

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Ing. Libor Kovár

**HODNOCENÍ DEFORMAČNÍHO CHOVÁNÍ MATERIÁLU
PŘI ŘEZÁNÍ NA ZÁKLADĚ STABILITY A NESTABILITY
PLASTICKÉ DEFORMACE A SMYKOVÉHO NAPĚTÍ V PRIMÁRNÍ
OBLASTI PLASTICKÉ DEFORMACE**

**EVALUATION OF DEFORMATION BEHAVIOUR
OF MATERIAL DURING CUTTING BASED ON STABILITY AND
INSTABILITY OF PLASTIC DEFORMATION AND SHEAR STRESS
IN THE PRIMARY REGION OF PLASTIC DEFORMATION**

ZKRÁCENÁ VERZE PHD THESIS

Obor: Strojírenská technologie
Školitel: Prof. Ing. Bohumil Bumbálek, CSc.
Oponenti: Prof. Ing. Jan Mádl, CSc.
Prof. Ing. Radko Samek, CSc.
Doc. Ing. Vladimír Gabriel, CSc.

Datum obhajoby: 17. 5. 2002

KLÍČOVÁ SLOVA

tvorba třísky, cyklická tříška, lokalizace plastické deformace, stabilita a nestabilita plastické deformace

KEYWORDS

chip formation, cyclic chip, localization of plastic deformation, stability and nonstability of plastic deformation

MÍSTO ULOŽENÍ PRÁCE

oddělení pro vědu a výzkum FSI VUT v Brně

© Libor Kovár, 2002
ISBN 80-214-2156-8
ISSN 1213-4198

OBSAH

1 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY	5
2 CÍL PRÁCE	7
3 METODY ZPRACOVÁNÍ	9
4 HLAVNÍ VÝSLEDKY PRÁCE.....	14
4.1 Hodnocení velikosti deformace	15
4.2 Hodnocení složek řezné síly	15
4.3 Hodnocení dynamických vlastností zkoušených materiálů podle navržené metodiky	15
4.4 Metalografické hodnocení	16
4.5 Hodnocení dynamické meze kluzu.....	16
4.6 Vliv deformační rychlosti	17
4.7 Exponent deformačního zpevnění	17
4.8 Hodnocení změn vlastností materiálu v důsledku změn deformační rychlosti ...	17
4.9 Dynamické vlastnosti zkoumaných materiálů	18
5 ZÁVĚR	19
6 SUMMARY	21
7 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	25
8 AUTOROVO CURRICULUM VITAE	27
SEZNAM PUBLIKACÍ AUTORA	28

1 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Obrábění kovů patří do skupiny složitých dynamických a stochastických procesů, kde chybí ještě řada informací o mechanismu jevů, které jej provázejí. V současné době nejsou mechanismy těchto jevů, které provázejí proces řezání plně objasněny, jak z ekonomických, tak i jakostních hledisek především pro své náhodné charakteristiky.

Podstatou nejednotnosti jsou komplikace a neznalost všech činitelů působících s různou intenzitou na sledované funkční vztahy, které znemožňují jejich matematické vyjádření ve formě jednoduchých modelů umožňujících jednoznačně řešit celou problematiku. Významnými technickými a ekonomickými parametry procesu řezání jsou trvanlivost rezného nástroje, způsob jeho opotřebení, jakost obrobeného povrchu a chování materiálu za extrémních podmínek zatěžování, kterým je materiál vystaven při řezání.

Současný stav této problematiky je možné vysledovat v řadě publikací, které řeší dílčí části těchto významných problémů. Na prvním místě je to sledování procesu tvoření třísky. I když dřívější teorie jsou neustále doplňovány, upřesňovány, případně přepracovávány, přece jenom nelze ani v současné době najít ucelenou práci, kterou by bylo možné považovat za definitivní v názorech na tvorbu třísky, na vliv této tvorby a na další jevy, které ji provázejí. Základní skutečností rozdílného přístupu k řešení těchto otázek je to, že během řezání se mění fyzikálně-mechanické vlastnosti obráběného materiálu. Tyto změny jsou ovlivňovány vznikajícími napětími, deformačním zpevněním, odpevněním, což jsou podmínky, které je nutné brát v úvahu při posuzování procesu řezání tj. plastické deformaci, která probíhá za vysokých rezných rychlostí.

Do současnosti bylo předloženo mnoho teorií o tvoření třísky [1] [2] [3]. Zvláštní skupinu názorů zaujímají ty, které se týkají tvorby neplynulé třísky, třísky cyklické, kde je její tvorba vysvětlována jako katastrofický termoplastický stříh, který způsobuje periodickou nestabilitu plastické deformace v pásmu řezání [4] [5] [6].

Cílem nejrůznějších prací v oboru technologie obrábění je snaha určit technologické parametry součástí, které musí být obráběny, aniž by se prováděly nákladné zkoušky. Pokud by sem měl řešit tento problém za skutečných podmínek, bylo by zapotřebí hodnotit široký rozsah proměnných, které ovlivňují proces řezání. Jednou z metod, jak dosáhnout tohoto cíle je orientace prací do oblasti studia materiálových charakteristik a jejich změn během řezání. S následným rozбором vlivů, které působí přímo, nebo nepřímo na mechanismus řezání.

V databázích jsou shromážděny údaje o obrobiteľnosti, řezných silách, kroutícím momentu apod. Takovéto údaje jsou zpracovány pro jednotlivé metody obrábění, pro různé nástrojové materiály, materiály obrobku, řezné kapaliny apod., což má za následek jisté nevýhody při zobecňování podkladů. Další problém, který se v této souvislosti objevuje je otázka současného stálého zvyšování řezné rychlosti, pro které se zatím zpracovaná data nedají dobře využít.

Jednou z možností řešení je sestavení modelu, který bude vycházet ze základní geometrie procesu řezání. Deformace a třecí podmínky při řezání jsou daleko vyšší, než při běžných zkouškách. Proto je nutné brát zřetel na chování materiálu, jako je deformační zpevnění, rychlost deformace, vliv teploty, aby bylo možné správně popsat chování materiálu. Zkoušky jsou obvykle prováděny při rovinném pravoúhlém řezání.

Při řezání dochází interakcí materiálu obrobku a nástroje k rychlému růstu deformace a teploty. Absolutní hodnoty jsou závislé na zvolených řezných podmínkách, ale obecně lze říci, že při řezné rychlosti do $300 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ se deformace pohybuje v rozmezí 2 až 5, deformační rychlost v rozsahu 10^3 až 10^6 s^{-1} a teplota v deformačním pásmu do 1000°C . Přitom dochází ke tření a nalepování částic materiálu na čele nástroje. Takovéto podmínky a nebo jejich kombinace nelze připravit při žádných běžných zkouškách materiálu.

Pro zkoušky obráběním se jeví jako nejvýhodnější pravoúhlé řezání prováděné na trubce. Model geometrických vztahů přitom předpokládá, že deformace probíhá jako deformace smyková v jedné rovině nebo v úzkém pásmu rovnoběžném s touto

rovinou. V některých teoriích jsou uvažovány různé definice, jako např. tloušťka pásma deformace apod. Obecnější vztahy pro smykové napětí, smykovou deformaci a deformační rychlost v pojmech snadno měřitelných veličin, jsou uváděny v řadě pramenů. Tyto veličiny jsou průměrné, skalární veličiny, necharakterizují jednoznačně deformaci, ale které se snadno dávají do vztahu s veličinami používanými v jiných procesech, při kterých se hodnotí chování materiálu. Nicméně jsou relativně nezávislé, dají se snadno vypočítat na základě změřených hodnot. Proto jsou tyto veličiny často používány, a také v literatuře je dost údajů o jejich změnách a závislostech.

Řada návrhů o geometrii napětí, deformace a deformační rychlosti je definována použitím tenzoru deformace nebo deformační rychlosti vypočtených z uvažovaného posunutí, nebo rozložení rychlosti. To zabezpečuje, že deformace je jednoznačně charakterizována, a že srovnatelné podmínky jsou definovány ve všech bodech, přinejmenším v pásmu plastické deformace. Tvar pásma deformace a rychlosti materiálu, jeho rozložení a přemístění, musí být počítáno z idealizovaných předpokladů. Nicméně je možné použít data ze zkoušek soustružení, pro měření parametrů užívaných v obecnější rovnici napětí – deformace v teorii obrábění. Takováto teorie může představovat solidní základ pro výsledky složitých procesů, které mohou být uplatněny i v jiných oborech.

2 CÍL PRÁCE

Proces tvoření třísky, jako proces plastické deformace, probíhá za určitých mechanismů, které jsou ovlivňovány fyzikálně metalurgickými vlastnostmi materiálu a výrazně deformační rychlostí. Zvláštní stav tvoření třísky je lokalizace plastické deformace, která se projevuje jak v hodnotách smykového napětí, tak i v mechanismu smykového porušení.

Získané poznatky přispívají k lepšímu hodnocení procesu řezání, dávají totiž technologovi podklady, kterými lze velmi dobře zhodnotit průběh sledované

operace obrábění. Jsou návodem k tomu jak ovlivňovat proces řezání z hlediska energetického a současně umožňují jejich využití v oblasti určování vlastností materiálu za vysokých deformačních rychlostí jako je mez kluzu, nebo exponent deformačního zpevnění.

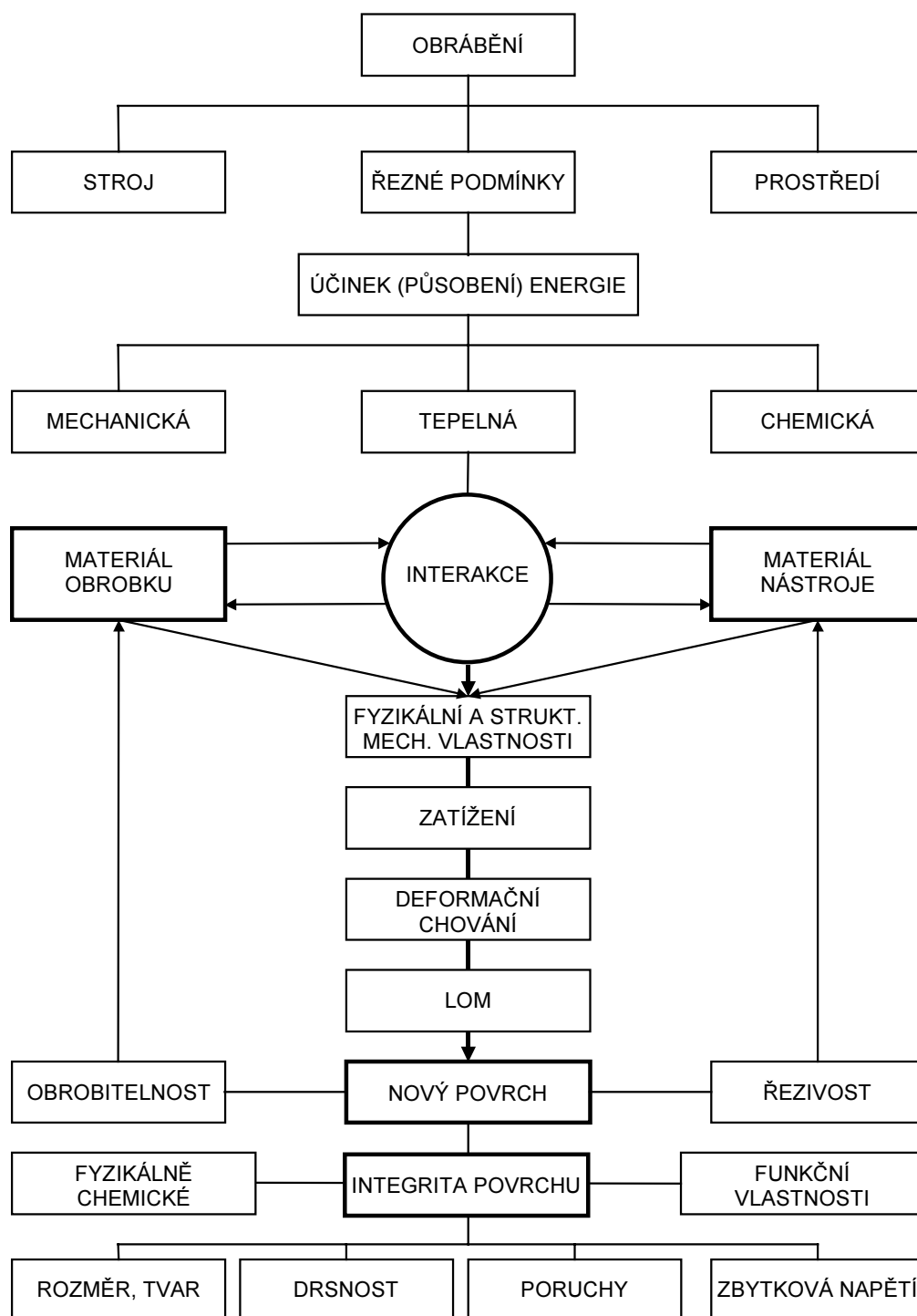
Proto je předložená disertační práce zaměřena na chování materiálů při řezání a chce přispět k ujasnění údajů týkajících se deformačního chování materiálu za specifických podmínek zatěžování, které probíhají při řezání.

Práce si klade za cíl, rozebrat problematiku obrábění kovů, jako proces pružně plastické deformace, kdy plastická deformace sehrává rozhodující úlohu. Při zkouškách obráběním zhodnotit podmínky deformačního chování vybraných druhů materiálů a zhodnotit plastickou deformaci probíhající při řezání. Hodnocení provést dvěma způsoby, na základě měření součinitele pěchování a na základě hodnocení průřezu třísek metalograficky. Analýzou procesu řezání stanovit smykovou deformaci i smyková napětí, s možností využití těchto poznatků pro přepočet výsledků na normálové napětí a normálovou deformaci při dynamickém zatěžování.

Tyto skutečnosti jsou vyjádřeny pojmy a hodnocením deformačního chování materiálu při řezání. Podstatou práce je sestavení metodického postupu hodnocení řezání jako systému interakce materiálu obrobku a nástroje, stability a nestability plastické deformace a její lokalizace. Dále postupu výpočtu hodnot charakterizujících deformační proces řezání a jeho využití pro stanovení dynamické meze kluzu a exponentu deformačního zpevnění.

3 METODY ZPRACOVÁNÍ

Moderní přístup k řešení fyzikální podstaty procesu řezání je systémový přístup. To znamená, že řezání lze hodnotit jako systém interakce materiálu obrobku a materiálu nástroje.



Obr. 3.1 Schéma systému procesu obrábění

Tímto systémem lze hodnotit obrobiteľnosť materiálu, rezivosť materiálu nástroje i nově vzniklý povrch. Uvedený model také ukazuje, které údaje je třeba sledovat, znát, aby bylo možné proces hodnotit z požadovaných hledisek, případně aby bylo možné provádět predikci s ohledem na požadovanou jakost a ekonomii výroby. Podstatou tohoto přístupu je to, že vychází z fyzikálně metalurgických základů a vlastností obráběného materiálu a hodnotí jaké změny nastávají v materiálu při řezání.

Deformační chování materiálu souvisí s plastickou deformací. Plastická deformace se mění s podmínkami deformace a to především s deformační rychlostí a teplotou. I když měření plastické deformace při řezání není snadné, přece existují metody, které umožňují stanovit její velikost. Provádí se to pomocí součinitele pěchování třísky Λ , nebo úhlu deformace ϕ .

Další možností je metalografický způsob hodnocení plastické deformace v tříse. Na metalografických výbrusech je možné posoudit zda plastická deformace je stabilní, nebo nestabilní. Dále je možné určit i úhel textury třísky, případně velikosti pásma primární i sekundární deformace.

Výsledky stanovení deformace touto metodou se velmi dobře shodují s deformacemi vypočtenými pomocí součinitele pěchování třísky Λ , ale připouští se, že mohou existovat rozdíly [16].

Určování deformačního chování materiálu je většinou zaměřeno na stanovení napětí v rovině stříhu, případně na stanovení dynamické meze kluzu a exponentu deformačního zpevnění. Všechny tyto údaje dávají velmi dobré informace o tom, jak se chová materiál při řezání.

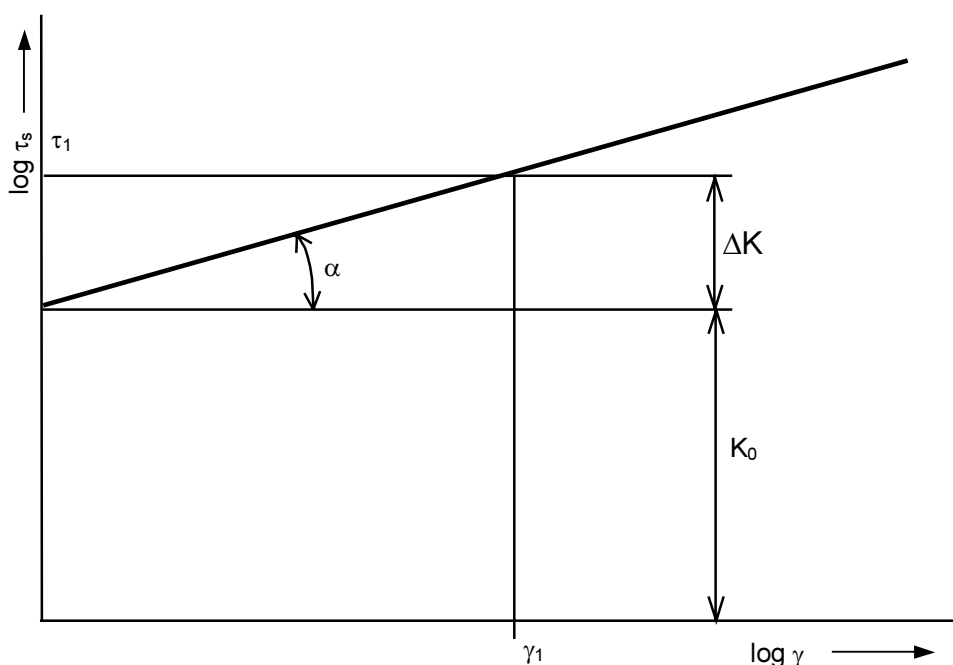
V pracích řady autorů zabývajících se problematikou řezání se objevují stanoviska, která ukazují na možnost získat informace o chování materiálu za vysokých deformačních rychlostí. Současně upozorňují na výhody i nevýhody této metody. Výhoda je v tom, že při řezání lze snadno dosáhnout vysoké hodnoty deformační rychlosti. Nevýhodou je to, že deformace a rychlost deformace se mění

a přepočítává z rozměru třísek. Také napětí se nedá měřit přímo a určuje se měřením složek řezné síly a stanoví se na základě analýzy zidealizovaného modelu řezného procesu [17].

Řezání lze ale považovat za proces, který je v určitém úseku konstantní, kdy je dostatek času ke snímání potřebných hodnot i k jejich záznamu.

Metodika stanovení dynamických vlastností materiálu na základě zkoušek řezání vychází z předpokladu získání jednoho bodu křivky vyjadřující vztah:

$$\tau_s = K_0 \cdot \gamma^m$$

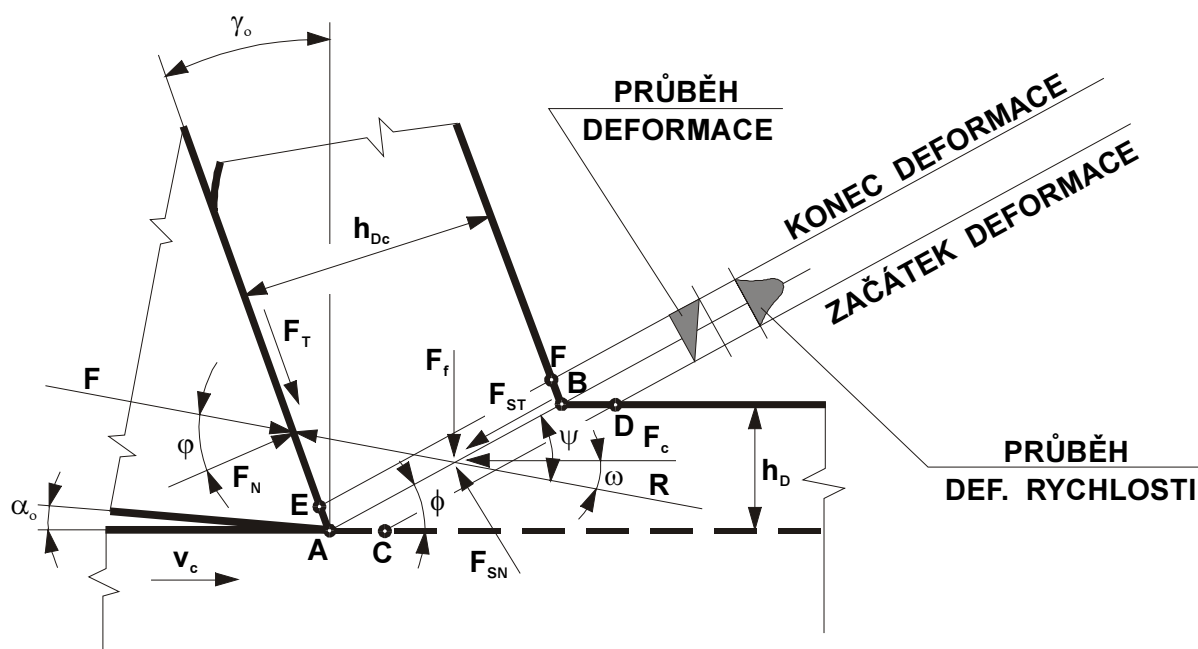


Obr. 3.2 Závislost smykového napětí na smykové deformaci při konstantní rychlosti deformace

Jednou z možností pro určování dynamických vlastností materiálů je sestavení modelu, který bude vycházet ze základní geometrie řezání [19], kdy je nutné brát v úvahu parametry jako deformační zpevnění, rychlost deformace a vliv teploty. Často jsou uvažovány různé obecnější vztahy vyjadřované v pojmech snadno měřitelných veličin. Tyto veličiny sice necharakterizují jednoznačně deformaci, ale snadno se dávají do vztahu s veličinami používanými v jiných procesech, při

kterých se hodnotí chování materiálů. Nicméně jsou relativně nezávislé a dají se snadno vypočítat na základě změřených hodnot.

Pro zkoušky obráběním se jeví jako nejvýhodnější pravoúhlé řezání (Obr. 3.3) prováděné na trubce, poněvadž umožňuje snadno stanovit řeznou rychlost, hloubku odebírané vrstvy, úhel čela i případný sklon břitu nástroje.



Obr. 3.3 Schéma pravoúhlého řezání

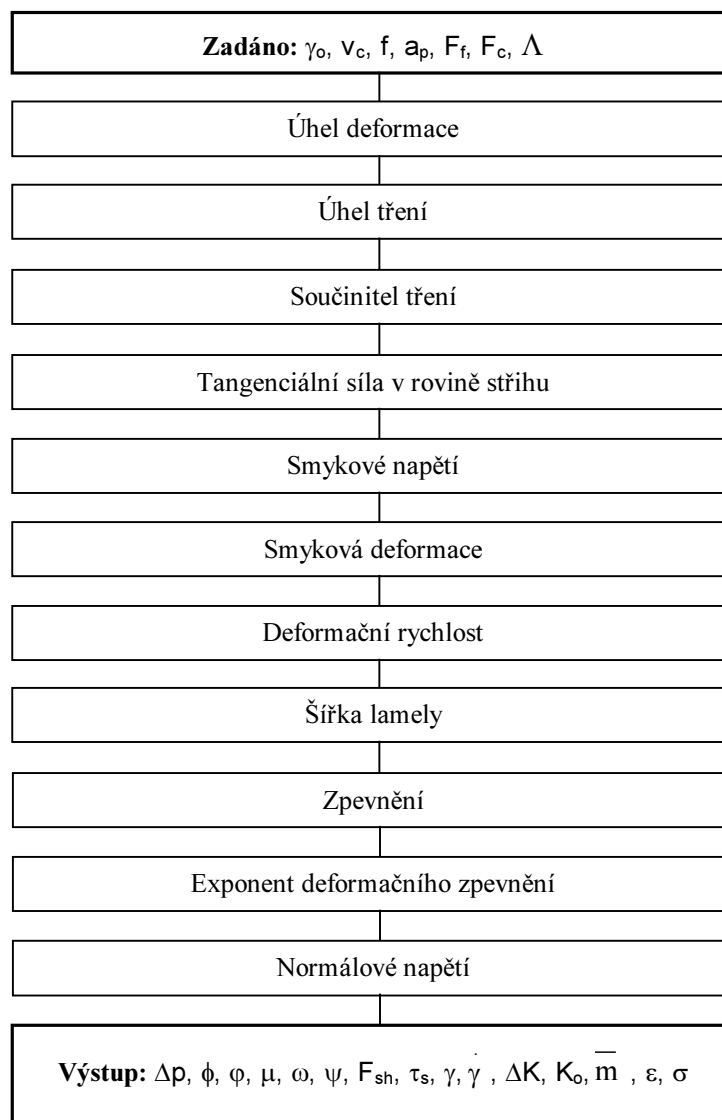
Model geometrických vztahů vychází z definice pásma rovnoběžného podél roviny stříhu skloněné v rovině řezání pod úhlem roviny stříhu ϕ . Toto pásmo je ohraničeno čarami \overline{CD} a \overline{EF} , které značí počátek a konec plastické deformace a rovina stříhu je označena čarou \overline{AB} . Autoři tohoto návrhu sledovali i rozložení deformační rychlosti v pásmu této deformace a konstatovali, že její rozložení odpovídá normálnímu rozložení a její maximum je na čáře \overline{AB} .

Tento model je možné použít jako základní východisko pro analýzu a výpočet jednotlivých veličin plastické deformace a jejich vzájemných vztahů.

Pro výpočet potřebných hodnot byl sestaven program na počítači (Obr. 3.4).

Vstupní hodnoty: $\gamma_0, v_c, f, a_p, F_f, F_c, \Lambda$

a z nich se vypočítává: $\Delta p, \phi, \varphi, \mu, \psi, \omega, F_{sh}, \tau_s, \gamma, \dot{\gamma}, \Delta K, K_0, \bar{m}, \varepsilon, \sigma$.



Obr. 3.4 Vývojový diagram pro stanovení dynamických vlastností materiálů

Z uvedených hodnot je vidět, že na základě zkoušek obrábění lze zjišťovat dynamické vlastnosti materiálu. Hodnoty smykového napětí při řezání se dají totiž přepočítávat na hodnoty odpovídající podmínkám jednoosého zatěžování.

4 HLAVNÍ VÝSLEDKY PRÁCE

Experimentální část této práce byla zaměřena do dvou oblastí. V první části byla hodnocena plastická deformace, tj. její velikost na základě metalografického hodnocení výbrusů třísek. Druhá oblast se týká hodnocení dynamické meze kluzu a exponentu dynamického zpevnění na základě vytvořené metodiky výpočtu těchto hodnot, vycházející z měření složek řezných sil, z geometrických poměrů v oblasti primární plastické deformace a platnosti modelu řezného procesu.

Zkoušky deformačního chování ocelí byly provedeny při soustružení na stroji s plynulou regulací otáček.

Řezné podmínky byly voleny v těchto rozsazích:

- řezná rychlost v_c [$\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$] 20; 40; 80; 160; 220
- posuv f [$\text{mm}\cdot\text{ot}^{-1}$] 0,1; 0,2; 0,3
- hloubka řezu a_p [mm] 1,5

Pro stanovení vstupních hodnot výpočtu, tzn. řezných sil a součinitele přechování, dynamických charakteristik byl použit pouze jeden posuv $f = 0,1 \text{ mm}\cdot\text{ot}^{-1}$.

Pro zkoušky byly zvoleny následující oceli: 12 050, 14 331, 15 241, 16 720. Oceli byly zkoušeny ve dvou stavech tepelného zpracování, normalizačně žíhaném a zušlechtěném, tj. kalené a popuštěné na 450°C .

Polotovar pro zkoušky měl tvar trubky, která se opracovávala na čele, tzn., že šlo o pravoúhlé řezání (rovinná deformace). Tloušťka stěny trubky se upravovala před vlastní zkouškou na hodnotu odpovídající hloubce řezu a_p .

Jako nástroj byl použit soustružnický nůž stranový osazený vyměnitelnými břitovými destičkami slinutých karbidů s negativním úhlem čela γ_0 a úhlem sklonu ostří $\lambda_s = 0^\circ$.

4.1 Hodnocení velikosti deformace

Při řezání je velikost plastické deformace vyjadřována pomocí součinitele pěchování Λ nebo Λ_1 . S ohledem na jednoduchost měření je ve zprávě využita hodnota Λ . Tento součinitel se vyjadřuje číselnou hodnotou větší než 1 a udává poměr tloušťky odebrané třísky k tloušťce teoretické.

Součinitel pěchování byl stanoven na základě měření tloušťky třísky. Měření byla provedeno mikrometrem s kulovými doteky. Proměření bylo prováděno na každé tříse 5x a výsledná hodnota je stanovena jako aritmetický průměr z těchto měření.

Průběhy součinitele pěchování v závislosti na řezné rychlosti odpovídají teoretickým předpokladům, tzn., že se s rostoucí řeznou rychlostí dochází k poklesu hodnoty součinitele pěchování. U ocelí normalizačně žíhaných je hodnota součinitele vyšší než u ocelí zušlechtěných. Oceli zušlechtěné vykazují strmější průběh závislosti na řezné rychlosti do hodnoty $v_c < 50 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, u vyšších hodnot řezných rychlostí se rozdíl hodnot součinitele pěchování pro různé třídy ocelí prakticky shoduje.

4.2 Hodnocení složek řezné síly

Pomocí hodnot řezných sil při zkouškách obráběním je možné stanovit energetickou náročnost řezání. Jelikož zkoušky byly prováděny při pravoúhlém řezání jedná se o řeznou sílu F_c a posuvovou sílu F_f . Síly byly měřeny na tříslžkovém dynamometru KISTLER, a vyhodnocovány na PC programem INMES. Měření bylo opakováno 3x pro všechny stanovené podmínky a pro další výpočet byla v úvahu vzata průměrná hodnota jednotlivých složek sil. Hodnoty byly graficky zpracovány a vyhodnoceny v závislosti na řezné rychlosti.

4.3 Hodnocení dynamických vlastností zkoušených materiálů podle navržené metodiky

Teoretická východiska, která byla využita při zpracování disertační práce vyústila v sestavení algoritmu pro stanovení dynamických vlastností zkoušených materiálů.

Výsledkem je mnoho hodnot, které jsou zpracovány ve formě tabulek. V těchto tabulkách jsou uvedeny v levé části hodnoty zadané a v pravé části hodnoty vypočtené a to pro zkoušené materiály ve stavu normalizačně žíhaném a ve stavu zušlechtěném.

Výsledky uvedené v tabulkách dávají velmi dobrý přehled o chování materiálu při řezání za měnících se řezných podmínek. Získané údaje uvádí 15 hodnot o geometrii řezání, o napětí, zpevnění, tloušťce lamel třísky až po přepočet na hodnoty deformace a napětí normálové.

4.4 Metalografické hodnocení

Metalografické hodnocení plastické deformace bylo provedeno na třískách, které vznikly při pravoúhlém řezání na čele trubky polotovaru. Výbrusy byly pořízeny v podélném směru každé třísky pro jednotlivé zvolené řezné podmínky. Na metalografických výbrusech třísek se dá hodnotit zda plastická deformace byla rovnoměrná nebo nerovnoměrná v celém průřezu třísky. Jedná se vlastně o posouzení stability, nebo nestability plastické deformace. Tento stav je v přímém vztahu k typu třísky, tj. zda se jedná o plynulou nebo segmentovanou třísku v závislosti na řezných podmínkách.

U materiálů normalizačně žíhaných dochází k segmentaci pouze za vysokých řezných rychlostí a vysokých posuvů. U ocelí kalených a popuštěných na 450°C je znatelný výrazný posun hranice segmentace k nižším rychlostem a také nižším posuvům.

4.5 Hodnocení dynamické meze kluzu

V navržené metodice výpočtu je možné určit hodnotu smykového napětí τ_s , kterou odpovídá hodnotě meze kluzu materiálu při vysokých deformačních (řezných) rychlostech. Výsledky byly zpracovány nejdříve ve formě tabulek, ve kterých jsou uvedeny podmínky zkoušek, tzn. naměřené hodnoty řezných sil, velikosti deformace a vypočtené hodnoty úhlu deformace, deformační rychlost a exponent zpevnění. Hodnoty napětí na mezi kluzu byly graficky zpracovány

v závislosti na řezné rychlosti. Tyto grafy vcelku dobře charakterizují změny, které nastávají při řezání, tj. dochází ke zpevnování, segmentaci, nebo lokalizaci deformace. Při hodnocení se postupovalo tak, že růst meze kluzu v závislosti na řezné (deformační) rychlosti znamená, že dochází ke zpevnování materiálu během řezání. Pokles meze kluzu znamená, že dochází k vyčerpání zpevňovacích schopností materiálu, dochází k lokalizaci plastické deformace a tříška se odděluje katastrofickým skluzem.

4.6 Vliv deformační rychlosti

Deformační chování materiálu při řezání se dá definovat charakteristikami jako je stabilita, nebo nestabilita plastické deformace, změnou dynamické meze kluzu nebo hodnotou exponentu zpevnění. Všechny tyto charakteristiky se mění především s řeznou rychlostí tj. s deformační rychlostí. Deformační chování materiálu je závislé na procesu zpevnování a odpevnování, který probíhá při tvoření třísky. Tvar třísky vyjadřuje tento stav deformačního chování velmi dobře tím, že tříška je plynulá, nebo cyklická. Zvláštní stav cyklické třísky je tříška, kdy dochází k lokalizaci plastické deformace. Tento stav se projeví také změnou smykového napětí, které se snižuje. Je proto možné počátek poklesu smykového napětí označit za počátek lokalizace plastické deformace.

4.7 Exponent deformačního zpevnění

Významným ukazatelem deformačního chování je exponent zpevnění. Tento exponent zpevnění je běžně určován a uváděn pro podmínky zatěžování, které odpovídají malým deformačním rychlostem. Při vysokých deformačních rychlostech se exponent zpevnění bude lišit především podle rozsahu deformační rychlosti. Pro vysoké deformační rychlosti byl použit pro exponent zpevnění symbol \bar{m} .

4.8 Hodnocení změn vlastností materiálu v důsledku změn deformační rychlosti

Významnou hodnotou, která je nutná při posuzování deformačního chování materiálu za vysokých deformačních rychlostí je hodnota tloušťky lamely třísky Δ_p , která odpovídá rovině stříhu. Tato tloušťka se dá vypočítat, nebo se dá zjistit měřením ze snímků třísek pořízených na elektronovém řádkovacím mikroskopu. Na základě vlastních měření byly vypočítány hodnoty Δ_p , tj. šířky pásma plastické deformace, což odpovídá tloušťkám lamel, které je možno odečíst i na třísce. Postup výpočtu použitý v této práci se velmi dobře shoduje s výsledky dosaženými měřeními třísek na EŘM.

4.9 Dynamické vlastnosti zkoumaných materiálů

Při hodnocení vlastností materiálů a jejich změn v důsledku růstu deformační rychlosti bylo využito zpracované metodiky. Tato umožňuje stanovit dynamickou mez kluzu i exponent deformačního zpevnění v závislosti na změně deformační (řezné) rychlosti. Současně umožňuje tento metodický postup stanovit i úhel stříhu, který je významným kritériem plastické deformace při řezání.

5 ZÁVĚR

Byla zpracována metodika hodnocení deformačního chování vybraných druhů ocelí při řezání a bylo vypracováno doporučení pro identifikaci lokalizace plastické deformace při řezání. Dosažené výsledky je možné použít jako podklad pro řešení interakce materiálu obrobku a nástroje i pro řešení dynamických vlastností materiálů za vysokých deformačních rychlostí.

Pro zkoušky byly zvoleny čtyři druhy ocelí. Ocel 12 050, 14 331, 15 241, 16 720 ve dvou stavech tepelného zpracování, normalizačně žíhaných, kalených a popuštěných na 450°C.

Na základě dosažených výsledků je možné udělat následující závěry:

Plastická deformace při řezání může být stabilní nebo nestabilní. Tento stav je závislý na zpevňovacích schopnostech materiálu. Dochází-li během řezání k deformačnímu zpevňování, je plastická deformace stabilní a projevuje se rovnoměrnou strukturou třísky. Je-li vyčerpána zpevňovací schopnost materiálu, dochází k lokalizaci plastické deformace, která se projeví segmentací třísky, průběhu plastické deformace v třísce odpovídá i průběh smykového napětí. Při deformačním zpevňování dochází k růstu tohoto napětí. Dojde-li k lokalizaci plastické deformace, hodnota smykového napětí klesá. Na průběhu závislosti smykového napětí na řezné rychlosti (deformační rychlosti) se projeví zlom, bylo prokázáno, že ocel o jedné mikrostruktuře má různé deformační chování, které se mění s různými podmínkami, především s řeznou rychlostí.

Výsledky disertační práce zaměřené na hodnocení deformačního chování materiálů při řezání prokázaly, že byly splněny cíle stanovené v zadání, které je možné dále na jejich základě doplňovat informacemi o charakteru plastické deformace a chování materiálu za vysokých deformačních rychlostí.

Jednotlivé dílčí výsledky provedené v rámci tohoto úkolu je možné shrnout v těchto výstupech:

- pro teorii obrábění

- tím, že byla vypracována metodika pro definování a stanovení obecných vztahů pro smykové napětí, deformaci, deformační rychlost a pásma deformace

- tím, že byly zpracovány postupy pro stanovení stability a nestability (lokalizace) plastické deformace a bylo prokázáno, jak tyto stavy ovlivňují řezné podmínky

- pro praxi

- tím, že byly vypočteny hodnoty smykových napětí při obrábění různých tříd ocelí normalizačně žíhaných a kalených a popuštěných, stejně jako exponenty deformačního zpevnění, případně deformační rychlosti

- tím, že byly doplněny informace pro lepší hodnocení obrobiteľnosti ocelí, které je možné využít pro rozšíření poznatků o průběhu plastické deformace při technologickém a energetickém hodnocení tvorby třísky

Praktické využití získaných znalostí je možné vidět v tom, že všechny naměřené hodnoty lze uplatnit v modelu závislosti obrobiteľnosti na různých proměnných. Do budoucna lze tuto zpracovanou metodiku aplikovat také pro stanovení plastické deformace řezných materiálů v závislosti na řezných podmínkách, a tak ji využít nejen pro úplnější hodnocení obrobiteľnosti, ale i hodnocení řezivosti.

6 SUMMARY

Metal cutting belongs to the group of complex dynamic and stochastic processes where we still lack some information on the mechanisms of phenomena accompanying it. Today the mechanisms of the phenomena accompanying the cutting process are still rather unclear, both from the economic and quality standpoints, particularly due to their accidental characteristics.

The inconsistency is essentially caused by complications and lack of familiarity with all the agents affecting the studied functional relations with different intensity, which prevents their mathematic expression in the form of simple models allowing clear solution of the whole problem area. Important technical and economic parameters of the cutting process are a long working life of the cutting tool, the way of its wear, quality of a finished surface and behaviour of material under conditions of extreme strain to which it is exposed during cutting.

The present level of knowledge of these problems is documented in a number of publications studying partial aspects of these major problems. These include in the first place a complete definition of the process of chip-creating. Although the earlier theories have been permanently further developed, elaborated, or even modified, there is still no consistent work available which would present final and convincing results as regards chip creation, a well-grounded opinion of the effects the chip creation and of other accompanying phenomena. The varying approaches to the solution of these issues are essentially due to the fact of the changing physical-mechanical properties during the cutting. These changes are affected by the arising stresses, deformation hardening, fading/weakening of hardening –all these conditions need to be considered while evaluating the process of cutting, i.e. plastic deformation which happens at high cutting velocities.

Up to now, numerous theories have been produced on creation of a chip, among them a special group of opinion represented by those concentrating on the creation of a non-continuous chip, a cyclical chip, whose creation is explained as a

catastrophic thermoplastic cut which causes periodic instability of plastic deformation in the cutting zone.

Therefore the thesis focuses on the behaviour of materials during the cutting and aims to contribute to the clear interpretation of the data relating to deformation behaviour of material under specific conditions of straining, arising during the cutting.

The aim of the thesis:

During the machining tests the conditions of the deformation behaviour of selected kinds of material will be evaluated, as well as the plastic deformation developed during the cutting. The evaluation will be carried out in two ways, based on the measurement of the coefficient of crowding/upsetting – and based on the metallographic evaluation of the chips' cross-sections. Based on the cutting process analysis, the shearing strain and shear stresses will be identified, and the findings may be used to convert the results to the direct stress and direct deformation values under dynamic loading.

The main aim of the thesis is to set up a methodical calculation procedure for the values characterizing the deformation process of cutting, and its utilization for defining the dynamic yield limit and the hardening index.

There have been methods set up for evaluating deformation behaviour in selected kinds of steel in the process of cutting and a recommendation has been made with regard to the identification and localization of plastic deformation in the cutting process. The results reached may be used as a basis for solving the interaction of a workpiece material and a tool, and also for defining the dynamic properties of materials under high deformation velocities.

There were four kinds of steel selected for the tests. Steel nos. 12 050, 14 331, 15 241 and 16 720 tested under two conditions of heat treatment, normalization-annealed, hardened and tempered to 450°C.

Based on the results reached the following may be concluded:

- Plastic deformation during cutting may be stable or unstable. This condition depends on the material's hardening abilities. If there is deformation/work hardening going on during the cutting, it proves stability of the plastic deformation, shown in the even structure of the chip. The exhaustion of the hardening ability of the material, on the other hand, is indicated by the localization of plastic deformation proved by the chip segmentation.

- The process of plastic deformation in the chip corresponds to the process of shear stress. During the deformation hardening the stress increases. If localization of plastic deformation occurs, the shear stress weakens. The curve of dependence of shear stress on cutting velocity (deformation/work velocity) shows a point of break.

- It has been proved that steel of one microstructure behaves differently in response to deformation based on different conditions, first of all depending on the cutting velocity.

The thesis' conclusions evaluating the deformation behaviour of materials during the cutting fulfil its aims and may be further developed based on the information on the character of plastic deformation and behaviour of materials under high deformation velocities.

Individual partial results reached within this task may be summed up in the following points of output:

- benefits for the machining theory following from

- Methods of defining and establishing the general relations affecting the shear stressing, deformation, deformation velocity and deformation zone.

- The procedures set up to determine stability and instability (localization) of plastic deformation – there were effects of these factors proved on the cutting conditions.

- practical benefits following from

- Calculations of shear stress value in the machining process of different classes of steel: normalization-annealed, hardened and tempered, as well as of indexes of work hardening, and of deformation velocity if applicable.

- Extending the information allowing better machinability/workability of steel that may extend the knowledge of the progress of plastic deformation during the technological and energetic/power evaluation of the chip creation.

The practical use of the knowledge acquired is offered by the fact that all the values measured may be applied to the model of dependence of machinability on different variables. In future the set-up methods may also be applied to defining the plastic deformation of cutting materials depending on the cutting conditions, and thus utilized not only in a broader evaluation of machinability but also in evaluating the cutting efficiency.

7 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Merchant, M.E.: Mechanics of metal cutting process I., Ortogonal cutting and type of chip, J. Appl. Physices, 16, 1945
- [2] Merchant, M.E.: Mechanics of metal cutting process II., Plasticity conditions in ortogonal cutting, 1945
- [3] Lee, H.E: A plasticity flow problem arising in the theory of discontinuous machining, trans. ASME, 76, 1954
- [4] Von Turkovich, B.F.: Shear stress in machining, J. Eng. Ind. 92, 1970
- [5] Veda, N., Matsuo, T.: An analysis of saw-brothed chip formation, Annals of the CIRP, 31, 1982
- [6] Recht, R.F.: Cathastrophic thermoplastic shear, J. Appl. Mech., 31, 1964
- [7] Von Turkovich, B.F.: Survey on material behaviour in machining, CIRP, Vol. 30/2, 1981
- [8] Von Turkovich, B.F.: The role of constitution equation in the theory of metal cutting, Proceedings of the 15th International Machines Tool Design and Research Conference, London, 1975
- [9] Klamecki, B.E.: Catastrophic theory models of chip formation, Trans. ASME, Journal of Eng. for Industry, Vol. 4, November 1982
- [10] Wrighte, P.K.: Predicting the shear plane angle in machining from material strain-hardening charakteristics, Trans. ASME, Journal of Eng. for Industry, Vol. 104, No. 3, August 1982
- [11] Matsumoto, Y., Barash, M.M., Liu, C.R.: Cutting mechanism during machining of hardened steel, Material Science and Technology, Vol. 3, April 1987
- [12] Ramalingam, S., Black, J.T.: An electron microscope study of chip formation, Metalurgical Transaction, Vol. 4, 1973

- [13] Recht, R.F.: A dynamic analysis of high speed machining, Trans. ASME, Journal of Eng. for Industry, Vol. 103, November 1985
- [14] Komanduri, R., Brown, R.H.: On the mechanism of chip segmentation in machining, Trans. ASME, Journal of Eng. for Industry, Vol. 103, Februar 1981
- [15] Bumbálek, B.: Obrobitelnost jako systém, Strojírnoství 36, č.11, 1986
- [16] Brown, C.A.: Strain analysis in machining using metallographic methods, Metallography, Vol. 20, No. 4, November 1987
- [17] Bumbálek, B., Novák, Z., Vala, P.: Deformační chování oceli při řezání jako podklad pro hodnocení jejich obrobitelnosti, VZ, VÚ 070, Brno, 1987
- [18] Bumbálek, B., Novák, Z., Vala, P.: Deformační chování ocelí při řezání, VZ, VÚ 070, Brno, 1989
- [19] Bumbálek, B., Novák, Z., Vala, P.: Deformační chování ocelí při řezání - oceli zušlechtěné, VZ, VÚ 070, Brno, 1990
- [20] Shaw, M.C.: Chip Formation in the Machining of Hardened Steel, Annals of the CIRP Vol. 42/1/1993 pp. 29-33
- [21] Lucca, D.A., Seo, Y.W: Aspect of Surface Generation in Orthogonal Ultraprecision Machining, Annals of the CIRP 43/1/1994 pp. 43-46
- [22] Elbestawi, M.A., Srivastava, A.K., El-Wardany, T.I.: A Model For Chip Formation During Machining of Hardened Steel, Annals of the CIRP 45/1/1996 pp. 71-76
- [23] Shaw, M.C., Vyas, A.: Mechanics of Saw-Tooth Chip Formation In Metal Cutting, ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, 121/1999, pp. 163-172
- [24] Kwon, K.B., Cho, D.W., Lee, S.J., Chu, C.N.: A Fluid Dynamic Analysis Model of the Ultra-Precision Cutting Mechanism, Annals of the CIRP 48/1/1999 pp. 43-46

8 AUTOROVO CURRICULUM VITAE

- leden 2002 Krajské státní zastupitelství Brno,
správce počítačové sítě v územním celku
- 1997 - 2002 VUT Brno, Fakulta strojního inženýrství,
Ústav strojírenské technologie,
technický pracovník odboru obrábění
- 1994 - 1997 VUT Brno, Fakulta strojní, Ústav strojírenské technologie,
interní doktorand odboru obrábění
- leden 1995 Průmyslová a obchodní komora – Drážďany,
Základy CNC a CAD/CAM techniky - DIN 66 025
- 1989 - 1994 VUT Brno, Fakulta strojní, Ústav strojírenské technologie,
Diplomová práce na téma:
Návrh technologie výroby individuální náhrady kyčelního
kloubu
- 1985 - 1989 Střední odborné učiliště strojírenské Kroměříž,
obor mechanik seřizovač s odborným zaměřením pro obráběcí
stroje a linky
- 1981 - 1985 Základní škola Komenského Kroměříž
- 1977 - 1981 Základní škola Švabinského nábřeží Kroměříž

SEZNAM PUBLIKACÍ AUTORA

- Bumbálek, B.- Kovár, L.: Deformační chování materiálu při řezání, Mezinárodní vědecká konference, VŠB-TU Ostrava, září 2000
- Kovár, L.: Metodika stanovování exponentů zpevnění žíhaných a zušlechtěných ocelí při vysokých deformačních rychlostech, grant FP 39 00 32, VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, listopad 1999
- Bumbálek, B.- Bumbálek, L.- Kovár, L.: Deformační chování materiálu a jeho vliv na namáhání nástroje, Nástroje '99, Mezinárodní konference, Zlín, říjen 1999
- Bumbálek, B.- Kovár, L.: Určování dynamických vlastností materiálu při vysokých deformačních rychlostech, veletrh IDET, Brno, květen 1999
- Bumbálek, B.- Bumbálek, L.- Kovár, L.: Příspěvek k mechanismu vytváření cyklické třísky při obrábění, Náradie '99, Mezinárodní konferencia, Trenčín, duben 1999
- Kovár, L.: Metodika určování dynamických vlastností materiálů za vysokých deformačních rychlostí měřením napětí a deformace při řezání, grant FP 38 00 07, VUT v Brně, Fakulta strojní, listopad 1998
- Bumbálek, B.- Bumbálek, L.- Kovár, L.: Identifikace stability a nestability plastické deformace při řezání, časopis Strojírenská technologie, ročník III., č.2, červen 1998
- Chladil, J.- Janský, M.- Kovár, L.– Šrubař, P.: Aplikace optimalizačního řešení řezných podmínek při obrábění rotačních součástí pro systém CAM, grant FP 37 97 27, VUT v Brně, Fakulta strojní, listopad 1997

Chladil, J.- Kovár, L.: Application of PC for Cutting Condition Optimization, CIM '97, 4th International Conference on Production Engineering, Zagreb, Hrvatska 1997

Chladil, J.- Kovár, L.: Automatic Optimatization of Cutting Conditions, ICIT '97, International Conference on Industrial Tools, Maríbor, Slovenía 1997

Chladil, J.- Kovár, L.: Aplikace PC pro optimalizaci řezných podmínek, WORKSHOP-CA systémy, Žilina 1997

Chladil, J.- Kovár, L.: Technologičnost konstrukčních prvků strojních součástí vytvářených v systémech CAD, konference Vysoká škola báňská, Ostrava 1996

Bumbálek, B.- Humár, A. - Kovár, L.: Keramické materiály a problémy jejich opracování, GA ČR 101/96/1525, VUT v Brně, Fakulta strojní, Brno 1996

Chladil, J.- Kovár, L.- Štěpán, L.: Nadstavba CAD/CAM systémů v oblasti technologické přípravy výroby, GA F-75-93, VUT v Brně, Fakulta strojní, Brno 1995