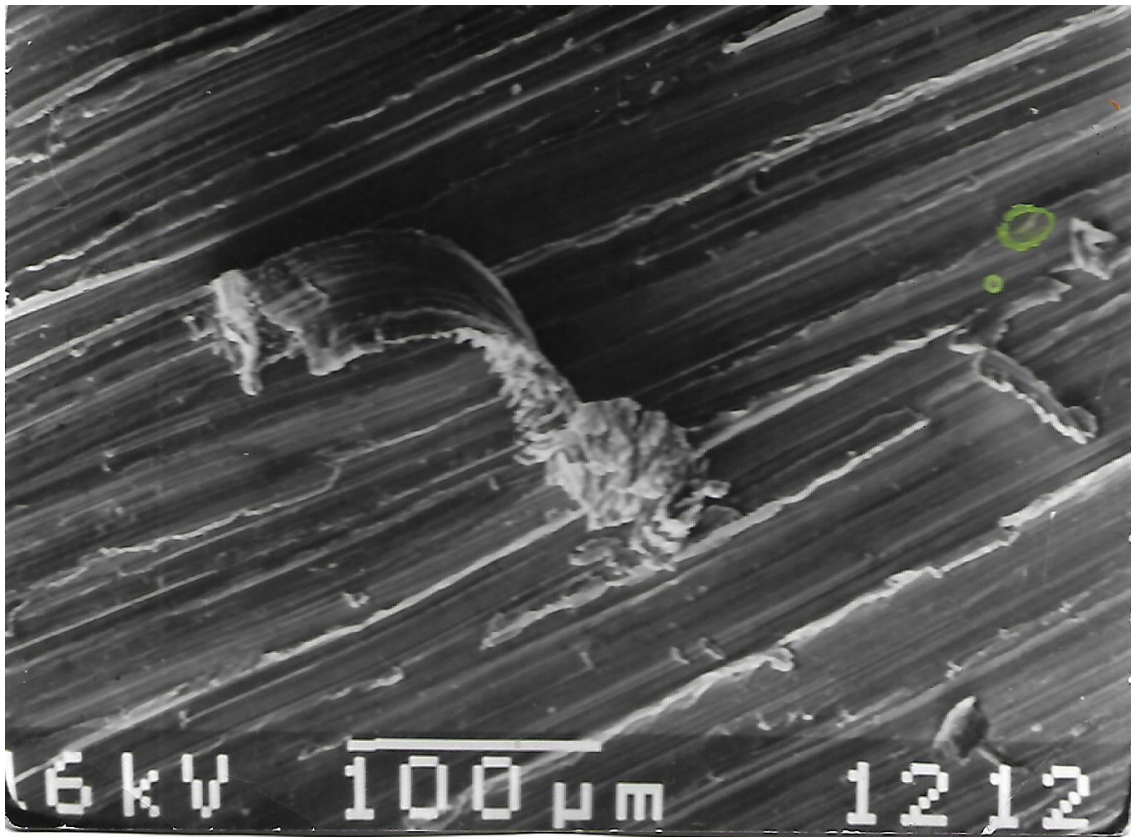
Na *obr. 1.18* je prípad vytvárania triesky zrnom, ktorého čelné plochy sú sklonené v jednom smere, šikmo na vektor reznej rýchlosti. Výsledkom je bočné vytváranie triesky.



Obr. 1.18 Špecifický prípad vzniku triesky od šikmo umiestneného brúsneho zrna.

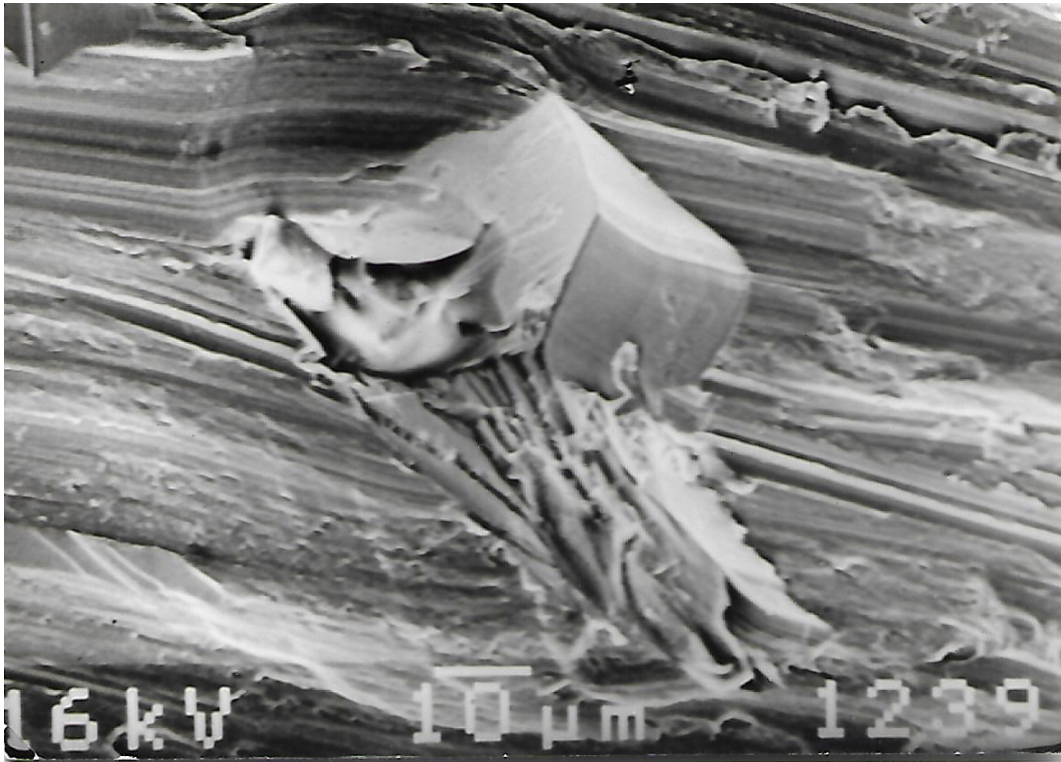
Vo všetkých prípadoch možno sledovať tvar drážok za brúsnyimi zrnami. Drážky sú hladké a v priečnom reze odpovedajú konkrétnemu umiestneniu kontaktujúcich rezných hrán brúsneho zrna.

Na *obr. 1.19* je vzácny prípad zachytenia kompletnej plynulej triesky, pri brúsení automatovej mosadze kotúčom z A99 25K 8V pri reznej rýchlosti $30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Zrejme bol pred rezným klinom voľný priestor na odchod triesky a čelo brúsneho zrna bolo kolmé na vektor reznej rýchlosti.



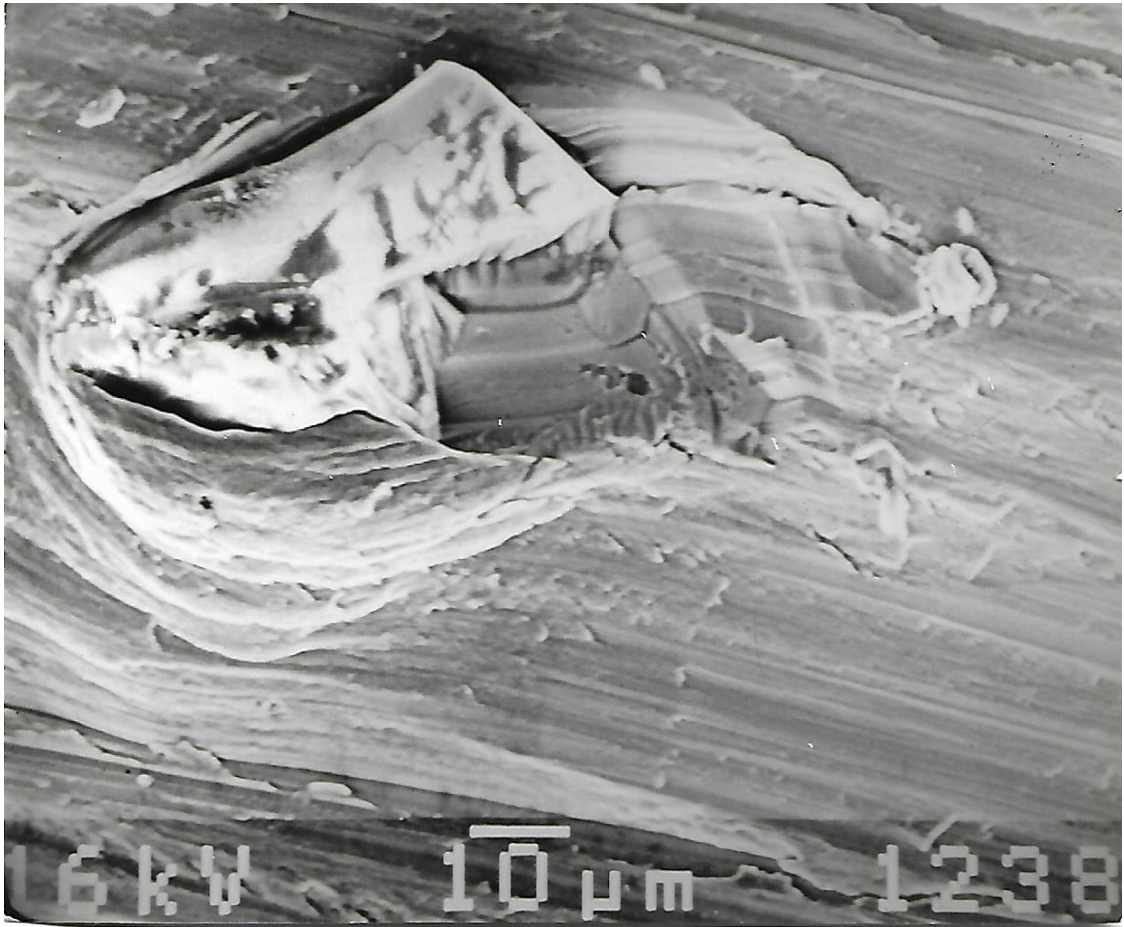
Obr. 1.19 Plynulá trieska vzniknutá pri brúsení automatovej mosadze

Na obr. 1.20 je pohľad na brúsne zrno v zábere, pri brúsení niklovej vzorky materiálu. Je vidieť, že často vznikajú zložité prípady vzniku triesok, pričom smer odchodu triesky závisí od polohy čelných plôch brúsneho zrna.



Obr. 1.20 Prípád zachyteného zrna v zábere pri brúsení niklu

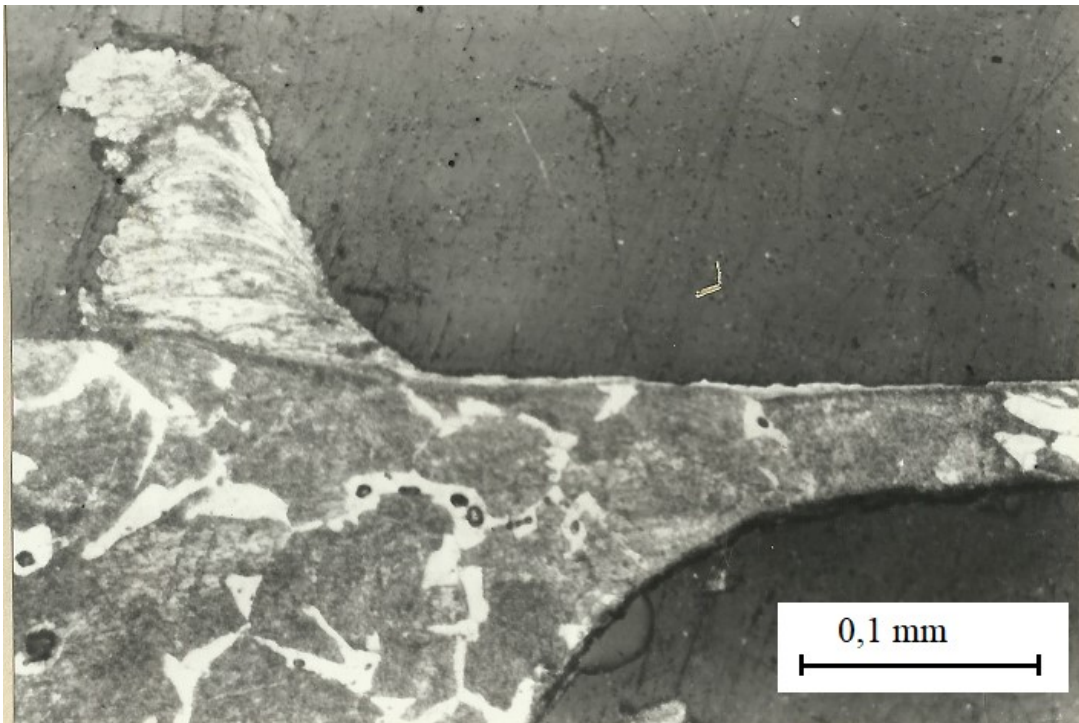
Na obr. 1.21 je iný prípad, ktorý ukazuje vylomenú časť zrna v zábere, pričom sa materiál vo forme triesky vytláča do strán okolo zrna.



Obr. 1.21 Úlomok brúsiaceho zrna z Al_2O_3 pri vytváraní rýhy na brúsenom povrchu (obrobok Ni)

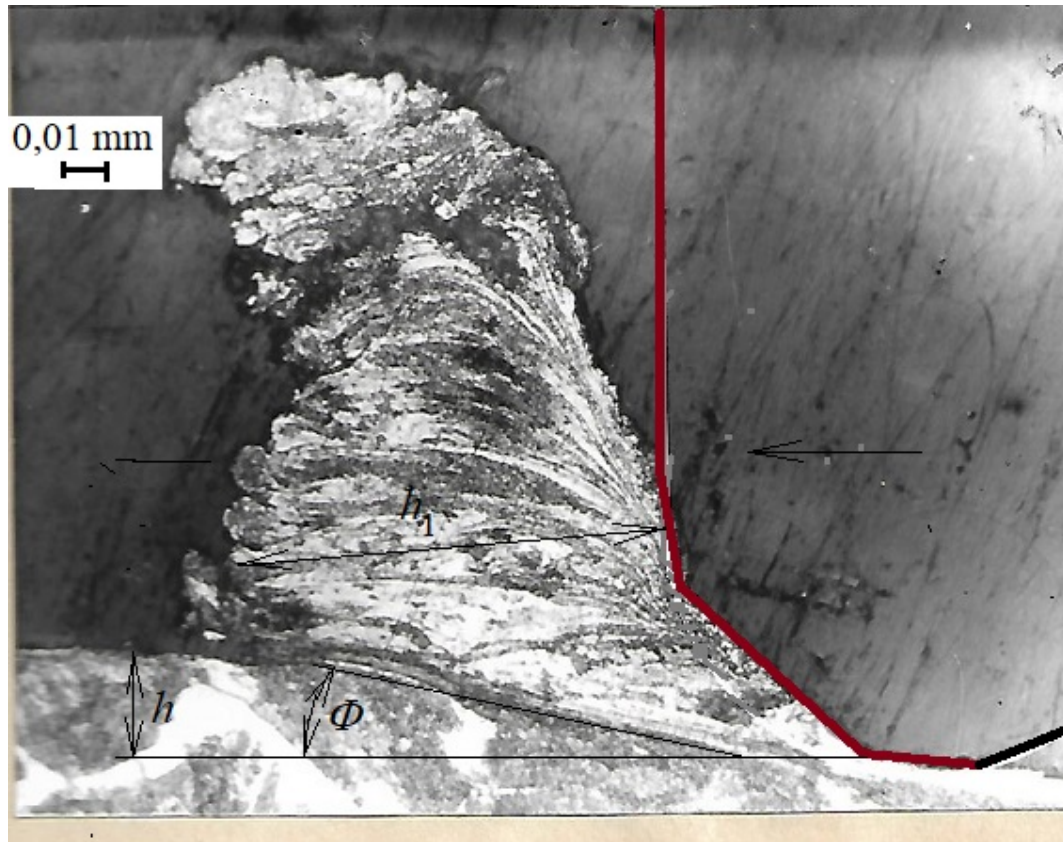
1.3.1.1 Metalografické štúdium procesu brúsenia

Ako bolo uvedené vyššie, aplikácia metódy okamžitého zastavenia procesu brúsenia je predurčená na detailné metalografické sledovanie javov vzniku triesky. Na zachytenej vzorke (obr. 1.15) je naznačená rovina metalografického rezu vzorky P_v . Miniatúrne rozmery vzoriek si vyžadujú sofistikovaný postup brúsenia leštenia, aby sme sa dostali presne do roviny rezu. Výsledok je po naleptaní ilustrovaný na obr. 1.22.



Obr. 1.22 Metalografický výbrus začiatku odtrhutej vzorky vzorky (rez rovinou P_v).
Obrábaný materiál: oceľ C45, Materiál brúsneho kotúča A99 25K 6V,
rezná rýchlosť $30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $h = 0,02 \text{ mm}$

Vzorka veľmi dobre dokumentuje charakter vznikajúcej triesky. Vidno odtlačok brúsneho zrna, jeho geometriu, najmä negatívne uhly čela, intenzívne plastické pretvorenie triesky, deformáciu a štruktúrnú transformáciu obrobeného povrchu, extrémne stlačenie triesky. Detailný pohľad na výbrus triesky je na obr. 1.23.



Obr. 1.23 Zväčšená oblasť tvorenia triesky z obr. 1. 22.

Na fotografii je naznačený predpokladaný tvar brúsneho zrna., ktoré pozostáva z viacerých rôzne orientovaných čelných plôch. Je známe, že istým kritériom intenzity plastickej deformácie triesky je parameter stlačenie triesky:

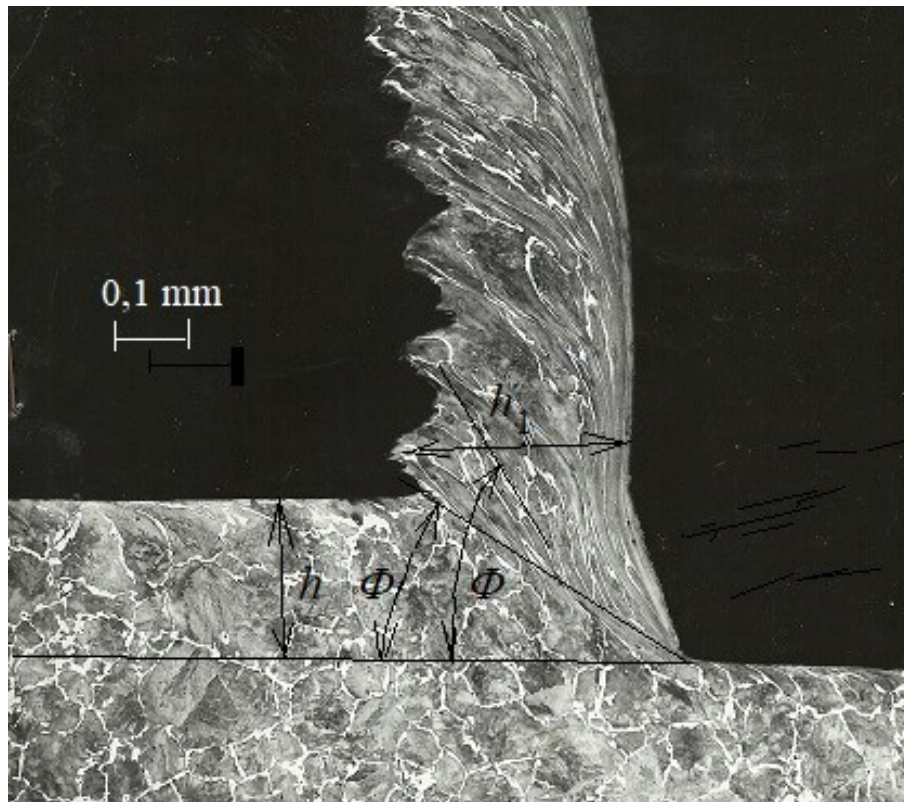
$$k = \frac{h_1}{h}, \quad (1.5)$$

kde h je hrúbka odrezávanej vrstvy, mm,

h_1 – hrúbka triesky, mm.

Ako vidno, pri brúsení je mimoriadne vysoký, v sledovanom prípade $k = 4,58$. Uhol hranice plastickej deformácie: $\Phi = 10^\circ$. Trieska má v podstate v celom priereze vláknitú štruktúru. Na brúsenom povrchu možno pozorovať bielu vrstvu, ktorá je výsledkom intenzívneho trenia medzi chrbtom zrna a obrábaným materiálom.

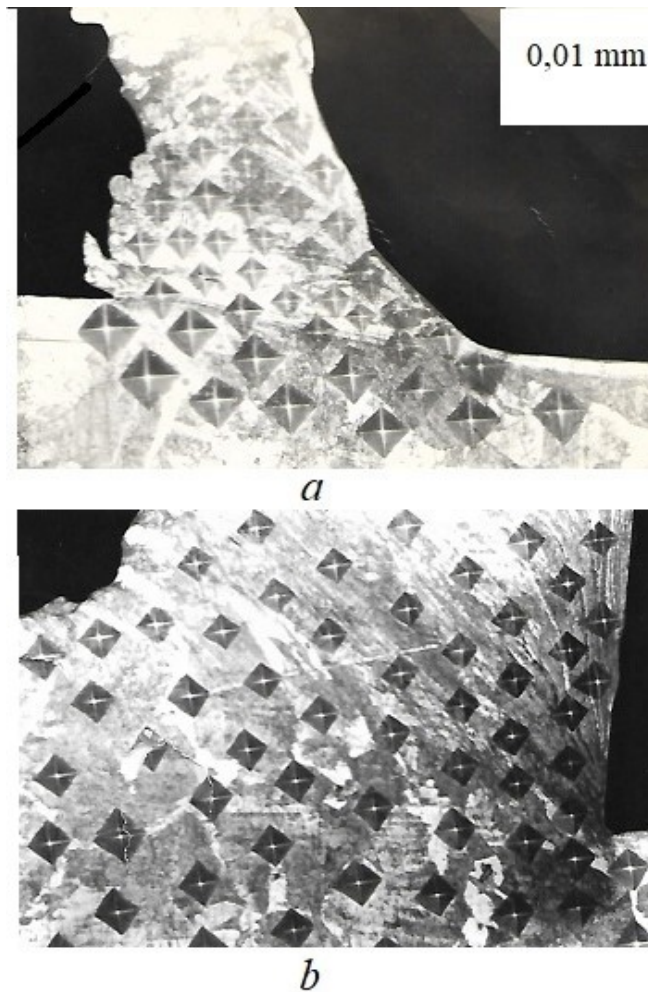
Na porovnanie je na obr. 1.24 podobná fotografia zóny tvorenia triesky pri sústružení. Geometria nástroja je upravená tak, že imituje brúsne zrna (záporná fázka na čele), rezná rýchlosť je však výrazne menšia ($120 \text{ m.min}^{-1} \equiv 2 \text{ m.s}^{-1}$).



Obr. 1.24 Zóna tvorenia triesky pri sústružení. Nástroj: SK-P20, obrobok: C45, $v_c = 120 \text{ m. min}^{-1}$, $h = 0,2 \text{ mm}$

Stlačenie triesky: $k = 1,5$, uhol hranice plastických deformácií: $\Phi = 45^\circ$. Okrem toho sa dá pri sústružení identifikovať aj uhol textúry Φ_1 , ktorý u brúsenia neexistuje, resp. splýva s uhlom hranice plastických deformácií.

Pre orientačnú identifikáciu intenzity deformácie počas obrábania, ktorá sa po vychladnutí vzoriek prejavuje ako spevnenie materiálu boli vykonané merania mikrotvrdości. Na obr. 1.25 je vizuálne porovnanie veľkosti mikropíchov pri brúsení a sústružení.

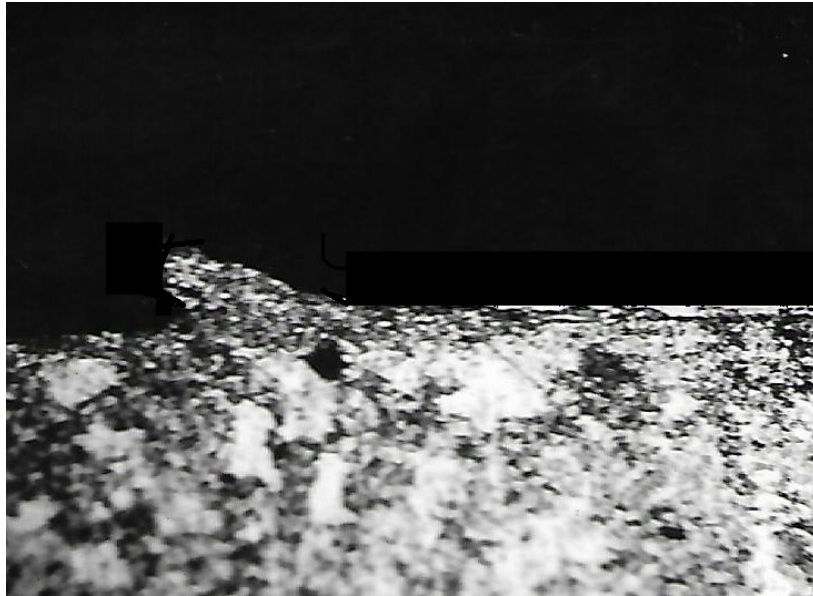


*Obr. 1.25 Vizualizácia oblastí a intenzity spevnenia triesky pri brúsení a sústružení
a – brúsenie, b- sústruženie*

Meranie názorne potvrdzuje predchádzajúce závery o vysokej intenzite plastickej deformácie a transformácii materiálu v dôsledku vysokej teploty medzi brúsnym zrnom a trieskou pri brúsení.

Vrátíme sa k *obr.1.7*. Z množstva dokumentovaných prípadov sa podarilo identifikovať tvar „koreňov triesok“ vo všetkých uvedených fázach záberu zrna s materiálom .

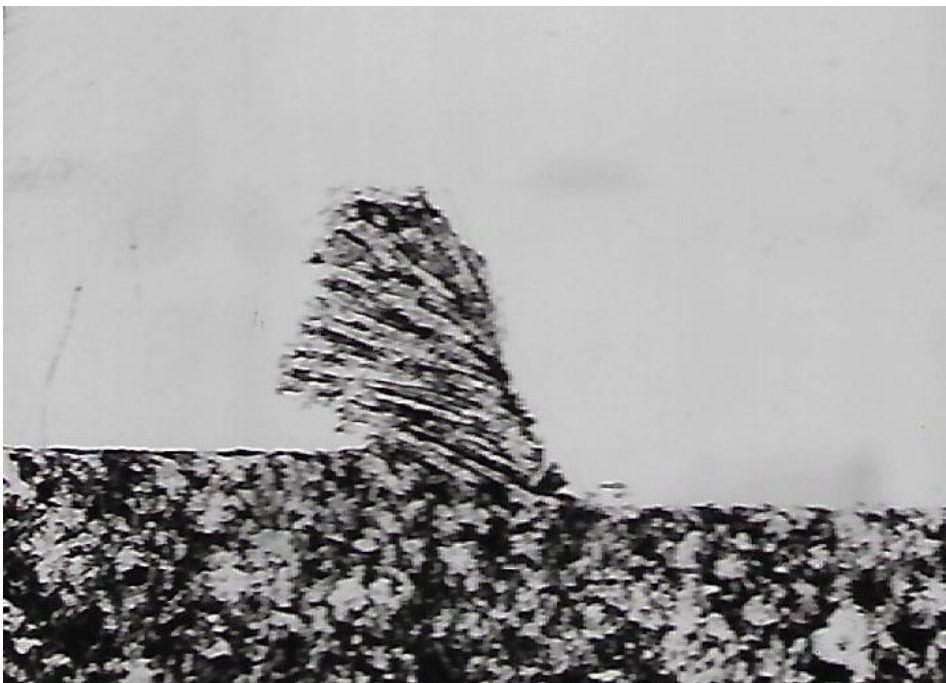
Na *obr. 1.26* je vytlačený materiál na konci fázy φ_1 . Nie je ešte viditeľná textúra, kov je deformovaný, štruktúrne sa nelíši od základného materiálu a za ním je náznak intenzívneho deformačného spevnenia vo forme bielej vrstvy.



Obr. 1.26 Pohľad na proces vytvárania deformačného výstupku na obrábanej ploche v prvej fáze brúsenia

Výstupok na povrchu, ako zdroj budúcej triesky je dôsledkom intenzívneho trenia brúsneho zrna o obrábaný povrch obrobku

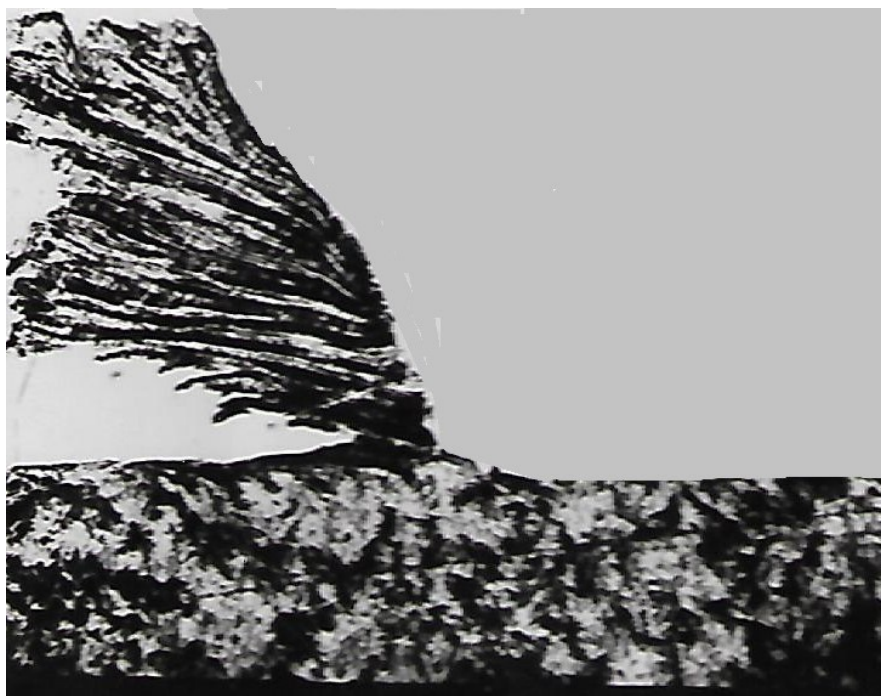
Na *obr. 1.27* je súvislá trieska, vznikajúca vo fáze φ_2 .



Obr. 1.27 Plynulá trieska z druhej fázy brúsenia.

Vidno intenzívnu deformáciu, zaoblenie vlákien kovu v blízkosti brúsneho zrna, uhol textúry, totožný s uhlom hranice plastickej deformácie. Možno teda konštatovať, že so zvyšovaním reznej rýchlosti rast hrúbky triesky značne prevyšuje hrúbku odrezávanej vrstvy. Možno to považovať za charakteristický prípad plynulého brúsenia. Obrobený povrch je lineárny, je vidno zaobľovanie zŕn na obrobenom pri zväčšovaní uhla čela do záporných hodnôt sa uhol hranice plastickej deformácie φ približuje uhlu textúry φ_1 , až sa oba uhly ako výsledok trenia chrbta brúsneho zrna o obrobenú plochu stotožnia. Preto pri brúsení sa pozoruje iba jeden smer, ktorý určuje pohyb vlákien kovu v trieske.

Na fotografii výbrusu triesky z poslednej fáze kontaktu brúsneho zrna s obrobenou plochou – obr. 1.28 je súvislá, zužujúca sa trieska. Jej hrúbka sa náhle mení z extrémnej na nulovú. Je to vzácny prípad, ktorý zachycuje ukončenie kontaktu triesky so zrnom brúsiva, po ktorom nasleduje vymrštenie vzniknutej triesky do okolia.

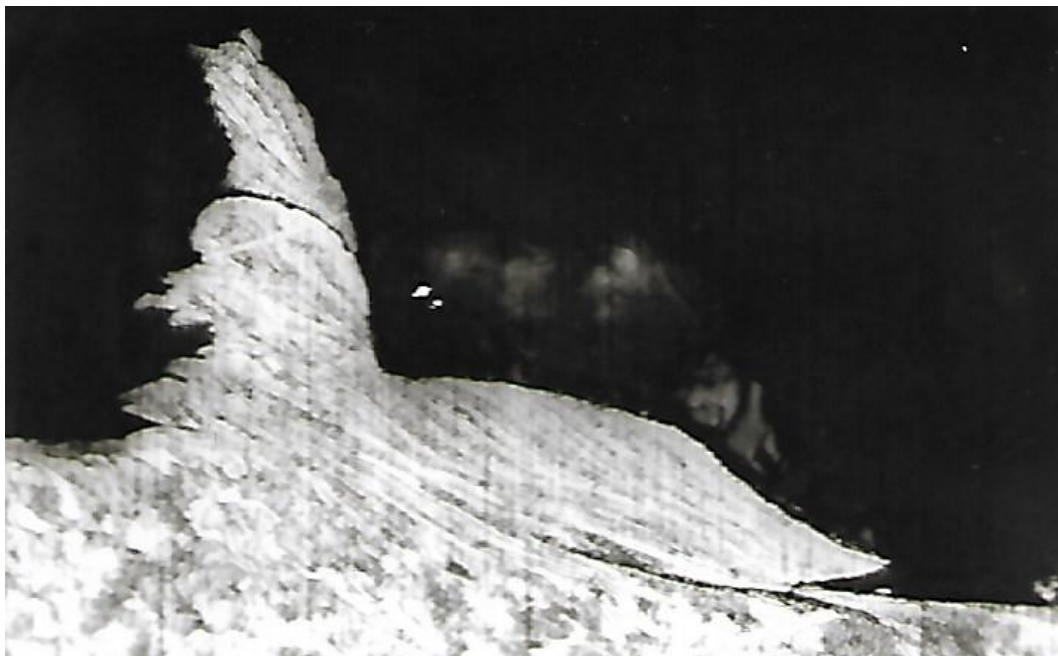


Obr. 1.28 Pohľad na moment ukončenia kontaktu triesky s brúsnym zrnom

Trieska, podobne ako v predchádzajúcom prípade má typickú vláknitú štruktúru. V blízkosti zrna sa vlákna zaobľujú, pretože pohyb materiálu je brzdený trením o čelné plochy brúsneho zrna.

Štúdium rôznych prípadov tvorenia triesky pri brúsení ukazuje, že tvar triesky výrazne závisí na veľkosti a konfigurácii brúsnych zrn v brúsnom kotúči.

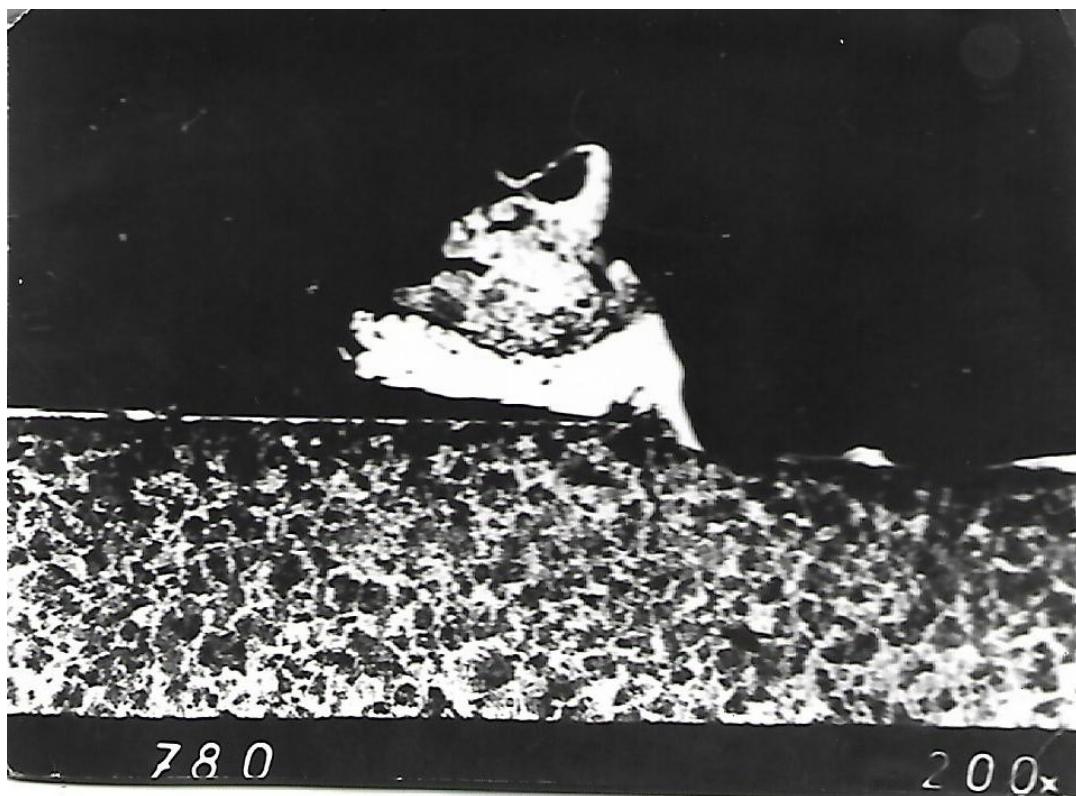
Na *obr. 1.29* je príklad metalografického výbrusu oblasti tvorenia triesky pri súčasnom brúsení dvoma zrnami kotúča, umiestnenými nad sebou (bežný prípad z *obr. 1.1, 1.2*).



Obr. 1.29 Prípad tvorenia triesky, vytváranej dvoma blízkymi zrnami.

Predné zrno vytvára trieslu obvyklým mechanizmom, zadné kontaktuje s obrobenou plochou a tlačí pred sebou deformovanú časť triesky do medzery medzi zrnami. Je zrejmé, že v takýchto prípadoch sa intenzívne spevňuje obrobený povrch. Na obrobenom povrchu vidno intenzívne zaobl'ovanie zrn kovu. V sledovanom prípade vlastne dochádza k „brúseniu“ povrchu spevneným kovom, udržívaným medzi dvoma zrnami. Dochádza teda ku treniu medzi obrábaným a obrábajúcim materiálom. Treba poznamenať, že na detailné sledovanie mechanizmu plastickej deformácie pri brúsení bola použitá zámerne oceľ C45, ktorá má feriticko - perlitickú štruktúru a deformáciu tejto sústavy možno názorne pozorovať.

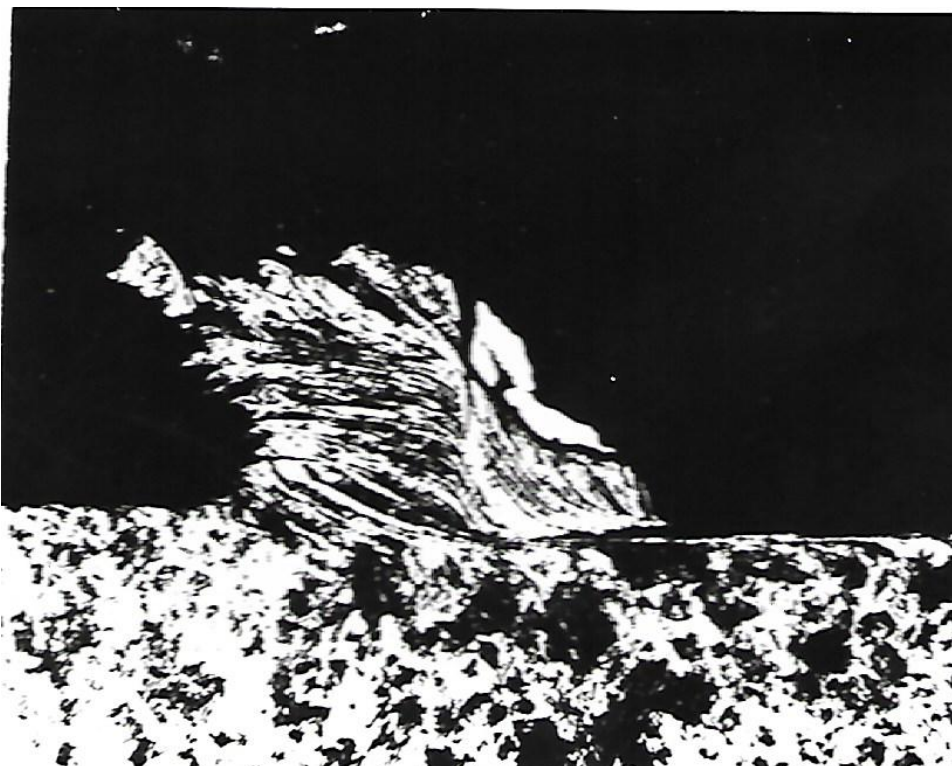
Na *obr. 1.30* je zaujímavý prípad, keď medzera medzi brúsnyimi zrnami je zaplnená trieskou, ktorá vznikla pri predchádzajúcej otáčke brúsneho kotúča. nová trieska sa nemôže vtesnať do medzery a tým sa intenzívne deformuje a ohrieva. Dokonca v nej môžu vzniknúť štruktúrne zmeny. Je to vidno na sfarbení triesky do biela. Tým sa ovplyvňuje aj proces tvorenia obrobeného povrchu (biela vrstva za zrnom).



Obr. 1.30 Prípád tvorenia triesky, ktorá sa vtesnáva do zaplnenej medzery medzi zrnami

Časti triesok, vtlačené v medzere medzi zrnami, alebo adhézne fixované na brúsiacich zrnách môžu následne pôsobiť ako rezné klíny a nahrádzať funkciu brúsiacich zrn. Dochádza ku interakcii medzi trieskou z predchádzajúcej otáčky brúsneho kotúča a novou trieskou, teda dvoma rovnakými materiálmi, čoho výsledkom je výrazný nárast koeficienta trenia. akéto prípady sú uvedené ďalej.

Na *obr. 1.31* je typický prípad brúsenia časťou fixovaného spevneného materiálu triesky. Poloha tohto elementu triesky je zrejmá z polohy zrna, ktoré bolo pri experimente vylomené.



Obr. 1.31 Prípád „brúsenia“ obrábaným materiálom

Oproti predchádzajúcim prípadom (*obr. 1.23, 1.27*) bolo zaznamenané väčšie stlačenie triesky, čiže aj vyššia intenzita plastickej deformácie v trieske. Je zaujímavé, že nevzniklo viditeľné tepelné ovplyvnenie obrobeného povrchu. Je to zrejme dané vyššou tepelnou vodivosťou ocele oproti keramickému zrnú. Mechanický účinok je intenzívnejší ako tepelný. Vidno, že plastický klin má výrazne väčší polomer reznej hrany a uhol čela blízky k nule. Intenzita deformácie triesky môže v týchto prípadoch klesať.

Špecifické podmienky tvorenia triesky vznikajú vtedy, keď obrábaný materiál má veľký koeficient trenia s materiálom nástroja. Takáto situácia vzniká napríklad pri brúsení titánu a jeho zliatin. Je známe, že titán má najväčší koeficient trenia so všetkých kovov. Na *obr. 1.32* je pohľad na zónu plastickej deformácie pred brúseným zrnom pri brúsení titánovej zliatiny VT-6.

Vidno, že vznikajúca trieska sa prakticky neoddeľuje od povrchu obrobku. Preto brúsenie titánových zliatin je značným technologickým problémom. Vhodné je použiť na jeho

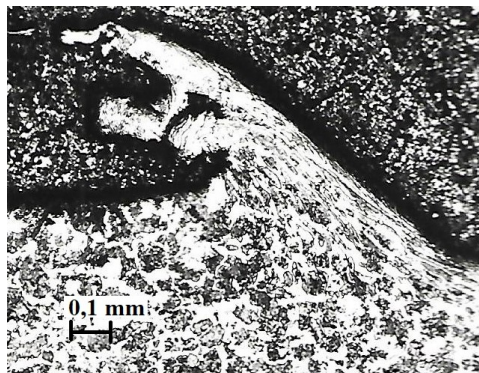
brúsenie diamantové brúsne materiály, pretože diamant je na opačnom konci od titánu, má najmenší koeficient trenia spomedzi kovov aj nekovových materiálov.



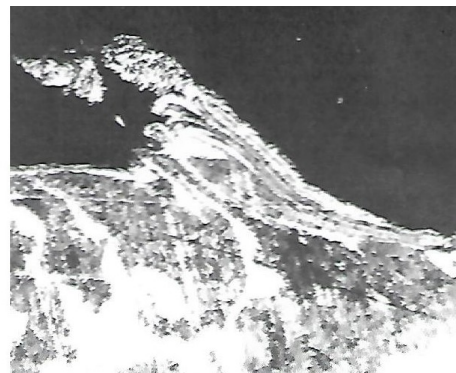
Obr. 1.32 Vznik triesky pred brúsnym zrnom pri brúsení titánovej zliatiny VT-6

V tab. 1.5 sú variačné prípady ďalších oblastí tvorenia triesky pri brúsení.

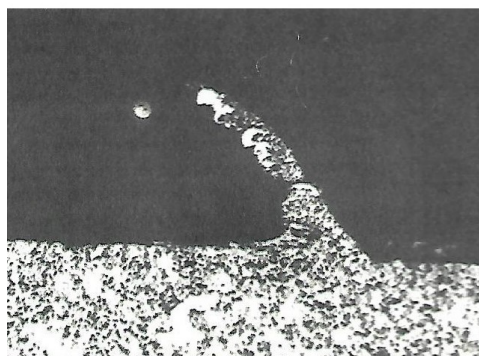
Príklady metalografických rezov zón tvorenia triesky pri brúsení *Tab. 1.5*



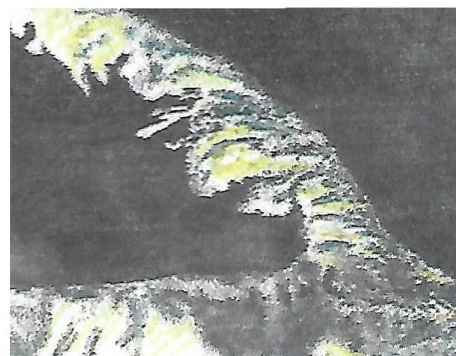
C35



C45

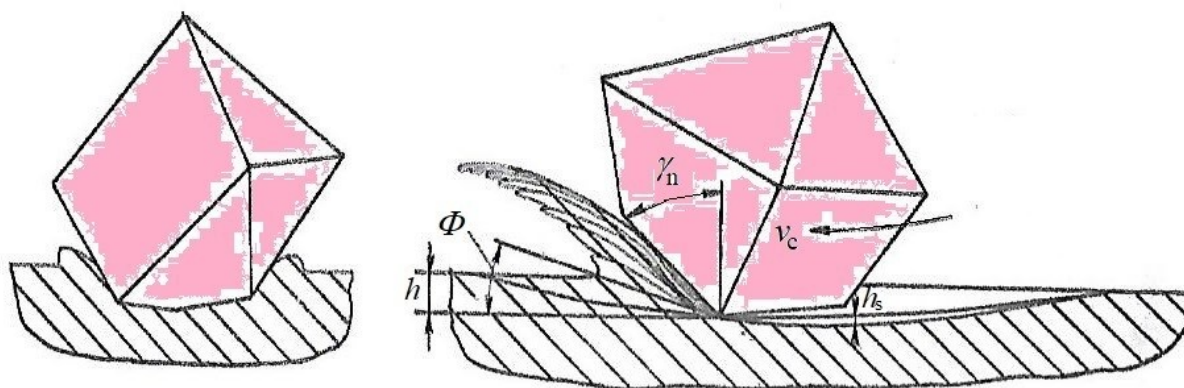


100Cr6



metalografický rez trieskou z obr.11.6

Na základe výsledkov výskumu možno s dostatočnou presnosťou naznačiť schému tvorenia triesky pri brúsení plastických materiálov – obr. 1.33.



Obr. 1.33 Zovšeobecnený model tvorenia triesky a obrobeného povrchu pri brúsení.
h – hrúbka odrezávanej vrstvy, *h_s* – hrúbka spevnenej vrstvy, Φ – uhol hranice plastickej deformácie, γ_n – uhol čela v normálovej rovine

Pri práci všeobecne orientovaným brúsiacim zrnom sa tvorí plynulá trieska. Výrazná medza plastickej deformácie, ohraničená uhlom Φ , oddeľuje nedeformovaný kov od triesky, ktorá sa výrazne plasticke deformuje. Na intenzite deformácie sa podieľa geometria zrna, jeho poloha a trenie medzi rezným a obrábanym materiálom. Prierez triesky sa počas záberu zrna v závislosti od okamžitej hrúbky odrezávanej vrstvy *h*. Okrem tvorenia triesky vo smere pohybu zrna sa aj plasticke vytláča materiál v priečnom smere. Vzniká v závislosti od podmienok brúsenia za brúsnym zrnom ovplyvnená vrstva premenlivej hrúbky *h₁*. Strana triesky, obrátená k brúsiacemu zrnú je lesklá, zadná strana má stopy po vyúsťujúcich šmykoch v trieske. Morfológia brúseného povrchu je tvorená sústavou drážok po brúsiacich zrnách a stopami po plastickej vytlačení materiálu z drážok.

V špecifických prípadoch vytvárajú plasticke deformáciu iba kontaktné vrstvy triesky s obrábanou plochou. Takéto rezanie prebieha vtedy, keď na kontaktných plochách sily vonkajšieho trenia sú menšie ako vnútorného, čiže ak platí nerovnosť:

$$\tau_k \leq \tau_v,$$

kde τ_k sú tangenciálne napätia na kontaktných plochách,

τ_v – šmykové napätia v deformovaných vrstvách obrábaného materiálu.

1.4 Vplyv mechanických vlastností materiálu na deformačné spevnenie pri brúsení

Deformačné spevnenie možno pri plastickej deformácii charakterizovať veľkosťou tangenciálneho napätia τ , ktoré vyvoláva šmyk. v prvom priblížení ho možno charakterizovať tangenciálnymi napätiami v troch rozličných zónach – v zóne tvorenia triesky a v zónach kontaktu triesky s obrábaným materiálom a čele a chrbte zrna. Takéto rozdelenie podmieňuje, že v sledovaných zónach je gradient deformácie, rýchlosti deformácie a teploty.

Spevnenie obrábaného materiálu pri plastickej deformácii v zóne tvorenia triesky možno približne charakterizovať strednou hodnotou šmykového napätia na ploche šmyku τ .

Podobne možno charakterizovať spevnenie pri plastickej deformácii v kontaktných vrstvách strednou hodnotou šmykového napätia deformovaných vrstiev triesky pozdĺž čela noža τ_k a strednou hodnotou šmykového napätia plasticke deformovaných vrstiev obrábaného materiálu pozdĺž chrbta zrna τ_{ka} . Pretože teploty a rýchlosti deformácie na čele a chrbte sa odlišujú málo, možno približne napísať:

$$\tau_{ky} \cong \tau_{kv} \cong \tau_k . \quad (1.6)$$

Spevnenie materiálu pri plastickej deformácii je funkciou:

$$\tau = F(\theta; \varepsilon; \varepsilon', \quad (1.7)$$

kde θ je teplota v sledovanom bode,

ε – pomerná šmyková deformácia,

ε' - rýchlosť pomernej deformácie.

Experimentálne štúdium plastickej deformácie v zóne tvorenia triesky [15] ukázalo, že veľkosť pomernej deformácie ε a rýchlosť deformácie ε' obrábaného materiálu sú v mieste šmykovej plochy a v konkrétnych vrstvách obyčajne veľké a mnohokrát prevyšujú deformáciu materiálu pri štandardných deformačných skúškach. Napríklad veľkosť pomernej deformácie na ploche šmyku sa pri obrábaní plasticke materiálov pohybuje v medziach $\varepsilon = 2 - 10$ a v kontaktných vrstvách $\varepsilon = 20 - 50$. Pri štandardných skúškach v ťahu býva $\varepsilon < 1$.

Neobyčajne veľký je aj rozdiel v rýchlostiach deformácie. Možno napr. uviesť, že pri reznej rýchlosti $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ je rýchlosť deformácie rádovo $4 \cdot 10^3 \text{ s}^{-1}$.

Možno uviesť orientačný výpočet rýchlosti pomerneho šmyku pri brúsení. Rýchlosť pomerneho šmyku:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\varepsilon}{\tau}, \text{ s}^{-1}, \quad (1.8)$$

kde ε je stupeň deformácie,

τ - čas na ušmyknutie jedného elementu.

Ak za jednotku času sa ušmykne m elementov, potom čas na ušmyknutie jedného elementu bude $\tau = \frac{1}{m}$. Množstvo šmykov za jednotku času sa určí ako pomer rýchlosti pohybu triesky k hrúbke elementu [6]:

$$m = \frac{\varepsilon \cdot v}{\Delta_x \cdot k}, \quad (1.9)$$

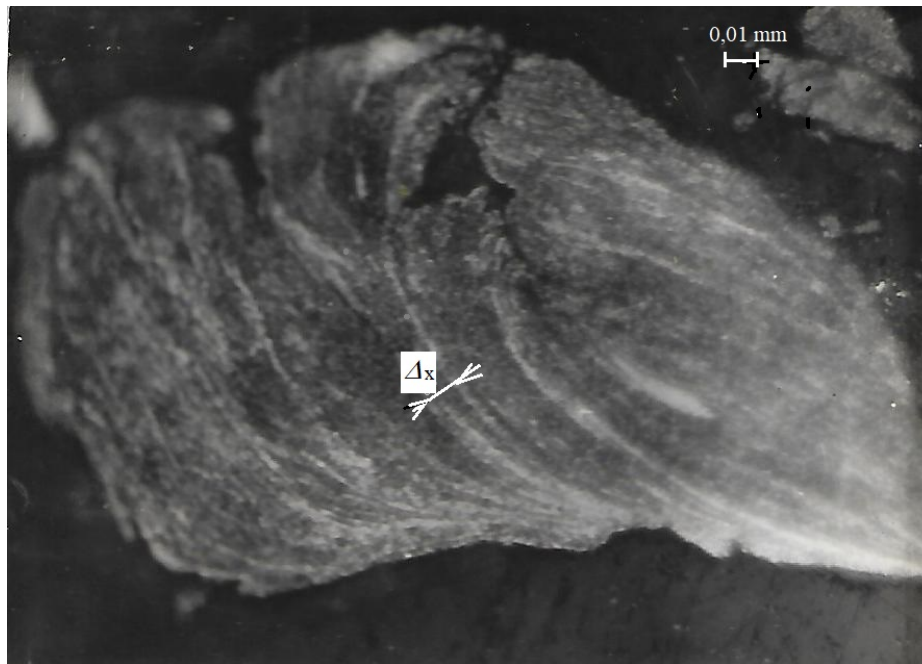
kde k je stlačenie triesky (pri brúsení 2-10).

Potom rýchlosť deformácie:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{m \cdot v}{\Delta_x \cdot k}. \quad (1.10)$$

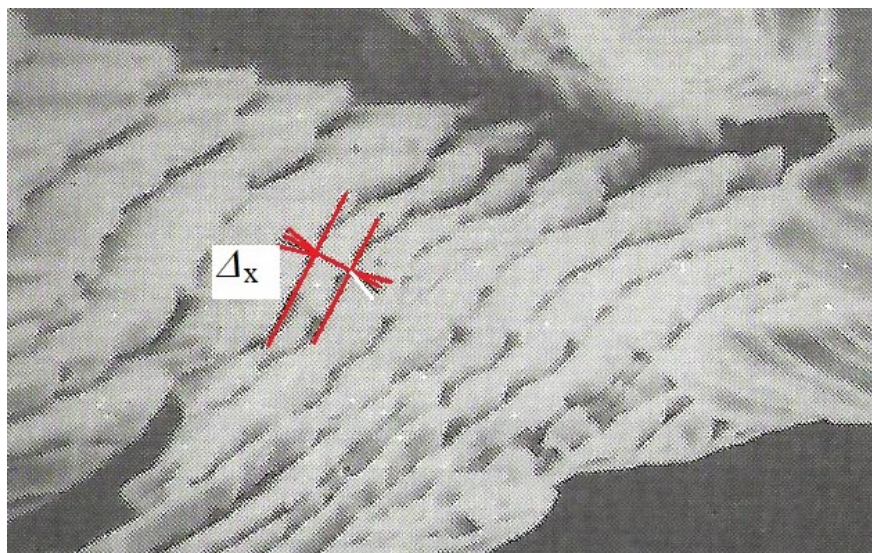
Hrúbka segmentu, ktorý prekonáva plastický šmyk, sa určí z mikrovýbrusov v pozdĺžnom reze trieskou.

Na *obr. 1.34* je pozdĺžny rez plynulou trieskou, získanou pri brúsení ocele C45, pri reznej rýchlosti $v_c = 30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.



Obr. 1.34 Príklad pozdĺžneho metalografického rezu triesky pri brúsení

Veľkosť segmentu možno zistiť z priloženej mierky ako vzdialenosť dvoch susedných vlákien feritu v strednej zóne triesky. Pri pozorovaní zadnej strany triesky vidno segmenty triesky zreteľnejšie, pretože sú vyústením šmykových plôch (*obr. 1.35*).



Obr. 1.35 Pohľad na zadnú stranu triesky, získanú pri brúsení kalenej ocele Fe70-2FN

Štúdium mikrofotografií triesok pri brúsení rôznymi reznými rýchlosťami ukazuje, že Δ_x závisí od rýchlosti brúsenia a pri rýchlostiach 30-35 m.s⁻¹ je 2-5 μm , pri rýchlostiach 80-120 m.s⁻¹ je 1,5-2 μm .

Výpočty podľa uvedeného vzťahu ukázali, že pri brúsení rýchlosťami 35-120 m.s⁻¹ je rýchlosť deformácie 10⁶-10⁹ m.s⁻¹. Možno konštatovať, že pri brúsení v porovnaní so štandardnými metódami skúšok ($\dot{\epsilon} = 10^{-3} \text{s}^{-1}$) vzrastá rýchlosť deformácie asi o 10 rádov. V dôsledku toho sa môžu šmykové napätia, určené štandardnými skúškami (na ťah, na tlak, na krut) výrazne odlišovať od šmykových napätí v podmienkach brúsenia a nie sú použiteľné.

Skúsme identifikovať vplyv veľkosti pomerného šmyku ϵ na hodnotu šmykových napätí. V začiatkovej fáze sa so zväčšovaním deformácie materiál intenzívne spevňuje a napätie prudko rastie. Ďalším zväčšovaním deformácie sa znižuje prírastok napätia a krivka deformačného spevnenia sa asymptoticky blíži k určitej hranici. Možno dokázať, že ak šmyková deformácia dosahuje $\epsilon=1$, možnosti spevňovania väčšiny materiálov sú vyčerpané.

Šmykovou deformáciou v zóne tvorenia triesky sa nasýti spevnenie, čiže materiál sa stáva ideálne plastický. V dôsledku toho zmena pomernej deformácie e pri zmene podmienok brúsenia málo vplýva na $\tau_{\phi 1}$. Pritom veľkosti šmykových napätí v porovnaní so štandardnými mechanickými skúškami budú značne vyššie.

Štúdium vplyvu teploty a rýchlosti deformácie na šmykové napätia pre rozličné materiály a údaje z teórie spevňovania a relaxácie materiálov vedú k nasledovným záverom.

Pri homologických teplotách (bezrozmerný pomer teploty vzorky k teplote tavenia v kelvinoch) je správanie sa materiálov z hľadiska rýchlosti deformácie rovnaké. Všetky materiály sú citlivé na rýchlosť deformácie pri teplotách rekryštalizácie a blízky k teplotám tavenia a nie sú citlivé pri teplotách značne nižších ako je teplota rekryštalizácie. Preto ak pri obrábaní materiálov je teplota v zóne tvorenia triesky menšia ako teplota rekryštalizácie, rýchlosť deformácie málo vplyva na $\tau_{\phi 1}$.

Pri metódach obrábania ako je sústruženie, frézovanie, teplota v zóne šmyku je menšia ako teplota rekryštalizácie. Preto napätie $\tau_{\phi 1}$ je málo citlivé na rýchlosť deformácie. Pri obrábaní ľahkotavitelných materiálov (olovo, cín, hliník) je v zóne tvorenia triesky teplota rekryštalizácie a rezná rýchlosť výrazne vplyva na $\tau_{\phi 1}$. Analogicky možno objasniť vplyv rýchlosti deformácie na $\tau_{\phi 1}$ pri obrábaní s predohrevom obrobku. Pri brúsení dochádza k predohrevu a teplota v šmykovej ploche môže značne prevýšiť teplotu rekryštalizácie obrábaného materiálu. V dôsledku toho rýchlosť deformácie bude významne vplyvať na menovité šmykové napätie.

Pre analytické určenie závislosti spevnenia od rýchlosti deformácie a teploty sa odvodili rôzne vzťahy. Väčšina z nich uvažuje s spomaleným rastom odporu pri zmene rýchlosti deformácie napr. Prandtlov vzťah:

$$\sigma_1 = \sigma_0 + a_3 \cdot \ln \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_0} \quad (1.11)$$

kde σ_1 je deformačné napätie pri rýchlosti deformácie ε_1 ,

σ_0 - deformačné napätie pri rýchlosti deformácie ε_0 ,

a_3 – koeficient závislý od vlastností materiálu a teploty.

Podľa tohto vzťahu možno určiť deformačné napätie pri ľubovoľnej rýchlosti deformácie, ak je známy koeficient a_3 a deformačné napätie pri ľubovoľnej rýchlosti, napr. pri statických skúškach. Treba poznamenať, že takéto výpočty možno realizovať, ak teplota v zóne deformácie je konštantná. výpočet sa komplikuje, ak sa súčasne mení teplota a rýchlosť deformácie. V tomto prípade treba poznať veľkosť koeficienta a_3 pri každej teplote.

Mac Gregor a Fischer [4

] riešili úlohu súčasného vplyvu teploty a rýchlosti deformácie pri skúškach kovov v ťahu zavedením pojmu teploty, modifikovanej podľa reznej rýchlosti. Dokázali, že napätia

vo vzorkách pri rôznych rýchlostiach ťahania sú premennou, ktorá má rozmer teploty. Modifikovaná je rýchlosťou deformácie teplotou:

$$\theta_M = \theta \left(1 - k \cdot \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right), \quad (1.12)$$

kde θ je absolútna teplota

k – materiálová konštanta,

$\dot{\varepsilon}$ - rýchlosť deformácie, pri ktorej je potrebné určiť napätie,

$\dot{\varepsilon}_0$ - rýchlosť deformácie pri štandardnej metóde skúšky (pre oceľ a liatinu je $k = 0,017$).

Metodika aplikácie modifikovanej teploty podľa rýchlosti deformácie sa zakladá na nasledujúcom.

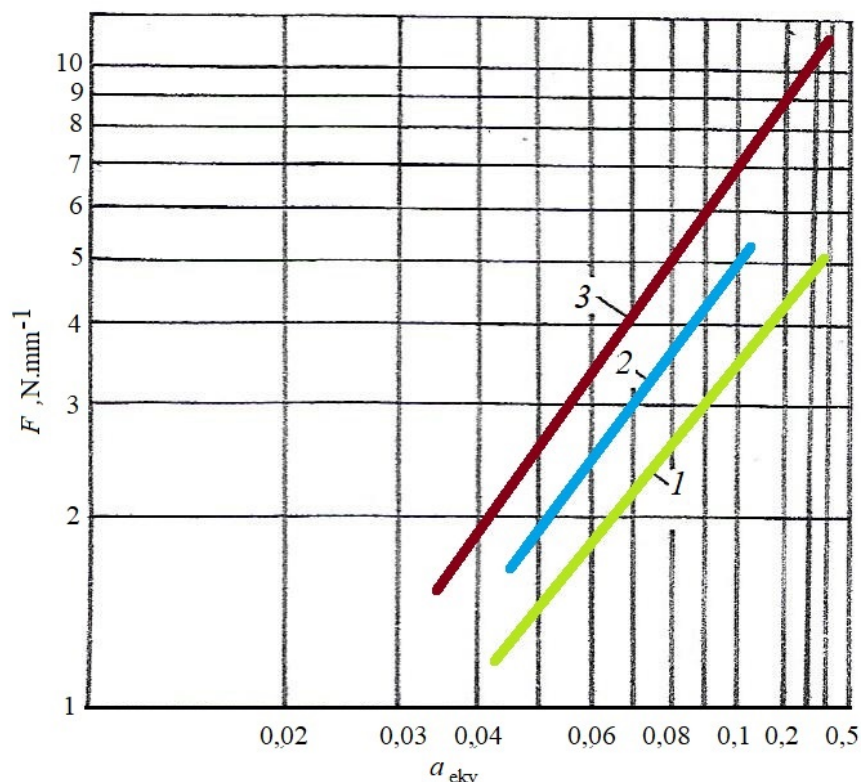
Pripusťme, že pri brúsení kalenej nelegovanej ocele je teplota samoohrevu odrezanej vrstvy 1 170 K a rýchlosť deformácie je 10^6 s^{-1} . Pretože táto teplota prevyšuje teplotu popúšťania a rekryštalizácie ocele, treba uvažovať s účinkom rýchlosti deformácie. S uvedeným cieľom nájdeme hodnotu modifikovanej teploty, ktorá podľa výpočtu sa bude rovnať 670 K. Podľa krivky závislosti tvrdosť - teplota pre danú oceľ (rýchlosť deformácie 10^3 s^{-1}) nájdeme tvrdosť, ktorá zodpovedá modifikovanej teplote 670 K. Z porovnania vyplýva, že deformačné spevnenie pri rýchlosti deformácie 10^6 s^{-1} a teplote 1 170 K vzrástlo v porovnaní s tvrdosťou, meranou štandardnými metódami, pri rovnakej teplote viac ako šesťkrát.

Teplotné závislosti šmykového napätia, ktoré zodpovedajú rezným podmienkam, dávajú v porovnaní so štandardnými skúškami rozdielnou deformáciou a rýchlosťou deformácie iba približnú predstavu o hodnotách šmykových deformácií pri rezaní. Spoľahlivo určiť tieto napätia možno len pozorovaním skutočného procesu. S uvedeným cieľom boli vykonané experimentálne skúšky obrábania rôznych materiálov s predohrevom. Pri sústružení boli merané zložky reznej sily a stlačenie triesky. Zo zjednodušených závislostí mechaniky rezania sa určili napätia τ_k , pričom rýchlosť deformácie bola 10^3 s^{-1} . Pri obrábaní dvoch druhov nelegovaných ocelí a jednej žiarupevnej, pri teplote 1 270 K bol získané hodnoty $\tau_k = 1,3; 1,75$ a $2,76 \text{ MPa}$.

Analogicky sa určili orientačné hodnoty τ_k pri brúsení.

Štúdium procesu tvorenia triesky z koreňov triesok ukazuje, že vo väčšine prípadov pri brúsení rôznych materiálov je uhol hranice plastickej deformácie $\phi = 5-15^\circ$. Pre orientačný výpočet treba určiť hodnoty zložiek rezných síl pri brúsení týchto materiálov.

Na obr. 1.36 sú výsledky merania rezných síl v závislosti od ekvivalentnej hrúbky odrezávanej vrstvy. Súčasne pomocou termokried sa určila teplota predohrevu odrezávanej vrstvy (približne 1 250 K).



Obr. 1.36 Experimentálna závislosť veľkosti reznej sily od ekvivalentnej hrúbky odrezávanej vrstvy 1 – oceľ C35, 2 – oceľ C45, 3 – oceľ X30Cr13

Pri použití nameraných hodnôt F_c a F_p sa vypočítali hodnoty τ_{ϕ} . Pri výpočte bola zohľadnená skutočnosť, že iba časť brúsiacich zrn odoberá triesky. Podiel aktívnych zrn je asi 10% [1], [12].

Výpočet ukazuje že τ_{ϕ} pre kalenú nelegovanú oceľ je 3,2 MPa, chrómovú oceľ 4,2 MPa a žiarupevnú oceľ asi 5,6 MPa. Porovnanie vypočítaných hodnôt svedčí o tom, že zväčšovanie rýchlosti deformácie z 10^3s^{-1} na 10^6s^{-1} vyvoláva zvýšenie spevnenia o 80 – 100 krát a v porovnaní so štandardnými metódami skúšok 5 – 10 krát. Z toho vyplýva, že bez ohľadu na predohrev brúsenej vrstvy od teploty rezania a zníženia pevnosti tejto vrstvy v dôsledku vysokých rýchlostí deformácie deformačné spevnenie je značne vysoké.

Záverom sledovanej problematiky možno konštatovať, že topografia pracovného povrchu brúsiaceho nástroja významne vplýva na intenzitu úberu kovu, teplotný režim v zóne brúsenia, rezné sily a spotrebovaný výkon, kvalitu brúseného povrchu a fyzikálno-mechanické charakteristiky povrchových vrstiev obrobeného povrchu.

Vo väčšine praktických prípadov sa topografia pracovného povrchu brúsiaceho kotúča výrazne mení. Pomerne stabilnou je pri jemnom brúsení a pri samoostrení abrazívneho nástroja. Určenie závislostí medzi topografiou pracovného povrchu brúsiaceho kotúča a funkčnými vlastnosťami kotúča dáva možnosť optimalizovať proces brúsenia.

Pracovný povrch kotúča sa skladá z abrazívnych zŕn, ktoré sú rozmiestnené v rozličných vzdialenostiach od teoretického profilu kotúča. V dôsledku toho v procese interakcie brúsiaceho kotúča s obrábaným materiálom nastáva rezanie, plastické stláčanie alebo trenie zŕn o obrábaný povrch.

Zloženie reznej kvapaliny podstatne vplýva na charakter spolupôsobenia abrazívnych zŕn s obrábaným materiálom. Pri použití aktívnych prostredí bude väčšina zŕn pracovať v podmienkach trenia a plastického stláčania povrchu.

Výskum ukazuje, že zákonitosti obrábania nástrojmi s definovanou geometriou rezného klina je potrebné pri obrábaní abrazívnym zrnom modifikovať so zreteľom na odlišnú geometriu, reznú rýchlosť a fyzikálne charakteristiky nástroja a obrobku. Pri brúsení je rýchlosť deformácie v porovnaní so sústružením vyššia a je rádovo 10^6 - 10^9 s.

Bez zreteľa na samoohrev odrezávanej vrstvy a adekvátne zníženie jej pevnosti, spevnenie obrábaného materiálu je pri vyššej rýchlosti deformácie vyššie ako pri obrábaní jednoklinovým nástrojom. Nemožno preto interpolovať na brúsenie výroky odvodené od jednoklinového nástroja.

2 TEPELNÉ JAVY PRI BRÚSENÍ

Brúsenie sprevádza značný vývoj tepla v zóne tvorenia triesky a tým sa ohrievajú kontaktné vrstvy brúsiacich zrn a spojiva. Súčasne sa ohrievajú povrchové vrstvy obrábaného materiálu. Pri rozličnej polohe rezných hrán brúsiacich zrn vzhľadom na profilovú krivku kotúča existujú tri druhy interakcie medzi abrazívnymi zrnami a obrábaným povrchom. V súvislosti s tým je aj teplota na kontaktných plochách zrn rôzna. Maximálna teplota (θ_k) vzniká na kontaktných povrchoch zrn, ktoré odoberajú triesku.

Teplota na abrazívnych zrnách (θ_1), ktoré pracujú v podmienkach pružnej, alebo plastickej deformácie materiálu, je väčšinou nižšia a mení sa v širokých hraniciach v závislosti od hĺbky vniknutia brúsiaceho zrna. z hľadiska poznania procesov prebiehajúcich v zóne kontaktu zrna a materiálu, má mimoriadny význam poznanie teploty kontaktu, ako aj teplotného poľa v brúsiacom zrne. Na určenie obidvoch týchto charakteristík v prácach viacerých autorov väčšinou používal nepriame metódy. ich aplikácie mal rad chýb, a tým sa vytvorila len približná predstava o teplote rezania.

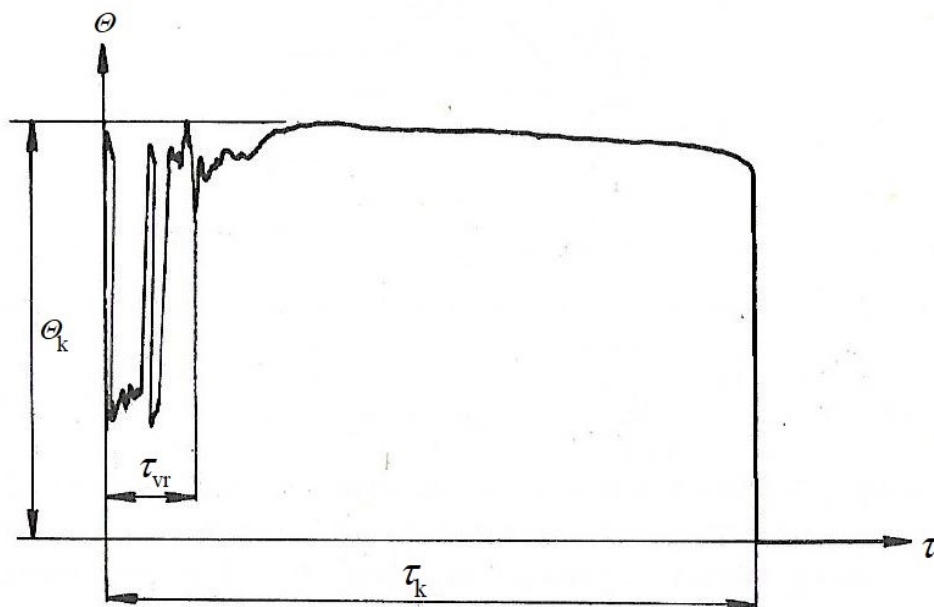
2.1 Teplota kontaktu

Základom predkladanej metodiky merania kontaktných teplôt [3] je termoelektrický efekt, ktorý vzniká medzi zrnom (napr. z SiC alebo polovodivého diamantu) a brúseným kovom.

Experimenty na určenie teploty brúsenia sa realizoval na brúske na plocho s plynulou zmenou frekvencie otáčania vretena. Pri určovaní kontaktných teplôt a charakteru ich zmien sa použil kotúč s jedným zrnom (*obr.1.8*). Stredná teplota na celej šírke brúsiaceho kotúča sa merala tak, ako opisuje *obr. 1.9*.

Termoelektrická sila bola meraná impulzívnym milivoltmetrom charakter impulzu jednozložkovým impulzným oscilografom. Na určenie teploty rezania z veľkosti termoelektrickej sily treba poznať závislosť medzi teplotou a termoelektrickou silou pre dvojicu obrábaný - rezný materiál. Pri kalibrovaní sa pri reznom materiáli SiC sa použila spekaná tyčka z SiC, čím sa zjednodušilo vytvorenie „studeného spoja“. Teploty do 1000 K sa vyvodzujú v kalibrujúcom prostredí 1000-1800 K vo vákuu. Pri kalibrovaní termočlánku s diamantom sa reže diamantovým zrnom zohriatym na patričnú teploty.

Na obr. 2.1 je jeden z typických oscilogramov zmeny teploty kontaktu v závislosti od času, získaný pri brúsení titánovej zliatiny VT 14 abrazívnym zrnom z SiC.

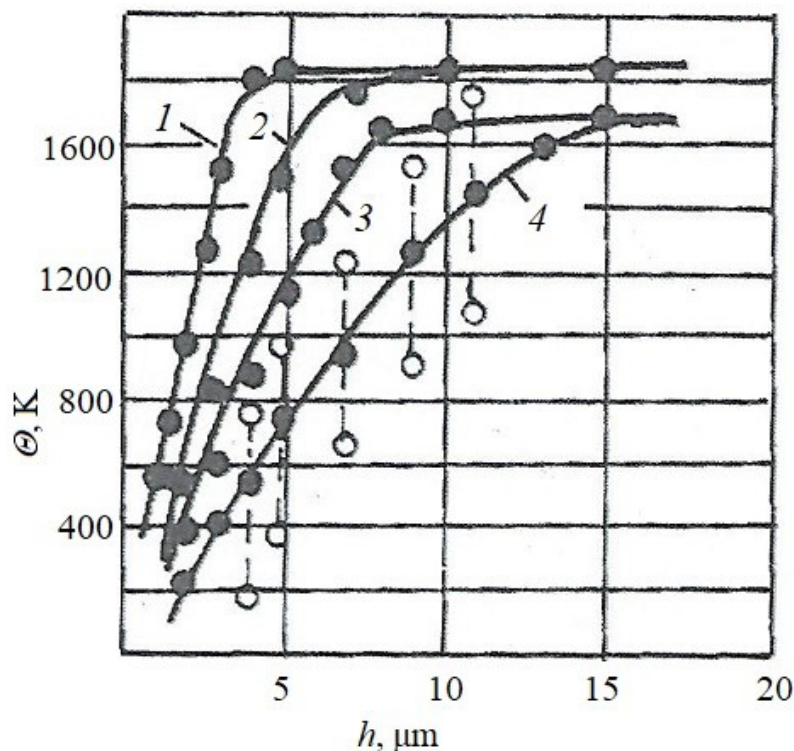


Obr. 2.1 Oscilogram zmeny teploty θ_k počas kontaktu pri mikrorezaní titánovej zliatiny VT 14 zrnom z SiC.

Vidno, že v prvých štádiách vznikajú teplotné rázy, ako dôsledok trenia abrazívnych zrn o obrobok bez odoberania triesky. Tento úsek zodpovedá vrezaniu a jeho trvanie (τ_{vr}) závisí na geometrii zrna, hĺbke jeho vniknutia do materiálu a podmienok trenia v kontakte. V momente, ktorý odpovedá oddeľovaniu triesky, teplota prakticky okamžite vystúpi na maximálnu hodnotu a zostáva na tejto hodnote až do ukončenia kontaktu (τ_k).

Analogické oscilogramy kontaktných teplôt sa získali pri brúsení viacerých ocelí a zliatin. Pri skúškach sa analyzoval vplyv hĺbky vniknutia a rýchlosti brúsenia na kontaktnú teplotu.

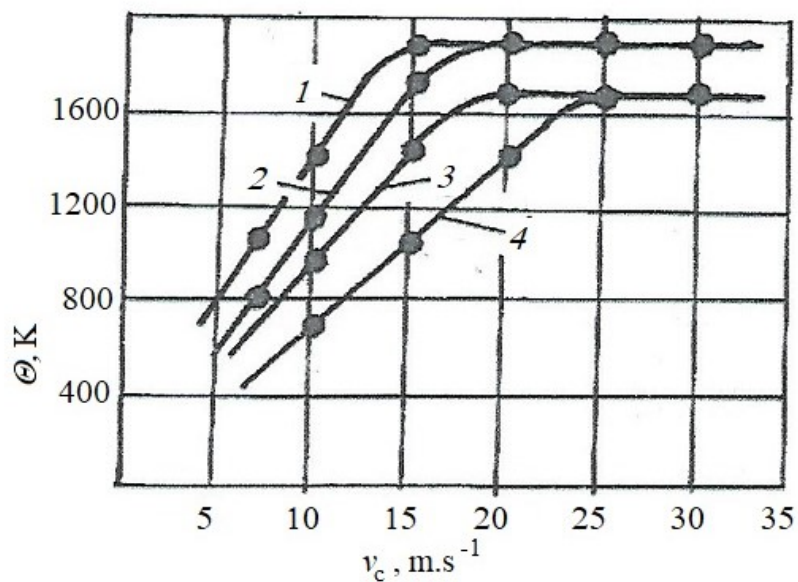
Na obr. 2.2 je závislosť kontaktnej teploty od okamžitej hrúbky odrezávanej vrstvy h pri brúsení ocele C45 a titánovej zliatiny VT 14 dvoma brúsiacimi materiálmi. Rezná rýchlosť bola $35 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.



Obr. 2.2 Závislosť kontaktnej teploty od hĺbky vniknutia zrna do materiálu, pri rôznych dvojiciach obrábaný – brúsny materiál. 1 – SiC – VT 14, 2 – diamant - VT 14, 3 SiC – nelegovaná oceľ, 4 – diamant – nelegovaná oceľ C45.[4]

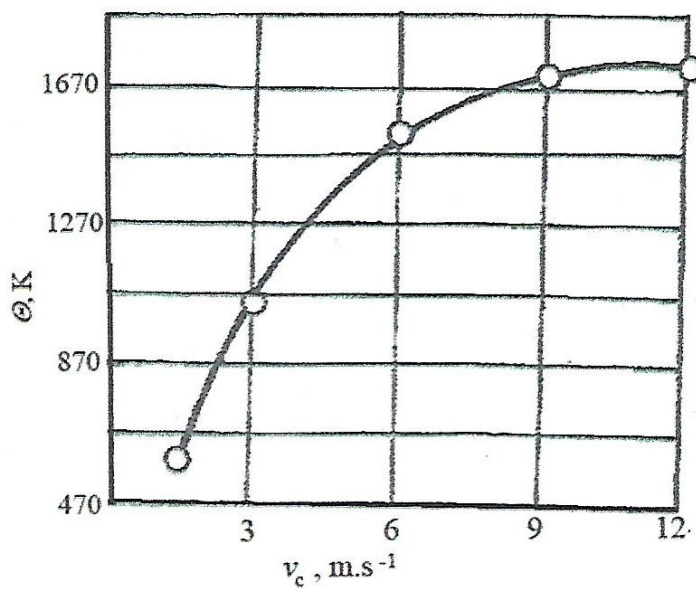
Vidno, že s nárastom hĺbky odrezávanej vrstvy (hĺbky vniknutia zrna do materiálu) kontaktná teplota narastá a pri určitej hrúbke dosahuje maximum. Maximum sa rovná teplote tavenia obrábaného materiálu. Pritom rýchlosť nárastu kontaktnej teploty je pri brúsení titánovej zliatiny vyššia, ako pri brúsení ocele. V dôsledku toho vzniká rozdiel vo výške okamžitej kontaktnej teploty pri brúsení diamantovým zrnom a zrnom z SiC. V dôsledku toho určenie skutočnej hĺbky vniknutia zrna je problematické, na oscilogramoch sa zaznamenáva značný rozptyl nameraných hodnôt (pole rozptylu je znázornené pri krivke 4 na obr. 2.2).

Kontaktnú teplotu veľmi ovplyvňuje rezná rýchlosť. Na obr. 2.3 je typická závislosť kontaktnej teploty na rezných rýchlostiach pri obrábaní ocele a titánovej zliatiny zrnom z diamantu a SiC. Počas skúšok bol uhol čela približne -60° uhol rezného klina $\beta = 120^{\circ}$) a to odpovedá stredným hodnotám uhlov čela a brúsiacich zrn.



Obr. 2.3 Závislosť kontaktnej teploty od reznej rýchlosti pri rôznych dvojiciach obrábaný – rezný materiál. 1 – SiC – VT 14, 2 – diamant – VT 14, 3 – SiC – C45, 4 – diamant – C45, [4]

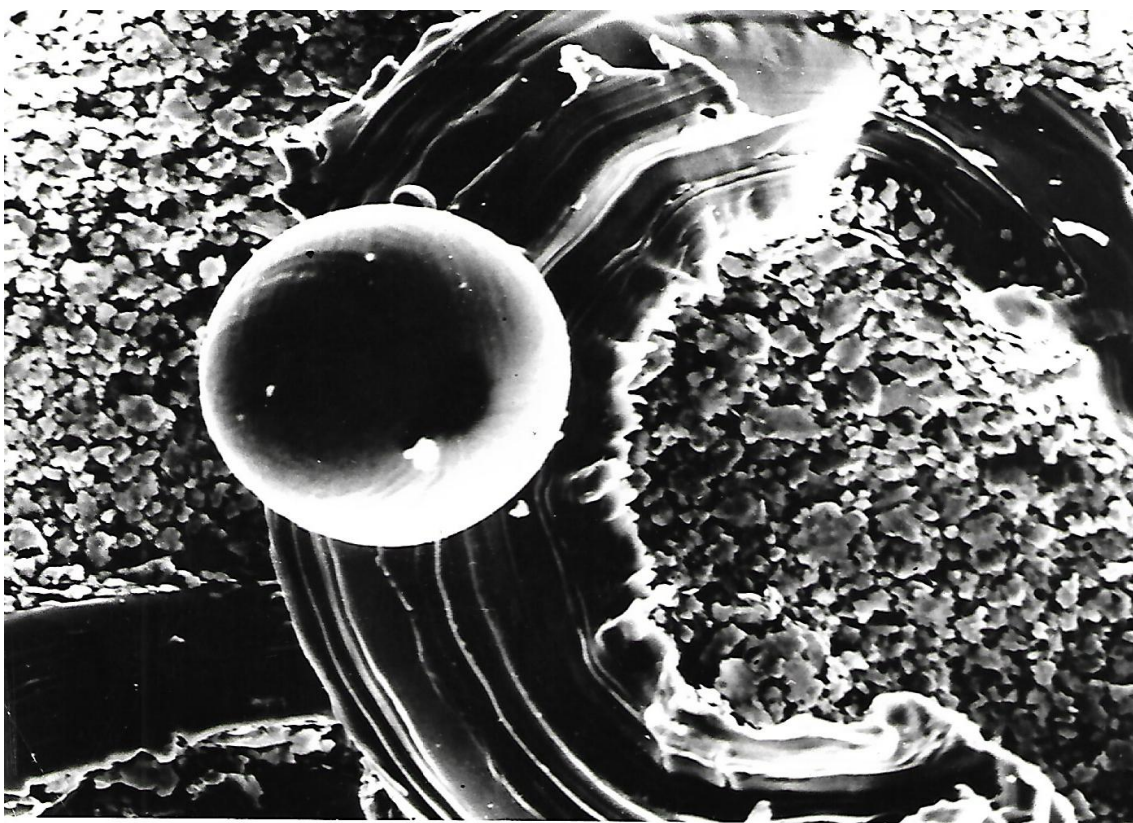
Na obr. 2.4 [16] je závislosť kontaktnej teploty od reznej rýchlosti pri brúsení spekaného karbidu K 10.



Obr. 2.4 Závislosť kontaktnej teploty od reznej rýchlosti pri brúsení spekaného karbidu K 10.

Pri analýze výsledkov experimentálnych skúšok možno konštatovať, že so zväčšovaním rezných rýchlostí teplota rezania vo všetkých prípadoch rastie a pri určitej reznej rýchlosti dosahuje maximum – teplotu tavenia sledovaného materiálu (pri brúsení spekaného karbidu s kobaltovým spojivom je to teplota tavenia kobaltu). Pri ďalšom zväčšovaní reznej rýchlosti zostáva kontaktná teplota približne konštantná.

Teplota na kontaktných plochách abrazívnych zrn, ktoré odoberajú triesku, je výsledkom premeny energie plastickej deformácie obrobku a triesky na teplo. Pri vysokých rezných rýchlostiach sa pri plastickej deformácii vyvíja teplo, ktoré sa nestačí rozšíriť do hĺbky materiálu vedením, preto sa koncentruje v kontaktných vrstvách, Na obr. 2.5 je pohľad pod elektrónovým mikroskopom na plynulú triesku a guľovú triesku. Pri použitom zväčšení vidno, že pri brúsení sa dosahuje plastický stav, blízky taveniu. Pri ďalšom zväčšovaní reznej rýchlosti sa teplota ďalej nezvyšuje a zostáva na úrovni teploty tavenia obrábaného materiálu.



Obr. 2.5 Elektrónová mikrofotografia triesky zo strany zrna a guľová trieska vznikajúce pri brúsení ocele [18].

Možno to objasniť skutočnosťou, že v zóne kontaktu dochádza ku treniu medzi abrazívnym zrnom a silne zmäkčenými povrchovými vrstvami obrábaného materiálu. V týchto podmienkach sa na ďalšiu plastickú deformáciu kontaktných vrstiev triesky stráca minimálna energia, ktorá nestačí zvýšiť tepelnú kapacitu v kontakte. Treba poznamenať, že na ohrev ocele na teplotu tavenia je potrebná energia $7,5 \text{ J.mm}^{-3}$ [8]. Podľa literárnych údajov [14] merná energia pri bežnom brúsení je značne vyššia a býva $30\text{-}100 \text{ J.mm}^{-3}$.

Rezná rýchlosť, pri ktorej kontaktná teplota dosahuje maximum, závisí od mechanických a tepelných vlastností obrábaného materiálu a materiálu brúsnych zrn.

Experimentálne štúdiá kontaktnej teploty pri brúsení rôznych kovov ukazujú, že priebeh je rovnaký, ako je uvedený na diagramoch. Rozdiel je iba v tom, že v závislosti od deformačného odporu obrábaného materiálu a od jeho tepelno-fyzikálnych charakteristík môže sa dosiahnuť maximálna teplota pri rozličných rezných rýchlostiach. Ak sa napr. pri brúsení ocele C45 dosahuje maximálna teplota pri reznej rýchlosti $v_c = 20 \text{ m.s}^{-1}$, pri brúsení titánovej zliatiny VT 14 pri $12 - 15 \text{ m.s}^{-1}$ a pri obrábaní žiarupevných zliatin na báze Ni 14 pri $12\text{-}15 \text{ m.s}^{-1}$.

Analýza experimentálnych údajov potvrdzuje, že kontaktná teplota pri brúsení závisí od obrábaného materiálu, pričom najnižšia kontaktná teplota vzniká pri obrábaní diamantovým zrnom.

Kontaktná teplota je výsledkom plastickej deformácie v zóne tvorenia triesky, ktorá závisí od geometrie brúsneho zrna, fyzikálno – mechanických charakteristík obrábaného materiálu a sekundárnej plastickej deformácie kontaktných vrstiev triesky a obrobenej plochy, ktorá predovšetkým závisí od trecích vlastností trúcej sa dvojice. Pri rovnakých podmienkach môžu trecie vlastnosti vplývať na veľkosť sekundárnej plastickej deformácie kontaktných plôch triesky a obrábaného materiálu. z toho vyplýva, že čím je menšia adhézia medzi trúcou sa dvojicou materiálov, tým menšia je deformácia kontaktných vrstiev obrábaného materiálu a nižšia je kontaktná teplota. Štúdium trecích vlastností abrazívnych materiálov ukázalo, že koeficient trenia korundu a karbidu kremíka s väčšinou kovov je približne rovnaký, pri malých aj vysokých rezných rýchlostiach. Možno teda predpokladať, že kontaktné teploty pri obrábaní týmito brúsiacimi materiálmi budú približne rovnaké.

Na rozdiel od ostatných brúsnych materiálov, diamant má nízky koeficient trenia a neobyčajne malú adhéziu ku kovom. Na vzduchu pri malých rýchlostiach pohybu diamantu po diamante alebo diamantu po oceli koeficient trenia prakticky nezávisí od mastenia a má malé hodnoty. Možno to objasniť tým, že sa na kontaktných povrchoch tvoria oxidy, ktoré sú tak pevné, že nedovolia poškodiť diamantovú mriežku.

Pri zmene podmienok trenia sa koeficient trenia diamantu a ocele výrazne mení. Pri zväčšovaní rýchlosti pohybu z $0,24$ na $21,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ narastá koeficient trenia z $0,05$ na $0,15$.

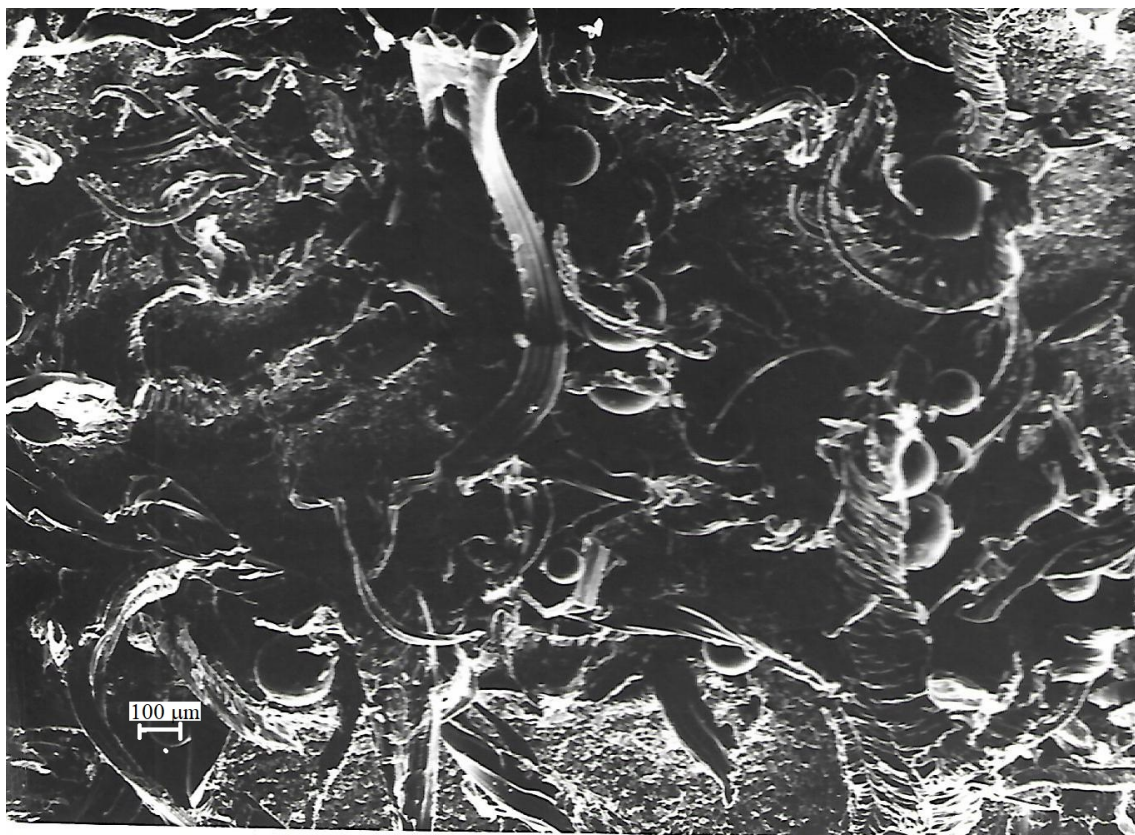
Trecie vlastnosti kubického nitridu bóru sú málo preskúmané. Podľa porovnania koeficientu trenia grafitu a hexagonálneho Nitricu bóru možno predpokladať, že koeficient trenia diamantu je o málo menší ako kubického Nitricu bóru.

Pri identifikácii teplotného režimu brúsenia možno vychádzať aj z tvaru odchádzajúcej triesky. Je známe, že pri brúsení vznikajú opisované plynulé, ale aj guľové triesky (*obr. 2.5*). Vznik guľových triesok možno objasniť úplným roztavením materiálu pred brúsiacim zrnom, čo môže vzniknúť pri nepriaznivých geometrických podmienkach. Ak považujeme za strednú hodnotu uhla čela brúsiaceho zrna -60° , potom jednotlivé zrná môžu dosahovať hodnoty -70° , -80° , aj blízko -90° . Pri týchto podmienkach sa často netvorí trieska a teplota tavenia v zóne kontaktu sa dosiahne už vo fáze plastického stláčania. Podobný vplyv má aj polomer zaoblenia reznej hrany. Nepriaznivý prípad nastáva, ak $r_n \gg h$. Vytvorenie guľového útvaru možno vysvetliť tým, že roztavený kov, vymrštený do vzduchu od povrchového napätia, má minimálny objem. Pretože pri chladení expandujú plyny, ktoré sú v dotyku s horúcim kovom, vzniká dutá guľôčka. Bol vyhotovený metalografický výbrus guľovou trieskou – *obr. 2.6*.



Obr. 2.6 Metalografický výbrus v reze guľovej triesky z brúsenia ocele C45

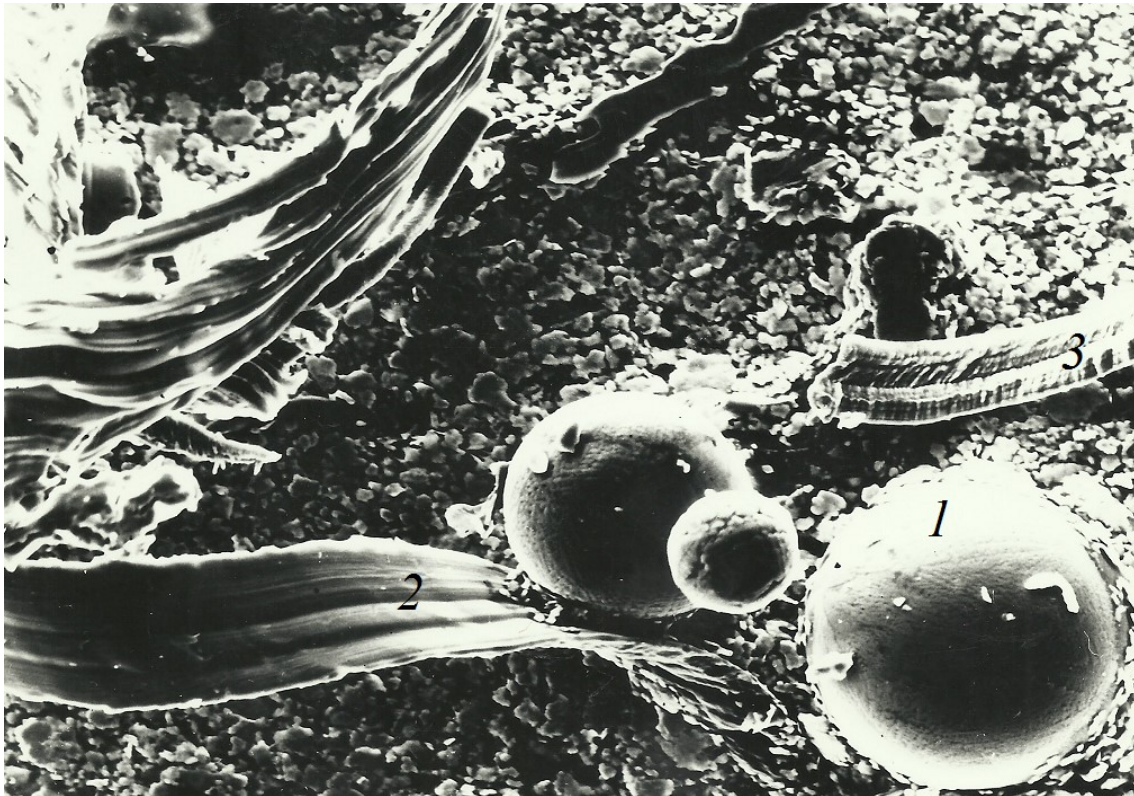
Na obr. 2.7 je pohľad na triesky, získané pri brúsení ocele 100Cr6.



Obr. 2.7 Triesky, získané pri brúsení ocele 100Cr6 kotúčom A99 25K 8V ($v_c = 30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $a_p = 0,3 \text{ mm}$)

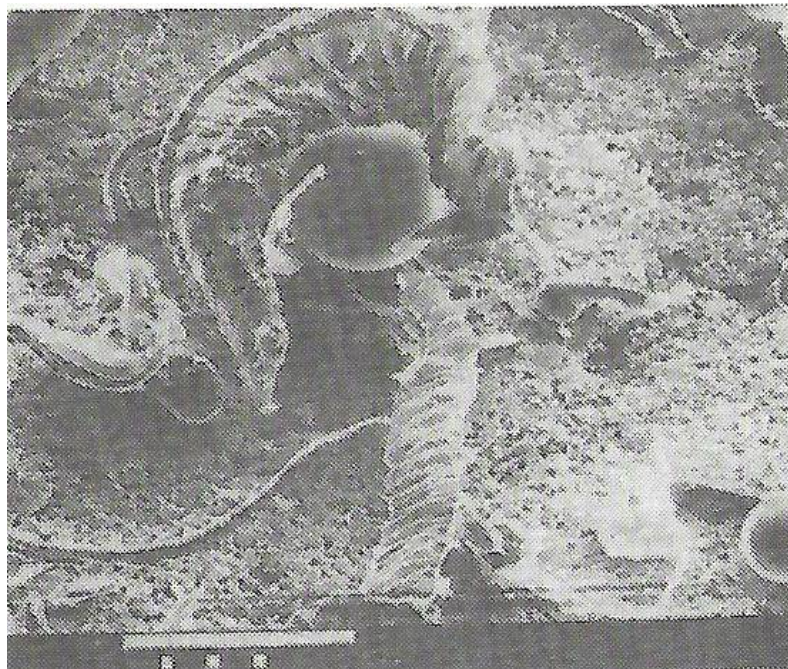
Gul'ové triesky majú rôznu veľkosť, čo súvisí s množstvom roztaveného kovu pred jednotlivými brúsnymi zrnami. Rovnako sa veľkosťou odlišujú aj plynulé triesky. Smer stáčania triesok závisí na geometrii a orientácii konkrétneho zrna. Pri pozorovaní triesok pri brúsení rôznych materiálov sa nevyskytujú prípady, keď plynulá trieska začínala alebo končila roztavenou zónou. Pri globálnom sledovaní triesok možno vysloviť názor, že spočítaním počtu gul'ových a plynulých triesok na určitej ploche je možné odhadnúť strednú teplotu v kontakte triesky a brúsneho zrna.

Z toho vyplýva, že pri vzniku obidvoch typov triesok vznikajú odlišné teplotné podmienky. Možno to potvrdiť detailným pozorovaním triesok (obr. 2.8). Vidno, že aj na plynulej trieske sa natavuje materiál na ploche triesky, ktorá je v interakcii s brúsiacim zrnom (lesklá plocha triesky po kontakte so zrnom).



Obr. 2.8 Pohľad na triesky od plochy, ktorá je v kontakte s brúsiacim zrnom. 1 – guľová trieska, 2 – trieska z pohľadu od zrna, 3 – zadná strana triesky so stopami sklzy

Na obr. 2.9 je pohľad na triesky, na ktorom vidno povrchy triesok, odvrátené od zrn. Vidno postupné vystupujúce sklzy v trieskach.



Obr. 2.9 Pohľad na povrchy triesok, odvrátených od brúsnych zrn.

2.2 Teplotné pole v brúsiacom zrne

Opotrebovanie a plastická pevnosť brúsiacich zrn brúsiaceho kotúča závisí výrazne od hĺbky preniknutia tepla do abrazívneho zrna. Preto štúdium teplotného poľa má dôležitý praktický efekt. Ohrev materiálu abrazívneho zrna v kontakte s obrokom možno opísať riešením klasickej Fourierovej diferenciálnej rovnice vedenia tepla. Krátko trvajúcim kontaktom sa teplo šíri do malej hĺbky zrna, preto abrazívne zrno možno v prvom priblížení abstrahovať ako tyč, ukončenú z jedného čela nekonečne veľkou plochou. v tomto prípade je tepelný tok rovnomerný a diferenciálna rovnica vedenia tepla bude mať tvar:

$$\frac{\partial \theta(x, \tau)}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 \theta(x, \tau)}{\partial x^2}. \quad (2.1)$$

Riešenie rovnice spočíva v hľadaní zákona rozdelenia teploty v ľubovoľnom bode abrazívneho zrna v sledovanom čase τ pri uvažovaní začiatočných a hraničných podmienok. Začiatočná podmienka je v zadaní zákona rozdelenia teploty telesa na začiatku procesu, keď abrazívne zrno je v kontakte s materiálom.

Vtedy

$$\theta(x, 0) = \theta_0 = \text{konšt.}, \quad (2.2)$$

kde θ_0 je teplota okolia.

Hraničná podmienka (prvého druhu) je v zadaní teploty povrchu telesa pri jeho ohreve, v ľubovoľnom časovom momente. Analýza oscilografických záznamov kontaktných teplôt ukazuje, že teplota na povrchu abrazívneho zrna, ktoré odoberá triesku je približne konštantná po celý čas kontaktu:

$$\theta_k = \text{konšt.}, \quad (2.3)$$

kde θ_k je stanovená experimentálne.

Ak použijeme metódu okamžitých zdrojov tepla a uvažujeme začiatočné (2.2) a konečné (2.3) podmienky, dostaneme riešenie diferenciálnej rovnice (2.1) v tvare:

$$\frac{\theta_k - \theta(x, \tau)}{\theta_k - \theta_0} = e^{-\frac{x}{2\sqrt{a\tau}}}, \quad (2.4)$$

kde $\theta(x, \tau)$ je teplota v bode, ktorý je umiestnený vo vzdialenosti x od čela abrazívneho zrna,

pri trvaní kontaktu τ_k ,

a - tepelná vodivosť.

$$\frac{\theta_k - \theta(x, \tau)}{\theta_k - \theta_0} = 0 \quad (2.5)$$

je prírastok teploty.

Pomer $\frac{a \cdot \tau}{x}$ je Fourierovým kritériom Fo z procesu čistého vedenia tepla, pre súradnicu x .

Potom riešenie (2.4) možno napísať:

$$\theta = e^{2 \cdot \sqrt{Fo \cdot x}} \quad (2.6)$$

Tepelno-fyzikálne parametre v rovnici (2.4) s presnosťou, ktorá stačí re inžinierske výpočty, možno považovať za nezávislé od teploty. V praktických výpočtoch sa tepelno-fyzikálne parametre stanovia ako stredné hodnoty z hraničných teplôt telesa a tieto hodnoty sa považujú za konštantné. Stredné hodnoty tepelno-fyzikálnych parametrov podľa údajov rôznych autorov sú v *tab. 2.1*.

Fyzikálno-mechanické vlastnosti niektorých rezných materiálov

Tab. 2.1

Brúsiaci materiál	Teplota K	Koeficient vedenia tepla $ W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1} $	Merné teplo $ J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1} $	Teplotná vodivosť $ 10^{-6} m^2 \cdot s^{-1} $
Al ₂ O ₃	1 250-1 650	5,196	1085,2	1,2
SiC	1 250- 1650	12,36	1127,6	2,9
KNB	293	41,9	670,4	18,0
Diamant	293	137,85	471,8	83,0

Výsledky výpočtu teplotných polí ukazujú, že najväčšia hĺbka preniku tepla sa dosahuje pri diamante, potom pri KNB, SiC a Al₂O₃. Napr. pri trvaní kontaktu 30 μs , čo odpovedá reznej rýchlosti $v_c = 35 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, pri elektrokorunde je táto hodnota 20 μm , pri SiC – 50 μm , pri KNB – 150 μm a pri diamante 250 μm . Z toho vyplýva, že hĺbka preniknutia tepla závisí výrazne od tepelno-fyzikálnych charakteristík abrazívnych materiálov. Čím menšia je tepelná vodivosť abrazívneho materiálu, tým menšie množstvo tepla, ktoré sa vytvorí počas jedného kontaktu sa dostane do brúsiaceho zrna.

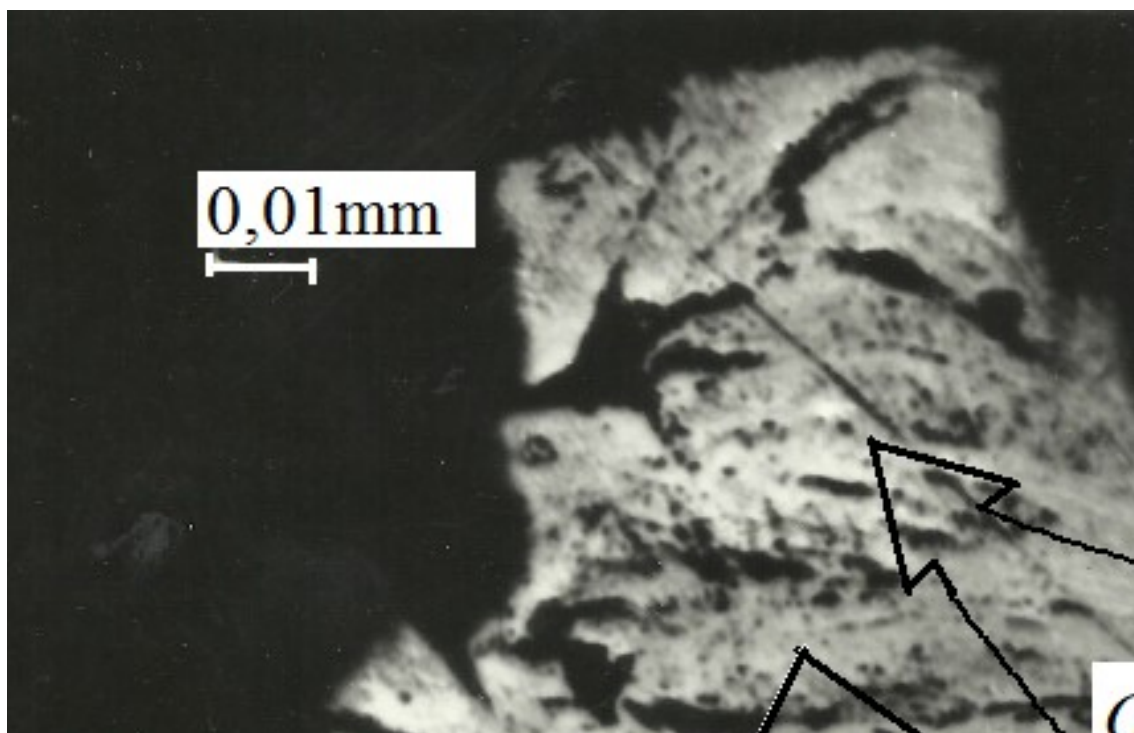
Nie menší abrazívny vplyv na hĺbku prieniku tepelného impulzu do zrna má trvanie kontaktu. Pri zmenšení času kontaktu z 50 na 10 μm , hĺbka sa zmenší asi 2-krát.

Výpočty teplotných polí sa vzťahujú pre brúsenie na plocho a vonkajšie brúsenie pri krátkom čase kontaktu. Najdlhší kontakt je pri vnútornom a rovinnom brúsení (čelom kotúča). Ako ukazujú výpočty, hĺbka šírenia tepla sa zväčší a môže dosiahnuť niekoľko desiatín mm.

2.3 Teplotné pole v obrobnku

Pri brúsení sa vytvára v zóne brúsenia a obrobnku teplotné pole, ako výsledok skladania elementárnych tepelných zdrojov, ktoré vznikajú v zóne brúsenia v dôsledku interakcie abrazívnych zrn a spojiva brúsiaceho kotúča s povrchom obrobnku. Sledujme vplyv jednotlivých zdrojov na výslednú teplotu v zóne brúsenia.

Najväčšie množstvo tepla, ktoré vzniká pri brúsení sa koncentruje v zóne tvorenia triesky a kontaktných vrstvách triesky a odvádza sa spolu s trieskou. Schéma šírenia tepla z miesta jeho vzniku pri brúsení jednotlivým zrnom je na obr. 2.7.



Obr. 2.7 Schéma zdrojov a šírenia tepla od nich. Q_d – teplo, vyvolané deformáciou, Q_{tc} – teplo, vyvolané trením na čele, Q_{tch} – teplo, vyvolané trením na chrbte zrna

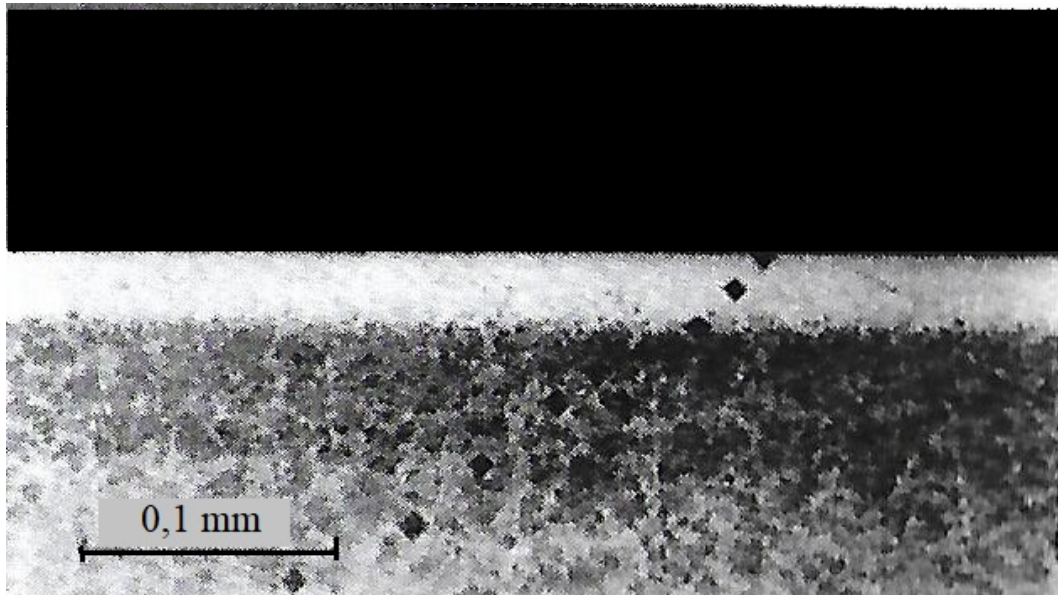
Sú teda definované tri zdroje tepla od ktorých sa teplo šíri do triesky, obrobku a brúsneho zrna. Ohrev povrchových vrstiev obrobku je spôsobený najmä teplom adhézneho trenia na chrbtovej ploche zrna, teda plastickou deformáciou kontaktných vrstiev obrobenej plochy.

Teploto, ktoré vzniká plastickým stláčaním a trením abrazívnych zŕn o brúsený povrch je na obr.2.7 Θ_{tch} . Pretože tepelná vodivosť obrábaného materiálu je vo všeobecnosti väčšia ako brúsiaceho zrna (ak vylúčime brúsiace nástroje s kovovou väzbou), do brúseného povrchu ide viac tepla, ako do zrna.

Teplota na kontaktných plochách brúsiacich zŕn, ktoré spôsobujú plastické stláčanie materiálu a trenie o obrobenej plochu je charakteristické rázmi, ktorých veľkosť závisí od reznej rýchlosti a veľkosti normálovej sily. Táto teplota je nižšia, ako teplota na kontaktných plochách zŕn, ktoré pracujú v podmienkach odoberania triesky.

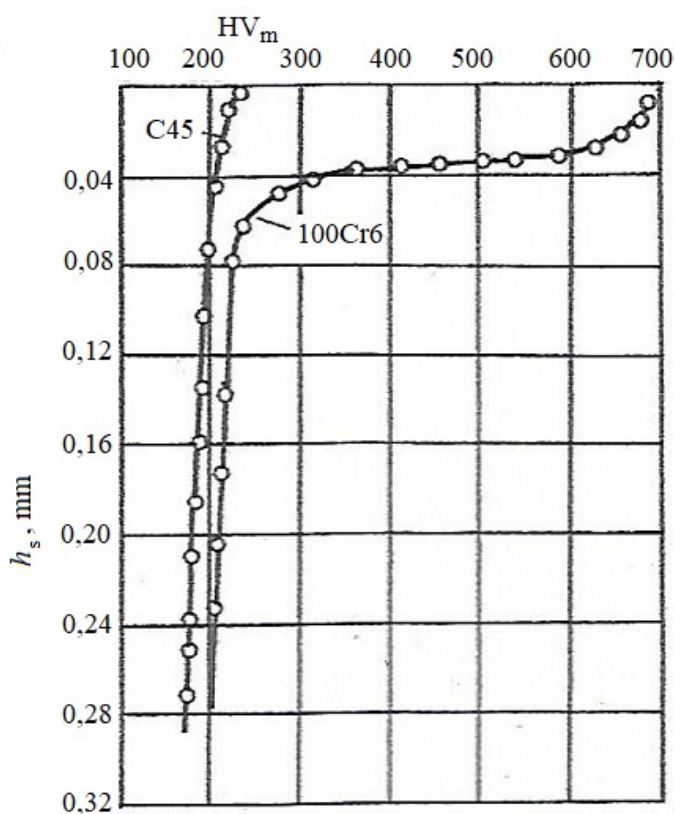
V rade prípadov významne vplýva na teplotu povrchových vrstiev obrobku trenie spojiva o obrábanú plochu.

Pôsobenie uvedených tepelných zdrojov vyvoláva v mnohých prípadoch tak intenzívny ohrev povrchovej vrstvy obrobku, že vznikajú fázové a štruktúrne modifikácie. Tento jav je pozorovaný na obr. 2.8, na ktorom je fotografia metalografického výbrusu obrobku z kalenej ocele 100Cr6 v reze kolmom na brúsenú plochu.



Obr.2.8 Metalografický výbrus podpovrchovej vrstvy brúsenej vzorky z ocele 100Cr6 ($v_c = 30 \text{ m.s}^{-1}$, brúsiaci kotúč A99 25K 8V, $a_p = 0,3 \text{ mm}$, $v_f = 5 \text{ m.min}^{-1}$)

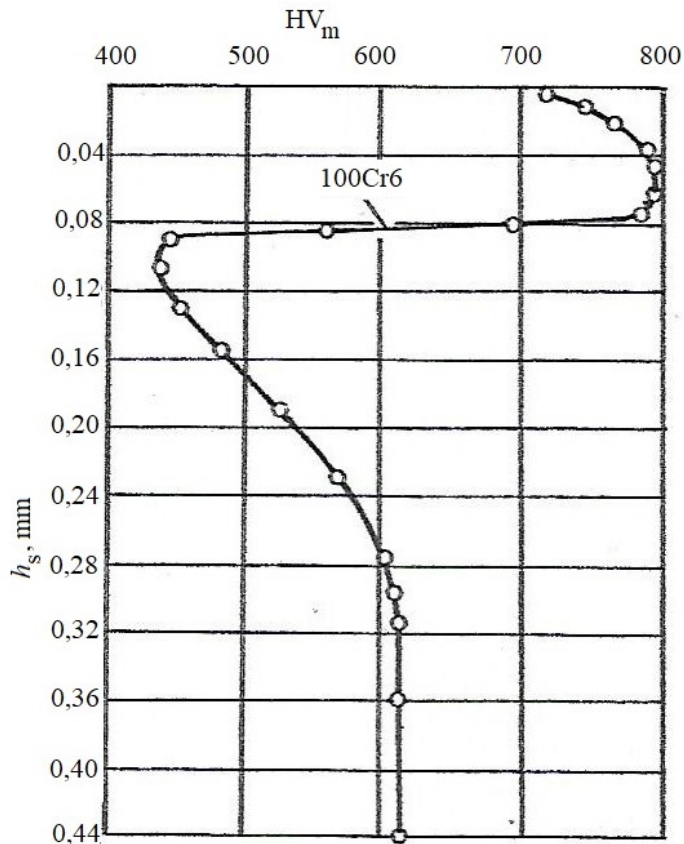
Vidno, že pri intenzívnych podmienkach brúsenia vznikajú v podpovrchovej vrstve tri fázy. Bezprostredne pod povrchom vzniká biela vrstva, ktorá predstavuje neleptateľnú amorfnú štruktúru po sekundárnom kalení. Pod ňou je popustená vrstva materiálu, ktorá prechádza do základnej zakalenej štruktúry. Zmeny, ktoré nastávajú v týchto vrstvách možno identifikovať meraním mikrotvrdości. Na *obr. 2.9* je záznam z merania mikrotvrdości v povrchovej vrstve dvoch ocelí po brúsení pri rovnakých rezných podmienkach.



Obr. 2.9 Priebeh mikrotvrdości pod brúseným povrchom žihanej oceli C45 a 100Cr6

Pretože normalizačne žihaná ocel' C45 nie je prekaliteľná, vzniklo iba čiastočné zakalenie. Pri oceli na valivé ložiská 100Cr6, žihanej sferoidizačne je vzrast tvrdosti podpovrchovej vrstvy značný. Došlo k zakaleniu povrchovej vrstvy do hĺbky 0,08 mm.

Na *obr. 2.10* je krivka priebehu mikrotvrdości po brúsení kalenej ložiskovej ocele.

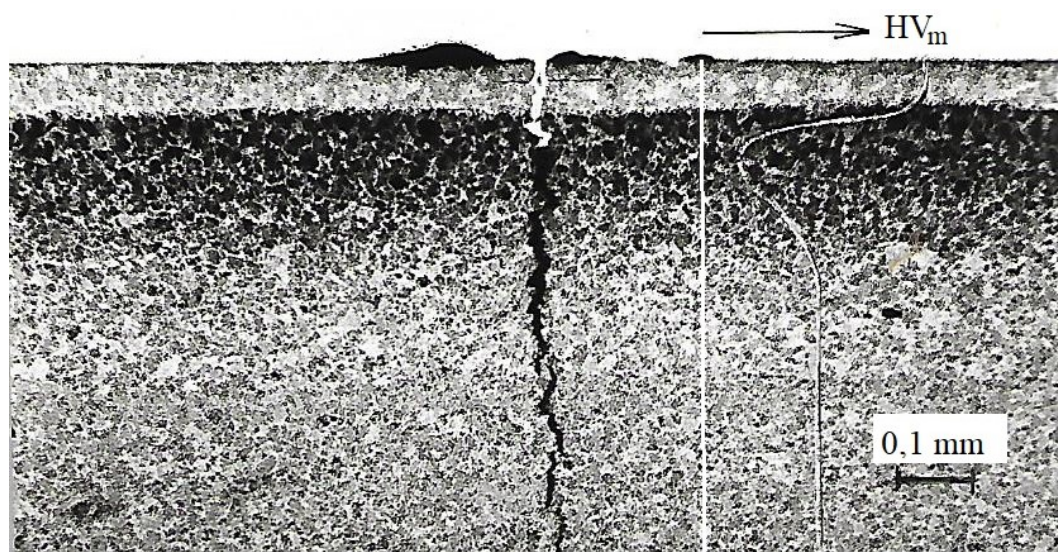


Obr. 2.10 Priebeh tvrdosti pod brúseným povrchom kalenej ocele 100Cr6

Vidno, že došlo k sekundárnemu zakaleniu povrchovej vrstvy do hĺbky 0,08 mm. Pod toto vrstvou je popustená oblasť s výrazným poklesom mikrotvrdosti. Prechod je prudký a môže spôsobiť problémy pri prevádzke takto brúsenej súčiastky vplyvom extrémnych napätí pod brúseným povrchom:

- pri miestnom tlakovom zaťažení sa môže mäkká podpovrchová vrstva prehnúť, čo povedie k prasknutiu krehkej prekalenej vrstvy
- pri dokončovaní takéhoto povrchu (lapovanie, superfinišovanie, mechanické leštenie) s nekontrolovaným úberom môže dôjsť k úplnému odstráneniu prekalenej vrstvy a na povrch sa dostane málo únosná popustená štruktúra (únosnosť povrchu sa výrazne zníži).

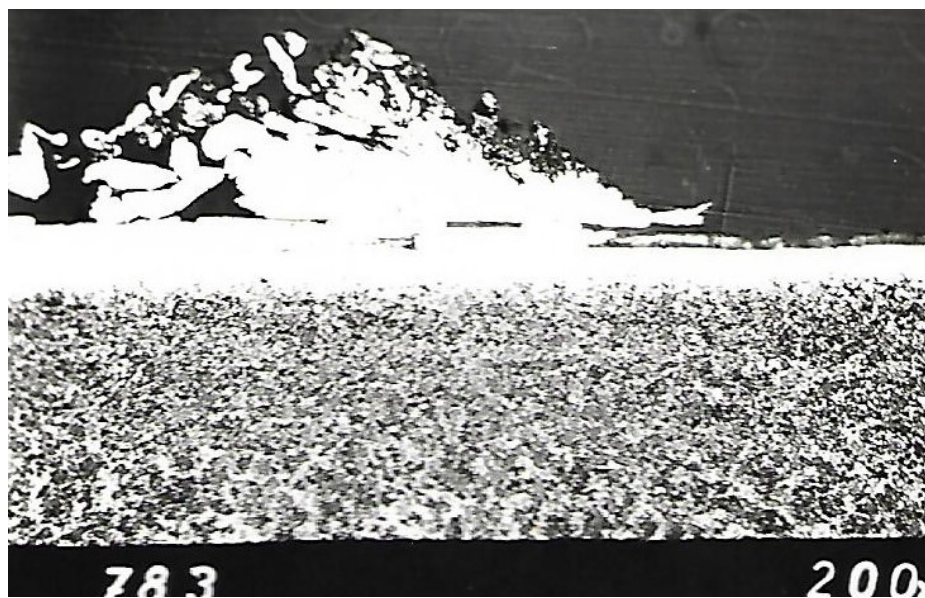
Na obr. 2.11 je na ilustráciu náhodne identifikovaný vznik trhliny pod povrchom ložiskového krúžku z prevádzky valivého ložiska. Na fotografii je súčasne naznačený priebeh mikrotvrdosti z obr. 2.10.



Obr. 2.11 Príklad havarijného poškodenia povrchu krúžku valivého ložiska pri zaťažení valivým telieskom, pri vzniku vnútorných zvyškových napätí

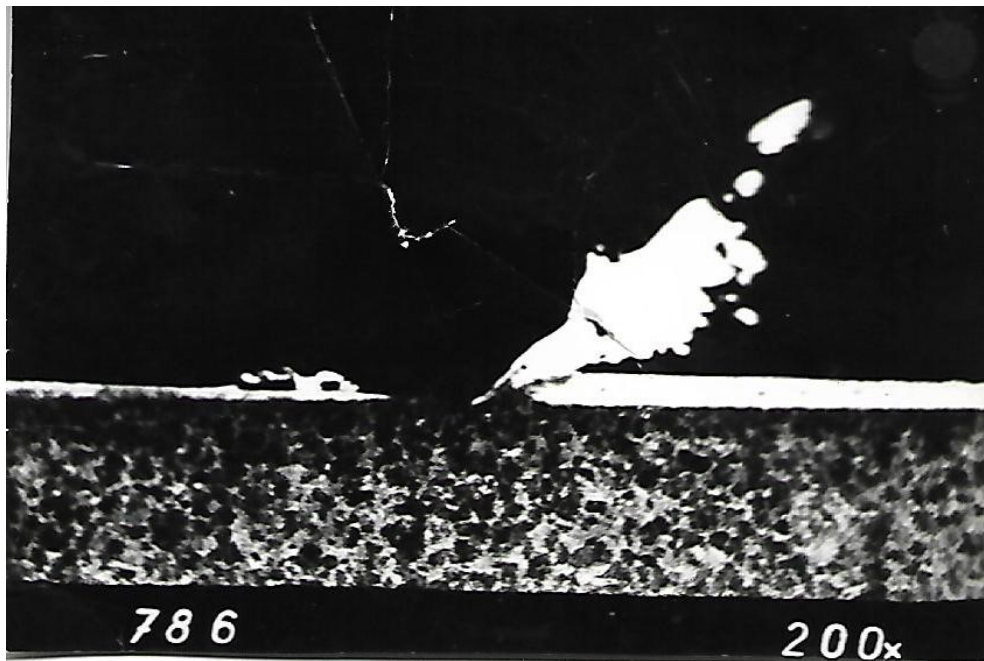
Na identifikáciu vlastností sekundárne zakalenej vrstvy bolo vykonaných viacero pokusov brúsením tak, aby hrúbka odrezávanej vrstvy bola menšia, alebo rovná bielej vrstve.

Prvý prípad odpovedá brúseniu časti bielej vrstvy (obr. 2.12). Dokumentuje, že biela vrstva sa pri ohreve teplotou rezania správa ako plastická. Odchádzajúca trieska má rovnakú štruktúru.



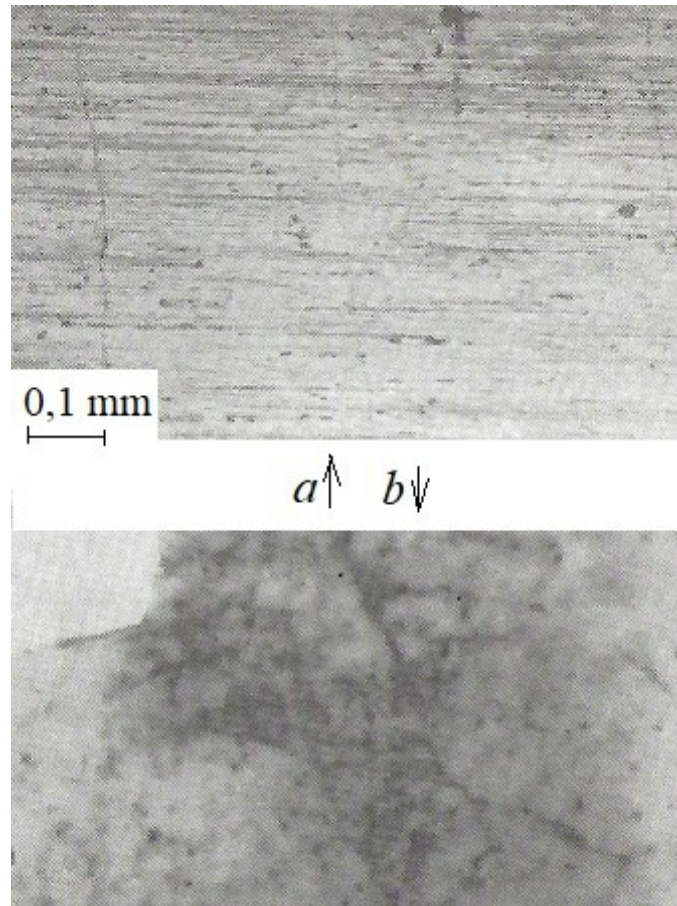
Obr. 2.12 Metalografický výbrus zóny tvorenia triesky z časti bielej vrstvy

Druhý prípad bol realizovaný pri brúsení celej bielej vrstvy – obr. 2.13.



Obr. 2.13 Metalografický výbrus zóny tvorenia triesky pri nastavení brúsiaceho zrna na celú hrúbku bielej vrstvy

Vidno, že po odbrúsení bielej vrstvy vzniká za zrnom ďalšia, pričom sa zväčšila hrúbka popustenej vrstvy (tmavý pás za zrnom). To svedčí znova o intenzívnom ohreve povrchu teplom trenia a deformácie pri brúsení bielej vrstvy. Štúdium vlastností bielych vrstiev naznačuje, že z hľadiska prevádzkovej funkcie súčiastky môžu mať aj pozitívny vplyv a ich hlbšiemu štúdiu je potrebné venovať pozornosť. Tieto javy možno charakterizovať ako proces jemného povrchového tepelného spracovania, alebo aj „kalenia brúsením“. Ak sa podarí zvládnuť reguláciu tohto procesu, bude možné vytvárať povrchové vrstvy vopred definovaných vlastností a v rade prípadov nahradiť nasledujúce kalenie. V iných prípadoch existencia bielych vrstiev sa charakterizuje ako nepriaznivý jav, ktorý svedčí o vysoko intenzívnom ohreve povrchu a môže pri nasledujúcom prudkom ochladení viesť ku vzniku trhlín, kolmých na brúsený povrch, ako dôsledok ťahových napätí v povrchovej vrstve (obr. 2.14). Preto tejto problematike je potrebné venovať pozornosť, najmä pri brúsení krehkých materiálov s malou pevnosťou v ťahu a brúsení s aplikáciou chladiacich médií.



Obr. 2.14 Pohľad na brúsený povrch reznej platničky zo spekaného karbidu P20 (a) a keramickej platničky z Al_2O_3 (b)

Trhliny na povrchu spekaného karbidu sú kolmé na smer brúsenia, v druhom prípade sú sieťové. Zrejme to súvisí s nízkou tepelnou vodivosťou keramiky (čistá keramika Al_2O_3 je vlastne izolant). Vľavo hore je zaznamenané vyštípenie materiálu platničky po brúsení (bez mechanického vplyvu).

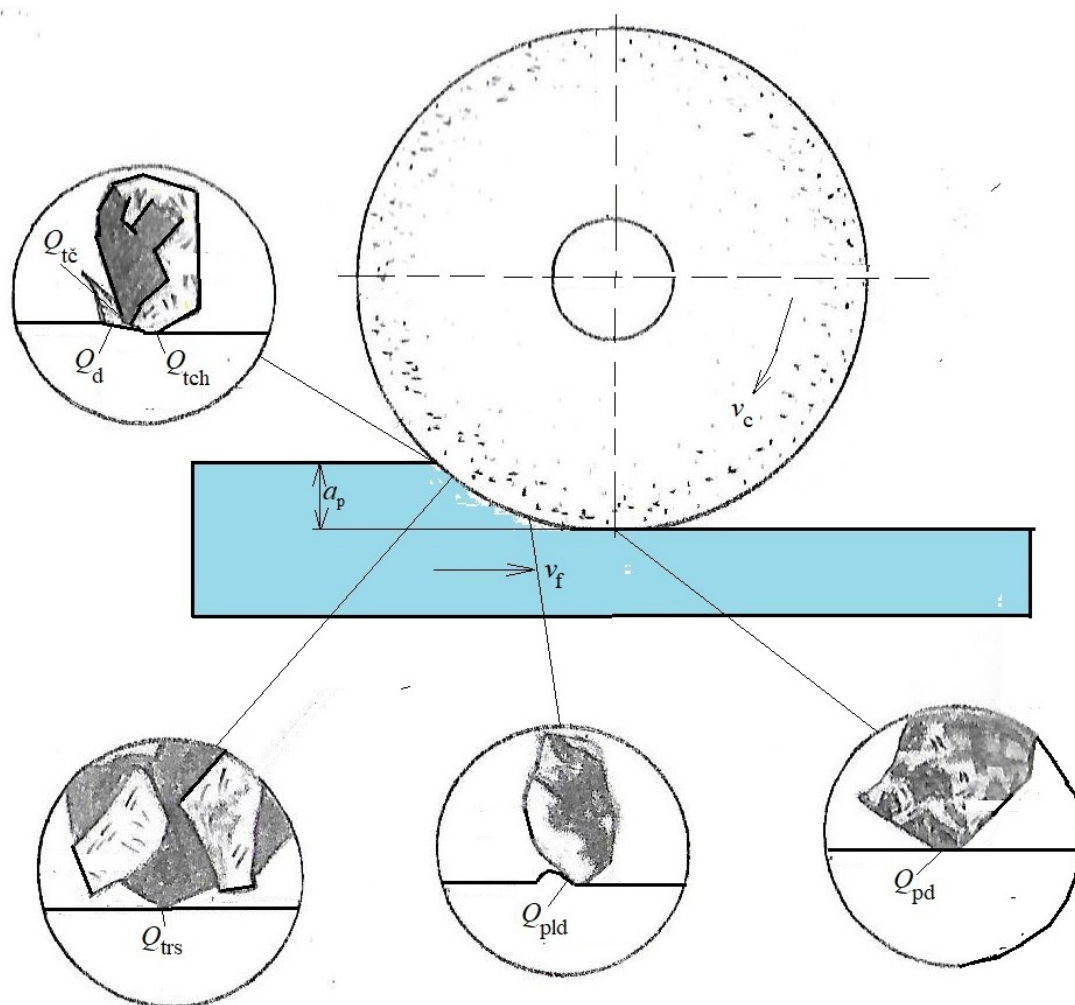
Vyššie bolo konštatované, že intenzitu vývoja tepla pri brúsení určuje najmä trenie zrna o obrobený povrch. Pri trení spojiva o brúsený povrch je situácia zložitejšia. Už pri teplote 470 K začína bakelit mäknúť, čo vývoj tepla znižuje. Adhézna interakcia keramickeho spojiva s obrábanym materiálom je vyššia, ale pri trení sa spojivo čiastočne krehko porušuje, pričom disperzná energia je minimálna.

Najväčší vývoj tepla je pri kovovom spojive, pretože adhézna väzba s obrábanym materiálom je najpevnějšía (trenie kovu po kove a rastie práca trenia. O tejto skutočnosti

svedčia aj merania rezných síl, ktoré dokumentujú, že pri brúsení diamantovými nástrojmi s kovovým spojivom v porovnaní s bakelitovým rezná sila rastie 3 až 5-krát.

Intenzita tepelného zdroja závisí nielen od adhézných vlastností spojiva, ale aj od jeho množstva na pracovnom povrchu kotúča.

Na obr. 2.15 je schéma zdrojov tepla v priebehu záberu brúsneho kotúča s obrokom.



Obr. 2.15 Zdroje tepla v procese brúsenia. Q_{tc} -teplo trenia na čele zrna, Q_d -teplo deformácie, Q_{tch} -teplo trenia chrbta zrna o obrobenú plochu, Q_{trs} -teplo trenia spojiva, Q_{pld} -teplo plastickej deformácie, Q_{pd} -teplo pružnej deformácie

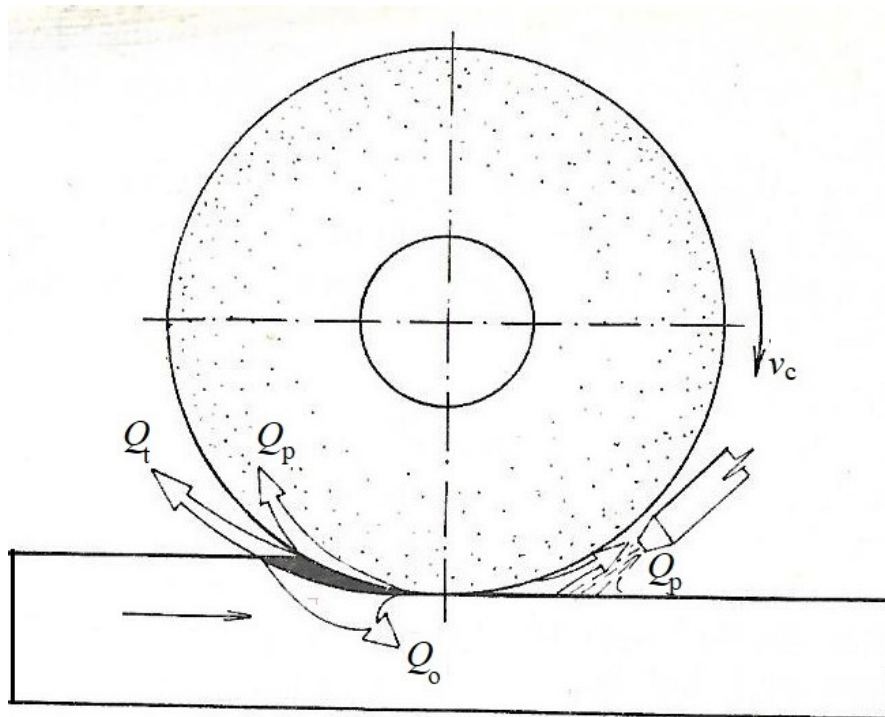
Ako vidno, teplo, vznikajúce pri brúsení v rozličných miestach kontaktu zrna s materiálom sa skladá z viacerých samostatných zdrojov. Teplo triesky je súčtom nasledovných zdrojov:

$$Q_{tr} = Q_d + Q_{tc} + Q_{tch} \quad (2.7)$$

Teplo, ktoré sa vyvíja pri brúsení sa šíri vedením do obrobku – Q_o , kotúča – Q_k , triesky – Q_t , a prostredia – Q_p . Možno zostaviť rovnicu tepelnej bilancie:

$$Q_d + Q_{tč} + Q_{tch} + Q_t + Q_{ts} = Q_o + Q_k + Q_p \quad (2.8)$$

Šírenie tepla do obrobku, kotúča a prostredia je na obr. 2.16.



Obr. 2.16 Šírenie tepla z kontaktu medzi brúsiacim kotúčom a obrobkom

Množstvo tepla od každého zdroja závisí na režime brúsenia, fyzikálno-mechanických a tepelno-fyzikálnych vlastností obrábaného materiálu, druhu abrazívneho materiálu a materiálu spojiva a druhu prostredia.

Podľa doterajších prác, venovaných tepelnej bilancii pri brúsení možno konštatovať, že asi 60 – 65 % z celkového množstva tepla sa šíri do obrobku, 12 – 30 % do nástroja a 5 – 25 % do triesky.

Porovnanie maximálnych hrúbok triesok, odoberaných pri brúsení s hrúbkami vrstvy, zohriatou na vysokú teplotu ukazuje, že vo väčšine prípadov je hrúbka triesky značne menšia ako hrúbka tepelne ovplyvnenej zóny. Možno konštatovať, že brúsiace zrná odrezávajú

materiál, ohriaty na vysokú teplotu. Tým možno vysvetliť skutočnosť, že brúsne zrná, držané v kotúči spojivom počas brúsenia nevypadnú zo spojiva.

Určenie teploty prirodzeného samo ohrevu má veľký význam pri posudzovaní obrábatel'nosti materiálov brúsením.

Uvedieme postup experimentálne analytického určenia priestorovo-časového teplotného poľa v zóne brúsenia, v ktorom sú namiesto radu zjednodušení použité experimentálne údaje. Tým použitý výpočtový model je blízky k reálnemu procesu vývoja tepla pri brúsení.

Pretože brúsiace zrná sú v kotúči umiestnené v určitých vzájomných vzdialenostiach, každý bod obrobeného povrchu je po vplyvom periodických tepelných impulzov. Preto pri výpočte teploty v ľubovoľnom bode brúseného povrchu treba rozlišovať dve periódy – kontaktnú, keď je sledovaný bod v kontakte s abrazívnym zrnom a periódu ochladzovania, keď je povrch ochladený pred záberom ďalšieho zrna.

Pri kontaktnej perióde sa povrchové vrstvy zohrievajú na určitú teplotu. Čas tepelného pôsobenia v každom bode obrábaného povrchu závisí od reznej rýchlosti a plochy kontaktu abrazívneho zrna s obrobenou plochou.

V perióde ochladzovania sa šíri teplo do obrábaného materiálu vedením a do okolia – konvekciou. Trvanie periódy ochladzovania je dané vzdialenosťou medzi abrazívnymi zrnami brúsiaceho kotúča a reznou rýchlosťou. kontaktu brúsneho zrna s obrokom, teplotu, ktorá je výsledkom pôsobenia jednotlivých tepelných zdrojov. Na určenie množstva impulzov, ktoré vznikajú v každom bode obrábanej plochy sledujeme idealizovaný proces vrezávania brúsiaceho zrna do súčiastky, keď sa vytvára úsek kontaktu brúsiaceho zrna s obrokom.

Pri kontakte brúsiaceho kotúča s obrábaným materiálom zrno odoberá triesku a vytvára teplotné pole v súčiastke. Pri premiestňovaní obrobku prichádza do kontaktu ďalšie zrno, ktoré pri odoberaní triesky mení pôvodné teplotné pole. Každé ďalšie zrno mení polohu teplotného poľa v súčiastke. To prebieha dovtedy, kým nenastane plný kontakt kotúča s obrokom. Teplotné pole sa premiestňuje a ďalšie premiestňovanie obrobku nevyvolá zmenu teplotného poľa, ale len jeho premiestnenie vo smere posuvu. Takto vytváranie teplotného poľa v povrchovej vrstve obrobku prebieha pri pôsobení tepelných impulzov až do vytvorenia plného kontaktu kotúča s obrokom.

Výsledky skúšok ukázali, že z celkového počtu brúsiacich zrn, umiestnených na povrchu kotúča sa asi 80 % nezúčastňuje na brúsení, asi 10 – 12 % sa pružne a plasticky stláča a len cca 10 % sa priamo podieľa na tvorení triesky.

Na určenie času kontaktu abrazívneho zrna s každým bodom obrobenej plochy treba poznať plôšku opotrebenia na abrazívnom zrne. Na základe sledovania reliéfu pracovného povrchu kotúča sa určilo, že pri brúsení vznikajú plôšky opotrebenia, ktorých veľkosť prudko rastie v prvých minútach práce kotúča, potom je nárast miernejší. Treba poznamenať, že plôšky určitej veľkosti sa zistili na vrcholoch brúsiacich zrn a na naostrenom brúsnom kotúči. Možno povedať, že brúsiaci kotúč počas svojej trvanlivosti pracuje väčšinou so zrnami, ktoré majú na chrbte plôšky určitej veľkosti. Preto pri určovaní času kontaktu zrna s každým bodom povrchu možno brúsiace zrná modelovať v tvare plôšok, ktorých dĺžka sa mení v závislosti od konkrétnych podmienok.

Ako bolo uvedené, na vytváraní teplotného poľa pri brúsení sa podieľajú tepelné zdroje, ktoré sú výsledkom pôsobenia abrazívnych zrn a spojiva.

Teplota, ktorá je výsledkom pôsobenia týchto zdrojov, kolíše v širokom rozsahu. Stredná teplota sa dá stanoviť experimentálne meraním termoelektrickej sily od jedného radu zrn. Na zjednodušenie výpočtu možno prijať tézu, že vytváranie teplotného poľa je výsledkom pôsobenia abrazívnych zrn, ktoré odoberajú triesku. Zjednodušenie vedie ku zväčšovaniu hĺbky ohrevu povrchových vrstiev obrobku.

Proces ohrevu obrobeného povrchu v perióde kontaktu možno opísať diferenciálnou rovnicou vedenia tepla, pri počiatočných podmienkach:

$$Q(x, \tau_{pk}) = \varphi(x) \quad (2.9)$$

a hraničných podmienkach:

$$\theta(0, \tau_k) = \theta_k = \text{konšt} \quad (2.10)$$

$$\frac{\partial \theta(n\tau_k, \tau_k)}{\partial x}$$

kde θ_k je stredná integrálna teplota kontaktu, určená experimentálne,

x – vzdialenosť obrábanej plochy,

$\tau_{pk} = (n-1)(\tau_k + \tau_0)$ - čas začiatku kontaktu n-teho zrna,

τ_0 - čas ochladzovania,

τ_k - čas kontaktu,

n – počet stretnutí zrna s obrobenou plochou.

Po uplynutí času τ_k brúsiace zrno vychádza z kontaktu a povrch brúsenej súčiastky sa začína ochladzovať do času kontaktu s ďalším zrnom.

V perióde ochladzovania aj ohrevu považujeme zrno za poloohraničené teleso, ktorého bočné plochy sa tepelne izolujú a výmena tepla medzi okolím a neizolovaným koncom telesa prebieha podľa Newtonového zákona iba v jednom smere. Pre identifikáciu teplotného poľa v súčiastke treba riešiť diferenciálnu rovnicu vedenia tepla (2.1) pri uvažovaní začiatočných podmienok:

$$\theta(x, \tau_{pon}) = \varphi(x) \quad (2.11)$$

a hraničných podmienkach:

$$\begin{aligned} \frac{\lambda \cdot \partial \theta(0, \tau_0)}{\partial x} + a[\theta_k - \theta(0, \tau_0)] &= 0 \\ \theta(nek, \tau_{0n}) &= \theta_0 \\ \theta(x, \tau_{pon}) &= \theta(x, \tau_k) \\ \theta(x, \tau_{pon}) &= \theta\langle x[\tau_k + (n-1)(\tau_k + \tau_0)] \rangle \end{aligned} \quad (2.12)$$

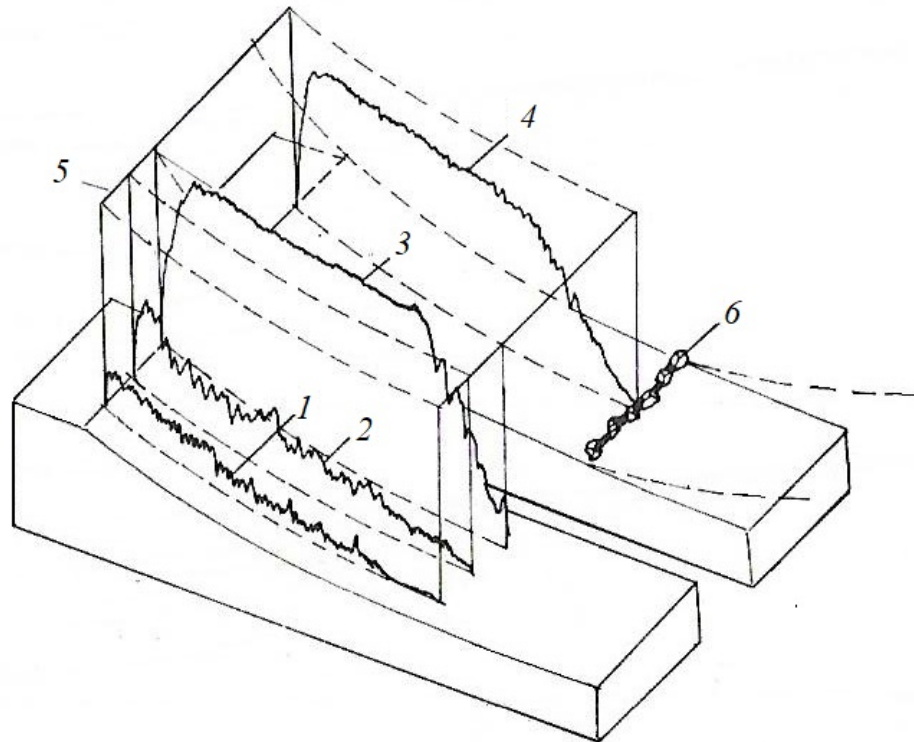
kde $\tau_{pon} = \tau_k + (n-1)(\tau_k + \tau_0)$ je čas chladenia jedného zrna.

Výpočet je potrebné realizovať tak, že začiatočnou podmienkou pre každú periódu ochladzovania je teplota, ktorá odpovedá koncu predchádzajúcej periódy kontaktu a začiatočná podmienka pre nasledujúcu kontaktnú periódu je hodnota teploty, ktorá zodpovedá koncu predchádzajúcej periódy ochladzovania.

2.4 Integrálna teplota kontaktu

Ako je známe, pri brúsení sa pružne a plasticky stláča materiál, odoberá sa trieska a dochádza aj ku treniu spojiva o obrobenú plochu. V zóne kontaktu na celej šírke brúsneho kotúča môžeme charakterizovať strednú integrálnu teplotu kontaktu. integrálna teplota kontaktu je dôležitým technologickým parametrom, ktorý značne vplýva a kvalitu obrobenej plochy a z viacerých aspektov podmieňuje charakter interakcie abrazívneho nástroja s obrábaným materiálom.

Na obr. 2.17 je hypotetická schéma vytvorenia stredne integrálnej teploty kontaktu [4].



*Obr. 2.17 Schéma vytvárania strednej integrálnej teploty v zóne kontaktu pri brúsení.
 1 - teplota trenia a plastickej deformácie, 2 - teplota trenia spojiva, 3 - teplota kontaktu pri rezení jedným zrnom, 4 - stredná integrálna teplota brúsenia pri rezení jedným radom brúsiacich zrn, 5 - teplota tavenia obrábaného materiálu, 6 - rad brúsiacich zrn*

Táto teplota sa s premiestňovaním brúsneho kotúča pozdĺž kontaktu zväčšuje. spôsobuje to skutočnosť, že intenzita tepelných zdrojov, ktoré prispievajú k rastu integrálnej teploty takisto rastie a dosahuje maximum pri vychádzaní kotúča z kontaktu. Z toho vyplýva aj to, že hodnota integrálnej teploty je v ľubovoľnom bode kontaktu nižšia ako teploty, ktoré sa dosahujú na režúcich zrnách a je vyššia ako teplota trenia zrn a spojiva o obrábanú plochu.

Integrálna teplota, ktorá predstavuje strednú hodnotu teploty po šírke brúsiaceho kotúča sa principiálne odlišuje od teploty, ktorá vzniká v zóne brúsenia na obrábanej ploche. Podstata je v tom, že stredná kvadratická teplota kontaktu sa vytvára ako výsledok interakcie uvedených tepelných zdrojov s obrábaným materiálom. Teplota v zóne brúsenia vzniká ako výsledok úberu materiálu, ktorý má premenlivý prierez.

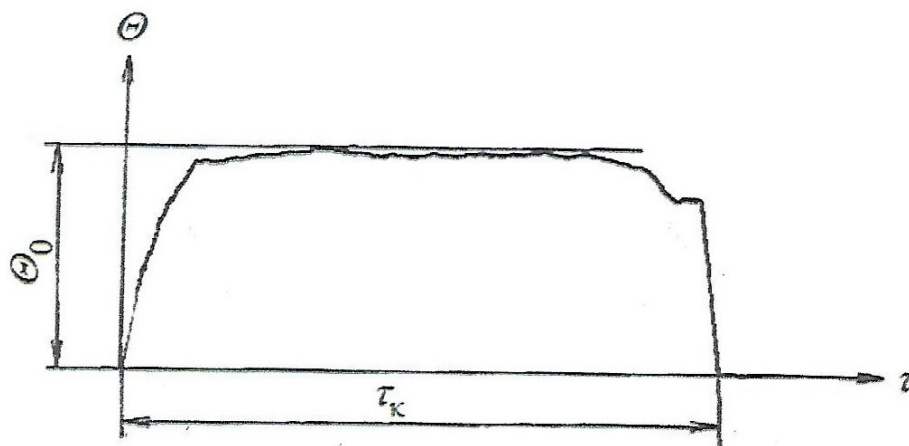
Stredná kvadratická teplota a teplota povrchu sa na začiatku kontaktu málo navzájom odlišujú. Pri zväčšovaní dráhy zrn pozdĺž kontaktného oblúka sa rozdiel oboch teplôt

zväčšuje úmerne k hrúbke odrezávanej vrstvy. Minimálnu hodnotu dosahuje teplota povrchu pri vychádzaní brúsiaceho kotúča zo záberu, čiže tam, kde hrúbka odrezávanej vrstvy dosahuje maximum.

Experimentálnym dôkazom týchto javov sú výsledky štúdia teplotného poľa v obrábanom materiáli v zóne brúsenia metodikou okamžitého prerušenia procesu brúsenia. Vidno, že teplotné pole má klinovitý charakter, z čoho je zrejmé, že zdroj tepla pozdĺž kontaktného oblúka má premenlivú intenzitu. Maximálna je pri vchádzaní a minimálna pri vychádzaní zo záberu. Pretože intenzita tepelného zdroja je na prevažnom úseku oblúka približne rovnaká, príčinou zmeny intenzity zdroja tepla je zmena prierezu odrezávanej vrstvy materiálu.

Experimentálna identifikácia strednej integrálnej teploty kontaktu je zložitým technickým problémom. Meraná termoelektrická sila je strednou hodnotou termoelektrickej sily, ktorá vzniká na jednotlivých rezných hranách zrn.

Typický oscilografický záznam z merania je na *obr. 2.18*.



Obr. 2.18 Oscilogram priebehu strednej integrálnej teploty brúsenia po obrábaní nelegovanej ocele kotúčom SiC s keramickým spojivom

Na začiatku má teplota minimálnu hodnotu, potom postupne rastie a dosahuje maximum na konci kontaktu. Analyticky by bolo možné hodnotu strednej integrálnej teploty určiť nasledovne.

Predstavme si, že na brúsený povrch súčiastky pôsobí plošný zdroj tepla, ekvivalentný zložitému zdroju, ktorý je výsledkom spoločného pôsobenia zrn, ktoré pracujú v režime

plastickej deformácie, deformácie a trenia. Je známe, že ak na brúsený povrch pôsobí plošný zdroj tepla, možno kontaktnú teplotu určiť z rovnice:

$$\theta_{str} = \frac{\theta_x - \phi \cdot \theta_0}{1 - \phi}, \quad (2.13)$$

kde θ_{str} je stredná integrálna teplota kontaktu,

θ_x - teplota obrobku v určitej hĺbke,

θ_0 - začiatočná teplota obrobku,

ϕ - pomerný prírastok teploty.

Na určenie strednej integrálnej teploty treba určiť teplotné pole v obrobku. Existujú rôzne metódy na experimentálne určenie teplotného poľa, spomedzi ktorých je najviac spoľahlivá metóda termoindikátorov. Podstata spočíva v tom že na bok vzorky sa naniesie termoidikátor.. Pri brúsení sa zohriata časť termoidikátora modifikuje a vzniká ostrá hranica, ktorá označuje kritickú teplotu použitého termoidikátora. Chyba merania je asi 10 %. Ešte vyššiu pevnosť možno dosiahnuť, ak nanesieme na bočnú stranu vzorky tenkú vrstvu kovu so známou teplotou tavenia.

Súčasný meranie teploty vo viacerých bodoch, rôzne vzdialených od brúseného povrchu dáva predstavu o teplotnom poli v obrobku pri daných podmienkach experimentu. V rovnici (2.13) na určenie θ_{str} treba nájsť hodnotu ϕ podľa vzťahu:

$$\phi = e^{\frac{1}{2 \cdot \sqrt{F_{0x}}}}. \quad (2.14)$$

Fourierovo kritérium $F_{0x} = \frac{a \cdot \tau}{x^2}$ pri známom x a a sa priamo úmerne mení k zmene τ

a je bezrozmerným parametrom času. V dôsledku toho, že v procese brúsenia pôsobí zložitý zdroj tepla, čas jeho pôsobenia τ v súčasnosti nemožno určiť presnejšie.

Ako bolo uvedené, zložitý zdroj tepla možno nahradiť ekvivalentným plošným zdrojom, ktorý v obrobku vytvára podobné teplotné pole. V druhej fáze možno vychádzajúc z takto určeného poľa určiť ekvivalentný zdroj tepla v tvare stredne integrálnej kontaktnej teploty.

Postup výpočtu možno vykonať podľa algoritmu: Experimentálne stanovíme teploty θ_1 a θ_2 a hĺbka ich priebehu v dvoch bodoch x_1 a x_2 . Ak uvážime, že teploty θ_1 a θ_2 v hĺbkach x_1 a x_2 sú výsledkom pôsobenia jedného zdroja tepla, možno napísať:

$$\theta_{str} = \frac{\theta_1 - \phi' \cdot \theta_0}{1 - \phi'} = \frac{\theta_2 - \phi'' \cdot \theta_0}{1 - \phi''}. \quad (2.14)$$

Je známe, že:

$$\theta = e^{\frac{1}{2 \cdot \sqrt{F_{0x}}}} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \int_0^u e^{-u^2} \cdot du, \quad (2.15)$$

kde

$$u = \frac{1}{2 \cdot \sqrt{\frac{a \cdot \tau}{x^2}}} \quad (2.16)$$

Potom

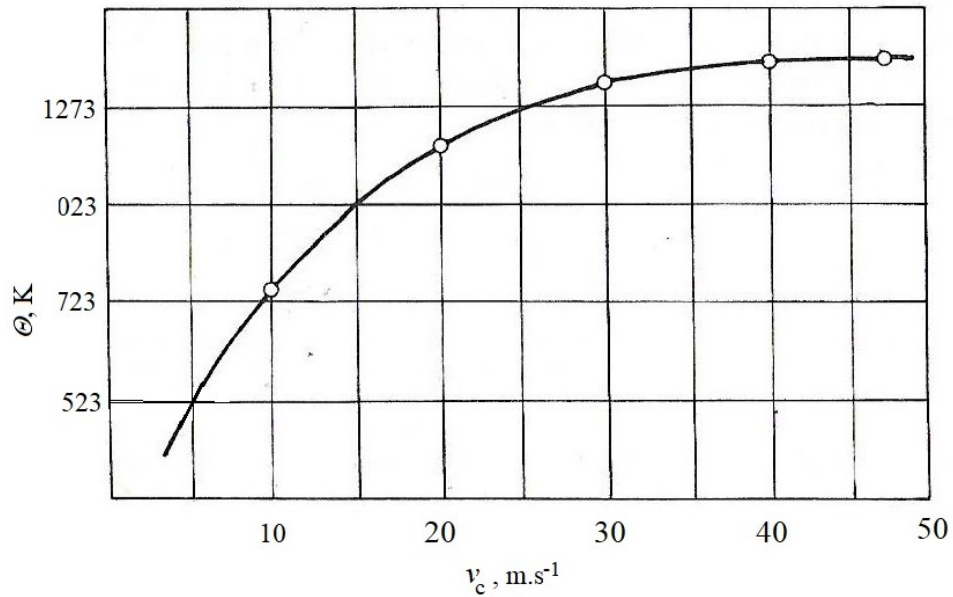
$$\theta_{\text{str}} = \frac{\theta_1 - \left(\frac{2}{\pi} \cdot \int_0^{u_1} e^{-u_1^2} \cdot du_1 \right) \cdot \theta_0 \cdot \theta_2 - \left(\frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \int_0^{u_2} e^{-\frac{u_2^2}{2}} \cdot du_2 \right)}{1 - \int_0^{u_1} e^{-u_1^2} \cdot du_1} = \frac{\theta_2 - \left(\frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \int_0^{u_2} e^{-\frac{u_2^2}{2}} \cdot du_2 \right)}{1 - \int_0^{u_2} e^{-\frac{u_2^2}{2}} \cdot du_2} \quad (2.17)$$

V rovnicu (2.17) je jedinou známou čas pôsobenia tepelného zdroja τ .

V tomto prípade sa úloha modifikuje na určenie takej hodnoty τ , pri ktorej ľavá a pravá časť rovnice budú rovnaké. Pretože hodnoty $\theta_1, \theta_2, x_1, x_2$ sú určené s určitou presnosťou, môže sa stať, že nevznikne úplná rovnosť. Výpočet sa preto realizuje do takej hodnoty τ , pri ktorej bude rozdiel medzi ľavou a pravou stranou minimálny. Pretože na splnenie tejto podmienky treba veľké množstvo výpočtov, bez použitia výpočtovej techniky výpočet prakticky nie je možný. Matematické spracovanie experimentálnych údajov ukazuje, že ak presnosť určenia teplôt θ_1 a θ_2 bude 10 %, nepresnosť strednej integrálnej teploty (je daná štruktúrou rovnice (2.14)), kolíše od 20 do 35 %.

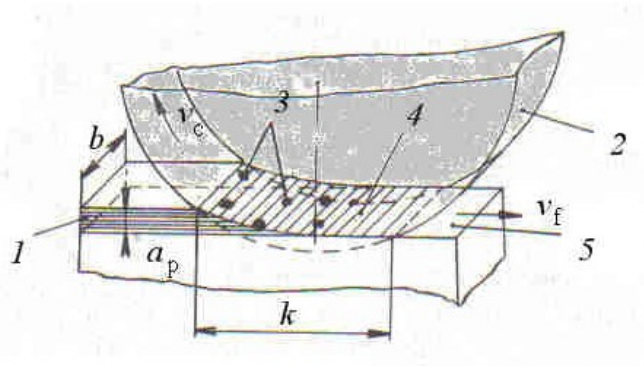
Na obr. 2.19 je príklad závislosti strednej integrálnej teploty kontaktu od rýchlosti pri rovinnom brúsení ocele C45 diamantovým kotúčom.

Vidno, že pri zväčšovaní reznej rýchlosti pri brúsení do 25 m.s⁻¹ prudko stúpa integrálna teplota. Potom intenzita rastu klesá. Absolútna hodnota teploty θ_{str} je menšia ako teplota kontaktu, ktorá vzniká na rezných hranách abrazívnych zrn, ktoré odoberajú triesku. Pri použití efektívnych rezných prostredí sa stredná integrálna teplota kontaktu výrazne znižuje, pretože klesá teplota na abrazívnych zrnách, ktoré pružne a plasticky deformujú materiál.



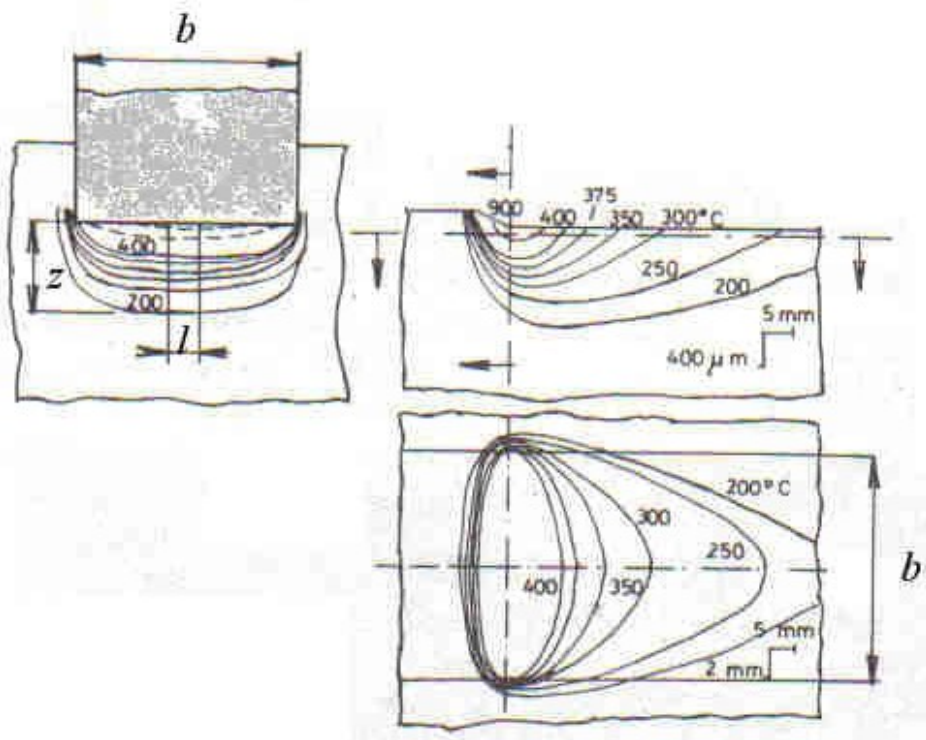
Obr. 2.19 Závislosť strednej integrálnej teploty od reznej rýchlosti pri brúsení ocele diamantovým kotúčom

Zložitejšia situácia v súvislosti s teplotou rezania nastáva pri brúsení krehkých materiálov, napr. pri ostrení rezných nástrojov. Na obr. 2.20 je schéma kontaktu brúsneho kotúča a obrobkom.



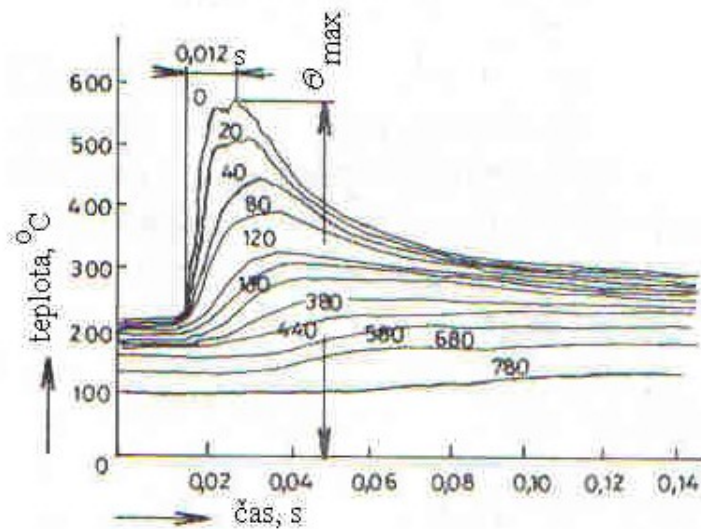
Obr. 5.20 Plocha kontaktu brúsneho kotúča s obrobkom. 1 – odoberaná vrstva kovu, 2 – brúsny kotúč, 3 – brúsne zrná, 4 – plocha styku kotúča s obrobkom, 5 – obrobená plocha, k – dĺžka kontaktu brúsneho kotúča s obrobkom

V dôsledku intenzívneho ohrevu obrobku na ploche styku s kotúčom vzniká pod brúseným povrchom typické pohyblivé teplotové pole, podľa *obr.2.21*. Dá sa identifikovať termočlánkami, umiestnenými pod brúseným povrchom. Teploty sú vyššie ako pri sústružení. Po prejdení brúsneho kotúča sa obrobená plocha prudko ochladí prídcom vzduchu, alebo chladiacou kvapalinou. Tento teplotný režim pripomína povrchové tepelné spracovanie.



Obr. 5.21 Teplotové pole pod brúsnym zrnom, zistené experimentálne [12], [14]

Ešte názornejšie možno vidieť sledované zmeny teplôt pri časových závislostiach. Na *obr. 2.22* je závislosť teploty na čase, nameraná termočlánkami, umiestnenými pod brúseným povrchom v rozličných hĺbkach.



Obr. 2.22 Zmena teploty na brúsenej ploche v závislosti na čase. Hodnoty pri krivkách označujú hĺbku pod povrchom, mm

Zo záznamu vyplýva, že cca po 0,012s po prechode brúsneho kotúča stúpne teplota povrchu na maximálnu hodnotu

Okrem transformácie štruktúry vznikajú pod obrobeným povrchom značné napätia, spôsobené teplotnou rozťažnosťou brúseného materiálu. Ako bolo dokumentované (obr.2.11, 2.14), môžu viesť k poškodeniu brúseného materiálu. Pre poznanie charakteru týchto napätí postačuje vzhľadom na súmernosť ich sledovať v rovine, kolmej na obrobenú plochu. Je zrejmé, že chladnejšia vrstva materiálu zabraňuje povrchovým ohriatym v predĺžovaní, alebo skracovaní, ktoré by odpovedalo danej teplote. Pokúsime sa tento prístup interpretovať výpočtom.

Abstrahujeme si obrobok ako „kompozit“, zložený z navzájom nezávislých úzkych vrstiev. Každá z nich sa bude predlžovať úmerne k veľkosti príslušnej teploty podľa vzťahu:

$$\Delta l = \alpha \cdot \Delta \theta \cdot l, \quad (2.18)$$

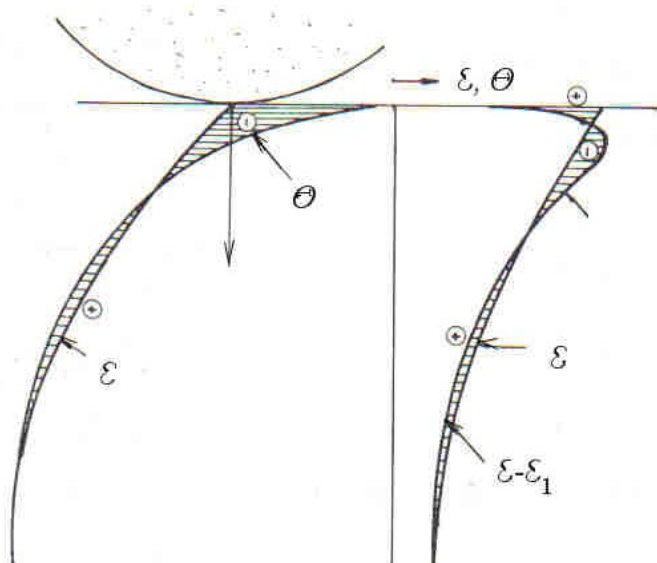
kde α je koeficient lineárnej teplotnej rozťažnosti, $\text{mm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$

$$\Delta \theta - \text{zmena teploty: } \Delta \theta = \theta - \theta_1,$$

alebo možno vyjadriť pomerné predĺženie:

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta l}{l} = \alpha \cdot \Delta \theta. \quad (2.19)$$

Pretože materiál obrobku je homogénny, jednotlivé „vrstvy“ si navzájom bránia v deformácii, preto skutočný priebeh pomerného predĺženia bude odpovedať krivkám ε . Vzniknuté napätie teda definujeme ako „tendenciu deformácie“ a bude úmerné rozdielu $(\varepsilon - \varepsilon_1)$, (obr. 2.23)



Obr. 2.23 Priebeh teoretického (ε_1) a skutočného (ε) pomerného predĺženia pod brúseným povrchom

V prvom prípade teda vzniká bezprostredne pod povrchom tlakové napätie, po opustení záberu ťahové. Pri prerušovanom brúsení, alebo pri obrábaní takto naostreným nástrojom, teda striedaní týchto napätí môže dochádzať k únave materiálu a vzniku teplotných trhlín. Rovnako pri brúsení (ostrení) nástrojov zo spekaných karbidov môže dôjsť k vzniku trhlín aj pri jednom prejdení brúsiaceho kotúča (spekaný karbid má minimálnu pevnosť v ťahu).

Pomocou uvedenej teórie možno odvodiť výpočtové vzťahy na určenie priebehu napätí pod ohrievaným a ochladzovaným povrchom obrobku pri brúsení.

Majme voľne uložený prút, (obr. 2.24) ktorý sa vplyvom ohrevu na teplotu θ predĺži o Δl . V prúte nevznikne napätie. V prípade votknutého prútu v ňom vznikne napätie, ktoré má hodnotu:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon = E \cdot \alpha \cdot \theta, \quad (2.20)$$

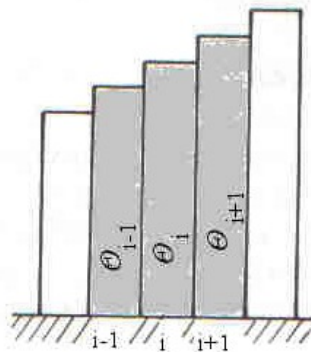
kde E je modul pružnosti materiálu, MPa



Obr. 2.24 Predĺženie voľného prúta (a) a vznik napätia vo votknutom prúte (b) vplyvom ohrevu na rovnakú teplotu

Uvedený vzťah platí ak $\sigma < R_e$, teda za predpokladu, že v prúte nevzniká plastická deformácia.

Reálny obrobok možno znázorniť ako sústavu vedľa seba uložených prútov rovnakej dĺžky, podľa obr. 2.25.



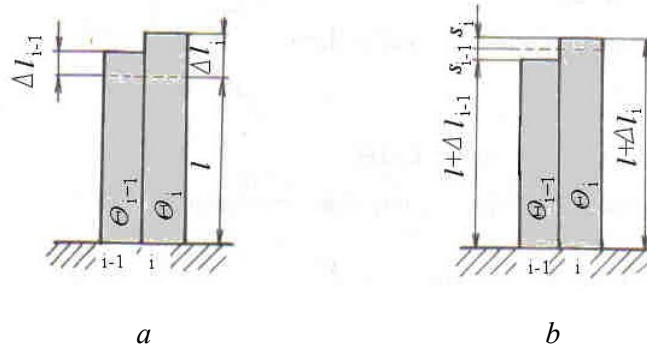
Obr. 2.25 Náhradná schéma pevného telesa

Po ohriatí na určitú teplotu vzniká predĺženie, ktoré odpovedá danej teplote. Krivka priebehu pomerného predĺženia teda bude identická krivke priebehu teploty.

Ďalej sledujme vzájomné vzťahy dvojice prútov i a $i-1$ z danej sústavy. Pri ohreve oboch prútov na rôzne teploty sa predĺžia podľa obr. 2.26 o hodnoty:

$$\Delta l_{i-1} = \alpha_{i-1} \cdot l_{i-1} \cdot \Delta \theta_{i-1} \quad (2.20)$$

$$\Delta l_i = \alpha_i \cdot l_i \cdot \Delta \theta_i \quad (2.21)$$



Obr. 2.26 Predĺženie voľne uložených prútov $i-1$ a i ohrevom (a) a deformácia pevne spojených prútov i a $i-1$ (b)

Za predpokladu, že $\alpha_i = \alpha_{i-1}$ a $l_i = l_{i-1}$, dostaneme:

$$\Delta l_{i-1} = \alpha \cdot l \cdot \Delta \theta_{i-1} \quad (2.22)$$

$$\Delta l_i = \alpha \cdot l \cdot \Delta \theta \quad (2.23)$$

$$\varepsilon_{i-1} = \alpha \cdot \Delta \theta_{i-1} \quad (2.24)$$

$$\varepsilon_i = \alpha \cdot \Delta \theta_i \quad (2.25)$$

V reálnom telese sú obidva prúta pevne spojené a ich vzájomná rozťažnosť je obmedzená. Vplyvom pevného spojenia sa skráti prút i a predĺži prút $i-1$ o hodnoty s_i a s_{i-1} , podľa obr.2.26b. Ak predpokladáme rovnaké prierezy obidvoch prútov, vznikne po ich spojení v každej z nich rovnaké napätie, dané vzťahom:

$$\sigma = \varepsilon'_{i-1} \cdot E = \varepsilon'_i \cdot E', \quad (2.26)$$

pričom

$$\varepsilon'_{i-1} = \frac{s_{i-1}}{l + \Delta l_{i-1}} \quad (2.27)$$

$$\varepsilon'_i = \frac{s_i}{l + \Delta l_i} \quad (2.28)$$

$$\varepsilon'_{i-1} = \varepsilon'_i. \quad (5.35)$$

Po dosadení a úprave dostaneme:

$$s_i = \frac{\Delta l_i - \Delta l_{i-1}}{1 + \frac{1 + \alpha \cdot \Delta \theta_{i+1}}{1 + \alpha \cdot \Delta \theta_i}}. \quad (2.29)$$

Výsledná deformácia i -tého prútu bude daná vzťahom:

$$\Delta l_i = \Delta l_i - s_i + s'_i. \quad (2.30)$$

Substitúciou: $\varepsilon = \frac{\Delta L}{l}$ a $\Delta l_i = \alpha \cdot l_i \cdot \Delta \theta_i$

dostaneme vzťah na určenie pomerného predĺženia v tvare:

$$\varepsilon = \alpha \left\{ \theta_i - \theta_0 \cdot [1 + \alpha(\theta_i - \theta_0)] \left[\frac{\theta_i - \theta_{i-1}}{2 + \alpha(\theta_i - \theta_{i-1} - 2\theta_0)} - \frac{\theta_{i+1} - \theta_i}{2 \cdot \alpha \cdot [\theta_i + \theta_{i-1} - 2\theta_0]} \right] \right\} \quad (2.31)$$

Odvođený vzťah možno použiť na stanovenie veľkosti pomerného predĺženia, napr. z experimentálne stanovených kriviek teploty.

Dosadením uvedených výrazov do vzťahu $\sigma_{i(i-1)} = -\varepsilon_{i-1} \cdot E$ dostaneme rovnicu na výpočet napätia v i -tom prúte, pôsobením prútu $i-1$.

Podobne určíme napätie v i -tom prúte pôsobením prútu $i+1$.

Výsledné napätie v i -tom prúte:

$$\sigma_i = \sigma_{i(i+1)} + \sigma_{i(i-1)}, \quad (2.32)$$

alebo:

$$\sigma_i = E \cdot \alpha \left[\frac{\theta_{i+1} - \theta_i}{2 + \alpha(\theta_i - 2 \cdot \theta_0 + \theta_{i+1})} + \frac{\theta_i - \theta_{i-1}}{2 + \alpha(\theta_i - 2 \cdot \theta_0 + \theta_{i-1})} \right]. \quad (2.33)$$

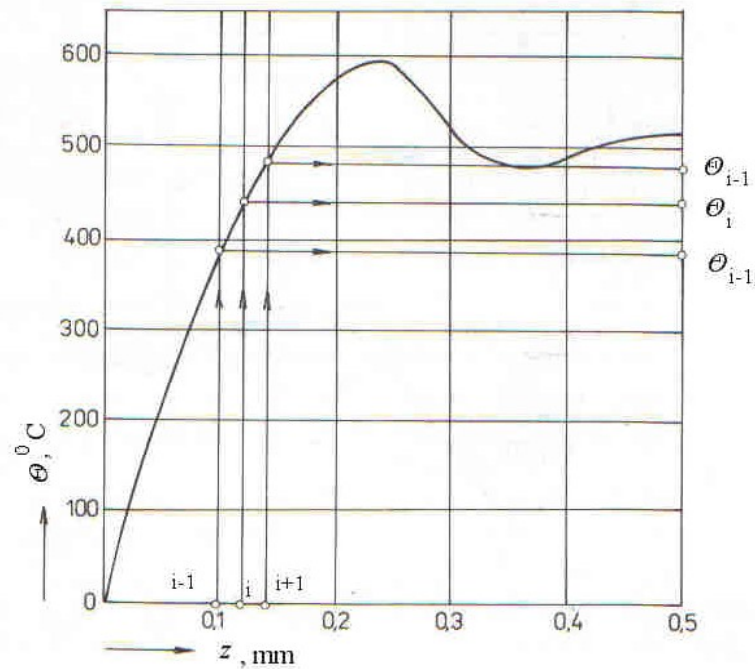
Na základe odvodeného vzťahu možno vypočítať priebeh napätí pod brúseným povrchom pri nestacionárnom rozdelení teploty podľa kriviek z *obr. 2,9-2.10*. Pretože výpočet napätia pre všetky krivky algebraicky je časovo náročný, uvedieme zjednodušený spôsob výpočtu. Vzhľadom na to, že α je oproti ostatným členom malé ($5 \cdot 10^{-6} \text{ mm} \cdot ^\circ\text{C}$), zanedbáme druhý člen v menovateli a dostávame jednoduchý výraz:

$$\sigma_i = E \cdot \alpha \left(\frac{\theta_{i+1} - \theta_i}{2} + \frac{\theta_i - \theta_{i-1}}{2} \right). \quad (2.34)$$

Pre sledovaný prípad po dosadení za E a α dostávame:

$$\sigma_i = 0,225 \left(\frac{\theta_{i+1} - \theta_i}{2} + \frac{\theta_i - \theta_{i-1}}{2} \right). \quad (2.35)$$

Na použitie vzťahu sa zvolil krok $x = 0,02 \text{ mm}$. Potom odpovedajúce hodnoty možno odčítať priamo z grafu – *obr. 2.27*.



Obr. 2.27 Spôsob odčítania teplotných rozdielov z krivky priebehu teplôt

Ak sledujeme zistený priebeh napätí v jednotlivých fázach pracovného cyklu, možno konštatovať, že napätie sa cyklicky mení v určitom rozsahu kladných a záporných hodnôt. Trhlinky teda vznikajú po prekročení pevnosti materiálu v ťahu aj pri nižšej hodnote napätia únavou materiálu.

Praktické pozorovania potvrdzujú, že objavenie mikroskopických trhliniek na reznom klíne pri obrábaní spôsobuje následné krehké porušenie rezného klína.

Definujme nástroj ako polo ohraničené teleso na ktoré v mieste styku pôsobí zdroj tepla q . Pre tento prípad bolo odvodené riešenie diferenciálnej rovnice v tvare:

$$\theta(x, y, z, \tau) = \frac{q}{2\sqrt{\pi \cdot a \cdot \tau}} \cdot e^{-\frac{r^2}{4 \cdot a \cdot \tau}}, \quad (2.36)$$

kde $\theta(x, y, z, \tau)$ je teploty ľubovoľného bodu v telese v čase τ od začiatku tepelného impulzu,

q – merný tepelný tok od tepelného zdroja intenzity Q ,

$$q = \frac{Q}{c\rho}, \text{ J.kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1},$$

pričom c je merné teplo, $\text{J.kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$,

ρ - hustota materiálu, g.mm^{-3} ,

$r = \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2}$ je vzdialenosť zdroja tepla zo súradnicami $x_1, y_1;$

z_1 od sledovaného bodu, mm.

Uvedené riešenie je fundamentálnym riešením diferenciálnej rovnice vedenia tepla. Z riešenia vyplýva, že teplota telesa sa blíži k nule, ak $\tau \rightarrow \infty$ vo všetkých bodoch. Po odstránení zdroja tepla nastáva vyrovnanie teploty telesa vedením do materiálu.

Ak riešenie integrujeme v celom objeme, dostávame:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \theta(x, y, z, \tau) dx, dy, dz = q. \quad (2.37)$$

Veľmi dobrú predstavu o teplotnom poli v nástroji možno získať určením polohy izotermických čiar, čo predpokladá riešiť rovnicu:

$$\theta(x, y, z, \tau; x_1, y_1, z) = \text{konšt.} \quad (2.38)$$

Pre zjednodušenie je vhodné vyjadriť tvar teplotného poľa v rovnobežných rezoch rovinami yz , teda pri radiálnom sústružení v zadnej rovine P_p . V tomto prípade sa rieši rozdelenie teploty v nástroji pomocou diferenciálnej rovnice:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right), \quad (2.39)$$

pričom predpokladáme, že $\frac{\partial \theta}{\partial x^2} = 0$.

Riešením tejto rovnice metódou bodových zdrojov tepla je výraz:

$$\theta(y, z, \tau) = \frac{q}{2\sqrt{\pi a \tau}} e^{-(y-y_1)^2 - (z-z_1)^2 / 4a\tau}, \quad (2.40)$$

ktorý je riešením rozdelenie teploty v neohraničenom telese pri dvojrozmernom tepelnom toku, vyvolanom pôsobením okamihového zdroja tepla, prechádzajúceho cez body y_1, z_1 , kolmo na os x v momente $\tau = 0$.

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \theta(y, z, \tau) dy dz = q. \quad (2.41)$$

Riešenie možno získať za predpokladu, že x_1 je rozdelené od $-\infty$ do $+\infty$, čiže izotermy na čele noža sú rovnobežné s osou x .

V jednoduchých prípadoch rozdelenia teploty možno výhodne stanoviť závislosť teploty od jednej súradnice z diferenciálnej rovnice:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2}, \quad (2.42)$$

Pričom platí: $\frac{\partial \theta}{\partial x^2} = \frac{\partial \theta}{\partial y^2} = 0$.

Je to prípad ohrevu tyče nekonečnej dĺžky, ktorej bočné plochy sú tepelne izolované a na jej konci pôsobí zdroj tepla, od ktorého sa teplo šíri vedením. Riešením rovnice predchádzajúcim spôsobom dostaneme výraz:

$$\theta(z, \tau) = \frac{q}{2\sqrt{\pi \cdot a \cdot \tau}} \cdot e^{-(z-z_1)^2/4a\tau}, \quad (2.43)$$

Pričom platí: $q = \int_{-\infty}^{+\infty} \theta(z, \tau) \, dy$.

Toto riešenie možno použiť na výpočet priebehu teploty v závislosti na vzdialenosti od reznej hrany pri nestacionárnom teplotnom poli.

Stacionárny priebeh teploty možno určiť riešením diferenciálnej Laplaceovej rovnice:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = a \cdot \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} = 0, \quad (2.44)$$

Ktorou sa získajú jednoduché vzťahy. Jej riešenie môžeme napísať v tvare:

$$\theta_{(x)} = \frac{q}{4 \cdot \pi \cdot \lambda (z - z_1)} + \theta_0. \quad (2.45)$$

Je to jednoosová hyperbola v posunutom súradnicovom systéme, kde z_0 a θ_0 sú súradnice počiatku súradnicového systému. Na základe tohto vzťahu možno pomerne jednoducho vypočítať priebeh teploty pod povrchom nástroja, ak na čelo nástroja pôsobí zdroj tepla. To platí pre plynulé obrábanie.

Pri prerušovanom reze musíme počítať s nestacionárnym priebehom teploty, pretože povrch nástroja je cyklicky ohrievaný a ochladzovaný. Pretože zdroj tepla pôsobí priamo na povrchu nástroja, platí: $z_1 = 0$ a riešenie diferenciálnej rovnice vedenia tepla možno vyjadriť:

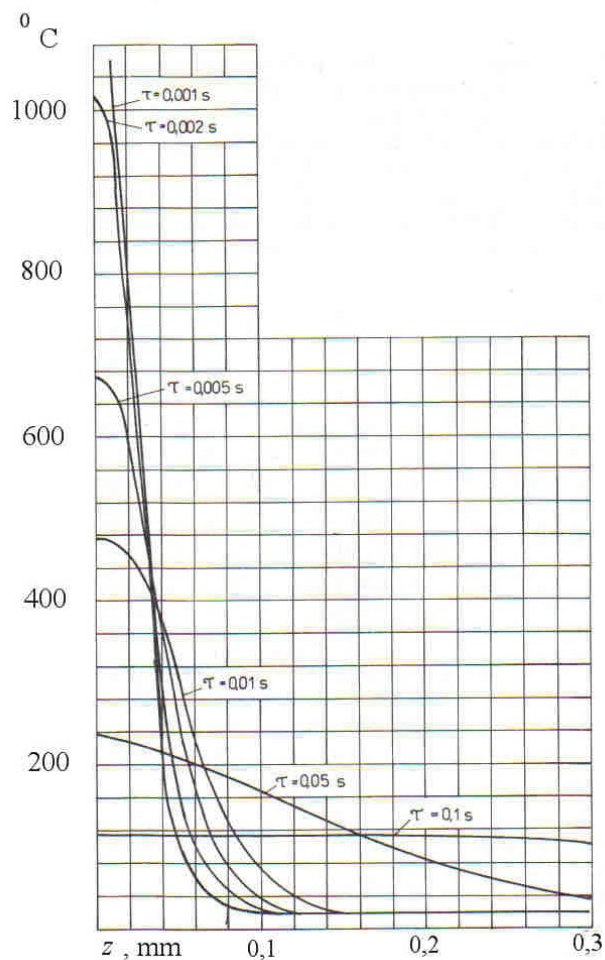
$$\theta_{(z,\tau)} = \frac{q}{2\sqrt{\pi \cdot a \cdot \tau}} \cdot e^{-z^2/4a\tau}. \quad (2.46)$$

Ďalej sa vypočíta priebeh teploty pod povrchom pri definovaných podmienkach obrábania. Zvoľme napr. $Q = 16 \text{ J} \cdot \text{C}^{-1}$, $a = \frac{\lambda}{c \cdot \gamma} = 0,014 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.

Dosadením vznikne vzťah:

$$\theta_{(z,\tau)} = \frac{14,5}{\sqrt{\tau}} \cdot e^{-z^2/0,056\tau} + 20, \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (2.47)$$

Na základe tohto vzťahu boli vypočítané krivky priebehu teploty v závislosti od povrchu pre rôzne časové intervaly od začiatku tepelného impulzu. Výsledok výpočtu je na obr. 2.28.



Obr. 2.28 Priebeh teploty pod povrchom nástroja, vyvolaný okamihovým zdrojom tepla, umiestneným na čele noža.

Po odstránení tepelného zdroja nastáva pod povrchom postupné vyrovnávanie teploty. Pritom sa neuvažuje s vonkajším chladením brúseného povrchu, iba vedením tepla do nástroja. V malých hĺbkach pod povrchom, rádovo niekoľko stotín mm vznikajú teploty, prevyšujúce 1000°C . Naznačený priebeh odpovedá jednému priebehu brúsneho kotúča. Je zrejmé, že pri viacnásobnom prechode kotúča sa budú priebehy superponovať, pričom stredná teploty obrobku bude narastať.

Na objasnenie príčin vzniku trhlín pod brúseným povrchom treba poznať okrem fázy ohrevu najmä fázu ochladzovania. Jej stanovenie na základe daného východiskového rozdelenia teploty pod povrchom bude spojené s ťažkosťami, preto možno vhodne použiť hraničnú podmienku, že teplota okolia je harmonickou funkciou času. Pri brúsení viacerými

prechodmi sa povrch striedavo ohrieva a ochladzuje. Hoci intenzita oboch fáz je rovnaká (ochladzovanie prebieha pomalšie, ak sa nepoužije rezná kvapalina), možno uvedené zjednodušenie použiť na orientačný opis zmeny teploty pod povrchom. Dá sa predpokladať, že vplyvom periodickej zmeny teploty sa pod povrchom šíria tepelné vlny. Na odvodenie výpočtových vzťahov treba zvoliť funkciu priebehu teploty na povrchu. Ďalej budeme sledovať prípad, keď sa teplota na brúsenom povrchu mení podľa jednoduchej sinusovej, resp. kosinusovej funkcie. Proces vedenia tepla budeme skúmať kvázi stacionárne, čiže predpokladáme, že prebiehal tak dlho, až začiatočné rozdelenie teploty v obrobku prestalo vplývať na konečné rozdelenie. Tým sa úloha vedenia tepla redukuje na úlohu bez počiatočných podmienok.

Nech sa teploty na brúsenom povrchu mení podľa zákona jednoduchého harmonického kmitania:

$$\theta_p = \theta_0 \cdot \cos 2\pi \cdot \omega \cdot \tau, \quad (2.48)$$

kde θ_p je okamžitá teplota na povrchu, °C

θ_0 – amplitúda kolísania teploty (maximálna teplota), °C,

ω - frekvencia zmeny teploty, s⁻¹

$2 \cdot \pi \cdot \omega$ - kruhová frekvencia, s⁻¹.

Úloha na stanovenie zákona rozdelenia teploty pod povrchom obrobku možno abstrahovať na prípad ohrevu poloohraničenej plochy, pre ktorý sa dajú použiť riešenia z klasickej termodynamiky. Diferenciálnu rovnicu vedenia tepla možno pre tento prípad riešiť metódou Laplaceovej substitúcie. Potom výsledný vzťah pre priebeh teploty bude:

$$\theta_{(x,\tau)} = A_0 \cdot e^{-x \sqrt{\frac{\pi \cdot \gamma}{a}} \cdot \cos \left(2 \cdot \pi \cdot \gamma \cdot \tau - x \sqrt{\frac{\pi \cdot \gamma}{a}} \right)}, \quad (2.49)$$

kde A_0 je amplitúda teploty povrchu (predpokladáme, že teplota povrchu sa rovná teplote zdroja, teda $x_1 = 0$).

Ako vidno z uvedeného vzťahu, teplota ľubovoľného bodu telesa harmonicky kolíše. Pre ľubovoľný čas $\tau = \text{konšt.}$ sa rozdelenie teploty smerom do hĺbky telesa riadi zákonom cosinu s postupne klesajúcou amplitúdou. Z riešenia vyplýva, že dĺžka vlny bude rovná:

$$\lambda = 2 \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot a}{\omega}} . \quad (2.50)$$

Hĺbka prieniku vln je priamo úmerná kvadratickému koreňu, koeficientu vedenia tepla a perióde kmitania. Rýchlosť pohybu teplotnej vlny (rýchlosť, akou sa pohybuje ľubovoľný bod vlny) je:

$$u = \lambda \cdot \omega = 2 \cdot \sqrt{\pi \cdot a \cdot \omega} . \quad (2.51)$$

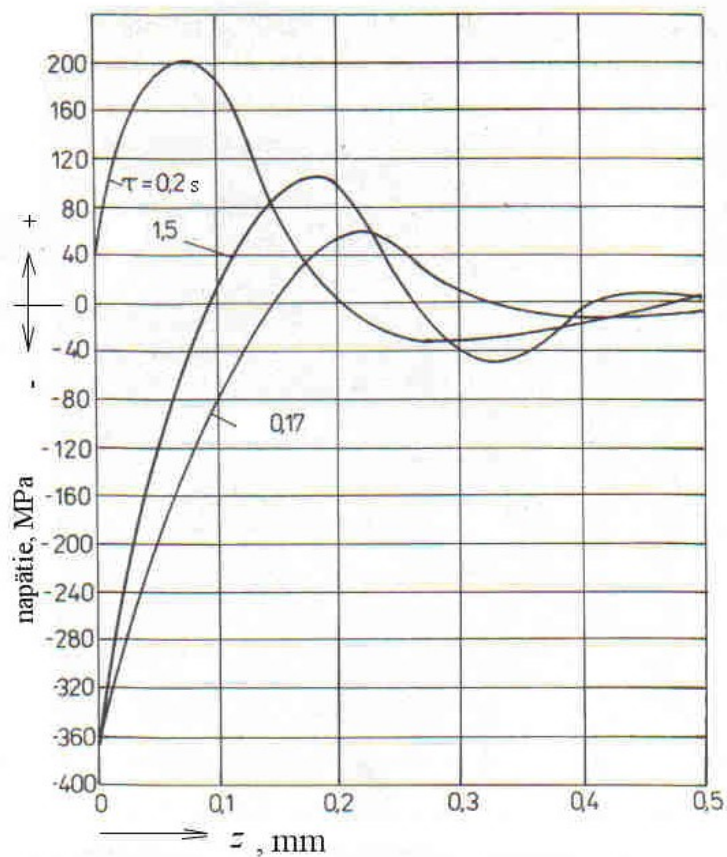
To znamená, že rýchlosť pohybu tepelnej vlny sa zväčšuje s frekvenciou a koeficientom vedenia tepla.

Pokúsme sa aplikovať tieto poznatky na prípad vedenia tepla v nástroji zo spekaného karbidu P20, ktorý je brúsený na chrbtovej ploche čelným, segmentovým kotúčom. Pre jednoduchosť predpokladajme, že fáza ohrevu sa rovná fáze ochladzovania, teda medzera medzi brúsiacimi segmentami sa rovná šírke segmentu. Nech frekvencia kolísania teploty na brúsenom povrchu je $\omega = 30$ Hz.

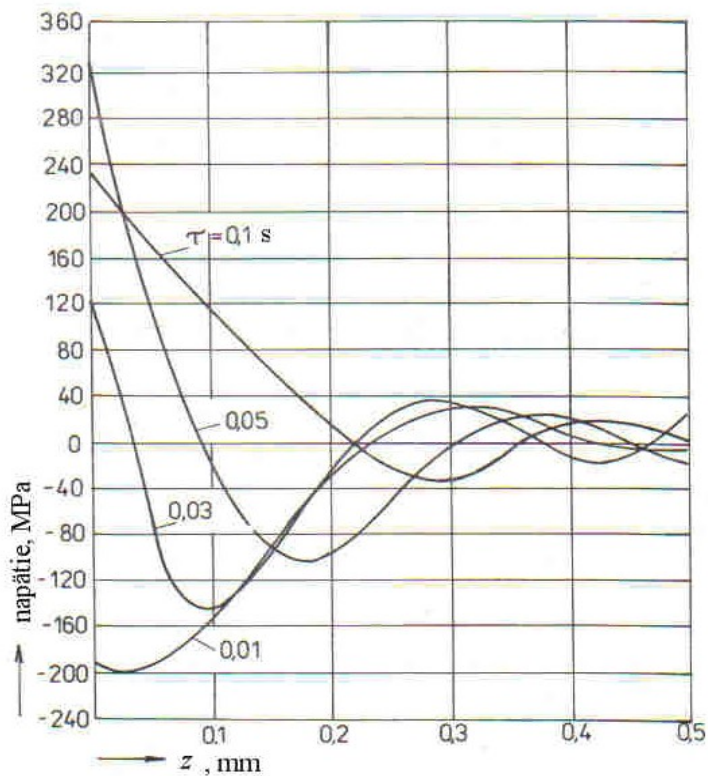
Po dosadení zodpovedajúcich hodnôt dostaneme:

$$\frac{\theta(x, \tau)}{\theta_0} = e^{-8,2 \cdot x} \cdot \cos 180(2,3\tau - x) . \quad (2.52)$$

Na základe tohto vzťahu boli vykonané výpočty, ktorých výsledok je na *obr. 2.29* a *2.30*.



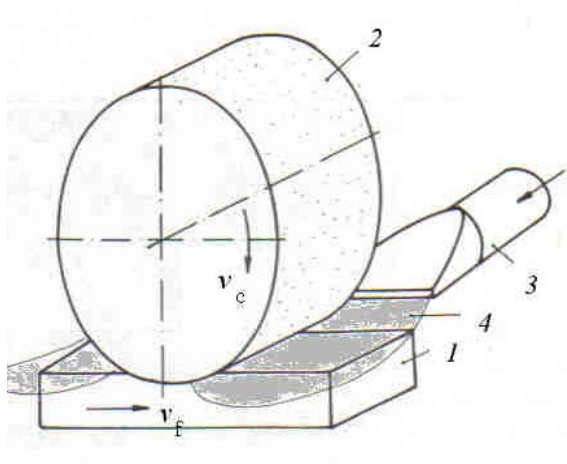
Obr. 2.29 Priebeh teplotných napätí pod brúseným povrchom nástroja zo spekaného karbidu – fáza ohrevu povrchu






Obr. 2.30 Priebeh teplotných napätí pod brúseným povrchom nástroja zo spekaného karbidu – fáza ochladzovania

Pretože iniciácia teplotných trhlín nastáva v čase ochladzovania povrchu, bol realizovaný pokus ohrievať brúsený povrch horúcim vzduchom, alternatívne plameňom, podľa *obr. 2.31*. Tým sa udržuje stacionárne teplotové pole a nemôže dôjsť k vzniku tlakových napätí v povrchovej vrstve. Treba však použiť teplotu ohrevu blízku teplote iniciovanej procesom brúsenia.

Obr. 2.31 Schéma vonkajšieho ohrevu povrchu obrobku pri brúsení



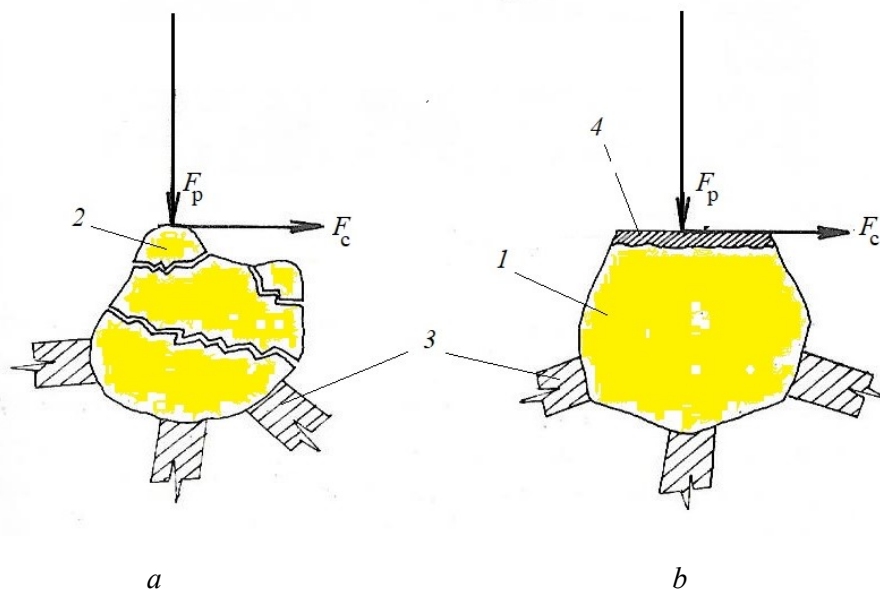
V *tab. 2.2* sú fotografie brúsených povrchov nástroja z Al_2O_3 po brúsení, pričom boli ohrievané vonkajším zdrojom na uvedené teploty (prvá fotografia je aj na *obr. 2.1b*). Vidno, že zatiaľ čo pri brúsení bez ohrevu vzniká na povrchu sieť trhlín, so zvyšujúcou teplotou ohrevu ich frekvencia klesá a pri určitej dostatočne vysokej teplote nevznikajú vôbec.

Teplota ohrevu, °C	Vzhľad brúseného povrchu
bez ohrevu	
600	
700; 800; 900	

3 PEVNOSŤ REZNEJ ČASTI BRÚSIACICH ZŔN

Z hľadiska všeobecných požiadaviek brúsiaci materiál má mať dostatočnú pevnosť, odolnosť proti opotrebeniu a má spĺňať podmienky ekonomického obrábania.

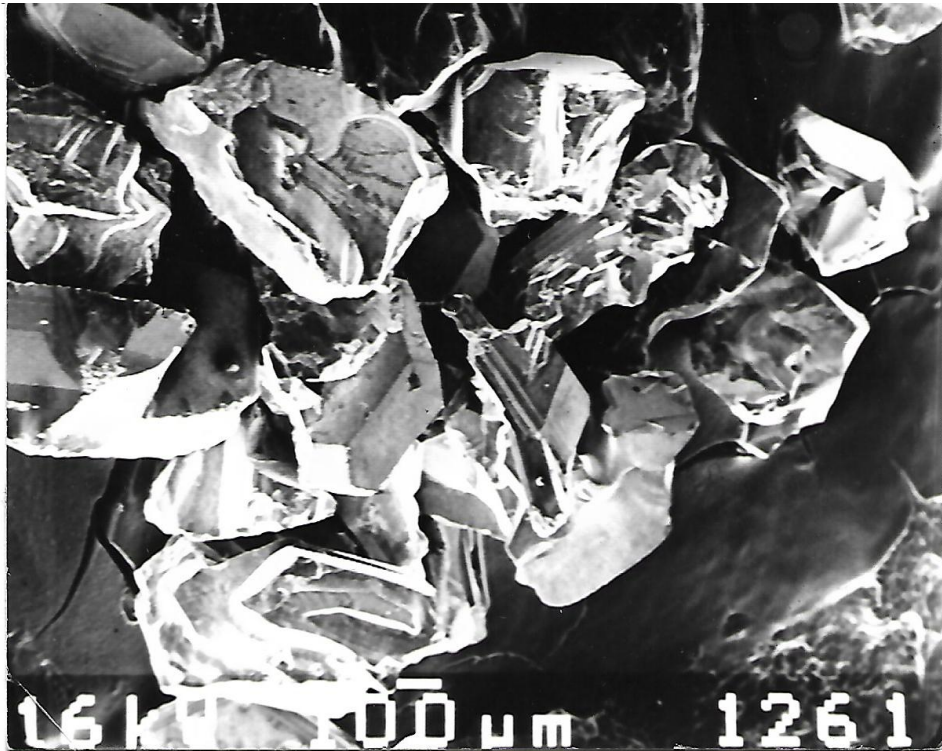
Pri malej pevnosti reznej časti abrazívnych zŕn sa zrná rozrušujú a to vylamovaním (obr. 3.1a), alebo oterom (obr. 3.1b). V prvom prípade o krehké a v druhom plastické porušovanie rezných hrán. Pokúsime sa objasniť fyzikálnu podstatu oboch uvedených mechanizmov opotrebenia brúsnych zŕn.



Obr. 3.1 Schémy poškodenia brúsnych zŕn. a – krehké porušenie, b – plastická deformácia, 1 – zrno, 2 – úlomok zrna, 3 – spojivo, 4 – oter zrna

3.1 Mechanizmus krehkého porušovania abrazívnych zŕn

Na obr. 3.2 je pohľad na nové brúsiace zrná, vybrané z povrchu keramického kotúča A99 40K 8V.



Obr. 3.2 Pohľad na separované celá zrná z brúsneho kotúča

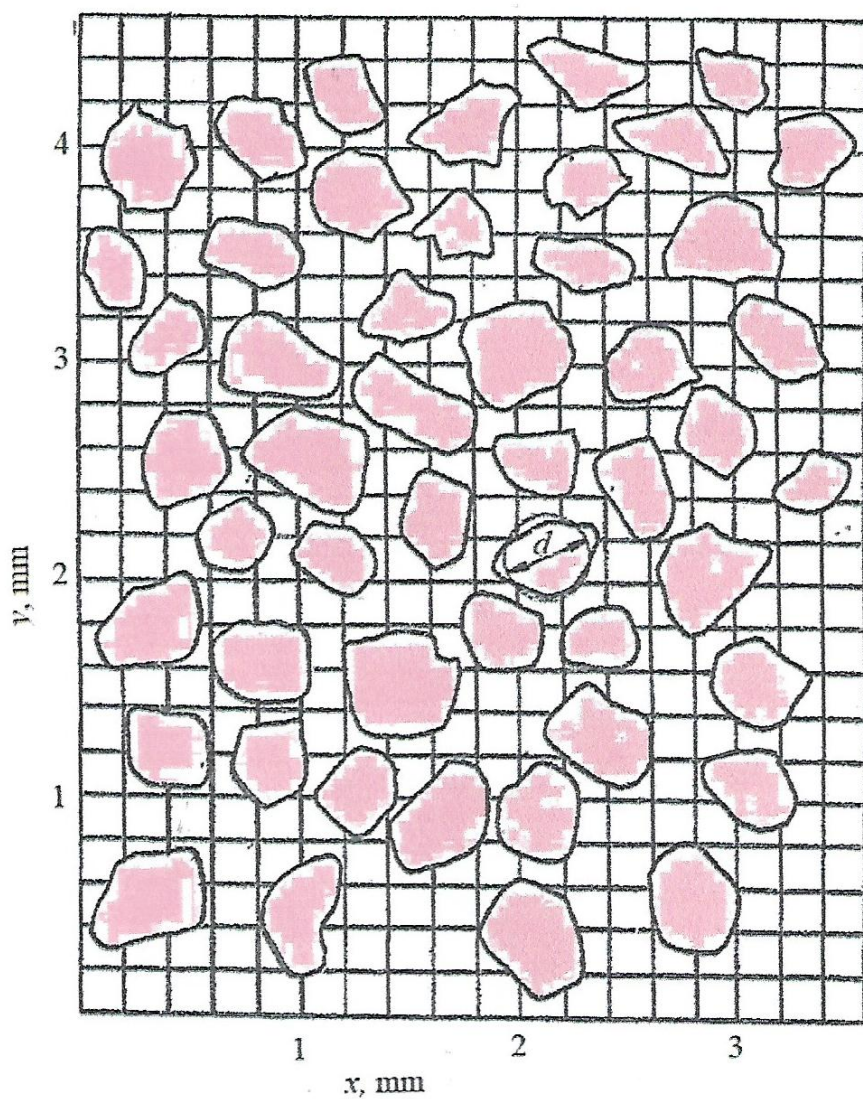
Analýza odpadu po brúsení nelegovaných ocelí, žiarupevných ocelí a zliati, titánových zliatin a ďalších materiálov s bežnými brúsnymi materiálmi ukazuje, že sa v ňom objavuje veľké množstvo vylomených častíc abrazíva, ktorá majú značne menšie rozmery ako východisková frakcia. Na *obr.3.3* je pohľad na vylomené časti brúsnych zrn, vybraných spomedzi triesok. Vidno plochy, charakteristické pre krehký lom.



Obr. 3.3 Pohľad na fragmenty zrn po brúsení, pri rovnakom zväčšení

Vidno veľký rozdiel vo veľkosti fragmentov. Dochádza k lomu častí zrn, alebo trhlinotvorný proces prebieha aj celými zrnami.

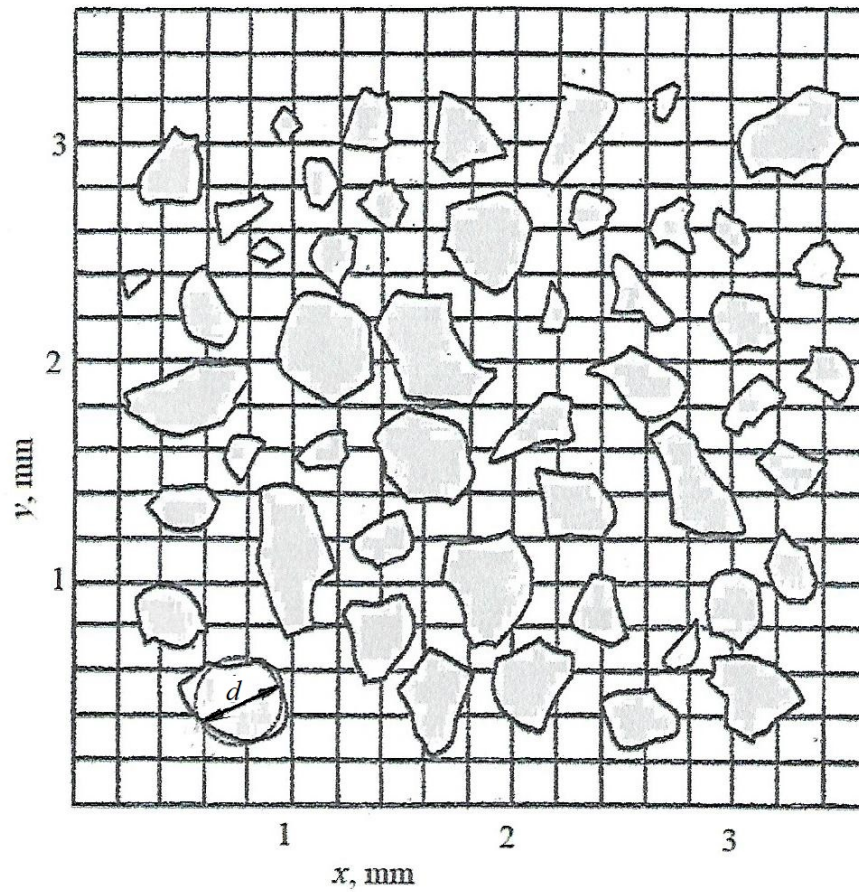
. Na identifikáciu veľkostí úlomkov bolo vybraných 40 zrn základnej frakcie z kotúča A99 40K V. Ich profil prekreslený z profiloprojektora na milimetrovú sieť je na *obr. 3.4*.



Obr. 3.4 Profil zrn tvoriacich brúsiaci kotúč A99 40K 8V

Podľa rozmerov zrn možno usudzovať, že pochádzajú z jednej frakcie a boli triedené.

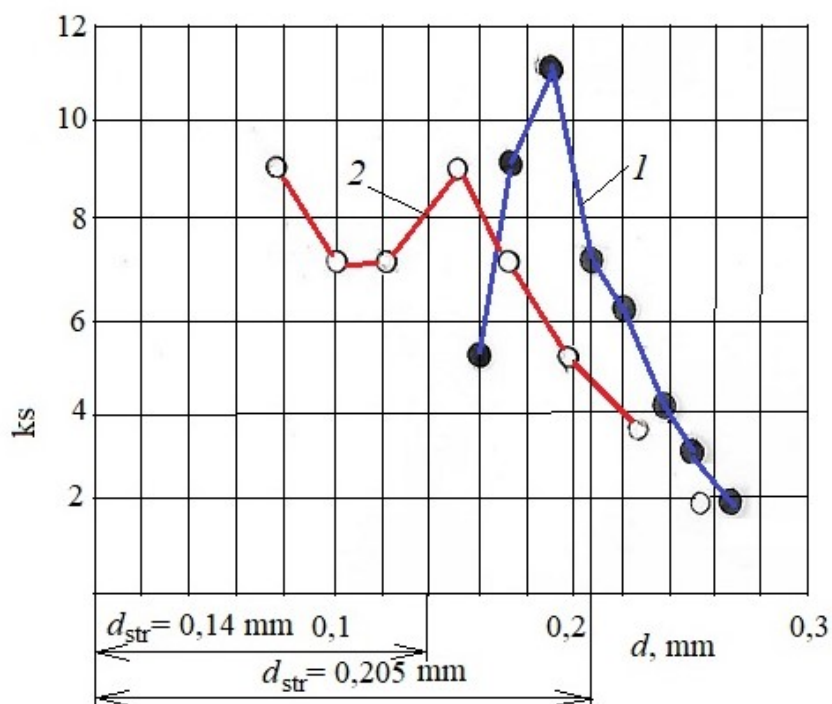
Na obr. 3.5 je súbor rovnakého počtu úlomkov triesok, nájdených medzi trieskami.



Obr. 3.5 Profil úlomkov zrn z kotúča A99 40K 8V, vybraných z triesok

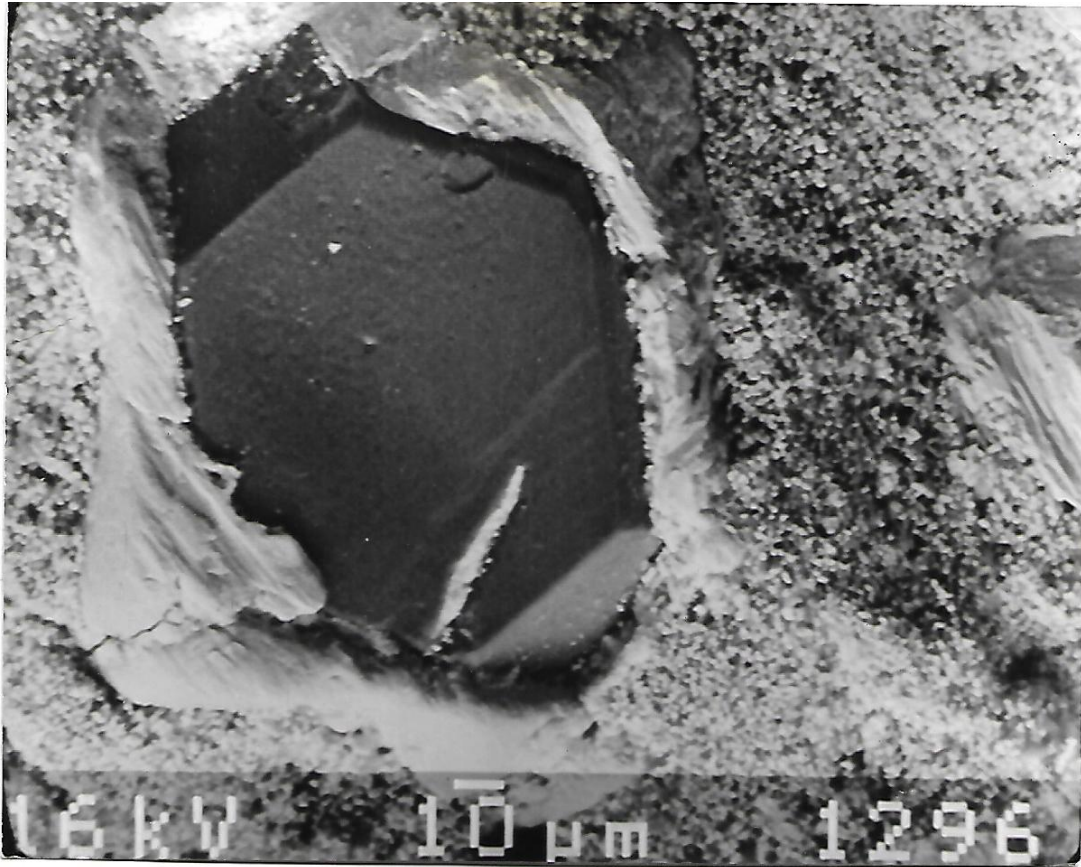
Vidno výrazný rozdiel rozmerov úlomkov. Dochádza teda ku vzniku mikroúlomkov, ktorí majú ostré hrany, čo svedčí o krehkom porušení zrn. Pri uvoľňovaní úlomkov sa súčasne ostria aj pôvodné zrná v brúsiacom kotúči.

Na kvalifikovanejšie vyhodnotenie sú na *obr. 3.6* krivky rozdelenia priemerov zrn a ich úlomkov.



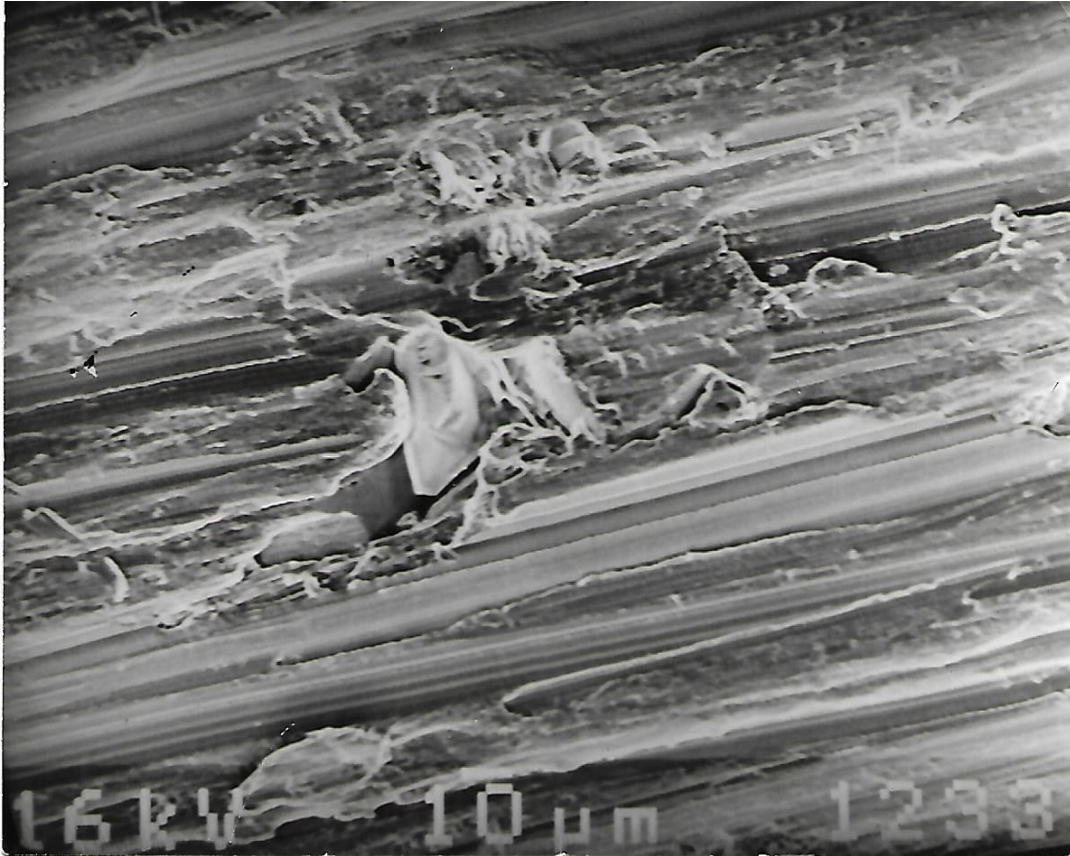
Obr. 3.6 Početnosť nových zrn – 1 a úlomkov zrn 2

Vidno, že rozmer úlomkov je výrazne menší. Stredná hodnota priemeru nových zrn je 0,205 mm, fragmentov zrn 0,14 mm. Obidve krivky rozdelenia sa sčasti prelínajú, čo svedčí o skutočnosti, že dochádza aj k uvoľňovaniu celistvých zrn zo spojiva. Rozptyl stredných priemerov úlomkov je podstatne väčší ako rozptyl priemerov nových zrn. Fragменты zrn teda majú rôznu veľkosť. Sporadicky teda dochádza aj k uvoľneniu celých zrn zo spojiva. Takúto tendenciu má napr. zrno z obr. 3.7.



Obr. 3.7 Pohľad na zrno, čiastočne fixované v spojive kotúča.

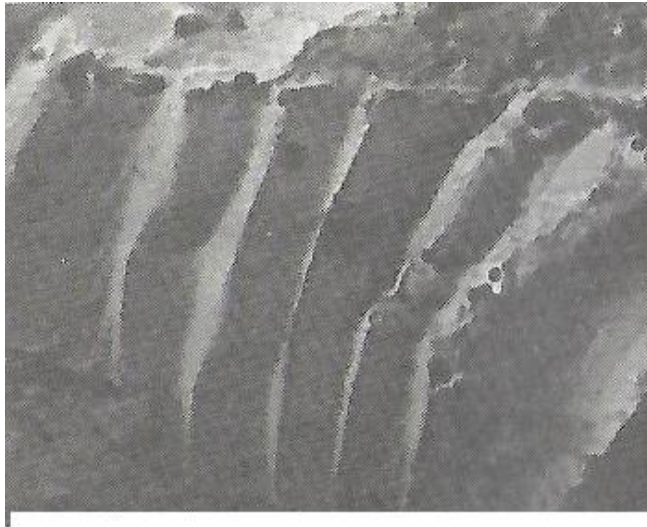
Treba poznamenať, že fragmenty triesok nie sú transportované iba do triesok ale v rade prípadov sú fixované na obrobenej ploche, čo neprospieva jej funkcii v prevádzke strojovej súčiastky. Takýto prípad je na *obr. 3.8*.



Obr. 3.8 Pohľad na brúsený povrch so zafixovaným segmentom keramického brúsneho zrna

Na *obr. 3.9* je elektrónová mikrofotografia plôch brúsiaceho zrna, na ktorých došlo ku krehkému porušeniu. Ide o zrna zo syntetického diamantu, pri brúsení bezvolframového spekaného karbidu. Topografia vytvorených plôch je typická pre lom. Teoreticky lomová plocha má byť ideálne hladká. Skutočná plocha má nerovnosti, dané defektami štruktúry, čo je charakteristické pre syntetický diamant.

V závislosti od rezných podmienok a fyzikálno-mechanických vlastností obrábaného materiálu môže krehké porušenie zrna prebiehať v tvare jednotlivých mikroobjemov abrazíva alebo vo väčších blokoch (*obr. 3.1a*).



Obr. 3.9 Elektrónová mikrofotografia povrchov zrna zo syntetického diamantu po krehkom porušení pri brúsení bezvolframového spekaného karbidu

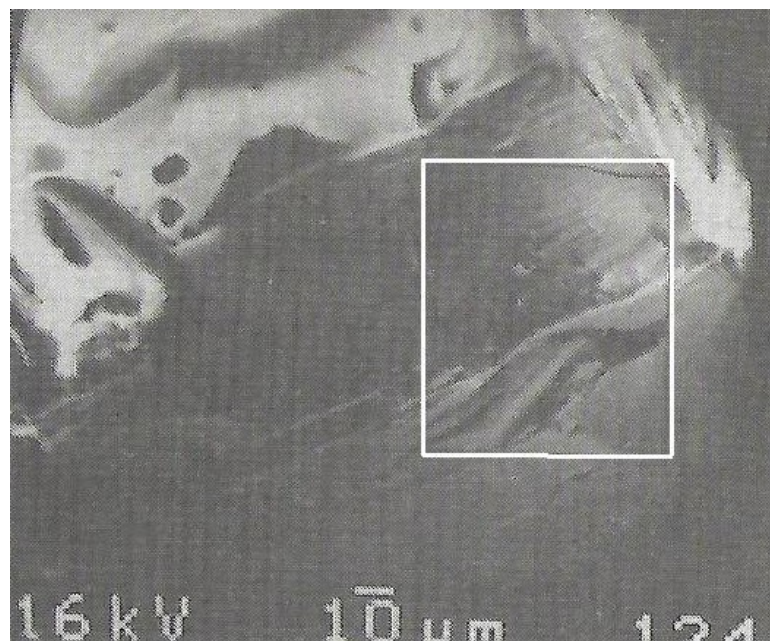
Na obr. 3.10 je pohľad na brúsiace zrno z Al₂O₃ s lomovou plochou. Zväčšená vyznačená zóna je na obr. 3.11. Jemnú štruktúru lomu možno pozorovať pri ešte väčšom zväčšení na obr. 3.12.

Na obr. 3.13 je názorný kaskádový lom zrna z uvedeného rezného materiálu.

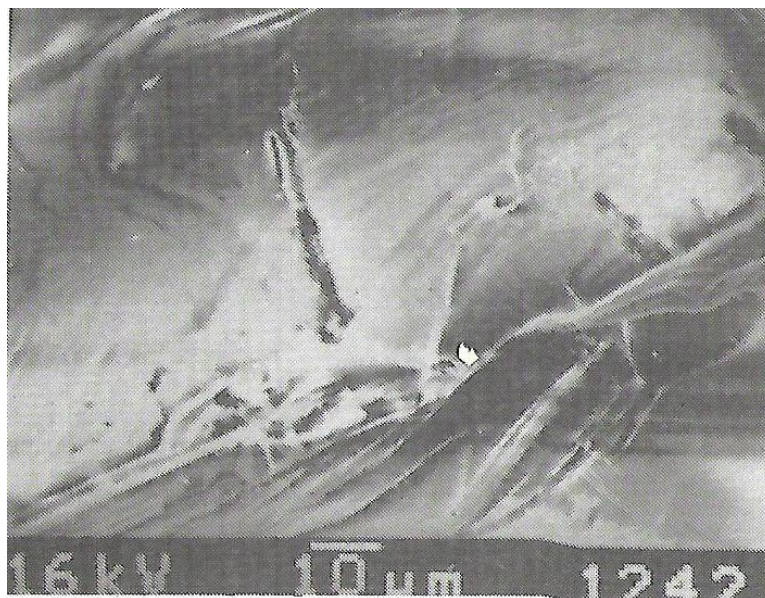
Treba zdôrazniť, že sklon rezných zŕn ku krehkému porušovaniu je špecifickosťou brúsenia. Na rozdiel od iných metód obrábania pri brúsení možno v dôsledku krehkého lomu zrna udržiavať reznosť brúsiaceho kotúča.

Pri dokončovacích metódach obrábania nie je krehké porušovanie brúsiacich zrn žiaduce, pretože sa mení rozmerová presnosť nástroja.

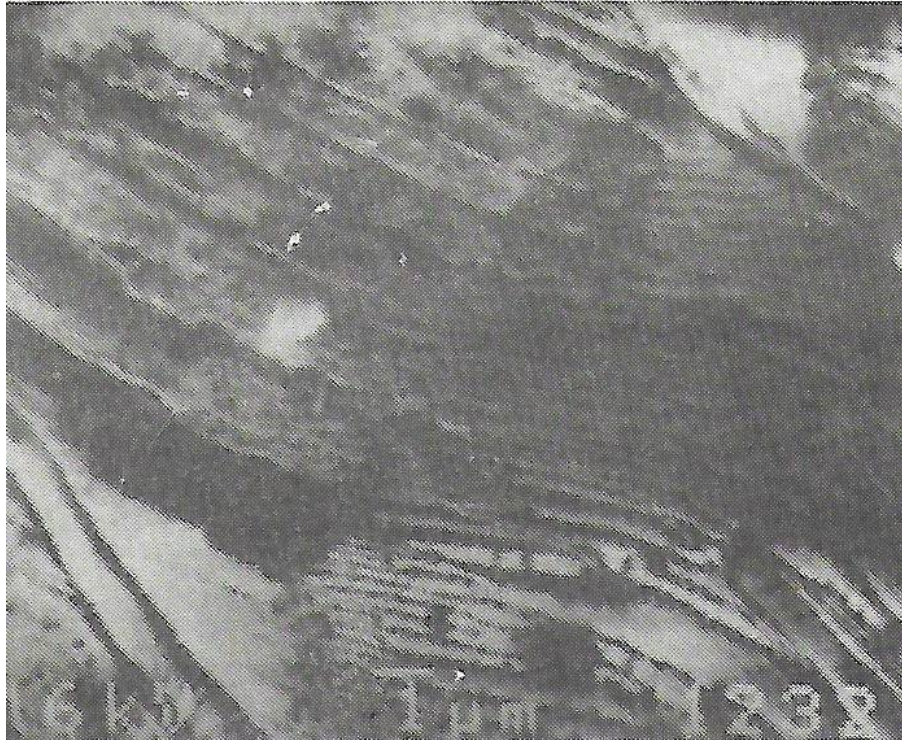
Pri hrubovacom brúsení, keď základnou úlohou je dosiahnuť veľký objem obrábaného materiálu pri nízkej rozmerovej presnosti nástroja, vedie krehké porušenie zrna k obnove rezných vlastností brúsneho kotúča, čiže dochádza ku samoostreniu. Treba zdôrazniť, že efektívne samoostrenie vzniká pri krehkom vylamovaní mikroobjemov a nie pri vylamovaní veľkých blokov zrn.



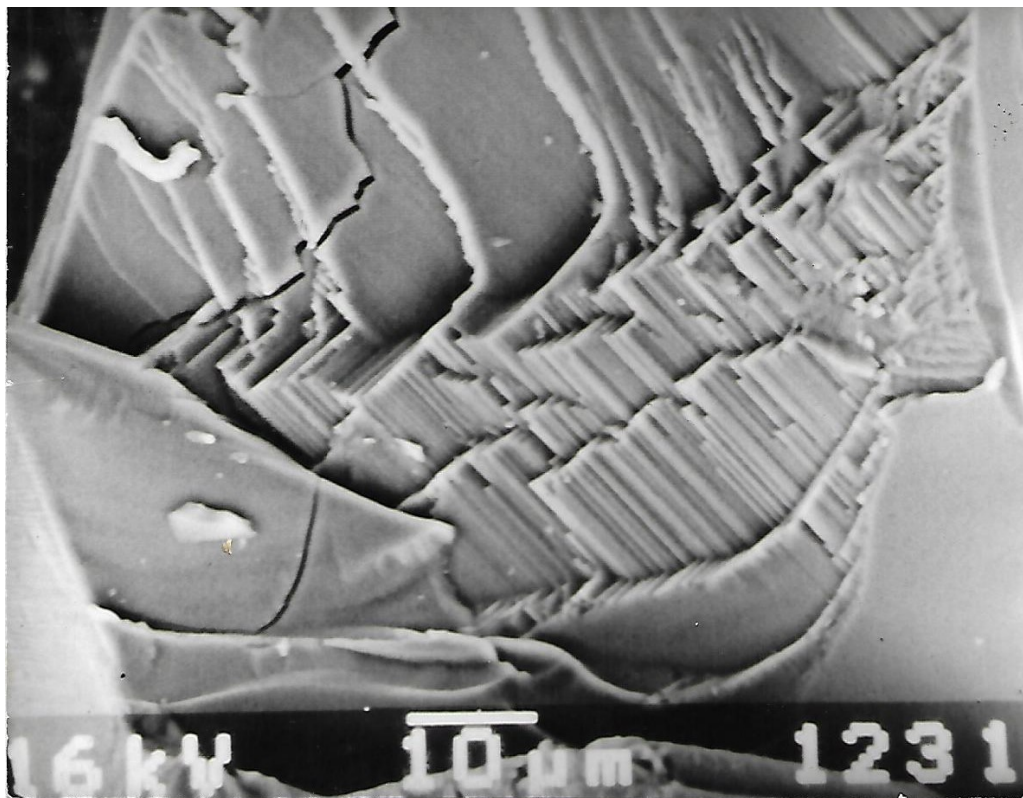
Obr. 3.10 Pohľad na brúsiace zrno z Al_2O_3 s plochu krehkého lomu



Obr. 3.11 Zväčšenie vyznačenej oblasti z obr. 3.10



Obr. 3.12 Štruktúra lomovej plochy pri veľkom zväčšení



Obr. 3.13 Kaskádový lom zrna z Al_2O_3 s viditeľnou trhlinou v strede zrna

Z toho vyplýva, že pri dokončovacom brúsení musí mať materiál brúsiacich zrn dostatočnú pevnosť a pri hrubovaní, keď treba zabezpečiť podmienku samoostrenia, môže byť odolnosť proti krehkému porušeniu menšia. Krehkým porušením tuhého telesa sa obvyčajne chápe porušenie, pri ktorom plastické trenie materiálu je také malé, že nie je pozorovateľné, inak povedané nevznikajú zvyškové deformácie.

Stupeň krehkosti sa obvyčajne posudzuje zo straty plasticity. Pri najvyššej krehkosti sa húževnatosť materiálu rovná nule. Krehké porušovanie materiálu možno objasniť podľa predstavy o vzniku a šírení trhlín. Možno predpokladať, že v tuhých telesách sú v objeme rozložené mikroskopické trhliny. So zväčšovaním vonkajšieho zaťaženia sa mikrotrhliny spájajú do prvotnej mikrotrhliny, z ktorej sa začína makroskopické porušenie. Preto na mechanizmus vzniku krehkého porušenia vplyva nehomogenita brúsiaceho materiálu a najmä povrchové defekty brúsiacich zrn, ktoré vyvolávajú koncentráciu napätia.

Súčasný brúsny materiál sa vyznačuje značnou nehomogenitou, ktorá je daná prítomnosťou nežiadúcich prímiesí, čo v značnej miere znižuje ich pevnosť. Napr. prírodné diamanty majú často lúčové trhlinky, výstupy a prehĺbeniny rôzneho tvaru. Ešte viac porúch majú syntetické diamanty.

Mnohé diamanty majú vtrúseniny. Môžu byť plynové (uhlík), tekutinové (voda) alebo tuhé (grafit, magnezit, rubín, oxidy železa a medi). Vtrúseniny spôsobujú vznik vnútorných napätí v diamantových zrnách. V takýchto diamantoch vidno pod mikroskopom anomálne dvojľomy ako dôsledok zvyškových napätí. Ráz alebo prudká zmena teploty vedie k tomu, že diamanty s vnútornými napätiami sa rozpadávajú.

Pretože diamantové zrná sú z hľadiska pevnosti anizotropne, pri brúsení sa môžu porušovať krehkým lomom.

Štúdium morfológie a niektorých vlastností kryštálov z kubického Nitridu bóru ukazuje, že na povrchu zrn kryštálov vznikajú vrstvy a stupienky, jemné kryštály, vtrúseniny a jamky. Kryštalizácia kubického nitridu bóru pri nízkej teplote vedie v rade prípadov k tvorbe dvojčat, ktoré obsahujú početné vtrúseniny vedľajších produktov reakcie. Značné množstvo rozličných vtrúsenín a prímiesí, ktoré vplyvajú na pevnosť kryštálov je aj v tradičných brúsiacich materiáloch, ako korund a karbid kremíka.

Priemyselné zrn, získané drobením monokryštálu elektrokorundu môže predstavovať kryštál, alebo polykryštál. Väčšina zrn sú polykryštály, pospájané vrstvami skla alebo iných látok. Pri žíhaní kotúča s keramickým spojivom pri takýchto zrnách sa narušuje celistvosť a znižuje sa ich pevnosť.

Mikroskopické sledovanie produktov syntézy pri výrobe karbidu kremíka sa skladá zo striedavých vrstiev tetraédrov dvojakej orientácie, ktoré sú slabo spojené. v kryštáloch karbidu kremíka je veľké množstvo prímiesí a nečistôt, ktoré negatívne vplyvajú na pevnosť zrn.

V procese brúsenia pri interakcii brúsiacich zrn s obrábaným materiálom vznikajú napätia v reznej časti zrn vplyvom zaťaženia reznými silami. Štúdium rozdelenia napätí v reznej časti nástroja možno realizovať metódami fotoelasticimetrie. Analýza rozdelenia izochróm ukázala, že pri hrúbke odrezávanej vrstvy 0,2 mm v reznom klíne nevzniká oblasť ťahových napätí. Pri hĺbke rezu 1 mm vzniká zreteľná hranica, nad ktorou vznikajú ťahové napätia, ktorých veľkosť stúpa. Zložitosť javov, ktoré vznikajú pri brúsení neumožňuje vytvoriť spoľahlivé modely. Napr. pri modelovom rezaní olova s veľkým záporným uhlom čela (-45°) vznikajú v reznom klíne len tlakové napätia.

Možno konštatovať, že zmena geometrie reznej časti zrna významne vplyva na napät'ové pomery. Konkrétne, so zväčšovaním uhla rezného klína sa ťahové napätia menia na tlakové. Okrem toho, ako ukazuje výpočet, absolútne hodnoty maximálnych tlakových napätí pri rovnakých podmienkach klesajú bez ohľadu na veľkosť zaťažujúcej sily. V dôsledku toho pri danej hĺbke rezu pravdepodobnosť krehkého porušenia klesá so zväčšovaním uhla rezného klína.

Pre každý nástrojový materiál s definovaným tvarom reznej časti existuje zodpovedajúca hĺbka rezu, pri ktorej dochádza ku krehkému porušeniu. Z praktického hľadiska je dôležité určiť hraničnú hrúbku odrezávanej vrstvy pre daný rezný materiál a rezné podmienky. Riešenie tejto úlohy v dôsledku toho, že k porušeniu dochádza bez pozorovateľnej zvyškovej deformácie, treba založiť na medznom stave pružne napätého telesa. Riešenie konverguje k úlohe teórie pružnosti.

Najviac používanou metódou pevnostných výpočtov je výpočet podľa dovoleného napätia. Podstata metódy je v nasledujúcom. Podľa známeho zaťaženia sa určia hlavné napätia $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3 (\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3)$ v rôznych bodoch telesa. Potom podľa teórie maximálnych napätí sa vo všetkých bodoch určia ekvivalentné napätia σ_{ekv} , čiže jednoosové ťahové napätia, rovnocenné reálnemu zložitému napät'ovému stavu. Bod, v ktorom je ekvivalentné zaťaženie maximálne, je kritickým bodom. Maximálne ekvivalentné napätie sa porovná s dovoleným zaťažením:

$$\sigma_{ekv_{max}} \leq \left| \sigma = \frac{\sigma_L}{n_L} \right|, \quad (3.1)$$

kde σ_L je medzné napätie (pre daný materiál) pri jednoosovom zaťažení,

n_L – koeficient bezpečnosti.

Pre krehké a málo plastické materiály možno za σ_L dosadiť medzu pevnosti pri jednoosovom ťahu R_m . Koeficient n_L v tomto prípade označíme n_R ako koeficient bezpečnosti pri krehkom lome.

Pre praktické výpočty možno použiť Mohrovú teóriu medzných napätí, podľa ktorej:

$$\sigma_{ekv} = \sigma_1 - \frac{R_m}{R_{-m}} \cdot \sigma_3. \quad (3.2)$$

Výpočet pevnosti reznej časti nástroja pri daných pevnostných charakteristikách nástrojového materiálu (R_m a R_{-m}) je v určení σ_{ekv} vo všetkých bodoch reznej časti nástroja, aby bolo možné určiť medzné body, a potom porovnať $\sigma_{ekv_{max}}$ so $|\sigma|$. Na tomto základe možno určiť hraničnú hrúbku odrezávanej vrstvy.

V dôsledku skutočnosti, že pri brúsení je v brúsiacom zrne trojzrnmerný napätový stav, teoretické určení pevnosti abrazívnych materiálov je značne složitú. Približnú predstavu o pomerných hodnotách pevnosti abrazívnych materiálov môže dať porovnanie ich medzi pevnosti.

Pri brúsení sa cyklicky zaťažujú brúsne zrná a pevnosť materiálu klesá od únavových javov so zväčšovaním dĺžky cyklu. Preto je potrebné poznať medzu únavy materiálu. Okrem toho, pri prerušovanom obrábaní vysokými rýchlosťami je rezná časť zrna dynamicky namáhaná, preto treba poznať pevnostné charakteristiky pri dynamickom zapažovaní.

V *tab.3.1* sú základné údaje o fyzikálno-mechanických vlastnostiach abrazívnych a nástrojových materiálov. Vidno, že existuje základná predstava o medziach pevnosti v ťahu a ohybe. Pretože medzi medzou pevnosti a únavy je v určitom intervale interakci, možno použiť na výpočet hodnoty R_m . Porovnanie mechanických vlastností rezných materiálov (*tab.3.1*) s mechanickými vlastnosťami ostatných nástrojových materiálov ukazuje, že medza pevnosti nástrojových ocelí a spekaných karbidov sú značne vyššie. Napríklad medza pevnosti v ohybe pri brúsiacich materiáloch je 5 až 20 krát menšia ako rýchloreznej ocele a medza pevnosti v tlaku je 2 až 3-krát menšia. Pri porovnaní so spekaným karbidom je medza pevnosti v ohybe 3 až 15-krát menšia.

Príčinou krehkého porušovania brúsiacich zrn sú teplotné napätia, ktoré menia svoj charakter. V čase záberu vznikajú v zrne tlakové, pri ochladení mimo záberu ťahové napätia. Ich striedanie spôsobuje únavu materiálu a vznik mikrotrhlin.

Materiál	Hustota kg.m ⁻³ .10 ⁻³	Mikrotvrdosť GPa	Medza pevnosti v ohybe GPa	Medza pevnosti v tlaku GPa	Modul pružnosti GPa	Koeficient. lineárnej teplotnej roztlačnosti K ⁻¹ .10 ⁻⁶
Diamant	3,46-3,54	98,1	0,3	2	882,9	0,9-1,4
KNB	3,44-3,49	65-90	-	-	706,3	2,1-4
SiC	3,21	32,4-35,3	0,1	1,5	358,1	6,5
Elektro korund	3,93-4,1	19,6-20,6	0,1	0,7	-	7,5
SK-P20	11-11,7	27,5-29,4-	1,1	3,8	510,1	6
SK-K10	14,4-+č,á	15,2-16,6	1,45	4,6	529,8	5
Rezná keramika	3,93	19,6-22,6	0,35	0,9-1,5	370	-
RO- HS12-1-4	8,2-8,7	12,8-13,7	3,6	3,5	215,8	11

Zaklad vzťahov na výpočet tepelných napätí možno aplikovať závislosť:

$$\sigma_{\theta} \cong \alpha.E(1-\nu)^{-1} \cdot \int_0^x \Delta\theta \cdot dx, \quad (3.3)$$

kde α je koeficient lineárnej teplotnej roztlačnosti,

E – modul pružnosti v ťahu,

$\Delta\theta$ - gradient teploty,

ν - Poissonov koeficient

x – súradnica sledovaného bodu.

Pre výpočet teplotných napätí je základnou úlohou určenie rozdelenia teploty v povrchových vrstvách brúsiaceho materiálu. Výsledky výpočtov teplotných napätí ukázali, že pri brúsení obodom brúsneho kotúča je množstvo tepla, ktoré pohlcuje kotúč pomerne malé. Vznikajúce napätia teda nie sú z hľadiska krehkého porušenia brúsiacich zrn nebezpečné.

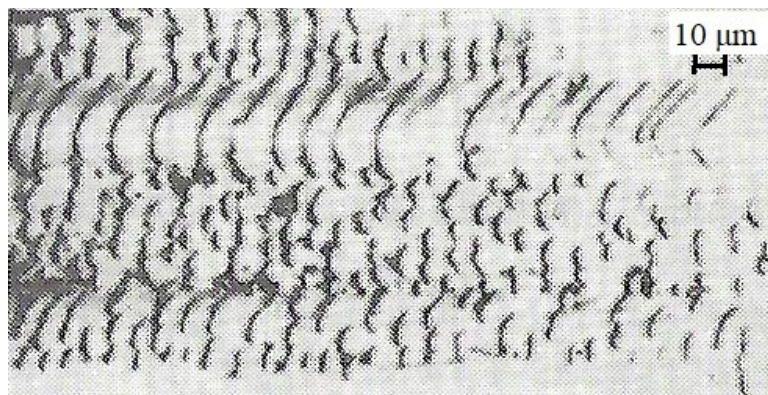
Iná situácia je pri brúsení čelom kotúča, pretože tu môžu vznikať značne vysoké napätia, ktorých výsledkom môžu byť mikrotrhliny a krehké porušenia zrn. Analýza ukazuje, že v konečnom dôsledku krehké porušenie brúsiacich zrn závisí na mnohých faktoroch, ako je charakter napätí v reznej časti zrna, geometria zrna, hrúbka odrezávanej vrstvy, javy únavy. Významnosť týchto faktorov možno určiť analyticky len s veľkými ťažkosťami, preto sa v súčasnosti aplikujú najmä experimentálne metódy,

3.2 Plastická deformácia brúsiacich zrn

Aby materiál brúsiacich zrn odoberal triesku, musí mať vyššiu odolnosť proti plastickej deformácii ako obrábaný materiál. Ak táto podmienka nie je splnená, nastáva plastická deformácia brúsiaceho zrna. Proces brúsenia sa vyznačuje opakovaným, prerušovaným kontaktom zrna s brúseným materiálom. Na prvý pohľad sa existencia plastickej deformácie krehkých materiálov brúsiacich zrn zdá byť nepravdepodobná. Naproti tomu treba zohľadniť skutočnosť, že pojmy krehkosť a plasticnosť sú relatívne a závisia na charaktere namáhania a teplote.

Krehký materiál možno priviesť do plastickeho stavu pri trojosovom tlaku. Naopak, plastické teleso možno dovieť do krehkého stavu pri trojosovom ťahu.

Doterajšie výsledky štúdia ukazujú, že aj také krehké materiály ako je mramor, liatiny, korund sa v podmienkach hydrostatického tlaku javia ako plastické. Napríklad ak korund pri normálnom tlaku má schopnosť k makroskopicky pozorovateľnej plastickej deformácii, už pri teplote 1250 K, pri tlaku 2,5 GPa „tečie“ už pri izbovej teplote. Bolo dokázané, že kamenná soľ a diamant pri trení vykazujú značnú plastickú deformáciu. Napríklad pri trení diamantu o diamant boli pod elektrónovým mikroskopom objavené plošné sklzy, čo svedčí o plastickej deformácii diamantu. Analogické sklzy v povrchových vrstvách diamantu boli objavené pri vysokých rýchlostiach trenia diamantu po čistom nikle. Na *obr. 3.14* je takáto fotografia povrchu diamantu so stopami po intenzívnom plastickej deformácii jeho povrchovej vrstvy. Podobné stopy po intenzívnej plastickej deformácii boli identifikované v povrchových vrstvách diamantu pri brúsení spekaného karbidu.



Obr. 3.14 Mikrofotografia výsledku trenia kontaktného povrchu diamantu po nikle rýchlosťou $50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

Pri rezaní vzniká kontakt brúsneho zrna s materiálom na čelnej aj chrbtovej ploche. Na čelnej ploche kontaktu pôsobia značné tlaky a spôsob namáhania je blízky všeobecnému tlaku, čiže vznikajú podmienky na plastický stav brúseného materiálu.

Na druhej strane, na zmenšenie krehkosti abrazívneho nástroja v rozhodujúcej miere vplyva ohrev povrchových vrstiev zrna v procese brúsenia.

Vo všeobecnom prípade musí mať nástrojový materiál vyššiu odolnosť proti plastickej deformácii ako obrábaný. Napríklad tvrdosť rezného materiálu má byť minimálne 1,25-2-krát vyššia ako obrábaného materiálu [10].

Plastická deformácia v nástrojovom materiáli sa začína iba vtedy, keď ekvivalentné napätia dosiahnu medzu vzniku plastickej deformácie. Skúšky ukázali, že ku plastickej deformácii rezného materiálu dochádza najskôr na chrbte, čiže tým sú určené kritické body pre výpočet. Táto skutočnosť zjednodušuje úlohu, pretože ju možno modifikovať na riešenie kontaktnej úlohy.

Koeficient bezpečnosti na dosiahnutie plastickej pevnosti možno definovať:

$$n \cong \frac{R_c}{\sigma_{ekv}} = \frac{H}{\sqrt{H_\beta^2 + \tau_\theta^2}}, \quad (3.4)$$

kde R_c je medza sklzu nástrojového materiálu

Potom:

$$n = \frac{H_n}{6 \cdot \sqrt{\tau_\beta^2 + \tau_\theta^2}}, \quad (3.5)$$

kde H_n je tvrdosť nástrojového materiálu v konkrétnych vrstvách pri teplote rezania.

H_β - tvrdosť obrábaného materiálu na plocha šmyku,

H_θ - tvrdosť obrábaného materiálu pri teplote rezania.

Pri vysokých rezných rýchlostiach, aké sa používajú pri brúsení, keď teplota kontaktných vrstiev je vyššia ak v zóne šmyku a je blízka teplote tavenia obrábaného materiálu $H_\beta \cong H_\theta$, možno koeficient n určiť zo vzťahu:

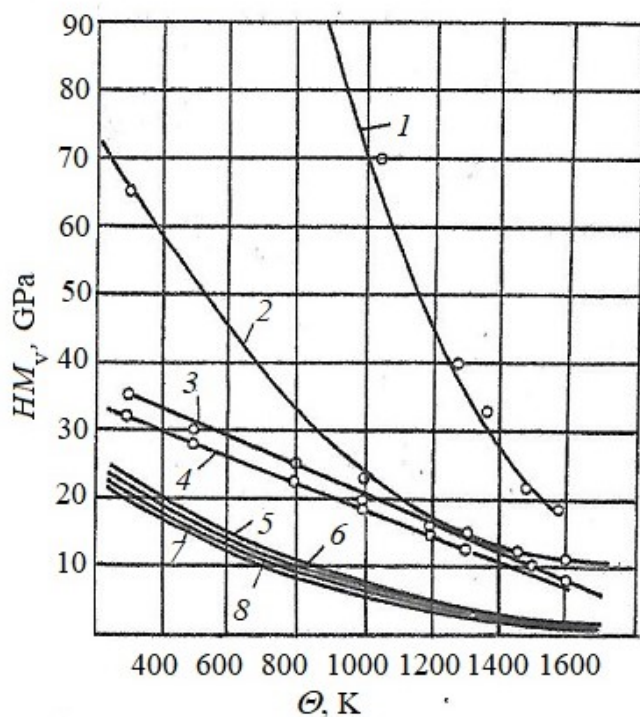
$$n = \frac{H_n}{H_\beta} \cong \frac{H_n}{6 \cdot \tau_\beta}. \quad (3.6)$$

Ak $n > 1$ nevzniká plastická deformácia a rezná hrana sa nešúverí.

Ak $n < 1$ vzniká plastická deformácia a rezná hrana sa šúverí.

Možno povedať, že koeficient bezpečnosti plastickej pevnosti rezného materiálu závisí od mechanických charakteristík nástrojového a obrábaného materiálu a podmienkach obrábania.

Na určenie okamihu porušenia brúsiaceho zrna treba poznať charakter závislosti tvrdosti rezného materiálu od teploty. Niektoré výsledky merania teplotných závislostí mikrotvrdosti brúsiacich materiálov sú na obr. 3.15 [8], [16].



Obr. 3.15 Teplotná závislosť mikrotvrdosti rôznych brúsiacich materiálov. 1 – prírodný diamant, 2 – kubický nitrid bóru, 3 – zelený karbid kremíka, 4 – zečierny karbid kremíka, titánový elektrokorund, 6 – chrómový elektrokorund, 7 – biely elektrokorund, 8 – normálny elektrokorund

Analýza teplotných závislostí mikrotvrdosti ukazuje, že so zvyšovaním teploty mikrotvrdosť abrazívnych materiálov klesá, pritom jednotlivé závislosti sa nepretínajú. Tvrdosť diamantu je v celom rozsahu výrazne vyššia ako ostatných brúsiacich materiálov. Potom nasleduje kubický nitrid bóru (kryštály kubického nitridu bóru majú pri izbovej teplote tvrdosť 64,6 GPa), ktorého tvrdosť so zväčšovaním teploty prudko klesá a pri teplotách 1 173 – 1 573 K len málo preyšuje tvrdosť karbidu kremíka. Elektrokorund má najmenšiu tvrdosť, ktorá ale preyšuje tvrdosť takých nástrojových materiálov ako spekaný karbid a rýchlorezná oceľ. V závislosti od obsahu legujúcich prvkov tvrdosť elektrokorundu klesá v nasledujúcej postupnosti: titánový, zirkonový 10 %, chrómový, biely a normálny.

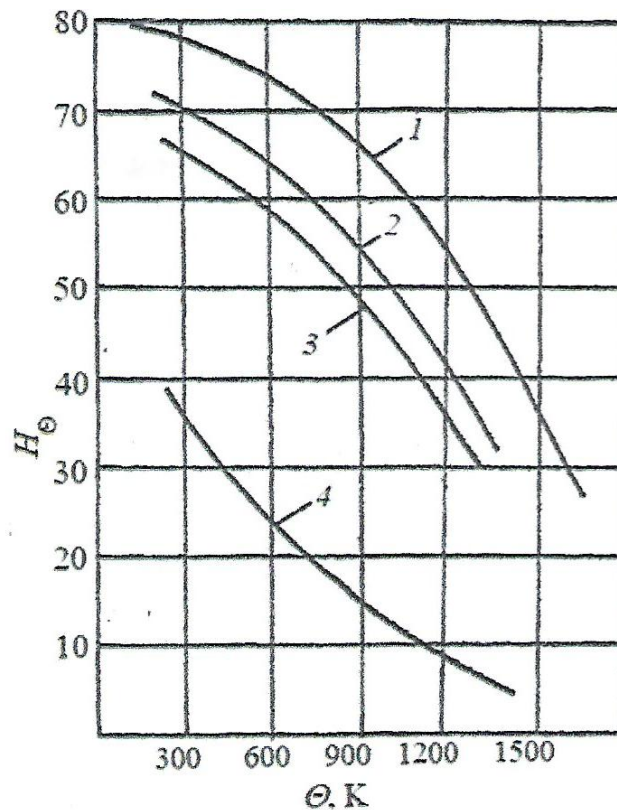
Pri matematickom spracovaní výsledkov experimentov sa získala analytická závislosť pri zadanej teplote:

$$H_{\theta} = H_0 \cdot e^{-k\theta} \quad (3.7)$$

kde H_{θ} je mikrotvrdosť pri izbovej teplote (pre KNB $\cong 100$; $\text{Al}_2\text{O}_3 \cong 32$),

k – teplotný koeficient (pre KNB = $(1-2) \cdot 10^{-3}$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 1,4 \cdot 10^{-3}$).

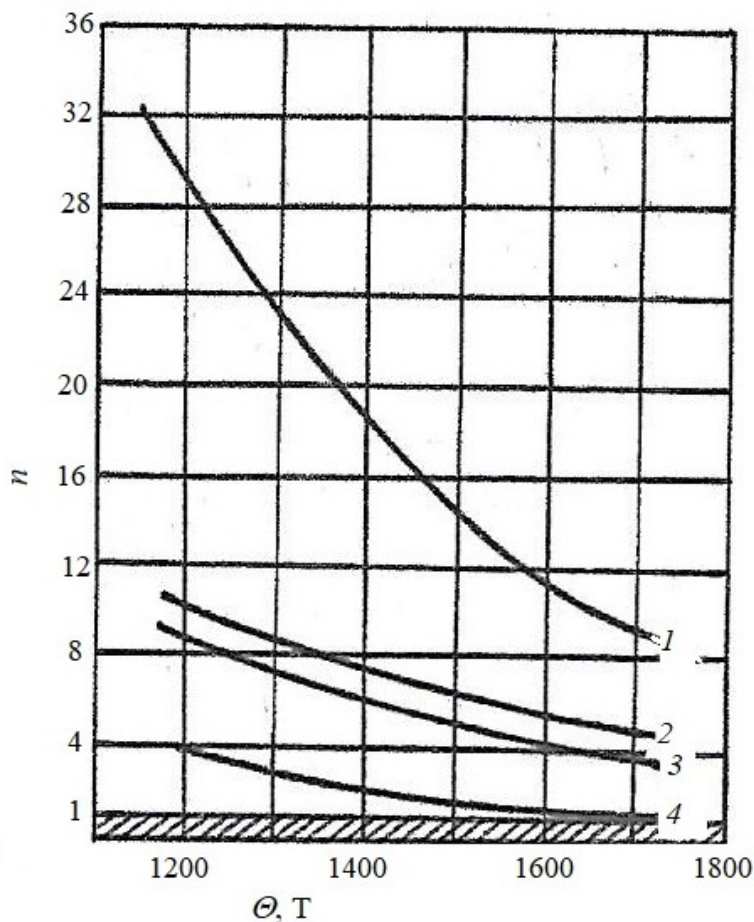
Uskutočnilo sa aj štúdium teplotných závislostí tvrdosti diamantu a kubického nitridu bóru od kryštalickej orientácie (obr. 3.16). Najväčšiu tvrdosť má v celom rozsahu teplôt kryštál prírodného diamantu typu 1. Syntetické diamanty oktaedrického typu majú menšiu tvrdosť. Najmenšiu tvrdosť majú kryštály kubického Nitricu bóru. Ak poznáme teplotné závislosti mikrotvrdosti brúsených materiálov a hodnoty τ_{ρ} , pri zodpovedajúcich teplotách, môžeme vypočítať koeficient bezpečnosti dosiahnutia plastickej pevnosti n [3].



Obr. 3.16 Teplotná závislosť tvrdosti

1 – prírodný diamant typu 1 (000) 100, 2 – syntetický diamant oktaedrického typu (001)100, 3 – syntetický diamant kubického typu (111) 110

Pri stanovenom n brali sa do úvahy nasledujúce špecifickosti brúsenia. Pri brúsení nastáva samoohrev odrezávanej vrstvy, preto τ_{β} sa musí definovať zodpovedajúcej teplote. Hodnoty τ_{θ} z dôvodu, že pri brúsení je teplota blízka teplote tavenia, sa berú rovné nule. Na obr. 3.17 je ako príklad diagram závislosti $n-\theta$, získaná pri brúsení zliatiny titánu VT-6.

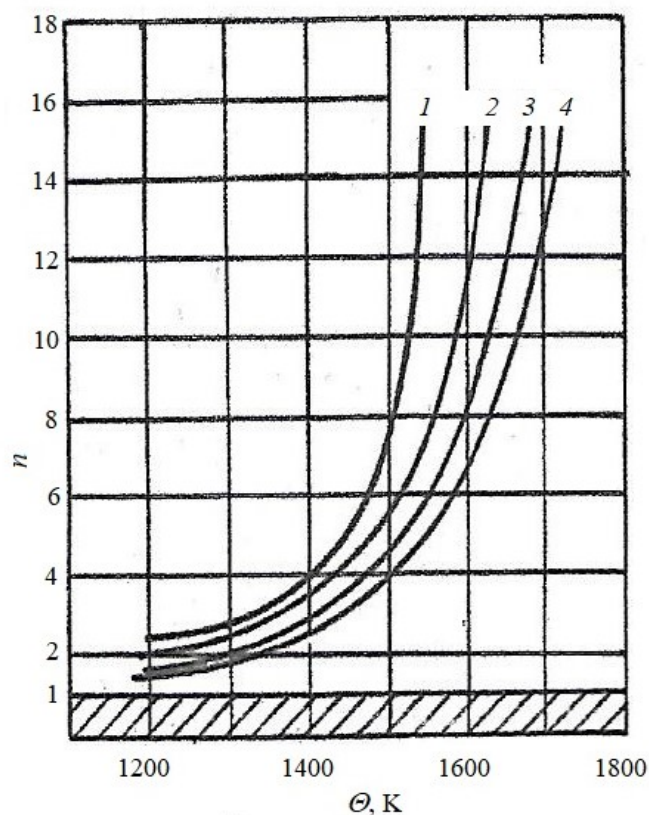


Obr. 3.17 Tepelná závislosť n pri brúsení zliatiny titánu VT-6. 1 – rezná keramika, 2 – diamant, 3 – polykryštalický kubický nitrid bóru, 4 – elektrokorund

Z analýzy závislosti vyplýva, že so zvyšovaním teploty koeficient bezpečnosti na dosiahnutie plastickej pevnosti brúsiacich materiálov klesá. Ďalšie experimenty ukázali, že najvyššiu plastickejšiu pevnosť má diamant, potom nasleduje kubický nitrid bóru, karbid kremíka a elektrokorund. Plastickejšia pevnosť závisí od vlastností obrábaného materiálu. Ak je pri oceli odolnej voči korózii hodnota n vyššia ako 1, žiarupevná oceľ pri brúsení elektrokorundom má n blízke 1, čo svedčí o možnosti plastickejšieho porušenia povrchových vrstiev elektrokorundu.

Analýza teplotných závislostí n pri brúsení spekaných karbidov ukazuje, že spomedzi všetkých brúsiacich materiálov iba diamant má najvyššiu plastickú pevnosť. Hodnoty n pri brúsení spekaného karbidu kubickým nitridom bóru a karbidom kremíka sú blízke jednej, preto použitie týchto materiálov pri brúsení spekaných karbidov je málo efektívne. Brúsenie spekaných karbidov elektrokorundom (n je menšie ako 1) prakticky neprichádza do úvahy.

Na obr. 3.18 sú teplotné závislosti n pre rôzne brúsiace materiály pri brúsení spekaných karbidov s predohrevom.



Obr. 3.18 Teplotná závislosť n pri brúsení spekaného karbidu K 10 s predohrevom.
1 – rezná keramika, 2 – diamant, 3 – polykrystalický kubický nitrid bóru, 4 – elektrokorund

So zvyšovaním teploty ohrevu nad 1250 K je koeficient n pre elektrokorund väčší ako 1, čiže možno ním v tomto prípade brúsiť aj spekaný karbid.

Zmenu n možno dosiahnuť aj výberom metódy brúsenia. Brúsenie sa charakterizuje ako prerušované obrábanie. Skracovaním času kontaktu a predlžovaním času mimo záberu možno regulovať ohrev povrchových vrstiev brúseného materiálu na hodnoty, pri ktorých sa nebude plasticky porušovať.

Z analýzy vyplýva, že súčasné brúsne materiály majú dostatočnú plastickú pevnosť, ale aj ohraničenia z hľadiska času. Elektrokorundové brúsiace materiály sa dajú použiť pri brúsení ocelí, liatin, farebných kovov a ich zliatin. Približne rovnakú oblasť použitia majú brúsiace nástroje na báze karbidu kremíka. Oblasť aplikácie brúsiacich nástrojov z kubického nitridu bóru je o niečo širšia. Okrem uvedených materiálov možno kubickým nitridom bóru brúsiť titánové zliatiny, rýchloreznú a žiarupevnú oceľ, keramické materiály. Najvyššiu plastickú pevnosť má diamant. Ohraničené použitie diamantu je z tohto hľadiska iba pri brúsení ťažko tavitelných kovov a ich zliatin.

Na príklade diamantu a kubického Nitridu bóru vidno, že efektívnym spôsobom výroby brúsiacich materiálov, ktoré majú vysokú plastickú pevnosť je syntéza veľmi tvrdých materiálov pri vysokých tlakoch a teplotách.

Z hľadiska výsledkov pri brúsení musia mať brúsiace materiály vysokú odolnosť proti krehkému porušovaniu. Pri dokončovacom brúsení, keď pracovný povrch kotúča musí mať vysokú rozmerovú trvanlivosť, nesmie vzniknúť krehké porušovanie brúsiacich zrn. Pri hrubovacom brúsení, keď je potrebné zabezpečiť efektívny úber materiálu, treba udržiavať reznú schopnosť brúsiacich zrn. Možno to dosiahnuť krehkým mikroporušovaním rezných hrán v momente, keď sa na nich objavia plošky opotrebenia. Periodický krehký lom zrn udržiava reznosť brúsiaceho kotúča. Tento mechanizmus je mimoriadne dôležitý pri brúsení nástrojov na báze kubického nitridu bóru a syntetického diamantu, ktorých efektívne ostrenie a tvarovanie je zatiaľ problematické.

Štúdium krehkého porušovania podľa predloženej metodiky ukazuje, že nastáva pri daných rezných podmienkach pri hraničných hrúbkach odrezávanej vrstvy. Hodnoty hraničných hrúbok závisia od fyzikálno-mechanických charakteristík (medza pevnosti v ťahu a ohybe) materiálu brúsiacich zrn, ich geometrie a vlastností obrábaného materiálu. Dosiahnuť hrúbky triesok pod úroveň hraničných možno zmenou rezných podmienok. V rade prípadov, najmä pri brúsení vysoko-pevných materiálov sa týmto opatrením tak znížia rezné podmienky, že proces brúsenia sa stane málo efektívnym.

Na zvýšenie efektívnosti brúsenia treba vyrábať brúsne materiály s širokým rozsahom pevnostných charakteristík. V tom prípade sa zadané hodnoty hraničných hrúbok odrezávanej vrstvy dosahujú nielen zmenou rezných podmienok, ale výberom brúsiaceho materiálu, ktorý má zodpovedajúcu pevnosť. Túto podmienku spĺňajú syntetické diamanty, ktoré majú široký rozsah pevnosti a elektrokorundy, ktorých pevnosť sa dá regulovať legovaním.

Hodnoty hraničných hrúbok odrezávanej vrstvy, určené podľa tejto metodiky sa nedajú v plnej miere využiť na optimalizáciu rezných podmienok. Vysvetľuje sa to tým, že

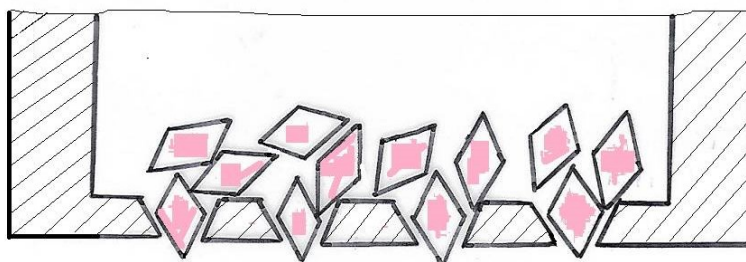
v súčasnosti ešte nemáme jednoduché a spoľahlivé metódy na určenie hrúbky odoberanej vrstvy jednotlivými zrnami. Len aplikáciou spoľahlivých metód výpočtom maximálnych hrúbok odrezávanej vrstvy pri definovaných rezných podmienkach a topografii pracovného povrchu kotúča bude možné brúsenie optimalizovať.

Dôležitou charakteristikou brúsiaceho materiálu je jeho plastická pevnosť. Poznanie koeficienta bezpečnosti plastickej pevnosti umožňuje vybrať pre dané podmienky efektívny brúsiaci materiál, pri ktorého aplikácii nevznikne nebezpečenstvo straty reznosti brúsiaceho kotúča vplyvom plastickej deformácie zrn.

Pri danej dvojici brúsiaci a obrábaný materiál, keď vzniká nebezpečenstvo plastickej deformácie kontaktných vrstiev brúsiacich zrn, možno dosiahnuť normálny režim brúsiaceho nástroja zmenou metódy brúsenia a rezných podmienok tak, aby sa maximálne znížil ohrev kontaktných vrstiev. Zvýšenie koeficientu bezpečnosti plastickej pevnosti možno dosiahnuť aj znížením mechanických charakteristík obrábaného materiálu jeho predohrevom.

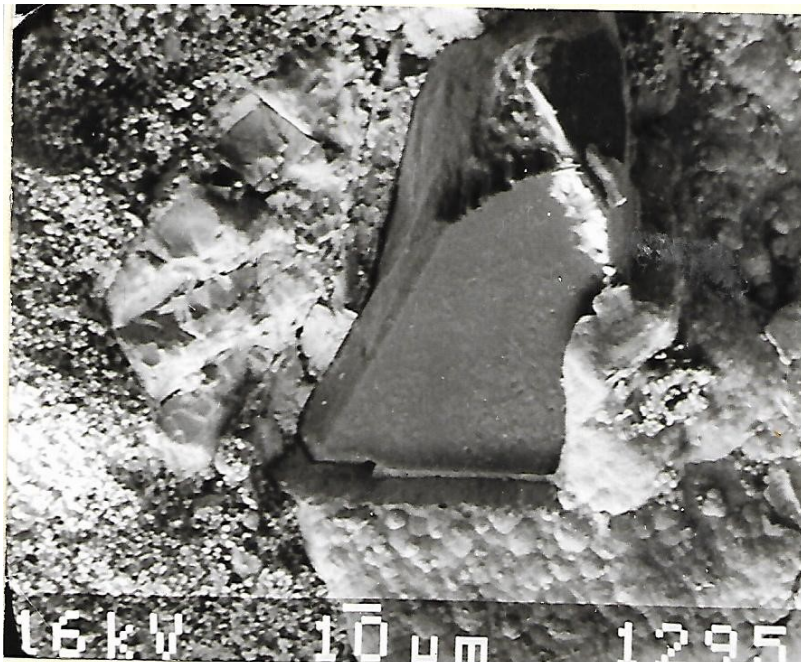
Príkladom zmeny metódy brúsenia je vtipné riešenie brúsneho kotúča, vyvinuté na Gruzínskej univerzite v Tbilisi.

Podstata riešenia spočíva vo vytvorení dutého tenkostenného kotúča v ktorom sú vytvorené kužeľové otvory na umiestnenie brúsnych zrn. V dutine sú nasýpané rozmerovo a tvarovo rovnaké brúsne zrná s výrazne rozdielnym pomerom dĺžky a priemeru. Pri rotácii kotúča sa odstredivou silou zrná zorientujú do otvorov a ich hroty vystupujú nad obvod kotúča. Na obr. 3.19 je princíp riešenia.



Obr. 3.19 Riešenie „dutého“ brúsneho kotúča

Technológia výroby zrn syntetického diamantu riadenou kryštalizáciou v súčasnosti nepredstavuje problém. Takéto zrná sa experimentálne aplikujú aj u klasických štruktúr brúsnych kotúčov. Ich hlavnou prioritou je zmenšenie uhla rezného klina, teda aj zlepšenie reznosti. Na obr. 3.20 je pohľad na orientované zrno v spojive klasického brúsneho kotúča.



Obr. 3.20 Orientované brúsne zrno v spojive brúsneho kotúča

Predpokladá sa, že pri zvýšení reznej sily bude zrno zatlačené do kotúča a nedôjde k jeho poškodeniu. Po zastavení kotúča sa zrná zosypu do dutého kotúča a pri opätovnom roztočení prídu do záberu iné hroty zrn. Ďalší pozitívny aspekt riešenia spočíva v použití reznej kvapaliny, ktorá sa pri rotácii kotúča dostane bezprostredne ku každému zrnu. Podľa výsledkov experimentálneho brúsenia, je metóda vhodná zatiaľ na jemné dokončovacie leštenie povrchu.

3.3 Identifikácia ďalších mechanizmov opotrebenia brúsnych zrn

Pri brúsení sa brúsiace zrná opotrebovávajú rôznymi mechanizmami. Pri dokončovacom brúsení trvanlivosť kotúča je určená intenzitou opotrebenia rezných hrán. Mechanizmus vylamovania brúsiacich zrn možno vysvetliť tak, že pri brúsení vznikajú na zrnách oterové plôšky, čím stúpajú rezné sily. Po dosiahnutí určitej veľkosti rezných síl sa časť zrna vylomí. tento proces sa periodicky opakuje. Možno konštatovať, že čím menšia je hustota zrn, tým menšia je spotreba brúsiaceho materiálu. Preto intenzita opotrebenia zrn výrazne vplýva na spotrebu brúsiaceho materiálu, čo potvrdzuje dôležitosť štúdia opotrebenia

brúsnych materiálov. Študovať mechanizmus opotrebenia brúsiacich zrn zo sledovania ich zvyškov, ktoré zostávajú na obrobenom povrchu a medzi trieskami je problematické. Z druhej strany možno konštatovať, že vylamovaním zrn sa zmení topografia brúsiaceho kotúča. Sledovanie topografie kotúča môže byť vhodnou citlivou metódou na identifikáciu charakteru opotrebenia nástroja.

Charakter opotrebenia brúsiacich materiálov sa určoval pri brúsení jednotlivým zrnom. táto metodika zjednodušuje štúdium reliéfu, ktorý vytvára brúsne zrno na povrchu. Pri porovnaní charakteru opotrebenia jednotlivých zrn a zrn viazaných vbrúsiacom kotúči nezistili sa výrazné rozdiely.

Z hľadiska použitej techniky na štúdium opotrebenia zrn možno vhodne použiť riadkovací elektrónový mikroskop. Často pri veľkom zväčšení sa stráca zákonitosť vzniku mikroprofilu. Preto získané výsledky treba porovnávať so sledovaním na metalografickom mikroskope.

Diamant na rozdiel od iných brúsiacich materiálov je chemicky homogénny a má odolnosť proti krehkému a plastickému porušovaniu, čo uľahčuje analýzu fyzikálno-chemických javov medzi nástrojom a obrobkom. Preto sa ďalšie štúdium zameria najmä na diamantový nástroj. Hlbšie štúdium tejto problematiky ukazuje, že v závislosti od podmienok brúsenia sa brúsiace zrno opotrebovávajú naledujúcimi mechanizmami.

- adhéžno-únavový a únavový
- brúsiaci
- difúzny
- chemický
- oxidačný, grafítizačný a pod.

Rozoberieme niektoré z týchto mechanizmov.

3.3.1 Adhéžno-únavové opotrebenie

V súčasnosti je už všeobecne známe, že trenie medzi tuhými telesami je podmienené najmä adhéznymi silami – súčytom trecích sa telies. Reálny kontakt telies pri brúsení je diskretný v rozmeroch atómov. V kontaktných bodoch sú špecifické tlaky dostatočné na vznik plastickej deformácie. Povrchy kontaktujú prakticky chemicky čisté, preto dochádza k ich silnej adhézii.

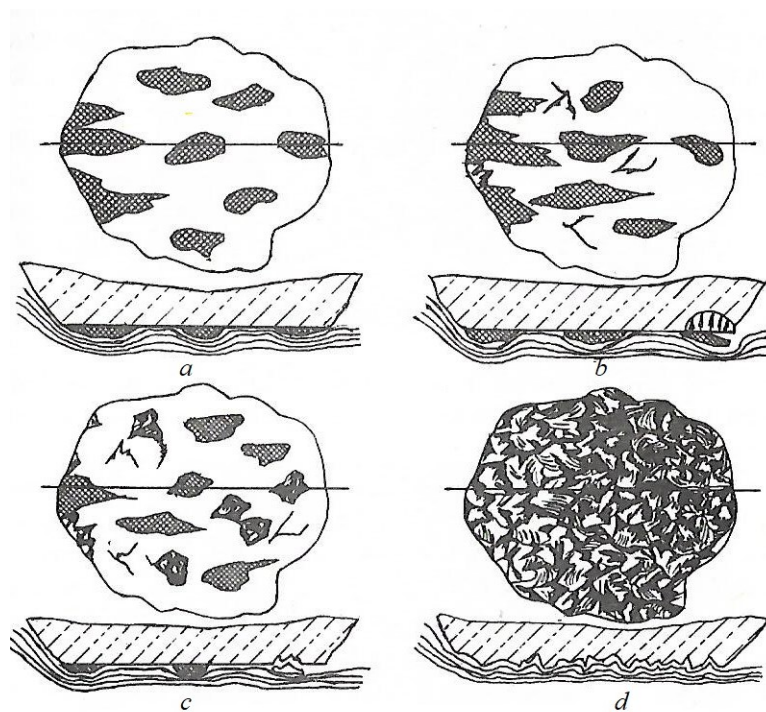
Fyzikálna podstata adhézie v súčasnosti ešte nie je dostatočne objasnená. Podľa niektorých autorov pri nej pôsobia elektrické silové väzby. Iní vidia príčinu

v mediatómových väzbách. Existujú teórie ktoré objasňujú adhéziu molekulárnymi väzbami medzi kontaktnými telesami. Rad autorov tvrdí, že adhézia má podstatu v difúzii.

Najviac je prezentovaná molekulárno-mechanická alebo adhézne-mechanická teória trenia. Pri brúsení s vysokými tlakmi a teplotami je trenie medzi nástrojom a obrokom väčšinou bez prítomnosti absorpčnej vrstvy, preto podmienky trenia sú podobné ako pri trení vo vákuu. V súvislosti s tým je potrebné upozorniť na výsledky trenia kovov vo vákuu, z ktorých vyplýva, že ohrev vo vákuu, pri ktorom sa odstránia absorpčné filmy, spôsobuje pri trení intenzívnu adhéziu povrchov a koeficient trenia extrémne narastá.

Pri trení čistých povrchov má veľký význam chemická príbuznosť trúcih sa materiálov. S príbuznosťou materiálov výrazne stúpa adhézia a koeficient trenia. Pri trení vo vákuu je menší koeficient trenia vtedy, ak oba kovy tvoria tuhý roztok. Tieto skutočnosti svedčia o tom, že ak v procese brúsenia dosiahnu kontaktné podmienky, blízke podmienkam vo vákuu, môže nastať intenzívna adhézia.

Približne možno kinetiku adhézne-únavového opotrebenia opísať takto (*obr. 3.21*) [4].

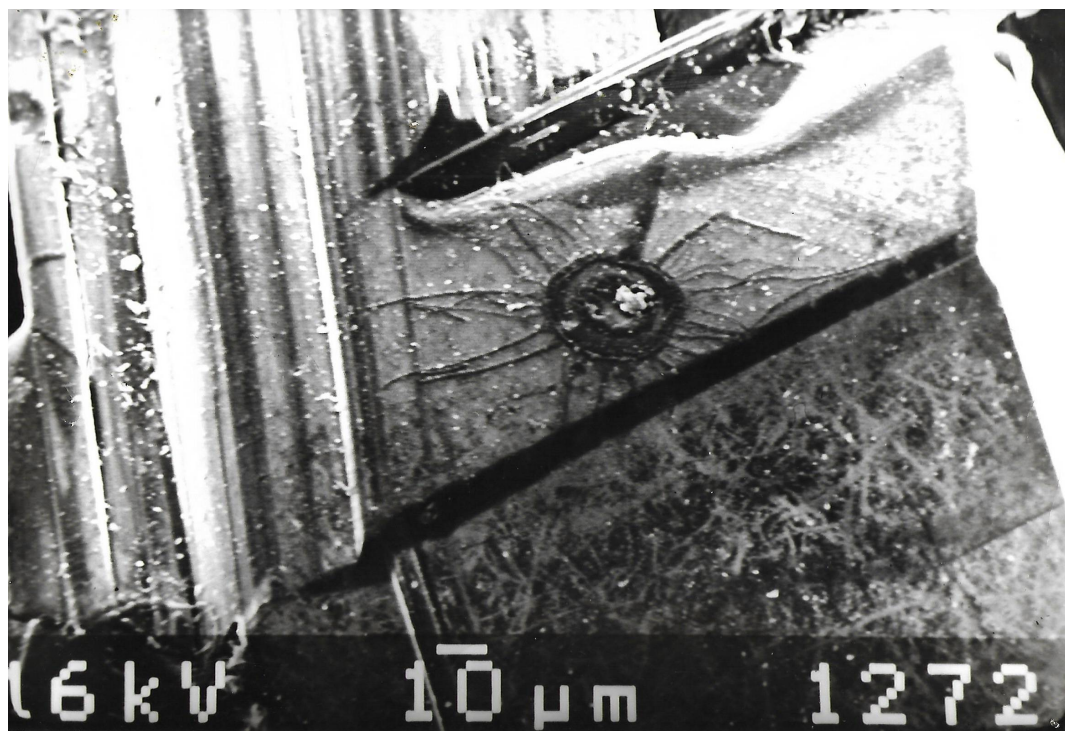


Obr. 3.21 schéma kinetiky adhézne-únavového opotrebenia

Na začiatku obrábania vznikajú na chrbte brúsiaceho zrna samostatné adhézne nálepy obrábaného materiálu (*a*). Adhézia vzniká vysokými tlakmi a nepretržitým pohybom novovytváraných povrchov obrábaného materiálu oproti chrbtu zrna. Pri sklíže obidvoch povrchov prebieha proces vnikania a odstraňovania adhézných filmov. Pri každom

elementárním odtrhnutí adhézného nálepu vznikajú v povrchových vrstvách materiálu cyklické napätia, ktoré sú prevažne nižšie ako je medzná pevnosť brúsiaceho materiálu. Podľa výpočtov možno konštatovať, že na jednom metre dráhy môže byť ľubovoľný bod chrta zrna až 1 000-krát pod účinkom napätia. Vplyvom takého cyklického namáhania sa postupne nakopia poruchy, ktoré zväčšujú trhliny (*b*). Brúsiace materiály v dôsledku nehomogenity, existencie pórov, nerovnomerného rozdelenia vnútorných napätí apod. možno považovať za anizotropné. Trhliny vznikajú najmä na miestach, kde sa tieto defekty koncentrujú. Príčinou vzniku trhlín môžu byť aj tepelné napätia, ktoré vznikajú jako dôsledok cyklického ohrevu zrn.

Na obr. 3.22 je pohľad na mikrotrhliny na povrchu brúsiaceho zrna, vzniknuté z tejto príčiny. Zrejme v tomto prípade došlo k odpareniu kvapky reznej kvapaliny na ohriatom zrne.



Obr. 3.22 Snímka povrchu brúsiaceho zrna so sieťou mikrotrhlin, spôsobených prudkým miestnym ochladením

Pretože napätia, ktoré vznikajú vytváraním a odsraňovaním adhézných nalepov, majú malú hĺbku, únavové javy prebiehajú len v poruchovom vrstve. Postupne sa v povrchovom vrstve objavujú nové trhliny, ktoré sa postupne spájajú a zaberajú stále väčšiu plochu. Keď

sily adhézie prekročia pevnosť rezného materiálu, v určitom štádiu sa odrezávajú mikročastočky materiálu (c). Adhezne poškodenie má charakter krehkého lomu.

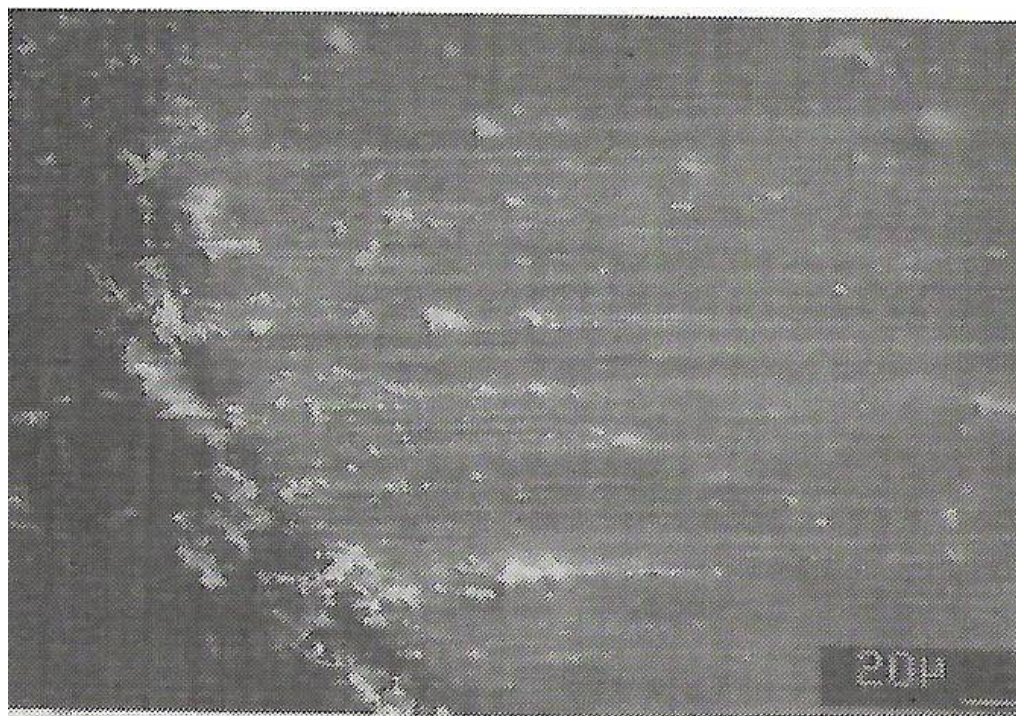
Postupne celú chrbtovú plochu zrna pokrývajú adhezne krátery a plocha je hrboľatá, čo je pre adhezno-únavové opotrebenie typické (d).

V rade prípadov sa častočky brúsiaceho materiálu v procese opotrebenia dostávajú do zóny trenia a sú vtlačené do obrobenej plochy. Po prejení ďalších zrn vtlačené časti zrna vytvárajú na chrbtových plochách drážky vo smere vektora rýchlosti. Úlomky sa ďalším brúsením vytrhávajú, ale vzhľadom na rovnakú tvrdosť, akú majú brúsiace zrná fixované v kotúči, môžu vylomiť ďalšie zrná z kotúča. Tento proces už nemá charakter adhézie.

Pokusíme sa ilustrovať proces adhezno-únavového opotrebenia na výsledkoch štúdia kontaktných javov pri brúsení rôznych materiálov.

Aby bolo možné sledovať javy adhézie, je vhodné pred experimentom sledované plochy brúsiaceho zrna vyleštiť do zrcadlového lesku. Na lesklom povrchu možno tak jasne rozlíšiť cudzie častice, aj opotrebenie.

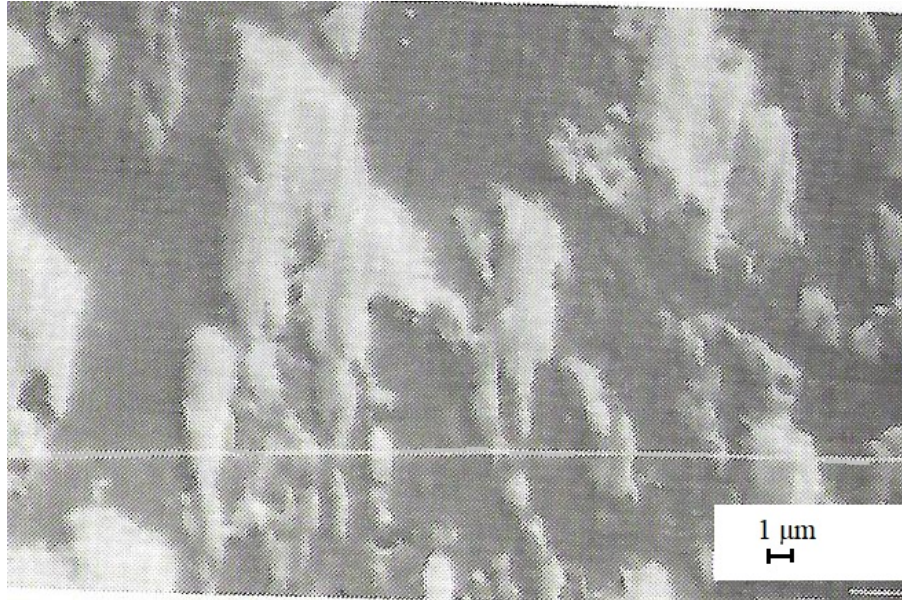
Na obr. 3.23 je mikrofotografia vopred vyleštenej chrbtovej plochy diamantového zrna. Fotografia bola vyhotovená po krátkodobom brúsení armovacieho železa reznou rýchlosťou 6 m.s^{-1} .



Obr. 3.23 Elektrónová mikrofotografia vyleštenej plochy diamantového zrna po brúsení armovacieho železa reznou rýchlosťou 6 m.s^{-1} (rozloženie nalepov je orientované vo smere vektora reznej rýchlosti)

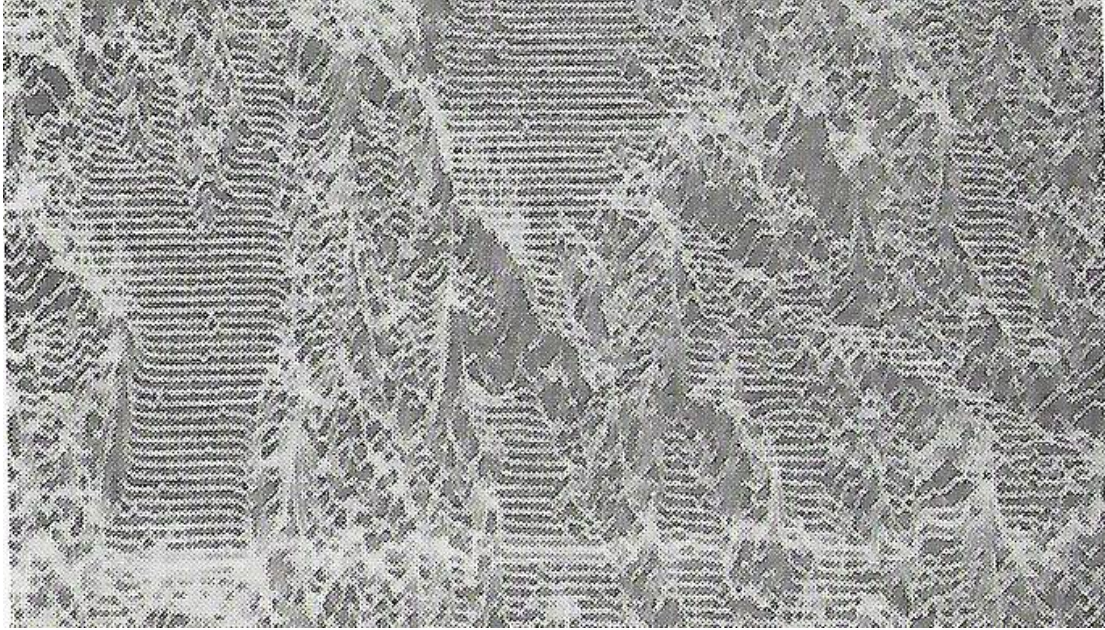
Napriek tomu, že chrbtová plocha bola vyleštená do zrkadlového lesku, vnikli na nej adhézne nálepy obrábaného materiálu. Najviac nálepov je v blízkosti reznej hrany. Ich rozmery sú 4-5 μm .

Na *obr. 3.23* je mikrofotografia chrbtovej plochy zrna po krátko trvajúcim brúsení technického titánu VT 1-1.



Obr. 3.23 Elektronová mikrofotografia leštenej plochy diamantového zrna po krátkodobom brúsení titánu VT 1-1

Na vyleštenej chrbtovej ploche diamantu sú nálepy titánu, ktoré majú rozmery 4-6 μm . Na profilograme – *obr. 3.24*, získanom Y moduláciou vidno, že výška nálepov dosahuje 2 μm .



Obr. 3.24 Profiloqram rovnakej plochy, zobrazený Y moduláciou

Veľkosť a tvar nálepv závisí na druhu obrábaného a rezného materiálu. Dôkazom adhézneho charakteru nalepv je skutočnosť, že chrtové plochy zrn boli vyleštené do zrcadlového lesku a nie je predpoklad zachytenia časti obrábaného materiálu v nerovnostiach povrchu zrna. Frekvencia nálepv, ich konfigurácia a rozmery závisia od charakteru interakcie dvojice obrábaného a rezného materiálu a podmienok trenia v kontakte.

Napríklad pri brúsení plastickej medi diamantom by bolo možné očakávať intenzívne nalepovanie materiálu, prakticky však nebolo objavené. Pri brúsení plastických materiálov, jako spekané karbidy, v rade prípadov sa objavilo značné nalepovanie obrábaného materiálu na brúsiace zrná. Pri brúsení ocele, kobaltu a niklu pri rovných podmienkach vznikli na chrpte brúsiacich zrn adhézne nálepy, ktorých rozmery a konfigurácia sa menili v závislosti od podmienok kontaktného trenia. Veľmi silná adhézia bola identifikovaná pri brúsení titánu a jeho zliatin, a to v širokom rozsahu rezných podmienok. V dôsledku periodického vzniku a odrezávania adhézných nálepv vznikajú javy únavy kontaktných povrchov brúsiacich zrn.

Experimentálne sa brúsila keramika diamantovým kotúčom s kovovou väzbou. Po (2-3). 10^3 cykloch striedavého kontaktu brúsiacich zrn a reznej rýchlosti $28 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ na zrnách diamantu sa pozorovali početné trhliny, ktoré pronikali do hĺbky, kolmo k smeru namáhania.

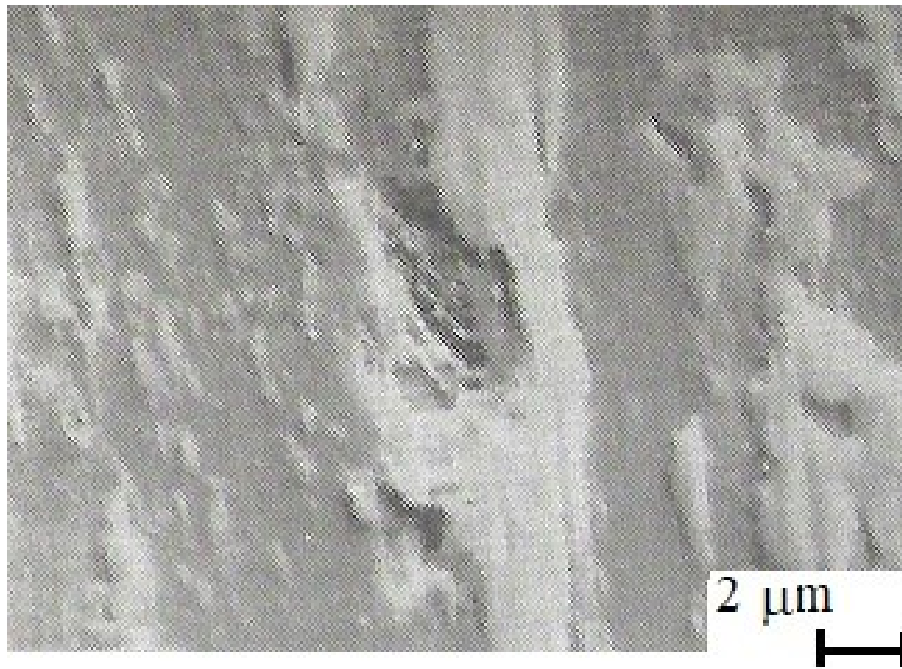
Podľa štúdia lomov možno určiť tri štádiá krehkého porušenia:

- východisková trhlina,

- rozvoj únavovej trhliny,
- kvázistatický lom.

Prvý a tretí mechanizmus je zrejmy. K rozvoju únavovej trhliny treba splniť určité podmienky, napr. aj vznik plastickej deformácie pri hrote trhliny. Iniciáciu trhlín podmieňujú periodické tepelné rázy a únavové javy.

Na obr. 3.25 je mikrofotografia chrbta diamantového zrna po brúsení titánu VT 1-1.



Obr. 3.25 Mikrofotografia chrbta diamantového zrna po brúsení titánu VT 1-1 po odtrhnutí časti nálepu obrábaného materiálu

Po odtrhnutí časti nálepu titánu (v strede obrázku) vidno mikroporušenie kontaktného zrna. Intenzívne opotrebenie zrna pri brúsení titánu je na reznej hrane, kde normálne napätia dosahujú maximálnu hodnotu (obr. 3.26).



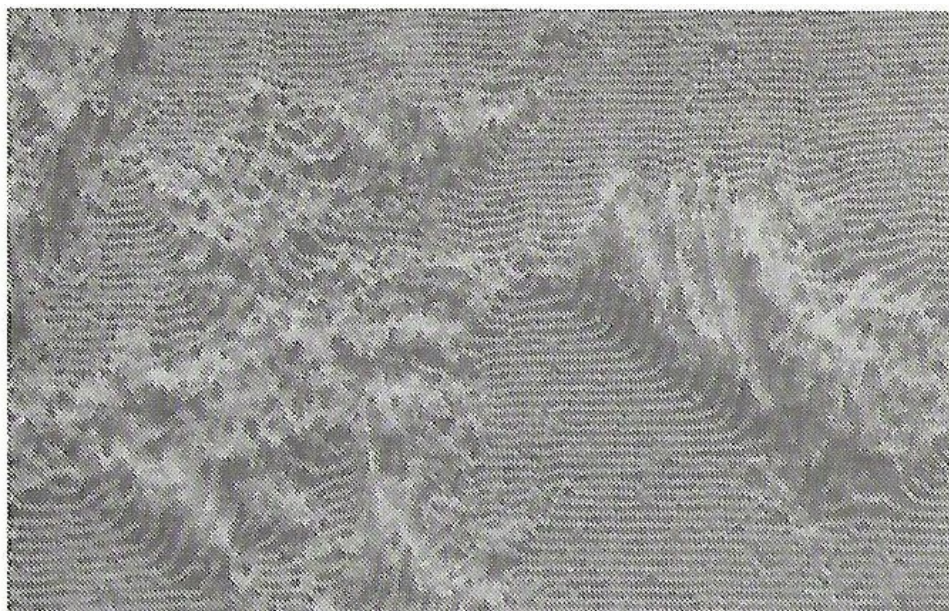
Obr. 3.26 Pohľad na reznu hranu diamantového zrna pri brúsení titánu VT 1-1

Analogické krátery sa objavujú pri odtrhnutí adhézných nálepor spekaného karbidu P20 (obr. 3.27). Stredný priemer kráterov je 5-40 μm . Povrch dna kráterov má zreteľný charakter krehkého porušenia.



Obr. 3.27 Chrbtová plocha diamantového zrna po krátkom brúsení spekaného karbidu P20

Na obr. 3.28 je profilograf, ktorý skenuje povrch z obr. 3.27



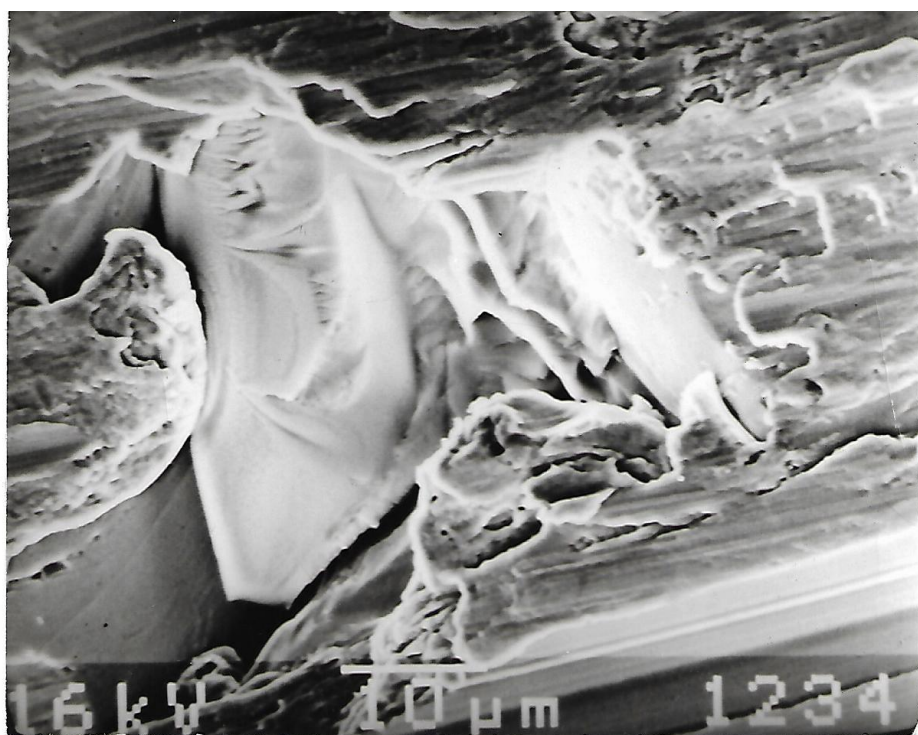
Obr. 3.28 Profilogram plochy diamantového zrna z obr. 2.27

Možno konštatovať, že prevládajúcim typom opotrebenia korundových a karbidovo-kremíkových a diamantových zrn je adhezno-únnavové opotrebenie.

3.3.2 Abrazívne opotrebenie

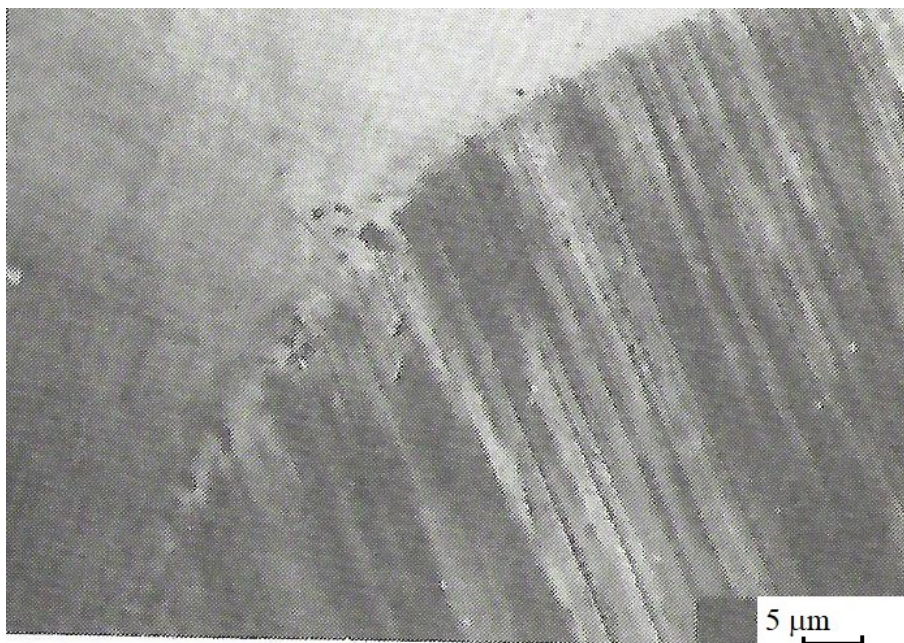
Mechanizmus abrazívneho opotrebenia možno vysvetliť nasledovne. Pri brúsení padajú do zóny kontaktu zrna s obrábaným materiálom čiastočky, ktoré majú rovnakú alebo vyššiu tvrdosť ako kontaktujúce vrstvy rezného materiálu. Sú to najmä tvrdé vtrúseniny obrábaného materiálu alebo čiastočky brúsiacich zrn, ktoré vznikajú krehkým lomom zrn. Tieto sú vtlačené do povrchu a tam sú pevne fixované. Na obr. 3.29 je detailný pohľad na čiastočku brúsiaceho zrna vtlačenú do povrchu, vidno, že je fixovaná obrábaným materiálom. Pri takomto uložení tvrdej čiastočky nemôže nastať jej okamžité vytrhnutie z povrchu ďalšími zrnami, pretože úlomek málo vyčnieva na povrch. Jeho vyčnievajúca časť pôsobí brúsiacim účinkom na prechádzajúce zrná kotúča.

Vonkajším prejavom abrazívneho opotrebenia je vznik drážok na brúsiacich zrnách, ktorých smer sa zhoduje s vektorom reznej rýchlosti.



Obr. 3.29 Detailný pohľad na úlomok brúsiaceho zrna v brúsenom povrchu (zväčšený záber z obr. 3.8)

Typický prejav abrazívneho opotrebenia reznej časti brúsneho zrna je na obr. 3.30.



Obr. 3.30 Elektrónová mikrofotografia opotrebeného povrchu diamantového zrna po brúsení spekaného karbidu K 10

Pri malých rezných rýchlostiach, napr. pri leštení, honovaní a superfinišovaní, ak kontaktná teplota neprevyšuje 350-500 K, abrazívne opotrebenie diamantu a kubického nitridu bóru je málo pravdepodobné, pretože tvrdosť týchto brúsiacich materiálov je pri uvedenom teplote podstatne vyššia ako tvrdosť známych karbidov kovov a vtrúsenín.

Pri brúsení malými reznými rýchlosťami nástrojmi na báze elektrokorundu a karbidu kremíka sa pravdepodobnosť abrazívneho opotrebenia zvyšuje, najmä ak v brúsenom materiáli sú tvrdé vtrúseniny. Možno to vysvetliť skutočnosťou, že tvrdosť korundu a karbidu kremíka pri nízkych teplotách sa dá porovnať s tvrdosťou týchto vtrúsenín alebo je o niečo menšia.

Pri vysokých rezných rýchlostiach, keď sa kontaktné vrstvy zahrievajú na vysoké teploty, môžu vzniknúť také podmienky, pri ktorých nastáva abrazívne opotrebenie diamantu. Napríklad pri brúsení spekaného karbidu vysokými reznými rýchlosťami sa karbidy matrici nestačia plne zahriať, ale kontaktujúci povrch diamantu je zahriaty na vysokú teplotu. Preto pri danej teplote brúsenia tvrdosť karbidu môže prevyšovať tvrdosť diamantu.

3.3.3 Difúzne opotrebenie

Obyčajne sa difúzia chápe jako pomaly prebehajúci proces, čo vyvoláva názor, že difúzne procesy nemôžu mať pri obrábaní rozhodujúci podiel na opotrebení nástrojov. Tento názor sa týka najmä brúsenia, kde kontakt nástroja a obrábku je prerušovaný.

Jedným z dôležitých faktorov, ktorý výrazne urýchľuje proces difúzie je vysoká kontaktná teplota, ktorá dosahuje pri brúsení teplotu tavenia obrábaného materiálu. Pri tak vysokých teplotách výrazne rastie rýchlosť difúzneho rozpúšťania v porovnaní s izbovou teplotou asi milionkrát.

Na druhej strane je základným zákonom difúzie tzv. parabolický zákon rastu difúznej vrstvy, ktorý vychádza z toho, že začiatková fáza difúzie má neobyčajne vysokú rýchlosť rozpúšťania.

Pri brúsení je čas prítomnosti brúsiaceho zrna nad sledovaným bodom obrábaného povrchu rádovo niekoľko mikrosekúnd. V dôsledku toho je rýchlosť rozpúšťania v kontakte neobyčajne vysoká, vlastná skôr začiatkovej perióde difúzie. V súvislosti s tým množstvo rozpustenej látky bude omnoho vyššie, ako by bolo vtedy, keď brúsiaci a obrábaný materiál je v stabilnom kontakte, ktorého čas určuje počet jednotlivých stretnutí počas brúsenia.

Pri brúsení sa kontaktujú chemicky čisté brúsiace zrná s novým povrchom obrodku. To ešte viac zvyrazňuje proces difúzného rozpúšťania, pretože na kontaktných plochách nie sú absorpčné filmy, ktoré by spomaľovali proces rozpúšťania. Pri chemickej príbuznosti obrábaného a rezného materiálu to vedie k intenzívnemu rozpúšťaniu atómov rezného materiálu v obrábanom materiáli.

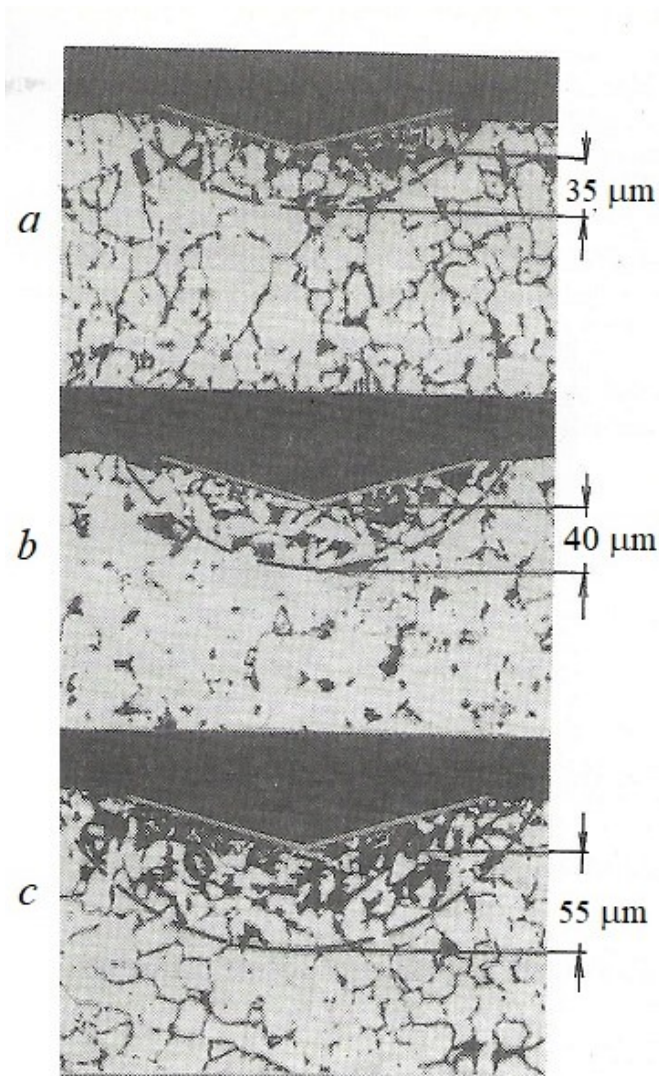
Špecifickosťou povrchov, ktoré sú výsledkom difúzného opotrebenia, sú hladké, až zrkadlové plochy. Možno to objasniť tým, že v dôsledku difúzneho rozpúšťania, ktoré prebieha viac alebo menej rovnomerne na celej ploche kontaktu, sa kopíruje povrch, ktorý je hladký.

Predstavu o možnosti existencie difúzneho opotrebenia možno získať štúdiom interakcie brúsiaceho a obrábaného materiálu pri stálom kontakte. V súčasnosti existujú metódy štúdia difúzie pri žíhaní v peci (ohrev, výdrž v peci na teplote a ochladenie). Pretože pritom na kontaktujúcich plochách vznikajú absorpčné vrstvy, vzniká inkubačná perióda, počas ktorej prebieha difúzia veľmi pomaly, a to výrazne ovplyvňuje výsledky. Z uvedeného dôvodu sa použila nasledujúca metóda.

Vo vákuovej komore (rádovo $6 \cdot 10^{-1}$) sa zahrieva brúsiace zrno, upevnené v držiaku a vzorka obrábaného materiálu. Po stabilizácii teploty sa zrno zatlačí do vzorky materiálu. Po určitom čase sa oddiali z kontaktu a začína sa ochladzovanie. Takto možno vytvoriť plošný styk a vylúčenie inkubačného času. Metódou možno realizovať krátke difúzne žíhanie rádovo niekoľko sekúnd alebo desiatín sekúnd.

Štúdium zóny kontaktu možno realizovať sledovaním mikroštruktúry na metalografickom mikroskope, meraním mikrotvrdości alebo röntgenovou mikroanalýzou. Takto bol sledovaný napr. difúzny proces medzi diamantom a armovaným železom. Výsledky ukázali, že pri teplotách 1 130 a 1 153 K a trvaní kontaktu 60 s vzniká pozorovateľná difúzia. Možno to vysvetliť skutočnosťou, že rozpustnosť uhlíka v α -železe neprevyšuje 0,03 %. Po fázovej premene $\alpha - \gamma$ rozpustnosť uhlíka prudko rastie a pri teplotách nad fázovou transformáciou možno pozorovať difúzne rozpúšťanie uhlíka diamantu v armovacom železe.

Na *obr.3.31* sú mikrofotografie kontaktných zón medzi armovacím železom a diamantom, pri teplote 1 273 K a po čase kontaktu 1, 10 a 60 s.

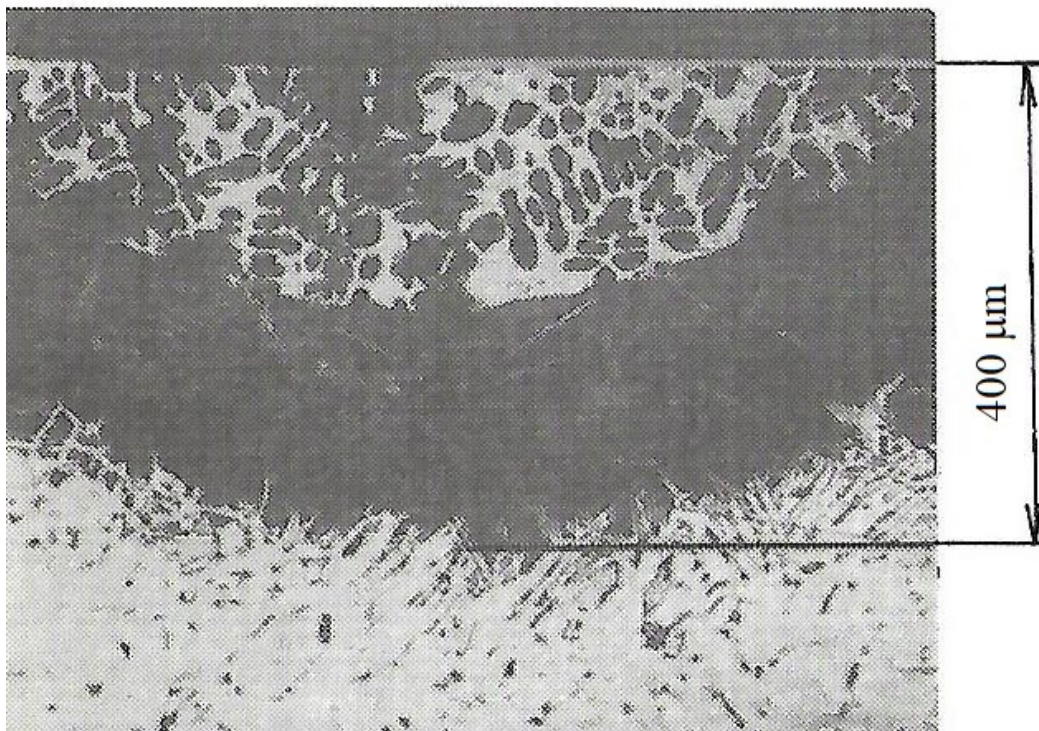


Obr. 3.31 Interakcia diamantu s armovaným železom pri teplote 1273 K a rôznom trvaní kontaktu (zväčšené 300-krát). a – 1 s, b – 10 s, c – 60 s

Z obrázku vyplýva, že už po jednej sekunde vzniká pozorovateľná difúzna zóna, ktorej štruktúra zodpovedá štruktúre s obsahom asi 0,02 % uhlíka. So zväčšovaním času difúzneho žihania sa difúzna vrstva zväčšuje.

Na obr. 3.32 je mikrofotografia kontaktnej zóny pri spojení diamantu s armovacím železom pri teplote 1573 K a čase 0,5 s. V kontaktnej zóne sa vytvorila dendritická štruktúra, ktorá je charakteristická pre tuhnutie taveniny. Ďalej vzniká prechodová vrstva vylúčených karbidov premenlivej koncentrácie, ktorá prechádza do základnej štruktúry armovacieho železa. Interakcia diamantu s armovacím železom je pri teplote 1573 K natolko intenzívna, že za desatinu sekundy vzrastie v povrchových vrstvách koncentrácia na 1,7 % a vzniká eutektoidné tavenie.

Výsledky skúšok ukázali, že intenzívne rozpúšťanie uhlíka diamantu v armovacom železe začína nad teplotou fázovej transformácie $\alpha - \gamma$. Súčasne intenzita rozpúšťania uhlíka diamantu v armovacom železe rastie so zvyšovaním teploty.



Obr. 3.32 Výsledok interakcie diamantu s armovacím železom pri teplote 1573 K a trvaní kontaktu 0,5 s (zväčšenie 120-krát)

Pri interakcii tuhých fáz sú možné dva mechanizmy difúzie – hetero-difúzia a reaktívna difúzia. V prvom prípade sa tvorí tuhý roztok prvku v mriežke „rozpušťaďla“. Maximálna koncentrácia difundujúceho prvku v rozpúšťanom kove nemôže prevýšiť mernú koncentráciu, určenú stavovým diagramom. V druhom prípade prebieha chemická reakcia s vytváraním tuhého roztoku na hranici kontaktu oboch materiálov. Na splnenie tejto podmienky je potrebné, aby reagujúce prvky tvorili tuhý roztok. Závisí to od vzájomnej rozpustnosti difundujúcich prvkov.

Pretože železo kryštalizuje v dvoch modifikáciách (priestorovo a plošne centrovaná mriežka), tvorí uhlík so železom dva druhy roztokov. V γ -železe je najväčšia dutina kryštalickej mriežky v strede a má veľkosť 0,052 nm. Aby vznikla medzietómová väzba, musí byť rozmer difundujúceho atómu väčší, ako je rozmer dutiny. Atómový polomer uhlíka je

0,077 nm, čiže táto podmienka je splnená. merná rozpustnosť uhlíka v γ – železe sa zväčšuje pri zvyšovaní teploty z 0, % (996 K) na 2 % (1403 K).

Uhlík tvorí tuhý roztok v α – železe. Pretože α -železo má priestorovo centrovanú mriežku, najväčšia je vakancia v strede steny kocky. Jej rozmer je 0,036 nm. Menší objem, cez ktorý sa môžu pretlačiť atómy uhlíka, znižujú rozpustnosť uhlíka v porovnaní s γ -železom. Pomerná rozpustnosť uhlíka v α -železe je 0,025 %, pri teplote 996 K je 32-krát menšia ako v γ -železe pri rovnakej teplote (0,8 %).

Pri znížení teploty rozpustnosť uhlíka v α -železe prudko klesá (0,016 % pri 973 K, na 0,008 % pri 873 K na 0,007 % pri 773 K).

Teoretický výpočet ukazuje, že pri difúzi v priestorovo centrovaném mriežke môžu atómy uhlíka preskočiť do štyroch rovnocenných susedných poloh a v štruktúre plošne centrovanej mriežky do dvanástich poloh. Frekvenci preskokov závisí exponenciálnej teploty. Pri izbovej teplote vykoná atóm uhlíka jeden preskok za 25 s a pri teplote tavenia železa (1 818 K) vykoná $2 \cdot 10^{11}$ preskokov za 1 s. Dôležitým parametrom difúzie je koeficient difúzie. Na koeficient difúzie navyše vplýva teplota. Teplotnú závislosť možno napísať vzťahom:

$$D = \frac{Q}{D_0 \cdot e^{R \cdot \theta}}, \quad (3.8)$$

kde D_0 je koeficient difúzie pri teplote rovnej nekonečnu,

Q – merná energia aktivácie tuhého roztoku,

R – plynová konštanta,

θ - absolútna teplota.

Analýza rovnice ukazuje, že koeficient difúzie exponenciálne závisí od teploty.

Hodnoty koeficientu D_0 málo preyšujú $10^1 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. Veľkosť koeficienta difúzie závisí najmä od energie aktivácie.

Aktivačná energia pre prakticky používané materiály býva 1,6 až $6,4 \cdot 10^{-19}$ J na atóm. Približná polovica Q zodpovedá vakancii E_γ a druhá polovica – energii premiestnenia E_m .

Koeficient difúzie závisí aj od druhu tuhého roztoku. Energia aktivácie Q pri tuhom roztoku je menšia, pretože atómy sú v medziuzlových polohách a nie je potrebná energia na ich vytrhnutí z uzla.

Ako bolo uvedené, koeficient difúzie závisí a od typu kryštalickej mriežky, čiže súvisí s chemickou príbuznosťou kontaktujúcich materiálov.

Koeficient difúzie α -železa sa dá určiť:

$$D = 2 \cdot 10^{-1} \cdot e^{-\frac{20500}{R \cdot \theta}} \quad (3.9)$$

a v γ -železe:

$$D = 10^{-1} \cdot e^{-\frac{32400}{R \cdot \theta}} \quad (3.10)$$

Všeobecné literárne údaje ukazujú, že koeficient difúzie uhlíka v α a γ železe stúpa s teplotou. Analogické výsledky sa dosiahli pri štúdiu difúzie atómov uhlíka do armovaného železa. Zovšeobecnené výsledky v difúznej interakci medzi brúsiacim a obrábanými materiálmi v rozsahu teplôt 1 200 – 1 700 K sb. v *tab. 3.2*. Interakci charakterizujú tri stupne. Ak v danom rozsahu teplôt a časov žihania do 500s má difúzna vrstva hrúbku pod 5 μm , stupeň interakcie je nízky, v rozsahu 5-25 mm je stredný a nad 25 mm vysoký. Stupeň difúznej interakcie medzi brúsiacim a obrábaným materiálom je dôležitým kritériom hodnotenia efektívnosti brúsiaceho materiálu pri danom obrábaném materiáli a rezných podmienkach.

Difúzna interakci brúsiacich a obrábaných materiálov

Tab. 3.2

Brúsiace materiály	železo a jeho zliatiny	nikel a jeho zliatiny	kobalt a jeho zliatiny	titán a jeho zliatiny	spekané karbidy
Diamant	veľká	veľká	stredná	malá	malá
Kubický nitrid bóru	veľmi malá	nie je	nie je	malá	nie je
Karbid kremíka	veľká	stredná	malá	stredná	veľmi malá
Elektrokorund	nie je	nie je	nie je	veľká	nie je

4 POŽIADAVKY NA SPOJIVO BRÚSIACICH KOTÚČOV

Vlastnosti brúsiacich kotúčov okrem použitého rezného materiálu významnou mierou ovplyvňuje druh a vlastnosti použitého spojiva. Spojivo má významnú funkciu pri opotrebení a obnove brúsiaceho nástroja. V praxi sa často stretávame s prípadom, že použitý brúsiaci materiál má vysokú odolnosť proti opotrebeniu a napriek tomu sa brúsiaci kotúč rýchle opotrebuje.

V súčasnosti nie sú k dispozícii metódy na sledovanie kvality spojiva brúsnych kotúčov. Možno konštatovať, že jednou z charakteristík, ktoré určujú kvalitu brúsiva je jeho tvrdosť. Túto charakteristiku možno z fyzikálneho hľadiska chápať ako odpor spojiva proti vytrhávaniu brúsiacich zŕn vonkajšími silami. Existujúce metódy túto vlastnosť nehodnotia. V praxi je rozšírený názor, že čím je vyššia tvrdosť brúsneho kotúča, tým pevnejšie sa držia brúsne zrná v nástroji. Na druhej strane ako ukazuje výskum, vysoká tvrdosť kotúča nie je vždy dôsledok pevnej väzby zŕn a spojiva. Je známe, že pri brúsení mnohých materiálov kotúčmi z diamantu alebo kubického nitridu bóru sa v trieskach objavuje mnoho zŕn východiskovej veľkosti. To svedčí o skutočnosti, že opotrebenie brúsiaceho kotúča pri týchto podmienkach prebieha najmä porušovaním spojiva a vytrhávaním celých brúsiacich zŕn z kotúča. Štúdium granulometrickej štruktúry zŕn, nájdených v trieskach pri brúsení elektrokorundovými a karbido-kremíkovými brúsiacimi nástrojmi ukazuje, že výrazne závisí od podmienok brúsenia. Pri dokončovacom brúsení je v trieskach 10-20% neporušených zŕn. Ostatnú časť tvoria úlomky zŕn, vzniknuté krehkým lomom.

Pri hrubovacom brúsení sa zväčšuje podiel brúsiacich zŕn východiskovej zrnitosti a 30 % a aj podiel menších úlomkov zŕn. To svedčí o objemovom krehkom lome brúsiacich zŕn (*obr.3.5, 3.6*).

4.1 Druhy opotrebenia brúsiaceho kotúča

V závislosti od vlastností obrábaného materiálu, technických charakteristík brúsiaceho nástroja, rezných podmienok, spôsobov ostrenia, prebieha opotrebenie brúsiaceho kotúča v dôsledku:

- prevládajúceho otupovania brúsiacich zŕn (režim dokončovacieho brúsenia),
- opotrebenia rezných hrán s čiastočným samoostrením (režim polohrubovacieho brúsenia),

- prevládajúceho samoostrenia (režim hrubovacieho brúsenia, brúsenia nástrojmi zo supertvrdých brúsiacich materiálov, silové rýchlostné brúsenie),
- adhézneho súchytu a nalepovania obrábaného materiálu na pracovný povrch brúsiaceho kotúča (brúsenie plastov).

Pri dokončovacom brúsení kotúčmi z elektrokorundu a karbidu kremíka, ak dominuje opotrebenie rezných hrán, rozmerové opotrebenie kotúča je 10-30 μm , pritom jeho podiel je 5 % objemu brúsiaceho nástroja, odobratého pri ostrení.

Prevládajúce opotrebenie rezných hrán brúsiacich zŕn vzniká pri brúsení nelegovaných ocelí diamantom. V dôsledku difúzneho rozpúšťania uhlíka diamantu a sprievodných procesov oxidácie alebo grafitizácie sa na brúsnych zrnách vytvárajú hladké plôšky opotrebenia. V závislosti od času brúsenia sa plôšky opotrebenia zväčšujú, a tým narastajú tangenciálne a normálové sily, pôsobiace na zrno. Veľkosť týchto síl závisí od podmienok brúsenia a najmä od fyzikálno-mechanických vlastností obrábaného materiálu. Ak pri brúsení sú maximálne hodnoty týchto síl menšie ako hodnoty síl väzby brúsiacich zŕn v spojive, radiálne opotrebenie kotúča podmieňuje rýchlosť difúzneho rozpúšťania brúsiaceho materiálu v obrábanom materiáli. Opotrebenie, spôsobené vylamovaním brúsiacich zŕn tvorí len malú časť objemového opotrebenia brúsiaceho kotúča. Takýto charakter opotrebenia vzniká brúsením armovacieho železa a ocelí s nízkym obsahom uhlíka diamantovým kotúčom s organickým spojivom.

V rade prípadov, napr. pri brúsení nízkolegovaných uhlíkových ocelí opotrebenie rezných hrán brúsiacich zŕn prebieha ako dôsledok difúzneho rozpúšťania. S rastom plôšok opotrebenia sa zväčšujú rezné sily. Keď ich hodnota dosiahne kritickú veľkosť, nastane krehký lom brúsiacich zŕn, lebo ich vylomenie brúsiaceho kotúča. Obyčajne podiel difúzneho opotrebenia na objeme opotrebenia kotúča je 2-3 % a podiel lomu zŕn a vylamovania zŕn z pracovného povrchu kotúča je viac ako 80 %.

Vo väčšine prípadov opotrebenie brúsiacich zŕn má adhéžno-únavový charakter. Morfológia opotrebených plôšok sa výrazne odlišuje od plôšok difúzneho opotrebenia.

Nerovnomerným rozdelením napätí, ktoré pôsobia na zrno, najintenzívnejšie sa opotrebuje tá časť chrbta zrna, ktorá je najbližšia k reznej hrane. Preto so vzrastom plôšky opotrebenia sa zmení tvar reznej hrany a porušuje sa v smere vektora reznej rýchlosti. Zmena tvaru rezných hrán oslabuje zrná a ryhy, ktoré vznikajú na zrne, vzrastú natoľko, že nastáva krehký lom zrna. Väčšinou v týchto podmienkach sa vyštrbuje rezná hrana, a tým sa čiastočne obnoví reznosť brúsiacich zŕn.

Takýto charakter opotrebenia vzniká v mnohých praktických prípadoch brúsenia ocelí elektrokorundovými kotúčmi s keramickým spojivom, pri brúsení kalených rýchlorezných ocelí diamantovým kotúčom a pod. Analýza triesok z brúsenia v týchto prípadoch ukazuje, že sa v nich objavujú najmä jemnejšie zrná ako základné. To svedčí skutočnosti, že prevládajúcim mechanizmom je proces krehkého lomu brúsiacich zrn.

Ako ukazuje výskum, úbytok brúsiaceho kotúča je iniciovaný z 80 % krehkým lomom zrn a 6-8 % tvorí adhéžno-únavové opotrebenie.

Pri obrábaní viacerých materiálov vznikajú také podmienky, že začína prevládať proces lomu brúsiacich zrn z pracovného povrchu kotúča. Napríklad pri brúsení žiarupevných zliatin sa na brúsiacich zrnách v krátkom čase objavujú plošky adhéžno-únavového opotrebenia. V dôsledku toho narastajú rezné sily, ktoré vylamujú celé zrná z povrchu brúsiaceho kotúča.

Pri brúsení húževnatých materiálov (hliník, meď a pod.) kotúčmi z elektrokorundu a karbidu kremíka prevláda nad opotrebením rezných hrán zaplňovanie priestoru medzi brúsiacimi zrnami trieskou. v tomto prípade hlavný podiel na strate reznosti kotúča má najmä tento proces.

Postupne sa častice triesky vtláčajú do prehĺbenín v kotúči a vrstvia sa navzájom (*obr. 1.30, 1.31*), pričom vytvárajú monolitné útvary, ktoré postupne zaplňujú póry brúsiaceho kotúča. V priebehu tohto procesu stále menšie množstvo rezných hrán kontaktuje s obrábaným materiálom a brúsenie s modifikuje na trenie triesky o obrobený povrch.

Vysoké rýchlosti trenia vyvolávajú fixovanie triesok v medzere medzi zrnami a chemicky rovnomerým materiálom obrobku.

Ešte intenzívnejší je tento proces pri brúsení titánových zliatin, ktoré sa vyznačujú intenzívnou adhéziou ku všetkým brúsiacim materiálom. Pri brúsení titánových zliatin vzniká silný súchyt titánu s kontaktujúcimi plochami zrn (*obr. 1.32*). Súčasne sa zaplňa priestor medzi zrnami trieskou. Kontaktné povrchy zrn sa nachádzajú v procese adhéžno-únavového opotrebenia. Napriek tomu prevláda vylamovanie zrn alebo blokov z pracovného povrchu kotúča. Preto pri brúsení titánových zliatin diamantom sa v trieskach nachádza značné množstvo zrn základnej zrnitosti.

Opisované mechanizmy opotrebenia pracovného povrchu kotúča nevyčerpávajú všetky prípady, ktoré môžu nastať pri rôznych podmienkach brúsenia. Uvedené príklady však ukazujú, že odolnosť brúsiacich zrn proti opotrebeniu nemôže zaručiť vysokú efektívnosť využitia brúsiaceho nástroja. Dôležitú úlohu má aj kvalita spojiva.

4.2 Hodnotenie kvality spojiva brúsiaceho nástroja

V súčasnosti nie sú vyvinuté metódy, ktoré by umožňovali kvalitatívne hodnotiť spojivo brúsiacich kotúčov. Možno konštatovať, že jednou z dôležitých charakteristík spojiva je jeho tvrdosť. Z fyzikálneho hľadiska možno tvrdosť spojiva chápať ako jeho odpor proti vytrhávaniu brúsiacich zŕn vonkajšími silami. Existujúce metódy kontroly takto definovanú tvrdosť nehodnotia. V praxi je rozšírené tvrdenie, že čím je väčšia tvrdosť brúsiaceho kotúča, tým pevnejšie sa držia zrná v nástroji. Na druhej strane výskum ukazuje, že vysoká tvrdosť kotúča nie je vždy dôsledok pevnej väzby zŕn a spojiva.

Jedným zo základných charakteristík brúsenia, ktoré pomerne objektívne hodnotí efektívnosť využitia brúsneho nástroja je koeficient brúsenia. Je to pomer objemu odobratého materiálu k objemu opotrebenia kotúča. Tento parameter hodnotí kvalitu brúsiva aj spojiva.

Pri rôznych brúsiacich nástrojoch objem brúsiacich zŕn je v objeme kotúča rôzny. Pri korundových a karbidovo-kremíkových kotúčoch s keramickým spojivom tvorí 6,2-38 % objemu a napr. pri diamantových (50–100 % koncentrácie) 12,5-25 % objemu kotúča zaberajú brúsiace zrná. Preto koeficient brúsenia vlastne vyjadruje pojem objemu odrezaného materiálu k objemu opotrebenia nie celého kotúča, ale brúsiacich zŕn.

Platí:

$$K_k = \frac{V_m}{V_{ob}}, \quad (4.1)$$

kde V_m je objem odbrúseného materiálu,

V_{ob} – objem opotrebovaného brúsiva.

Z toho vyplýva, že koeficient brúsenia K_k v takomto chápaní charakterizuje efektívnosť využitia brúsiaceho materiálu pri brúsení daného obrábaného materiálu pri rôznych rezných podmienkach.

Pri hodnotení efektívnosti použitia diamantového brúsiaceho nástroja sa vo väčšine prípadov používa merné opotrebenie diamantu:

$$q = \frac{M_m}{M_d} \cdot 100\%, \quad (4.2)$$

kde M_m je hmotnosť odrezaného materiálu,

M_d – hmotnosť opotrebeného diamantu.

Pri brúsení materiálov s rôznou hustotou, napr. titánu a tantalu bude koeficient brúsenia približne rovnaký, ale v dôsledku malej hustoty titánu je špecifické opotrebenie diamantu až 4x menšie. Môže to viesť k nesprávnym záverom o lepšej obrábateľnosti tantalu. Loladze a Bokučava [11], vyvinuli spôsob na hodnotenie kvality spojiva, ktorého princíp je nasledovný.

Pomocou vybraného brúsiaceho zrna sa realizuje mikrorezanie obrábaného materiálu pri definovaných rezných podmienkach. Určí sa koeficient brúsenia pre jednotlivé brúsne zrno K_z . Potom sa materiál brúsi pri rovnakých podmienkach brúsiacim kotúčom a určí sa aj koeficient brúsenia K_k s uvažovaním koncentrácie brúsiva v kotúči. Pomer obidvoch koeficientov brúsenia:

$$n = \frac{K_k}{K_z} \cdot 100\% \quad (3.3)$$

charakterizuje kvalitu spojiva pri definovaných rezných podmienkach, a je to vlastne koeficient využitia brúsiva v nástroji.

Pri ideálnom spojive, keď opotrebenie brúsiaceho nástroja je výsledkom opotrebenia brúsiacich zrn a nevzniká ani krehké porušovanie brúsiacich zrn, ani ich vytrhávajúce z kotúča, hodnota n sa blíži v 100%. Prakticky, ako ukazujú skúšky, veľkosť n sa mení v širokých hraniciach. V *tab. 4.1* sú ukazovatele pre vonkajšie brúsenie valcových plôch rôznych ocelí elektrokorundovými kotúčmi s keramickým spojivom [19]. Rezné podmienky sú nasledujúce: $v_k = 35 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $v_o = 2 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, $f = 6,4 \text{ mm}$, $a_p = 0,008 \text{ mm}$ na zdvih.

Ukazovatele pri brúsení do guľata elektrokorundovými kotúčmi

Tab. 4.1

Obrábaný materiál, oceľ	Tepelné spracovanie	Trvanlivosť, min	K_k	$\frac{F_c}{F_p}$	Koeficient reznosti, $\text{mm}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{N}^{-1}$
E360	žíhaná	85	185	0,67	3 037
E360	kalená	45	133	0,3	1 617
C45	kalená	35	83	0,32	1 440
HS 12-1-2	kalená	2,8	4,6	0,36	588
HS 12-1-4-5	kalená	1,2	0,46	0,26	127

Vidno, že koeficient brúsenia K_k sa v závislosti od vlastností brúseného materiálu mení v značnom rozsahu. Pri mikrorezaní žihanej ocele C45 jedným elektrokorundovým zrnom je koeficient brúsenia $K_k = 1976$. Efektívnosť využitia rezných vlastností

elektrokorundových zrn v kotúči s keramickou väzbou je len 10% (10% brusiva brúsi materiál, ostatná časť sa vylamuje, alebo vyštrbuje).

Skúšky kvalitných brúsiacich kotúčov (napr. firmy Norton) ukazujú, že pri brúsení ocelí efektívnosť brúsenia dosahuje 30 %, čo je vysoká hodnota. V tomto prípade jedna tretina objemu brusiva sa adhézno-únavovo opotrebuje. Ostatné dve tretiny zrn zostávajú v kotúči.

Pri skúškach diamantových kotúčov pri brúsení rôznych materiálov sa dokázalo, že nízkou kvalitou spojiva sa málo využívajú rezné vlastnosti diamantových zrn [11]. Napríklad pri brúsení vzoriek z molybdénu diamantovým kotúčom s keramickým spojivom sa využíva asi 9 % rezných vlastností diamantu. Pri brúsení žiarupevnej zliatiny je to 6%, spekaného karbidu 5 %, ocele 2 % a liatiny mene ako 1 %. Z toho vyplýva, že pri vysokej cene diamantu a kubického nitridu bóru má využitie ich rezných vlastností väčší význam ako elektrokorundových a karbidovo-kremíkových brúsiacich materiálov.

Pri rovnakom obrábanom materiáli závisí koeficient brúsenia podstatnou mierou od druhu spojiva. Napríklad pri brúsení rýchloreznej ocele HS6-5-2 diamantovým kotúčom s kovovým spojivom v porovnaní s organickým vzrástol koeficient brúsenia 3-krát, pri brúsení nástrojom z kubického nitridu bóru 6-krát. Na prvý pohľad vidno, že kovové spojivo je efektívnejšie ako organické. Pri porovnaní však musíme brať do úvahy také dôležité parametre procesu brúsenia, ako rezné vlastnosti brúsiaceho nástroja a ich stabilita pri brúsení.

Pracovný povrch brúsiaceho nástroja zo supertvrdých brúsnych materiálov, na rozdiel od elektrokorundu a karbidu kremíka je charakteristický tým, že medzi zrnami nie je dostatok miesta na triesku. Pri brúsení si trieska sama vytvára prehĺbeniny v spojive. Tento proces prebieha efektívne pri brúsení krehkých materiálov, ako spekané karbidy, liatina, keramika a pod.

V mnohých prípadoch funkciu priestoru pre triesku plnia prehĺbeniny na pracovnom povrchu kotúča, ktoré vznikajú v dôsledku vylomenia zrn alebo ich častí. Preto pri brúsení uvedených materiálov je vhodné kovové spojivo.

Pri brúsení plastických materiálov, najmä ocelí, sa odstraňuje spojivo v menšej miere a brúsenie väčšinou sprevádza nalepovanie kovu na pracovný povrch kotúča, čím sa jeho reznosť zhoršuje. Pretože súčasne narastá trenie v zóne kontaktu, vyvíja sa veľké množstvo tepla a kvalita obrobenej plochy sa zhoršuje.

Brúsenie ocelí, titánu a ďalších plastických materiálov kotúčmi zo supertvrdých brúsiv s kovovým spojivom môže byť efektívne pri aplikácii metód na odstraňovanie spojiva z okolia zrn. Patria sem metódy na báze elektroerózie.

Vyššiu efektívnosť pri brúsení ocelí má organické spojivo. Kotúče s týmto spojivom majú vysokú a stabilnú reznosť.

Vývoj nových spojív značne zvýšil reznosť brúsiacich kotúčov pri brúsení liatin. Koeficient brúsenia K_k pri brúsení liatiny diamantovým kotúčom s organickým spojivom (pokovovaný diamant) a kovovým spojivom pri reznej rýchlosti 26 m.s^{-1} bol 16 600 až 48 200. Ak berieme do úvahy, že pri brúsení jedným zrnom je koeficient brúsenia asi 120 000, využitie potencionalnej reznosti diamantu v kotúči s organickým spojivom sa zvýši na 14 % a s kovovým spojivom sa zvýši na 20 %.

Reznosť diamantového nástroja veľmi závisí od fyzikálno-mechanických vlastností obrábanej liatiny. V *tab. 4.2* sú hodnoty koeficienta brúsenia K_k pri rovinnom brúsení diamantovým kotúčom s kovovým spojivom zrnitosti 125/100 s 100 % koncentráciou pri reznej rýchlosti 27 m.s^{-1} [3].

Najhoršie obrábatelná je vysokopevná liatina. Značné problémy vznikajú pri brúsení žiarupevných ocelí a zliatin. Napríklad pri brúsení žiarupevných zliatin elektrokorundovými kotúčmi v závislosti na druhu zliatiny sa hodnoty K_k menia v rozsahu 8-40. Pri mikrorezaní žiarupevnej zliatiny jedným diamantovým zrnom bola veľkosť $K_k = 600 - 650$. Pri užití diamantového kotúča s organickou väzbou bol $K_k = 70 - 80$. Efektívnosť využitia reznosti kotúča bola 12 %.

Koeficienty brúsenia rôznych liatin

Tab. 4.2

Posuv (mm na zdvih)	Sivá liatina HB 1,79 GPa	Vysokopevná HB 2 GPa	Biela HB 2,6 GPa	Kalená HRC 52-55
0,02	4 166	1 428	3 570	1 923
0,05	3 300	566	2 941	1 281

Racionálnou metódou použitia diamantových kotúčov je brúsenie spekaných karbidov. V *tab. 4.3* [6] sú výsledky štúdia vplyvu spojiva na koeficient brúsenia spekaného karbidu P 20, kotúčmi zrnitosti 100/80. Pri brúsení jedným zrnom sa zistil koeficient brúsenia $K_z = 5 000$. Pri použití kovového spojiva je efektívnosť využitia rezných vlastností diamantu vysoká (30 %) a je na úrovni brúsenia ocelí kvalitnými elektrokorundovými kotúčmi s keramickým spojivom. Kotúče s organickým spojivom majú 2-3 krát väčšiu mernú spotrebu diamantu v porovnaní s kotúčmi s kovovým spojivom.

Spojivo	Organické	Kovové
K_k	636	1 764
n (%)	11	30

Analýza hodnôt n , určených rôznymi autormi ukazuje, že vyvinúť spojivo, pri ktorom by bolo n blízke 100 %, prakticky nie je možné. V najlepšom prípade sa brúsiace zrno udrží v kotúči vtedy, ak približne tretina zrna sa zachytí v telese nástroja. Z toho vyplýva, že maximálna hodnota n môže byť 30 %.

Z tohto aspektu je perspektívne použitie kotúčov s diamantmi predĺženého tvaru. V špeciálnych podmienkach syntézy môžu vyrásť diamanty s pomerom dĺžky k priemeru 2:1 až 5:1. Takéto zrná sú uchytené v spojive s časťou objemu 50 %. Dajú sa použiť v kotúčoch s organickým spojivom pri brúsení spekaných karbidov. Pri výrobe kotúčov v magnetickom poli možno diamantové zrná orientovať tak, že ich pozdĺžna os je kolmá k pracovnému povrchu. Efektívnosť využitia reznosti diamantových zrn v takýchto kotúčoch je 40 % a viac. Hodnoty n sú 40-50 %.

V závislosti od kvality spojiva, tvaru brúsiacich zrn a ďalších faktorov môže sa efektívnosť využitia potencionálnych rezných vlastností brúsiacich zrn meniť v širokom rozsahu od 1 do 50 %.

4.3 Požiadavky na spojivo brúsiacich kotúčov

Na základe štúdia vlastností brúsiacich kotúčov možno formulovať základné požiadavky na spojivo, ktoré významnou mierou ovplyvňuje pracovné charakteristiky kotúča.

Pevnosť brúsiaceho kotúča

Pri brúsení vznikajú v spojive brúsiaceho nástroja napätia od rezných a odstredivých síl. Vplyvom odstredivých síl v spojive vznikajú ťahové napätia. Experimentálne merania rezných síl ukázali, že radiálna sila môže v závislosti od rezných podmienok dosahovať hodnoty od 5 N pri dokončovaní do 500 až 1 000 N pri ťažkých podmienkach. Výnimkou je silové brúsenie, pri ktorom je radiálna sila až 5 000 N.

Ak poznáme plochu kontaktu nástroja a obrobku, ľahko zistíme veľkosť napätí na pracovnom povrchu brúsiaceho kotúča. Elementárne výpočty ukazujú, že tieto napätia väčšinou nemôžu spôsobiť vylomenie nástroja.

Iná situácia je pri napätiach, ktoré vznikajú vplyvom odstredivých síl. Ako ukazuje výpočet, napätia dosahujú značné hodnoty a môžu roztrhnúť brúsiaci kotúč. Napríklad pri reznej rýchlosti $35 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ dosahujú 2,5 MPa a pri rýchlosti $125 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ prevyšujú 30 MPa.

Nástroje s keramickým spojivom majú v závislosti od tvrdosti a zrnitosti brúsiacich zrn pevnosť v ťahu 6,9 až 16,2 MPa. Bakelitové spojivo je o niečo pevnejšie (7,8 až 29,4 MPa). Najvyššiu pevnosť majú kotúče s kovovým spojivom. Ak berieme do úvahy, že pevnosť v tlaku kotúčov s keramickým spojivom je 6 až 8-krát a s bakelitovým spojivom 3,5-krát väčšia ako v ťahu, z toho vyplýva, že vysoká pevnosť spojiva sa vyžaduje najmä z hľadiska prevencie roztrhnutia kotúča vplyvom odstredivých síl.

Je známe, že zvyšovanie reznej rýchlosti pri brúsení je jedným z dôležitých faktorov zvyšovania produktivity brúsenia. Zvyšovať rezné rýchlosti možno len pri dostatočnej pevnosti kotúča v ťahu. Možno to dosiahnuť špeciálnymi spojivami, armovaním brúsiacich kotúčov sklenenými vláknami a oceľovými krúžkami, používaním vrstvených kotúčov, kotúčov bez stredového otvoru a pod. Tým možno zvýšiť reznú rýchlosť na $100 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Pevnosť väzby brúsiacich zrn so spojivom

V súvislosti s vlastnosťami spojiva a a materiálu brúsiacich zrn, môžu sa zrná v kotúči udržiavať

- vytvorením chemickej väzby medzi materiálom spojiva a zrna
- silami adhézie
- mechanickým zaklivením zrn v spojive.

Súčasne môžu vznikajú aj kombinované metódy fixácie zrn v kotúči (napr. adhéziou a zaklivením zrna). Ako ukazujú skúsenosti, najvyššia pevnosť sa dosahuje pri chemickom spojení materiálu spojiva a brúsiva. Takýto typ spojenia je pri korundových kotúčoch s keramickým spojivom.

Podľa skúšok možno konštatovať, že v oblasti kontaktu s korundovým zrnom tvorí keramické spojivo v procese žihania tzv. reaktívnu zónu. Výsledkom interakcie spojiva s korundom je jeho povrchové rozpúšťanie a obohacovanie spojiva oxidom hlinitým.

Na *obr. 4.1* je mikrofotografie zóny kontaktu keramického spojiva s korundovým zrnom. Hranicu oboch materiálov možno ťažko rozlíšiť. Pretože mechanické charakteristiky

korundových zrn a keramického spojiva sa málo odlišujú, pevnosť brúsiaceho nástroja v rôznych miestach je rovnaká a dostatočne vysoká.



Obr. 4.1 Mikrofotografia zóny kontaktu keramického spojiva a elektrokoruddového zrna

Iný typ interakcie je pri organickom spojive. V tomto prípade sa brúsiace zrná udržujú vplyvom adhézných síl, čiže v dôsledku štiepenia medzi bakelitom a zrnom. Na obr. 4.2 je mikrofotografia zóny kontaktu medzi korundovým zrnom a bakelitovým spojivom. Na rozdiel od keramického spojiva, bakelitové spojivo kontaktuje so zrnom nie na celom povrchu, ale na samostatných úsekoch.



Obr. 4.2 Mikrofotografia zóny kontaktu medzi korundovým zrnom a bakelitovým spojivom

Sila udržovania zŕn v spojive závisí od adhézných vlastností spojiva, tvare a topografii povrchu zŕn. Ak povrch zrna je hladký, pevnosť fixácie zrna v spojive bude malá aj pri dobrých adhézných vlastnostiach spojiva. Preto pri fixácii zŕn adhéznymi silami musia byť zrná drsné s veľkou povrchovou plochou.

Syntetické diamanty bežnej pevnosti majú dobre vyvinutý povrch, preto bakelitové spojivo dáva dobré výsledky. Prírodný diamant charakterizuje hladký povrch a bakelitové spojivo je v týchto prípadoch málo efektívne.

V ostatnom období na zvýšenie efektívnosti využitia syntetického diamantu a kubického nitridu bóru pokrývajú zrná rôznymi kovmi a ich zlúčeninami. Pri nanosení týchto vrstiev sa súčasne riešia dve úlohy:

- zvyšovanie pevnosti zrna (vytvorením kovového povlaku)
- vytvorenie spájacej vrstvy medzi zrnom a spojivom.

Kovový povlak tvorí pevnú väzbu so zrnom, najmä v dôsledku chemickej reakcie a adhéznej väzby. Výber efektívneho materiálu spojiva sa zjednodušuje, pretože variovaním materiálu spojiva a povlaku možno vytvoriť pevnú adhéznú väzbu.

Príkladom tretieho typu väzby, mechanického spojenia zŕn v spojive je kovová väzba. Používa sa najmä pri výrobe diamantových kotúčov. Často je spojivom kov na báze medi s olovom alebo iné kovy, v ktorých sú uchytené diamantové zrná. Väčšinou sa zrná v kovovom spojive udržujú adhézne.

Z analýzy praktického používania kotúčov na báze rôznych spojív vyplýva, že najviac sú zdokonalené brúsiace nástroje, v ktorých sa chemicky spája materiál spojiva a zrna.

Adhézna väzba spojiva s obrábaným materiálom

Na pracovnom povrchu brúsiaceho nástroja sú výstupky spojiva, ktoré kontaktujú s obrábanou plochou. Podiel týchto prípadov je pri korundových a karbidovo-kremíkových kotúčoch s keramickým a organickým spojivom 10-30 % a pri diamantových kotúčoch prevyšuje 50 %.

Pri takýchto podmienkach môže sklon spojiva k adhéznemu súchytu viesť k intenzívnemu opotrebeniu kotúča hĺbkovým vytrhávaním brúsiacich zŕn. Tento druh opotrebenia je častý pri kotúčoch s kovovým spojivom.

Mechanizmus tohto opotrebenia je nasledujúci. Adhézia medzi kovovým spojivom a obrábaným materiálom má vysokú intenzitu a tým sa adhézne spája a „rozmazáva“ obrábaný materiál po povrchu kotúča. Šmykové napätia, ktoré vznikajú v kontakte,

vytrhávajú bloky zrn a spojiva z pracovného povrchu kotúča. Väčšinou súchyt sprevádzajú vibrácie, čo ďalej zintenzívňuje porušovanie pracovného povrchu nástroja.

Analogické javy, aj keď v menšej miere, vznikajú pri brúsení kotúčmi s organickým spojivom. Organické spojivo má sklon k adhézii nielen s brúsiacimi zrnami, ale aj s kovom brúseného povrchu. Vplyvom toho sa môžu pri brúsení hĺbkovo vytrhávať bloky zrn z pracovného povrchu kotúča.

Na rozdiel od kovových a organických spojív má keramické spojivo k väčšine obrábaných materiálov malú adhéziu. Preto pri používaní keramického spojiva sa brúsiace zrná hĺbkovo vytrhávajú v menšej miere.

Opotrebenie kotúčov, spôsobené adhéznym spojením medzi spojivom a brúsivom môže prebiehať s rozličnou intenzitou a závisí najmä od sklonu materiálu brúsiva k adhézii s obrábaným materiálom a od rezných podmienok.

Adhézne opotrebenie brúsiaceho nástroja možno zmenšiť použitím spojív s minimálnym sklonom k adhézii s obrábaným materiálom. Túto podmienku treba dodržať aj preto, že sklon materiálu spojiva k adhézii s obrábaným materiálom je jednou zo základných príčin intenzívneho vývoja tepla v zóne kontaktu a znižovaním kvality obrobenej plochy.

Adhézny súchyt medzi spojivom a obrábaným materiálom nie je žiaduci a z iného dôvodu. Trieska sa pri adhéznom súchyte zväzuje so spojivom a pri vychádzaní z kontaktu trieska zostáva v póroch kotúča.

Bloky triesok vlišaných v póroch bránia prenikaniu brúsiacich zrn do obrobku a nástroj stráca reznosť.

Tepelná trvanlivosť spojiva

Je známe, že pri brúsení sa v zóne kontaktu vyvíja veľké množstvo tepla. V závislosti od tepelno-fyzikálnych vlastností brúsiaceho nástroja a obrábaného materiálu sa určitá časť tepla šíri do kotúča a ďalšia do obrábaného materiálu. Teplom sa ohrievajú povrchové vrstvy brúsiaceho kotúča. Pri ohreve spojiva ich mechanická pevnosť a sila, ktorou sú brúsiace zrná udržiavané v kotúči, klesajú.

Najmenšiu odolnosť proti vysokým teplotám má bakelitové spojivo a polymér. Pri teplote 400-450 K klesne pevnosť spojív natoľko, že brúsiace zrná alebo menšie bloky zrn sa uvoľňujú z pracovného povrchu kotúča. Tepelná stálosť keramického spojiva na rozdiel od organického je oveľa vyššia. Mechanická pevnosť keramického spojiva sa znižuje pri ohreve nad 1 050 K, pritom pevnosť väzby brúsiacich zrn so spojivom sa neznižuje. V súlade s tým musí spojivo odolávať tepelným rázom, ktoré spôsobuje striedanie ohrevu a ochladzovania

pracovného povrchu brúsiaceho kotúča. Pri malej tepelnej vodivosti vznikajú v brúsiacom nástroji teplotné napätia, čo vedie ku vzniku trhlín na povrchu kotúča.

Pri brúsení sa dosahuje vysoká teplota, ktorá môže roztaviť kovové spojivo. Pri použití krehkých spojív, napr. keramického, teplota trenia spojiva je nižšia ako teplota jeho tavenia. Možno to vysvetliť tým, že pri trení keramického spojiva vzniká jeho krehký lom, a tým sa spotrebúva malé množstvo energie.

Odolnosť voči vlhkosti a chemická stálosť

Pri brúsení sa často aplikujú rezné kvapaliny, ktoré obsahujú lúhy a rôzne aktívne prísady. Existuje nevyhnutná podmienka, zabezpečiť spojivá odolné voči vode a chemikáliám. Podmienke nevyhovujú všetky súčasné spojivá. Napríklad organické spojivá sú málo odolné proti pôsobeniu rezných kvapalín najmä preto, že obsahujú lúhy. Ak rezná kvapalina má viac ako 1,5 % vody, mechanická pevnosť organického spojiva výrazne klesá.

Spojivo ako inhibítor adhézných a difúzných javov v kontakte

Pri brúsení sa do kontaktu s obrábaným materiálom dostávajú nielen brúsiace zrná, ale aj spojivo. Ak spojivo obsahuje také prvky, ktoré znižujú adhéziu v kontaktnej vrstve alebo znižujú intenzitu difúznej reakcie, vtedy sa odolnosť proti opotrebeniu zvyšuje a kvalita povrchu stúpa. Veľa výrobcov dáva do spojiva síru, ktorá znižuje trenie v kontakte. Rovnakú úlohu majú prímеси grafitu hexagonálneho nitridu bóru a pod.

Úlohu inhibítora difúzneho opotrebenia môžu mať spojivá, ktoré sú chemicky príbuzné s obrábaným materiálom, napr. ak spojivo obsahuje grafit a pri brúsení vzniká difúziu grafitu do ocele. Pretože tým klesá gradient uhlíka medzi diamantom a obrábaným materiálom, klesá aj intenzita difúzneho opotrebenia diamantu. Zloženie spojiva preto výrazne vplýva na podmienky trenia a opotrebenia materiálu brúsiacich zrn.

4.4 Veľkosť vrstvy odobratej pri ostrení nástroja

Pri ostrení brúsiaceho kotúča sa spotrebúva až 80 % opotrebeného povrchu nástroja, preto určenie optimálnej hrúbky odrezanej vrstvy kotúča pri ostrení môže v niektorých prípadoch významne znížiť spotrebu brúsiaceho materiálu. V prevádzkových podmienkach je veľkosť tejto odobratej vrstvy podmienená kvalifikáciou brúsiča. Obyčajne sa hrúbka odoberanej

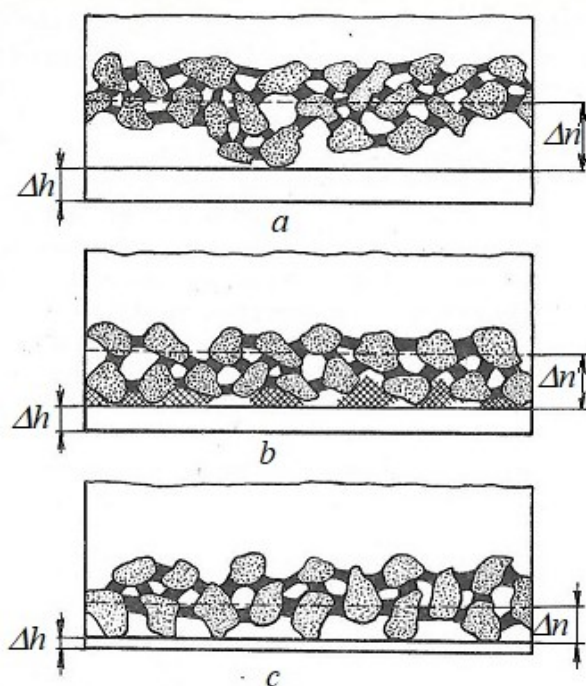
vrstvy pri ostrení kotúča zvolí väčšia, ako je potrebná z hľadiska obnovy reznej schopnosti brúsiaceho kotúča.

Veľkosť vrstvy brúsiva odobratého pri ostrení závisí najmä na charaktere opotrebenia pracovného reliéfu brúsiaceho kotúča. Pri brúsení sa dvojako modifikuje pracovný reliéf kotúča. Pri jemnom brúsení sa opotrebovávajú rezné hrany brúsiacich zrn, pričom mikronevnosťi pracovného povrchu kotúča, vytvárané pri ostrení sa v podstate nemenia.

Pri hrubovacom brúsení sa otupujú brúsiace zrná a zaplňajú sa póry trieskou, čím sa výrazne mení mikrogeometria povrchu kotúča. V niektorých prípadoch pri náročných podmienkach brúsenia (napr. pri hrubovaní zalomeného hriadeľa) môže opotrebenie kotúča dosiahnuť 12-15 μm .

V závislosti od podmienok brúsenia je nevyhnutné porovnať brúsiaci kotúč, ktorý má opotrebené rezné hrany a póry kotúča zaplnené trieskou.

Na obr. 4.3 je závislosť objemu brúsiva, odobratého pri ostrení od charakteru zmeny reliéfu pracovného povrchu kotúča po opotrebení.



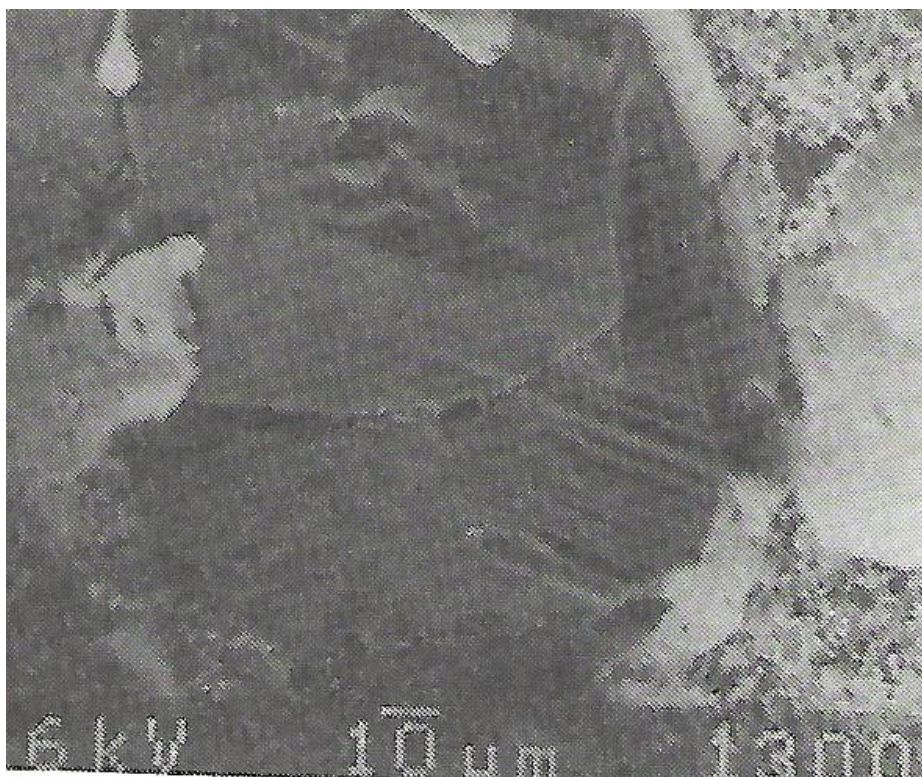
Obr. 4.3 Závislosť veľkosti prídavku na ostrenie kotúča od charakteru pôvodného reliéfu

Prípád *a* odpovedá podmienkam ťažkého brúsenia. Veľkosť odobratej vrstvy pri ostrení podmieňuje obnovu geometrie pracovného povrchu kotúča. Určenie optimálnej hrúbky abrazívnej vrstvy odoberanej pri ostrení vychádza z prevládajúceho mechanizmu opotrebenia.

Na *obr. 4.3 b* je prípad, keď stratu reznosti kotúča zapríčiní zaplňovanie pórov kotúča trieskou. Veľkosť vrstvy brúsiva odobratého pri ostrení závisí od hĺbky preniknutia triesky do pracovného povrchu kotúča. Hĺbku preniknutia možno určiť experimentálne, napr. vyhotovením mikrovýbrusov v reze pracovného povrchu kotúča. Z toho vyplýva, že na obnovu reznosti brúsiaceho kotúča treba odstrániť vrstvu brúsiva, ktorej hrúbka je o niečo väčšia ako je hĺbka preniknutia triesok do kotúča.

V prípade *c*, keď reznosť kotúča sa stratí len opotrebením rezných hrán brúsiacich zrn, veľkosť vrstvy brúsiva, odrezaného pri orovnávaní je minimálna a neprevyšuje výšku jednej vrstvy zrn. Zväčšovaním úberu brúsiva sa trvanlivosť kotúča nezvyšuje.

Interakciu brúsiacich zrn a spojiva možno pozorovať riadkovacím mikroskopom. Ako príklad je na *obr. 4.4* je pohľad na brúsiace zrno z karbidu kremíka, fixované v spojive. Vidno čiastočný lom zrna a od reznej hrany stopy po abrazívnom opotrebení zrna. Rovnobežné rýhy sú orientované v smere vektora reznej rýchlosti. Veľkosť abrazívneho opotrebenia svedčí o tom, že zrno je pevne fixované v spojive, pričom sily trenia nestačia na vytrhnutie zrna zo spojiva. Je to typický prípad na spôsob ostrenia podľa *obr. 4.3c*.



Obr. 4.4 Opotrebené brúsiace zrno z SiC, upevnené v keramickom spojive

Vysoká reznosť materiálu brúsnych zŕn ešte nezaručuje efektívnosť využitia brúsiaceho nástroja. Dôležitú úlohu má aj kvalita spojiva. Pri nesprávnej voľbe spojiva, alebo jeho nízkej kvalite môže byť výsledok úsilia o zlepšovanie reznosti brúsiacich zŕn negatívny. V tejto súvislosti je rozpracovanie metód na hodnotenie kvality spojiva veľmi aktuálne.

V závislosti na kvalite spojiva, rezných podmienkach a ďalších faktorov môže sa efektívnosť využitia rezných schopností brúsiaceho nástroja meniť v širokom rozsahu. Teoretické štúdiá ukazujú, že zrno bude pevne upevnené v kotúči vtedy, ak aspoň jedna tretina jeho objemu bude fixovaná v spojive, čiže maximálna hodnota efektívnosti využitia brúsiaceho materiálu dosiahne 30 %. Menšie hodnoty tohto koeficientu svedčia o potrebe vývoja dokonalejších spojív, ktoré umožnia zabezpečiť pevné uchytienie zrna na pracovnom povrchu nástroja, budú mať malý sklon k adhézii s obrábaným materiálom, budú inhibítormi adhézných a difúzných javov v kontakte.

5 PRÍKLADY RACIONALIZÁCIE BRÚSIACEHO PROCESU

Pri aplikácii vyššie uvedených poznatkov možno vyvodzovať závery, zaujímavé pre strojársku prax. Uvedieme niektoré prípady.

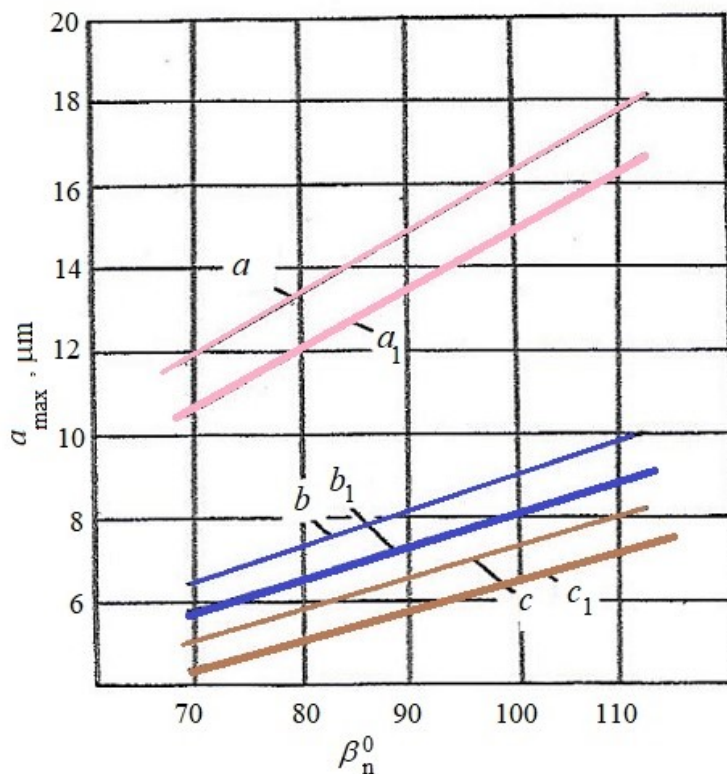
5.1 Brúsenie spekaných karbidov

Efektívnosť používania spekaných karbidov na rezné nástroje závisí na kvalite ich povrchu, ktorý sa vytvára brúsením a lapovaním. Zvýšenie pevnosti a odolnosti proti opotrebeniu reznej časti nástroja podmieňuje výber racionálnych metód a podmienok brúsenia.

V súčasnosti sa na brúsenie a ostrenie spekaných karbidov používajú prevažne diamantové brúsiace nástroje. Ich použitie sa zdôvodňuje vysokou pevnosťou a odolnosťou proti opotrebeniu diamantových zŕn. Ako bolo uvedené, spomedzi brúsiacich materiálov má pri brúsení spekaného karbidu najvyššiu plastickú pevnosť práve diamant. Treba poznamenať, že diamantovými brúsiacimi kotúčmi sa brúsia a ostria nástroje zo spekaných karbidov, určené na priame obrábanie, alebo pripravované na rektifikáciu a aplikáciu oteruvzdorných povlakov. V oboch prípadoch sú požiadavky na finálnu kvalitu brúsených povrchov o niečo rozdielne.

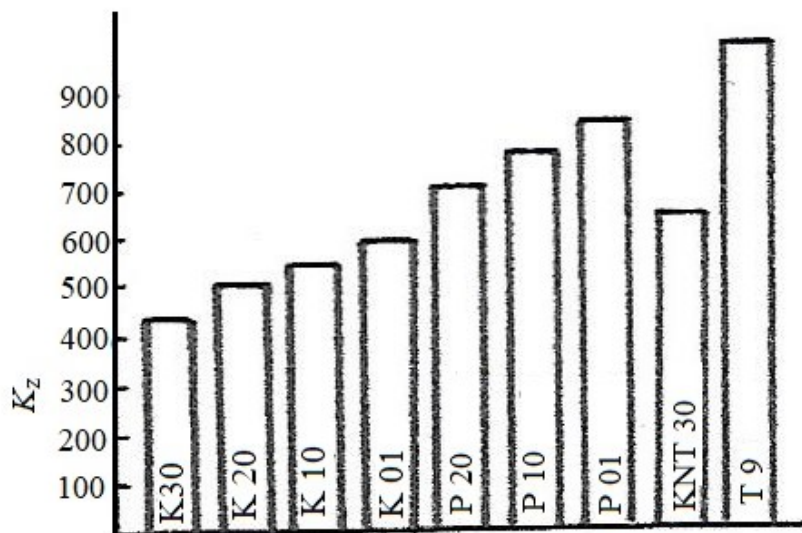
Na *obr. 5.1* je experimentálna závislosť hraničných hrúbok odrezávanej vrstvy od uhla rezného klina pri brúsení spekaných karbidov rôznymi brúsiacimi materiálmi.

Pri brúsení spekaných karbidov P 20 a K 10 prírodným diamantom sú hodnoty hraničných hrúbok značne vyššie ako pri brúsení kubickým nitridom bóru a karbidom kremíka.



Obr. 5.1 Závislosť hraničných hrúbok odrezávanej vrstvy od uhla rezného klina. a a a_1 – pre diamant pri mikrorezaní spekaných karbidov P10 a K20, b a b_1 – pre kubický nitrid bóru pri mikrorezaní spekaných karbidov P20 a K10, c a c_1 – pre karbid kremíka pri mikrorezaní spekaných karbidov P10 a K20.

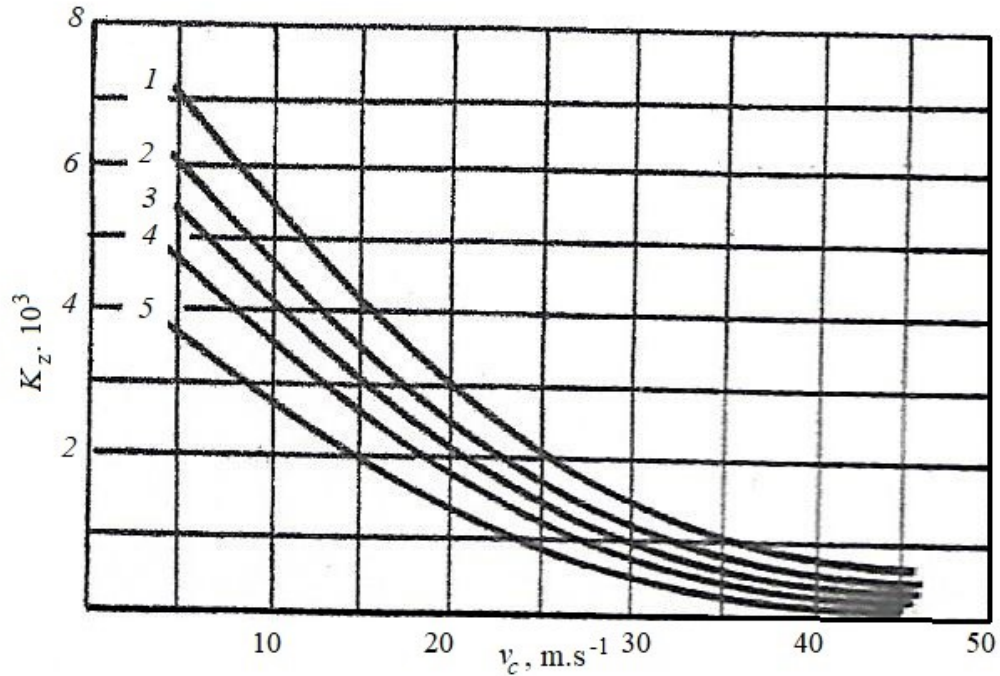
Jedným z ukazovateľov, ktoré charakterizujú odolnosť brúsiacich materiálov proti opotrebeniu je koeficient brúsenia. Na obr. 5.2 sú hodnoty koeficientov brúsenia pri mikrorezaní spekaných karbidov reznou rýchlosťou $35 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ s hrúbkou odrezávanej vrstvy $5 \mu\text{m}$.



Obr.5.2 Koeficienty brúsenia pri mikrorezaní spekaných karbidov rozličných druhov jedným zrnom reznou rýchlosťou 35 m.s^{-1}

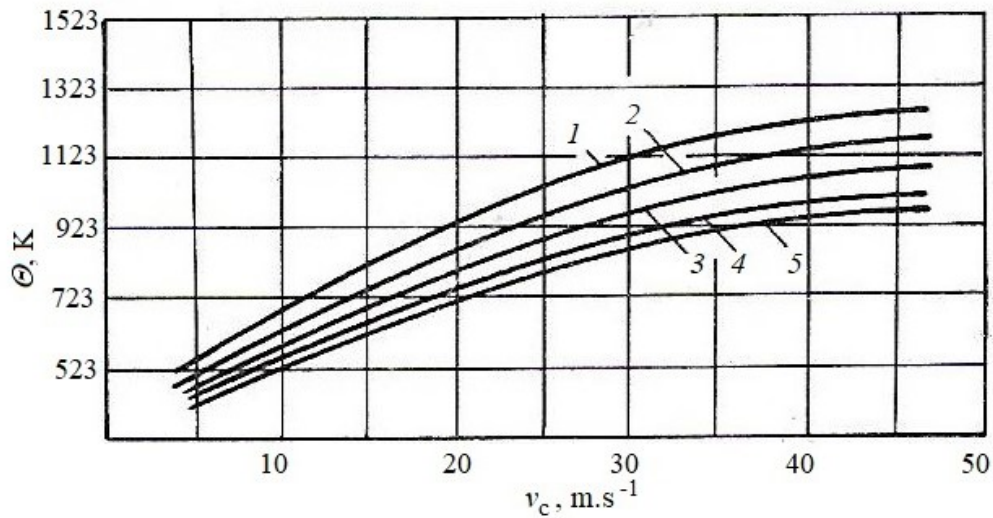
Vidno, že koeficient brúsenia pri jedno a dvojkarbidových spekaných karbidoch závisí od percentuálneho obsahu karbidov a kobaltu. So vzrastom obsahu kobaltu koeficient brúsenia klesá, pričom pri jednokarbidových spekaných karbidoch je o niečo nižší ako dvojkarbidových. Koeficient brúsenia pri bezvoframovom spekanom karbide má strednú hodnotu.

Hlbšie štúdium ukazuje, že hodnoty koeficientov brúsenia závisia od reznej rýchlosti (obr. 5.3). Ak pri mikrorezaní spekaných karbidov reznou rýchlosťou 40 m.s^{-1} neprevyšuje koeficient brúsenia hodnotu 1 000, pri reznej rýchlosti 5 m.s^{-1} vzrastá na 6 000. Tak výrazná zmena koeficienta brúsenia s reznou rýchlosťou sa spája s kontaktnými javmi a najmä s hodnotou strednej integrálnej teploty v kontakte.



Obr. 5.3 Závislosť koeficienta brúsenia od reznej rýchlosti pre rezné materiály 1 – P X01, 2 – P 10, 3 – KNT 30, 4 – K 10, 5 – K 30

Na obr. 5.4 je závislosť zmeny strednej integrálnej teploty od reznej rýchlosti pri brúsení. Pri skúškach sa udržiavala konštantná ekvivalentná hrúbka odrezávanej vrstvy tak, že sa zachoval konštantný pomer rýchlosti rotácie kotúča k posuvu obrobku a hĺbky rezu.



Obr. 5.4 Závislosť strednej integrálnej teploty od reznej rýchlosti pri brúsení diamantovým kotúčom ASR 425/100 K 100 % spekaných karbidov: 1 – KNT 30, 2 – P 10, 3 – P 01, 4 – K 10, 5 – K 01

Experimentálne skúšky ukázali, že so zvyšovaním obvodovej rýchlosti brúsneho kotúča na $v_c = 20-25 \text{ m.s}^{-1}$ stredná integrálna teplota v kontakte prudko narastá. Pri ďalšom zvyšovaní reznej rýchlosti intenzita narastania teploty sa znižuje a pri rýchlosti $45-50 \text{ m.s}^{-1}$ dosahuje maximum.

Výpočet teplotných polí pri brúsení spekaných karbidov K 10 a P 20 ukazuje, že pri brúsení K 20 reznou rýchlosťou 10 m.s^{-1} sa ohrev na teplotu 373 K dosahuje do hĺbky $550 \mu\text{m}$, pri reznej rýchlosti 40 m.s^{-1} do hĺbky $420 \mu\text{m}$. Pri spekanom karbide P 10 je hĺbka ohrevu 430 a $290 \mu\text{m}$.

Experimentálne skúšky ukázali, že so zvyšovaním reznej rýchlosti na $20-25 \text{ m.s}^{-1}$ stredná integrálna teplota v kontakte prudko rastie. Pri ďalšom zvyšovaní reznej rýchlosti intenzita narastania teploty sa znižuje a pri rýchlosti $45-50 \text{ m.s}^{-1}$ dosahuje maximum.

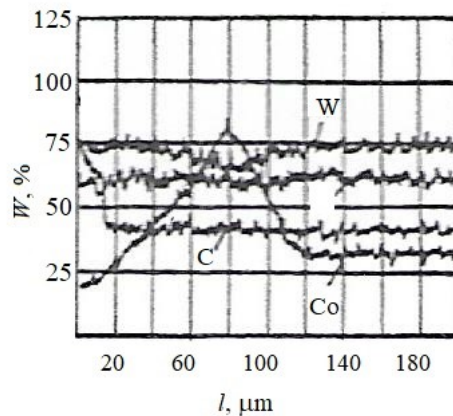
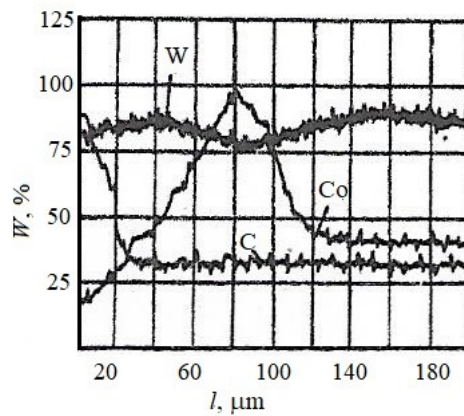
Pokles hĺbky prenikania tepla so zvyšovaním reznej rýchlosti možno vysvetliť tým, že na zabezpečenie konštantnej ekvivalentnej hrúbky odrezávanej vrstvy treba zväčšiť rýchlosť pohybu súčiastky v_f . V tomto prípade množstvo tepelných impulzov, ktoré pôsobia v sledovanom priereze súčiastky sa nemení, ale klesá sumárny čas pôsobenia.

Tento príklad ukazuje, že so zvyšovaním reznej rýchlosti pri konštantnej ekvivalentnej hrúbke odrezávanej vrstvy sa znižuje hĺbka prieniku tepla do obrobku, hoci potom teplotný gradient narastá.

Na stredne integrálnu kontaktnú teplotu výrazne vplyva materiál spojiva. Maximálny vývoj tepla vzniká pri brúsení diamantovým kotúčom s kovovým spojivom, menší pri keramických kotúčoch a minimálny pri organickom spojive.

Pri štúdiu adhéznej interakcie sa dokázalo, že intenzita adhézie diamantu s dvojkarbidovým spekaným karbidom je vyššia ako s jednodobým. Možno to vysvetliť skutočnosťou, že v dvojzložkových spekaných karbidoch je titán, ktorý má veľký sklon k adhéznemu súchytu. Vyššia intenzita súchytu diamantu s dvojkarbidovými spekanými karbidmi ukazuje, že adhézne-únarové opotrebenie diamantového nástroja v interakcii s dvojkarbidovým spekaným karbidom je väčšie.

Štúdium difúzných vrstiev, ktoré vznikli difúznou interakciou tuhých fáz sa realizovalo röntgenovo-spektrálnou analýzou difúzných zón spekaných karbidov K 20 a 10. Z kriviek na obr. 5.5 vyplýva že na hranici kontaktu spekaného karbidu s diamantom sa percentuálny obsah titánu a volfrámu prakticky nemení a je na rovnakej úrovni ako pri východiskovej štruktúre spekaného karbidu. Obsah uhlíka je na hranici kontaktu maximálny, potom klesá a v určitej hĺbke sa rovná obsahu uhlíka v oceli. Pritom hĺbka difúzie uhlíka pri rovnakých podmienkach je vyššia pri spekanom karbide K 20.



Obr. 5.5 Zmena koncentrácie C, Co, w a Ti v závislosti na vzdialenosti od povrchu kontaktu pri difúznej interakcii diamantu pri teplote 1 600 K a čase 360 s.
a – K 20, b – P 10

Krivka, ktorá charakterizuje percentuálny obsah kobaltu, ukazuje, že v hĺbke 50-100 μm od hranice kontaktu sa obsah kobaltu prudko zvyšuje. Takýto charakter zmeny koncentrácie kobaltu sa nedá vysvetliť teplotným faktorom. Röntgenová štruktúrna mikroanalýza zóny kontaktu po skontaktovaní pri izbovej teplote ukázala rovnaké rozdelenie kobaltu, ale kobalt prenikol do menšej hĺbky. To nasvedčuje skutočnosti, že premiestnenie kobaltu do spekaného karbidu vzniklo vplyvom plastického vtlačenia.

Zo stavových diagramov C – W a C – Ti vyplýva že v systéme C – W sa tvoria jeden alebo dva nestabilné karbidy (W_2C_2 , alebo W_2C_3) a v systéme C – Ti karbidy TiC_2 sa netvoria, čiže uhlík sa nerozpúšťa v tuhom stave.

Ak ide o diagram C – Co treba poznamenať, že tuhý roztok uhlíka tvorí eutektikum s kobaltom, pričom eutektická teplota je 1 954 K. Analýzou tejto skutočnosti možno predpokladať, že pri difúznom rozpúšťaní je v jednodobových spekaných karbidoch obsiahnutý v eutektiku s kobaltom a v nestabilných zložitých karbidoch. V dvojkarbidoch spekaných karbidoch sa môže nachádzať iba v eutektiku s kobaltom. Táto skutočnosť je

základnou príčinou toho, že koeficient difúzie uhlíka diamantu je v jednodokarbidových spekaných karbidoch vyšší ako v dvojkarbidových.

V *tab. 5.1* sú hodnoty koeficientov difúzie uhlíka do spekaných karbidov, určené z výsledkov štúdia difúznej interakcie tuhých fáz. Z *tab. 4.1* vyplýva, že koeficient difúzie sa znižuje so znižovaním obsahu kobaltu v spekanom karbide. V rovnakej postupnosti musí klesať podiel opotrebenia, spôsobený difúznym rozpúšťaním uhlíka diamantu v obrábanom spekanom karbide.

Koeficient difúzie uhlíka do spekaných karbidov

Tab.5.1

Teplota, K	K 30	K 20	K 01	P 30	P 10	P 01
1 300	1,22	0,92	0,44	0,66	0,44	0,27
1 400	3,93	2,79	1,56	2,14	1,57	0,88
1 500	15,81	14,49	8,36	8,36	5,52	3,94
1 600	66,93	40,84	28,82	21,18	16,73	9,41
1 700	220,9	173,9	117,96	83,66	64,05	26,47

Ukazuje sa, že pri brúsení jednodokarbidových spekaných karbidov diamantovým kotúčom prevláda difúzne opotrebenie. Na diamantových zrnách sa v krátkom čase objavia lesklé plošky, ktoré sú typickým prejavom difúzie. Okrem toho sa objavujú stopy brúsiaceho opotrebenia, najmä v blízkosti reznej hrany. So znižovaním obsahu kobaltu klesá intenzita difúzneho rozpúšťania uhlíka diamantu, a tým sa zvyšuje odolnosť diamantového nástroja proti opotrebeniu a zväčšuje sa koeficient brúsenia.

Pri brúsení dvojkarbidových spekaných karbidov prebieha súčasne niekoľko mechanizmov opotrebenia (adhézne-únavové, abrazívne a difúzne). Možno to vysvetliť skutočnosťou, že intenzita adhéznej interakcie diamantu s dvojkarbidovými spekanými karbidmi je asi o 150 % vyššia ako s jednodokarbidovými. Súčasne intenzita adhéznej interakcie stúpa so znižovaním obsahu kobaltu. V rovnakej postupnosti rastie odolnosť diamantového brúsiaceho nástroja proti opotrebeniu pri brúsení spekaných karbidov.

Dôležitá je metodológia výberu optimálnych podmienok brúsenia a ostrenia spekaných karbidov na dosiahnutie danej kvality povrchu a geometrického tvaru obrobku.

V súvislosti s rozvojom automatizácie výroby a širšou aplikáciou vymeniteľných rezných platničiek vzrástli požiadavky na presnosť ich výroby. Zúžila sa tolerancia nielen hrúbky platničky, ale aj polohy rezných hrán proti osi otáčania. Pretože sa zdokonalili metódy

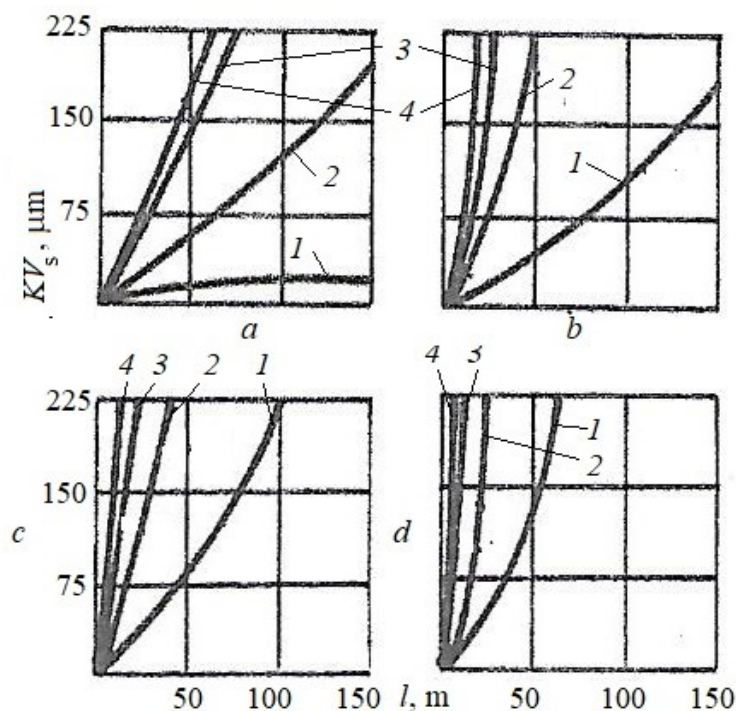
výroby vymeniteľných platničiek, výraznejšie sa znižujú operačné prídavky na brúsenie a lapovanie platničiek. Pri odoberaní veľkých prídavkov efektívne je použiť diamantový kotúč s kovovým spojivom, ktorý pracuje pri vysokých rezných rýchlostiach (30-45 m.s⁻¹). Možno to zdôvodniť skutočnosťou, že pri použití kotúčov s kovovým spojivom a vysokých rezných rýchlostiach trenia vzniká intenzívny samo ohrev odrezávanej vrstvy, a tým sa znižuje pevnosť spekaného karbidu. Súčasne pri kovovom spojive pevnosť spekaného karbidu. Súčasne pri kovovom spojive sa dvojnásobne využívajú potenciálne rezné vlastnosti diamantu proti kotúču s organickým spojivom. Na druhej strane intenzívnym ohrevom a značnými reznými silami sa zhoršuje kvalita brúseného povrchu a vznikajú nepriaznivé zvyškové napätia. Znižuje sa tým pevnosť a odolnosť spekaných karbidov proti opotrebeniu. Tento spôsob brúsenia možno použiť iba pri hrubovaní.

Diamantové kotúče s organickým spojivom sú charakteristické dobrými reznými vlastnosťami a teplota rezania je o niečo nižšia. Okrem toho majú stabilnejšie rezné vlastnosti. Kotúče s organickým spojivom možno odporučiť pre dokončovacie brúsenie spekaných karbidov napriek tomu, že rezné schopnosti brúsiacich zŕn sa naplno nevyužívajú.

Náklady na brúsenie nástrojmi zo spekaného karbidu v značnej miere závisia od spotreby brúsiaceho materiálu, pretože diamantový nástroj je pomerne drahý. Znižovať spotrebu diamantového nástroja je preto veľmi aktuálne.

5.2 Brúsenie titánových zliatin

Titánové zliatiny zaradzujeme k ťažko obrábatelným materiálom, pretože majú nízku tepelnú vodivosť a vysokú chemickú a adhéznú aktivitu k nástrojovým materiálom [19]. Skúmala sa odolnosť proti opotrebeniu prírodného diamantu, spekaného kubického nitridu bóru, karbidu kremíka a elektrokorundu pri brúsení titánovej zliatiny VT 1/1. Kritériom hodnotenia bola prejdená dráha do dosiahnutia zadanej hodnoty radiálneho opotrebenia. Výsledky skúšok sú na *obr. 5.6*, kde je znázornená závislosť prejdenej dráhy od radiálneho opotrebenia pre rôzne brúsiace materiály a štyri charakteristické rezné rýchlosti. Pri malej reznej rýchlosti 1,46 m.s⁻¹ prejdená dráha elektrokorundového zrna do opotrebenia 150 μm je až 40 m. Karbid kremíka prešiel dráhu 50 m a kubický nitrid bóru 90 m. Diamant má mimoriadne vysokú odolnosť proti opotrebeniu.



Obr. 5.6 Závislosť prejdenej dráhy od radiálneho opotrebenia pri brúsení titánovej zliatiny VT 1-1 rôznymi brúsiacimi materiálmi pri štyroch charakteristických rezných rýchlostiach: od najmenej (a) po najväčšiu (d), 1- diamant, 2 – KNB, 3 – SiC, 4 – korund, a – $1,46 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, b – $5,65 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, c – $11,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, d – $22,6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

So zväčšovaním reznej rýchlosti sa prejdená dráha úmerne znižuje. Najlepšie výsledky sa dosahujú brúsením diamantom. Napríklad pri reznej rýchlosti $5,65 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ dráha diamantu proti elektrokorundu je vyššia 12-krát, pri reznej rýchlosti $11,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 14 krát a pri reznej rýchlosti $22,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ až 18-krát.

Prevládajúcim typom opotrebenia je pri všetkých brúsiacich materiáloch pri brúsení titánu adhézne-únavové opotrebenie. Pri elektrokorunde a spekanom karbide kremíka vzniká aj difúzne opotrebenie s pomerne malou intenzitou.

Na rozdiel od iných obrábaných materiálov, pri brúsení zliatin titánu medzi obrábanými a reznými materiálmi v dôsledku chemickej príbuznosti vzniká silná adhézna väzba. Zakrátko sa v podstate celá chrbtová plocha zna pokryje plošným adhéznym nálepom. Na určenie frekvencie vnikania a odrezávania adhézných nálepor sa vykonal nasledovný experiment. Na povrch adhézných nálepor sa mikrotvomerom vytvorili odtlačky diamantového ihlana. Potom sa pokračovalo v rezaní zrnom a sledoval sa moment odrezania takto označeného nálepu a vznik nového.

Adhézne nálepy, ktoré vznikajú na chrbte zrna, majú rozličnú výšku. Elektronovým mikroskopom sa získali profilogramy v rezoch umiestnených v oblasti nálepov, v rezoch, ktoré prechádzajú cez vpichy diamantu, čo umožnilo usudzovať o momente odrezania adhézneho nálepu z chrbtovej plochy brúsiaceho zrna.

Napríklad pri brúsení titánovej zliatiny v prostredí 10 % vodného roztoku dusičnanu sodného bol časový úsek medzi odrezaním a vznikom nového nálepu asi 0,02 s, pri brúsení za sucha 0,002 s. Možno konštatovať, že pri použití reznej kvapaliny sa znížila frekvencia vzniku a odrezávania adhézných nálepov.

Pri analýze fyzikálneho modelu adhéžno-únavového opotrebenia sa dokázalo, že intenzita tohto opotrebenia závisí od množstva cyklov.

- pri zväčšovaní počtu cyklov (ako ukázali skúšky brúsenia s reznou kvapalinou a bez nej) bude trvanlivosť nástroja klesať.

Na identifikáciu vplyvu prostredia na odolnosť brúsiacich materiálov proti opotrebeniu sa realizovalo mikrorezanie titánovej zliatiny VT 1-1.

Ako rezné prostredie prostredie sa použili 1 % vodný roztok sódy, 10 % vodný roztok dusičnanu sodného a 2 % vodný roztok jodovodíka. Brúsilo sa brúsiacimi zrnami s leštenými chrbtovými plochám. Vplyv prostredia sa hodnotil prejdenu dráhou, ktorá sa určovala momentom vzniku adhézných kráterov, ktoré sú typické pre adhéžno-únavové opotrebenie. Veľkosť prejdenej dráhy sa brala ako stredná hodnota z piatich experimentálnych bodov. Výsledky skúšok sú v *tab. 5.2*.

Prejdená dráha brúsiacich zrn pri brúsení titánu

Tab. 5.2

Brúsiaci materiál	Zrnom prejdená dráha za sucha		1% vodný roztok sódy		10 % roztok dusičnanu sodného		2% roztok jodovodíka	
rezná rýchlosť, ms ⁻¹	1,46	22,6	1,46	22,6	1,46	22,6	1,46	22,6
Elektrokorund	9,72	0,18	0,94	0,50	6,4	1,2	0,98	0,96
Karbid kremika	0,72	0,18	0,86	0,75	7,2	2,5	1,2	0,8
Kubický nitrid bóru	9	4,2	10,2	5,8	120	45	12,7	6,5
Diamant	45	14	49	15,4	920	128	48	16

Pri použití 1 % vodného roztoku sódy sa odolnosť proti opotrebeniu málo zvyšuje v porovnaní s obrábaním za sucha. Značné zvýšenie sa dosiahne pri 10 % vodnom roztoku dusičnanu sodného. Došlo až k 10-násobnému zvýšeniu odolnosti proti opotrebeniu pri všetkých brúsiacich materiáloch v porovnaní s brúsením za sucha. Menej efektívne bolo použitie vodného roztoku jodovodíka. Jeho efektívnosť možno porovnať s efektívnosťou 1 % vodného roztoku sódy.

Ako ukázalo štúdium kontaktných javov, nezávisle od použitého prostredia interakcia prebieha medzi adhéznymi nálepmi pevne uchytenými na kontaktných povrchoch zrn s obrábaným materiálom. Tak vzniká trenie titánu po titáne. V takom prípade sa použitím reznej kvapaliny zníži koeficient trenia medzi titánovým nálepmom na brúsiacom zrne a obrábaným titánom. Pre verifikáciu tohto predpokladu sa určili koeficienty trenia titánu po titáne pri použití reznej kvapaliny.

Vo vretene sústruhu bol upnutý valcový obrobok z titánovej zliatiny. V dynamometri upevnenom na suporte stroja bol sa upevnil trň, ktorého čelo malo sférický povrch a rovnako bol z titánovej zliatiny. Dynamometrom sa merala normálová a tangenciálna sila. Relatívna rýchlosť bola $0,1 \text{ ms}^{-1}$. Výsledky skúšok sú v *tab. 5.3*.

Koeficient trenia titánu v rôznych prostrediach

Tab. 5.3

Prostredie	Koeficient trenia
Za sucha	1,06
1 % vodný roztok sódy	0,73
10 % vodný roztok dusičnanu sodného	0,52
2 % vodný roztok jodovodíka	0,25

Vidno, že koeficient trenia titánu po titáne vo výraznej miere závisí od použitého prostredia. Maximálnu hodnotu má v suchom prostredí. Pri použití 1 % vodného roztoku sódy a 10 % vodného roztoku dusičnanu sodného klesol koeficient trenia o 25 % a 50 % a najmenšiu hodnotu dosiahol pri použití 2 % vodného roztoku jodovodíka jodovodíka. Túto skutočnosť možno vysvetliť vytváraním filmov z jodidu titánu. Filmy majú malú pevnosť a trecími silami sa ľahko odstraňujú. Použitie tejto reznej kvapaliny pri brúsení titánu je preto málo efektívne.

Údaje v *tab. 5.3* dobre korešpondujú s výsledkami štúdia odolnosti proti opotrebeniu brusív v rozličných prostrediach. Výsledky skúšok svedčia o tom, že funkcia prostredia pri brúsení titánových zliatin je najmä v znížení trenia medzi abrazívnymi nálepmi a obrábaným

titánom, čím sa v konečnom dôsledku znížia tangenciálne napätia na kontaktných plochách a frekvencia vzniku a odtrhávania adhézných nálepv.

Získané zákonitosti sa verifikovali skúškami brúsenia na plochu titánovej zliatiny VT 1-1 pri použití viacerých brúsiacich materiálov. Rezná rýchlosť bola 15-30 m.s⁻¹, posuvová rýchlosť 5 m.min⁻¹ a prísuv 0,005 mm na zdvih. Kritériom hodnotenia bol koeficient brúsenia K_k . Výsledky skúšok sú v tab. 5.4.

Koeficient brúsenia pri rôznych brúsiacich kotúčoch a prostrediach (pre VT 1-1) Tab. 5.4

Brúsiaci kotúč	$v_c, m.s^{-1}$	za sucha	1 % vodný roztok sódy	10 % vodný roztok NaNO ₃	2 % roztok HJ
Elektrokorund	15	3,5	3,5	22,4	4,2
	30	3	3	12,4	3,5
Karbíd kremika	15	4,2	4,8	60	6,2
	30	3,8	4	38,2	5,2
KNB (bakelitové spojiv)	15	14,2	-	-	-
	30	8,3	-	-	-
Diamant (bakelitové spojivo)	15	32,4	-	-	-
	30	18,2	-	-	-
Diamant (keramické spojivo)	15	-	52,2	182	-
	20	-	34,4	115,4	-
Diamant (kovové spojivo)	15	-	96,2	650	-
	30	-	56,4	440	-

Z tabuľky vyplýva, že kotúče z karbidu kremíka majú výrazné prednosti v porovnaní s elektrokorundom pri použití 10 % roztoku dusičnanu sodného. Pri brúsení za sucha a použití iných prostredí je tento efekt minimálny. Najvyššie hodnoty koeficientu brúsenia má diamantový kotúč s kovovým spojivom. V porovnaní s kotúčmi z elektrokorundu a karbidu kremíka je K_k pri diamantových kotúčoch rádovo vyšší. Pretože roztok dusičnanu sodného je toxický, možno ho použiť len na strojoch s automatickým a poloautomatickým cyklom. Výsledky jednoznačne ukazujú, že použitie diamantu na brúsenie zliatin titánu je perspektívne.

Špecifickosťou brúsenia titánových zliatin je vytváranie pevných titánových nálepv na brúsiacich zrnách, ktoré majú charakter nárastku a odoberajú materiál. Dôležitú úlohu má správny výber efektívneho zloženia reznej kvapaliny. Musí maximálne znižovať trenie medzi adhéznym nálepvom a brúsenou titánovou zliatinou.

5.3 Rýchlostné superfinišovanie krúžkov valivých ložísk

Zvyšovanie trvanlivosti valivých ložísk je dôležitým národohospodárskym problémom. Bezprostredný vplyv na trvanlivosť ložísk má kvalita povrchu ložiskových krúžkov a teliesok a ich geometrické odchýlky (hranatosť, vlnitosť, oválnosť). Zo skúsenosti je oválnosť a hranatosť funkčných povrchov v hraniciach, ktoré sa v súčasnosti dosahujú a neovplyvujú výrazne na trvanlivosť.

Trvanlivosť najviac ovplyvňuje kvalita obrobeného povrchu. Pri zlepšení kvality funkčných plôch z $Ra = 0,16$ až $0,32$ na $Ra = 0,25-0,08$ μm narastá trvanlivosť ložísk dvojnásobne. Ak dokážeme zmenšiť Ra na $0,063-0,04$ mm, stúpne už len o ďalších 20 %.. Ďalšie znižovanie Ra už neovplyvňuje trvanlivosť ložiska. Vzniká naopak problém udržiavania súvislého olejového filmu vo valivom dotyku teliesok a obežných dráh krúžkov. Bolo dokumentované, že trvanlivosť sa podstatne zvýši pri vlnitosti pod $0,5$ μm a najväčšia trvanlivosť je pri výške vlnitosti v hraniciach $0,1-0,2$ μm .

Efektívnou metódou na zvyšovanie kvality funkčných plôch, ktorá zlepšuje geometrický tvar povrchu je superfinišovanie. Superfinišovať možno dvoma metódami, pri konštantných podmienkach, alebo pri pružnom prítlaču brúsiaceho kameňa k obrábanej ploche.

Superfinišovaním podľa prvej metódy tým, že nástroj sleduje nerovnosti povrchu, prakticky nemožno odstrániť geometrické nepresnosti súčiastky, ale dosahuje sa výrazné zmenšenie mikronerovností povrchu. Pri druhej metóde, keď prítlak kameňa sa kinematicky reguluje, nenastáva kopírovanie a klesajú nerovnosti od predchádzajúcich operácií. Súčasne pri konštantnom prítlaču sa kvalita povrchu podstatne nezlepšuje. Obidvom metódam možno teda prisúdiť pozitívne aj negatívne vlastnosti.

Vo viacerých prácach sa predpokladalo, že pri určitej zotrvačnosti superfinišovacej hlavy brúsiaci kameň nestačí celkom kopírovať tvar obrobku, preto sa zlepšuje profil obrobenej plochy. Použitím diamantových superfinišovacích kameňov sa intenzifikuje superfinišovanie v dôsledku vyššej reznosti diamantu, reznej rýchlosti a kontaktného tlaku.

Aby bolo možné superfinišovaním odstrániť vlnitosť treba, aby vznikol kontakt na vrcholoch nerovností. Možno to realizovať reguláciou zotrvačnosti superfinišovacej hlavy. Zotrvačnosť závisí od konštrukcie hlavy a možno ju ovplyvniť výberom hmotnosti hlavy a reguláciou polohy ťažiska pri superfinišovaní.

Teoretická analýza ukazuje, že v závislosti od kroku a výšky nerovností možno určiť potrebnú zotrvačnosť hlavy, pri ktorej sa zníži východisková vlnitosť. k bude zotrvačnosť hlavy väčšia ako výpočtová hodnota, dosiahne sa zlepšenie vlnitosti.

Vysoká zotrvačnosť hlavy je potrebná v prvej fáze obrábania. Pri ukončovaní superfinišovania musí byť zotrvačnosť superfinišovacej hlavy menšia ako výpočtová hodnota.

Vtedy sa dosiahne superfinišovanie s kopírovaním nerovností a zlepšuje sa kvalita povrchu. Z toho vyplýva, že na zníženie nerovností povrchu pri superfinišovaní treba regulovať zotrvačnosť superfinišovacej hlavy zmenou polohy ťažiska tak, aby na začiatku superfinišovania mala hlava veľkú a pri dokončovaní malú zotrvačnosť.

Štúdium vplyvu štruktúrne zmenenej vrstvy na trvanlivosť ložísk ukazuje, že na zlepšenie funkčných vlastností treba odsuperfinašovať prídavok 10-25 mm (z priemeru). Na odobratie tejto vrstvy treba intenzifikovať proces superfinišovania.

Vysokou reznosťou diamantových zrn a ich schopnosťou pre leštiaci efekt, diamantovými superfinišovacími kameňmi sa v porovnaní s inými brúsiacimi materiálmi efektívne zníži maximálna výška nerovností obrobeného povrchu a intenzifikuje sa superfinišovanie.

Pri výraznom zvýšení rýchlosti superfinišovania a tlakov sa môže zvýšiť kontaktná teplota na také hodnoty, pri ktorých v povrchových vrstvách obrobku vzniknú fázové transformácie. Preto boli merané stredné integrálne teploty kontaktu pri superfinišovaní podľa uvedenej metodiky. Rezná kvapalina mala zloženie: 1,5 % trietanolamínu, 1 % zmáčadla, 0,1 glycerínu, 0,5 % bórxu, zvyšok voda. Výsledky sú v *tab. 5.5*

Z tabuľky vyplýva, stredná integrálna kontaktná teplota závisí od brúsiaceho materiálu.. Pri konštantných rezných podmienkach je teplota pri superfinišovaní diamantovým kameňom nižšia ako pri použití kameňov z kubického nitridu bóru a elektrokorundu.

Pri použití diamantových kameňov, ak sa mení rýchlosť superfinišovania z 1,9 na 5,71, narastá stredná integrálna teplota z 397 K na 486 K. Pri použití elektrokorundu a kubického nitridu bóru sa zistili zvýšené teploty zo 428 K na 747 K a zo 407 K 517 K. Pri superfinišovaní elektrokorundom rýchlosťou 5,71 m.s⁻¹ a tlaku 2,1 MPa je stredná integrálna teplota asi 2-krát vyššia ak pri superfinišovaní diamantom.

Štúdium kvality obrobených plôch ukázalo, že superfinišovaním elektrokorundom vznikli na obežných dráhach krúžkov popúšťacie farby a zhoršila sa kvalita ložísk.

Stredná integrálna teplota pri superfínišovaní rôznymi nástrojmi

Tab. 5.5

Druh nástroja	v_c , ms^{-1}	p , MPa	θ , K
Diamantový s kovovým spojivom	1,99	2,1	397,3
		0,7	400,6
	3,23	2,1	414
	4,47	3,5	439
		2,1	434
	5,71	2,1	486,6
Kubický nitrid bóru	1,99	2,1	407
		0,7	412,6
	3,23	2,1	422,6
	3,47	3,5	477,6
		2,1	455,6
	571	2,4	517,0
Elektrokorund	1,99	2,1	459,6
	4,47	3,5	420
		2,1	570,6
	5,71	2,1	747,3

Na identifikáciu vplyvu rezných podmienok a zotrvačnosti superfínišovacej hlavy na mikrogeometriu obežných dráh sa opracovalo 10 krúžkov. Výsledky sú v *tab. 5.6*. Počas skúšok sa stupňovito menila zotrvačnosť. Pri prvom prechode bol moment zotrvačnosti $18,9 \text{ kg.m}^2$ a pri druhom $2,5 \text{ kg.m}^2$.

Výsledky superfínišovania krúžkov valčekového ložiska

Tab. 5.6

Číslo krúžku	R_z , μm		Úber z priemeru, μm	Vlnitosť, μm		Hranatosť, μm		Oválnosť, μm	
	pred	po		pred	po	pred	po	pred	po
1	0,75	0,08	25	0,8	0,1	1,8	1,1	6	5
2	0,63	0,05	24	1,3	0,85	1,9	1,43	7	7
3	0,4	0,05	22	1,5	0,2	2	1,2	8	8
4	0,5	0,1	23	1,7	0,1	1,8	1,12	4	4
5	0,8	0,06	26	0,9	0,09	1,5	1,05	3	2
6	0,05	0,1	20	1,8	0,18	1,5	1	5	5
7	0,4	0,07	26	1,2	0,1	1,7	1,18	8	8
8	0,35	0,08	26	1,3	0,2	1,8	1,1	7	6
9	0,58	0,09	25	0,8	0,1	1,9	1,14	9	8
10	0,8	0,06	24	0,8	0,12	2	1,1	9	9

Pri všetkých desiatich krúžkoch klesla vlnitosť na požadované hodnoty a jej stredná hodnota bola 0,1 až 0,2 μm . Potom hranatosť poklesla o 30 % a oválnosť sa prakticky nezmenila.

Obežné dráhy krúžkov boli superfinišované zapichovacím spôsobom. Na zabezpečenie zvolenej geometrie mali superfinišovacie kamene široké zóny a úzku stredovú zónu (na vytvorenie konvexnej plochy obežnej dráhy).

Na určenie efektívnosti metódy sa merala trvanlivosť tridsiatich valivých ložísk, ktoré sa opracovali opisovanou a pôvodnou technológiou. Trvanlivosť ložísk sa zvýšila 3,43 krát.

6 ZÁVER

Brúsenie možno charakterizovať ako zložitý proces trenia a deformácie dvoch fyzikálne odlišných materiálov pri vysokých kontaktných tlakoch, a teplotách v kontakte. Problém jeho skúmania spočíva v tom, že prebieha v mikroobjemoch a pri vysokých kontaktných rýchlostiach. Jeho výsledkom je špecifický profil obrobenej plochy so stopami plastickej deformácie a trenia brúsnych zŕn o obrábanú plochu. Brúsenie sa obyčajne aplikuje ako dokončovacia operácia, ktorá zodpovedá za finálnu mikrogeometriu obrobenej plochy. Preto jeho význam stúpa, so stúpajúcimi požiadavkami na kvalitu a prevádzkovú spoľahlivosť strojárskych súčiastok. Vývoj supertvrдых brúsiacich materiálov na báze nitridu bóru a syntetického diamantu vyústil do ich širokej aplikácie, najmä pri brúsení ťažko obrábatelných materiálov. Žiada sa zdokonaľovať geometrický tvar zŕn širšou aplikáciou riadenej kryštalizácie a ich orientácie v telese kotúča, vývoj efektívnych rezných prostredí na báze kvapalín a plynov. V publikácii sme aplikovali hlbšiemu štúdiu javov, ktoré prebiehajú v interakcii medzi brúsiacim a brúseným materiálom na báze modelovania a priameho sledovania procesu s využitím originálnych metodík štúdia. Autor vyslovuje nádej, že kniha zaujme odborníkov v tejto zaujímavej oblasti štúdia.

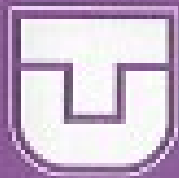
Literatúra

- [1] BAKUL, C, E.: *Puti povyšnija proizvoditel'nosti abrazivnogo instrumenta pri šlifovanii*. Moskva, Mašgiz, 1964
- [2] BLAŠKOVIČ, P., BALLA, J., DZIMKO, M.: *Tribológia*. Bratislava, ALFA, 1990, 360 s., ISBN 80,-05-00633-0.
- [3] BOKUČAVA, G.V., KASRADZE, D,CH.: Issledovanije razprostraneniya tepla v rezce I obrazce v processe sverchskorostnogo rezaniya metallov. *Trudy Gruzinskogo sel'skhozvanstvennogo instituta*, 1, 1976, s 93.
- [4] BOKUČAVA, G, V: Tribologija processa šlifovanija. Tbilisi: Sabčota Sakartvelo, 1984., 230 s.
- [5] BOKUČAVA, G. V., VASILKO, K.: Štúdium mechanizmu interakcie nástroja s obrábaným materiálom v zone kontaktu. *Strojrenství*, 1982.
- [6] BUDA, J., VASILKO, K.: Nová metóda na získavanie koreňa triesky pri obrábaní za nastavených podmienok rezania bez špeciálnych prípravkov. *Patent ČSSR 122243*, 15.3.1967
- [7] GRAČENKO, A. I et al.: Vlijaniye reljefa almaznogo kruga na process šlifovanija. *Sverchtverdyje materially*, 1, 1980, s. 53
- [8] IKAWA, N., TANAKA, T.: Thermal aspects diamond in grinding. *Annals of the CIRP*, vol. XXIV, s. 153
- [9] KAŠČEJEV, V. N.: *Procesy v zone frikcionnogo kontaktu metallov*. Moskva, Mašinstrojenije, 1978.
- [10] LOLADZE, T. N.: *Pročnosť I iznostostojkosť režuščego instrumenta*. Moskva, Mašinstrojenije, 1982.
- [11] LOLADZE, T. N., BOKUČAVA, G. V.: *Iznos almazov i almaznykh krugov*. Moskva, Mašgiz, 1967.
- [12] MASLOV, J. N.: *Teorie broušení kovú*. Praha, SNTL, 1979.
- [13] PŘIKRYL, Z., MUSÍLKOVÁ, R. *Teorie obrábění*, Praha, SNTL, 1982, 235 s.
- [14] REZNIKOV, A. N.: *Teplofizika processov metalorežuščej obrabotki materialov*. Moskva, Mašinstrojenije, 1981.
- [15] SNOEYS, R., PETERS, I.: The significance of chip in grinding. *Annals of the CIRP*, 1974, s. 227
- [16] SNOERS, R et al.: Thermally inducent damage in grinding. *Annals of the CIRP*, 2, 1978, s. 571.

- [17] VASILKO, K., NOVÁK, S.: Príspevok k objasneniu fyzikálnej podstaty procesu rezania pri brúsení. *Strojirenství*, 21. 11. 1971.
- [18] VASILKO, K., BOKUČAVA, G.: *Brúsenie kovových materiálov*, Bratislava, ALFA, 1988, 235 s.,
- [19] VASILKO, K.: *Obrábanie titánu a jeho zliatin*. Bratislava, ALFA, 2011, 120 s., ISBN 80-7099-683-8

Dr.h.c prof. Ing. Karol Vasilko, DrSc.
METÓDY A PROSTRIEDKY BRÚSENIA KOVOV

Vydávateľ: Technická univerzita v Košiciach, Fakulta výrobných
technológií so sídlom v Prešove
Tlač: COFIN Prešov
Rok vydania: 2020
Vydanie: prvé
Rozsah: 176 str., 110 obr., 18 tab.
Náklad: 100 kusov
ISBN 978-80-553-3509-4



TECHNICKÁ UNIVERZITA V KOŠICIACH

FAKULTA VÝROBNÝCH TECHNOLOGIÍ
SO SÍDLOM V PREŠOVE

METÓDY A PROSTRIEDKY BRÚSENIA KOVOV

Tribológia procesu

Karol Vasilko



Prešov 2020