



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

SIMULACE VÁLEČKOVÁNÍ POMOCÍ EXPLICITNÍ MKP

SIMULATION OF ROLLING OPERATION USING EXPLICIT FEM

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. Martina BEZROUKOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Jan ZOUHAR, Ph.D.

BRNO 2012

ABSTRAKT

Cílem práce je uvedení do problematiky explicitních metod MKP a seznámení s komerčními programy, ve kterých je možné provádět simulace. V další části jsou specifikovány technologické podmínky a oblasti použití válečkování. Součástí této práce bylo vytvoření modelu pro simulaci válečkování. Výpočty byly provedeny v programu ANSYS LS-DYNA. V závěru jsou prezentovány výsledky simulace a technicko-ekonomický přínos metody válečkování.

Klíčová slova

Explicitní MKP, deformace, napětí, simulace válečkování, tváření za studena, úpravy povrchu výrobku, technologie, kalibrování povrchů, hlazení povrchů, zpevňování povrchů, statické válečkování, dynamické válečkování, tvářecí síla, rychlost válečkování, tvářecí elementy, nástroj, stroj

ABSTRACT

The purpose of this work is to introduce explicit finite element method (FEM) and to familiarize with commercial software tools which are capable to perform simulations. The technological conditions and the scope of application of roller burnishing are described in subsequent part. The simulation model of roller burnishing was created. Software ANSYS LS-DYNA was used to make computations. The results of simulation and technical and economical benefits of roller burnishing are presented in the conclusion.

Key words

Explicit FEM, strain, stress, simulation of rolling operation, roller burnishing, cold forming, product surface finishing, technology, surface calibration, surface smoothing, surface hardening, static roller burnishing, dynamic roller burnishing, forming force, roller burnishing speed, forming elements, tool, machine

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

BEZROUKOVÁ, Martina. *Simulace válečkování pomocí explicitní MKP*. Brno 2012. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 117 s. příloh. Vedoucí práce Ing. Jan Zouhar, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma *Simulace válečkování pomocí explicitní MKP* vypracoval(a) samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

25. 5. 2012

Datum

.....
Bc. Martina Bezrouková

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto Ing. Janu Zouharovy, Ph.D. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce.

OBSAH

Obsah	5
Úvod	7
1 Rešeršní studie	9
1.1 Explicitní metoda MKP	9
1.1.1 Základní principy explicitní MKP	9
1.1.2 Kritická hodnota časového kroku	10
1.1.3 Jednobodová integrace prvků	12
1.1.4 Hourglassing	12
1.1.5 Zaokrouhlovací chyby	13
1.1.6 Vhodné typy úloh	13
1.2 Formulace explicitní MKP	15
1.2.1 Lagrangeova formulace.....	15
1.2.2 Eulerova formulace	15
1.2.3 ALE (Arbitrary Lagrange-Euler).....	16
1.2.4 SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics).....	16
1.3 Materiálové modely v explicitní MKP	16
1.3.1 Lineárně plastický model.....	16
1.3.2 Model Johnson-Cook	17
1.4 Kritérium porušení materiálu	17
1.4.1 Kritérium Johnson-Cook.....	18
1.4.2 Kritérium redukovaného přetvoření	18
1.5 Přehled explicitních programů	19
1.5.1 ANSYS LS-Dyna	19
1.5.2 PamCrash	20
1.5.3 Abaqus	20
1.5.4 Deform	21
1.5.5 AdvantEdge.....	21
2 Základní pojmy při tváření válečkováním	22
2.1 Průběh tváření povrchu válečkováním	22
2.2 Podmínky plasticity	27
2.2.1 Podmínka plasticity HMH	27
2.2.2 Podmínka plasticity maximálního smykového napětí	28
2.3 Válečkování.....	28
2.3.1 Rozdělení technologie válečkování	30
2.3.2 Charakter působení tvářecí síly při válečkování	34
2.3.3 Pracovní podmínky.....	35
2.3.4 Další činitelé působící na kvalitu dokončované součásti	41
2.4 Tvářecí elementy	46
2.5 Nástroje používané při válečkování.....	47
2.5.1 Nástroje pro vnější válcové plochy	47
2.5.2 Nástroje pro vnitřní válcové plochy.....	48
2.5.3 Nástroje pro rovinné plochy.....	50
2.5.4 Nástroje pro tvarové plochy.....	50
2.5.5 Nástroje pro speciální použití	51
2.5.6 Hydrostatické nástroje.....	52

2.6 Stroje a zařízení	52
3 Simulace válečkování pomocí explicitní MKP	54
3.1 Vstupní podmínky válečkování pro simulaci	54
3.1 Hloubka průniku válečku do materiálu	55
3.2 Preprocessing	57
3.3 Výpočet problému v programu ANSYS LS-DYNA	61
3.4 Postprocessing	62
3.5 Generování .k souboru pro jiný tlak válečku	63
4 Praktická část: Válečkování vnitřní kuželové plochy	64
4.1 Úvod k praktické části	64
4.2 Metody a možnosti měření zbytkových napětí	64
4.2.1 Mechanické metody	64
4.2.2 Fyzikální metody	67
4.3 Vstupní podmínky válečkování pro praktickou část	67
4.4 Průběh válečkování	69
4.5 Dosažené výsledky po válečkování	70
4.6 Nástroje a zařízení použité v průběhu praktické části	71
4.6.1 Válečkovací nástroj Baublies IRG-K-3	72
4.6.2 Dotykový profiloměr Form Talysurf Intra	73
4.6.3 Univerzální hrotový soustruh SV-18-RD	74
5 Prezentace výsledků	75
5.1 Prezentace výsledků z praktické části	75
5.2 Prezentace výsledků ze simulace	75
5.2.1 Efektivní plastické přetvoření	76
5.2.2 Efektivní napětí HMM	77
5.2.3 Průběhy axiálního a tangenciálního zbytkového napětí	78
5.3 Prezentace výsledků v literatuře	81
6 Technicko - ekonomický přínos metody válečkování	83
6.1.1 Vlastnosti povrchu po válečkování	83
6.1.2 Využití technologie válečkování v praxi	83
6.1.3 Zhodnocení technologie válečkování	84
Závěr	86
Seznam použitých zkratk a symbolů	88
Seznam použitých tabulek	93
Seznam použitých obrázků	94
Seznam použitých vzorců	98
Seznam použitých zdrojů	100
Seznam příloh	108

ÚVOD

Cílem práce je uvedení do problematiky explicitních metod MKP a seznámení s komerčními programy, ve kterých je možné provádět simulace. V další části jsou specifikovány technologické podmínky a oblasti použití válečkování. Součástí této práce bylo vytvoření modelu pro simulaci válečkování. Výpočty byly provedeny v programu ANSYS LS-DYNA. V závěru jsou prezentovány výsledky simulace a technicko-ekonomický přínos metody válečkování.

První kapitola obsahuje popis explicitních metod konečných prvků. Kapitola je zaměřena na základní principy explicitní MKP a problémy, které mohou při výpočtu vzniknout. Je zde pojednáno o hourglassingu, neboli problému „přesýpacích hodin“, který se vyskytuje u prvků s jednobodovou integrací. Při řešení problému můžou vzniknout zaokrouhlovací chyby, které jsou způsobeny velkým množstvím kroků při řešení. V závěru kapitoly „Explicitní metoda MKP“ jsou uvedeny vhodné typy úloh.

Před samotným výpočtem daného problému je potřeba formulovat vhodný model sítě konečných prvků. K nejpoužívanějším formulacím patří Lagrangeova, Eulerova, ALE a SPH. Ty jsou popsány v kapitole „Formulace explicitní MKP“.

Materiálové modely používané při simulacích jsou součástí kapitol „Materiálové modely v explicitní MKP“ a „Kritérium porušení materiálu“. Uvedené materiálové modely jsou součástí programu ANSYS LS-DYNA, ve kterém byl proveden výpočet zadaného problému.

V závěru první kapitoly jsou uvedeny programy, ve kterých je možné provést simulaci daného problému pomocí explicitní MKP. Také jsou zde uvedeny jednotlivé kroky, které se při simulaci zadaného problému provádí.

Ve druhé kapitole „Základní pojmy při tváření válečkováním“ jsou uvedeny principy a základní rozdělení technologie podle výsledného účinku válečkovací metody a podle charakteru působení tvářecí síly. Jsou zde popsány jednotlivé technologické podmínky, které mají zásadní vliv na výsledný povrch dokončené součásti po válečkování.

Základní charakteristické typy válečkovacích prvků jsou uvedeny v kapitole „Tvářecí elementy“. Zde je popsáno rozdělení podle typu uložení tvářecích elementů v nástroji.

Kapitola „Nástroje používané při válečkování“ se zabývá rozdělením nástrojů podle tvaru válečkované součásti. Také je zde zmíněno válečkování nástrojem pro speciální použití a princip nástrojů, u nichž je tvářecí síla vyvolána hydraulicky.

Kapitola „Stroje a zařízení“ je zaměřena na problematiku využití strojů pro válečkovací operace a vhodnost použití válečkovací metody na obráběcích strojích.

Třetí kapitola popisuje samotnou přípravu na simulaci válečkování. Práce je rozdělena do třech částí a to na preprocessing, processing a postprocessing. Preprocessing a postprocessing byl řešen v programu LS-PrePost, processing je řešen v programu ANSYS LS-DYNA.

Ve čtvrté kapitole je popsána praktická část, ve které se vnitřní kuželová plocha dokončuje technologií válečkování. Začátek kapitoly je věnován možnostem měření zbytkových napětí, které se vyšetřují i při simulaci v programu LS-Dyna. V další části jsou uvedeny podmínky, za kterých válečkování proběhlo. Na podmínky válečkování navazuje kapitola, která obsahuje fotografie z průběhu válečkování a popis samotného procesu. Závěr kapitoly tvoří výsledky povrchu po měření dotykovým profiloměrem Form Talysurf Intra a použité nástroje a zařízení v průběhu praktické části.

Pátá kapitola obsahuje shrnutí dosažených výsledků v simulaci a v experimentu. Dosažené výsledky jsou zde porovnány s literaturou.

V závěrečné kapitole „Technicko – ekonomický přínos metody válečkování“ je srovnání s konvenčními technologiemi dokončování strojních součástí. Jejich efektivní využití, úspora nákladů a užitná hodnota dokončené strojní součásti.

1 REŠERŠNÍ STUDIE

1.1 Explicitní metoda MKP

Metoda konečných prvků (MKP nebo FEM - finite element method) byla vyvinuta pro numerické řešení napjatosti, deformace, teplotních polí, hlukové analýzy atd. MKP patří mezi variační metody.

Metodou MKP se nahrazuje objem tělesa souborem geometricky jednoduchých podoblastí, tzv. konečných prvků. Tyto konečné prvky dávají dostatečně přesnou aproximaci povrchu tělesa^{6, 59}.

Vývoj explicitní metody MKP začal v šedesátých letech dvacátého století, kdy na univerzitách začaly vznikat první naprogramované kódy. První řešení úloh probíhalo ve 2D. S vývojem výpočetní techniky se v sedmdesátých letech začínají řešit i 3D úlohy. V současné době patří k nejrozšířenějším explicitním programům PamCrash, LS-Dyna, Abaqus/Explicit, Deform, Advantedge a další^{3, 13, 24, 42}.

1.1.1 Základní principy explicitní MKP

Základním principem explicitní MKP je užití druhého Newtonova zákona přeepsaného do maticové podoby a definovaného v určitém okamžiku. Dynamická rovnováha nastane v případě, pokud je splněn následující vztah (1.1)^{3, 10, 13, 24, 42}.

$$\{a_t\} = [M]^{-1} (\{F_t^{\text{ext}}\} - \{F_t^{\text{int}}\}) \quad 1.1$$

kde: $\{a_t\}$ [m/s²] - vektor zrychlení v čase t,
 $[M]$ [kg] - matice hmotnosti,
 $\{F_t^{\text{ext}}\}$ [N] - vektor aplikovaných sil v čase t,
 $\{F_t^{\text{int}}\}$ [N] - vektor vnitřních sil v čase t interpretovaný vztahem (1.2).

$$\{F_t^{\text{int}}\} = \sum \left(\int_{\Omega} [B]^T \{\sigma_n\} d\Omega + \{F^{\text{hg}}\} \right) + \{F^{\text{cont}}\} \quad 1.2$$

kde: $\{F^{\text{cont}}\}$ [N] - vektor kontaktních sil,
 $\{F^{\text{hg}}\}$ [N] - vektor tlumících sil hourglassingu,
 $[B]$ [-] - prvková matice tvarových funkcí přetvoření,
 $\{\sigma_n\}$ [MPa] - prvková matice vnitřních napětí.

Rychlosti vypočítáme ze vztahu (1.3)^{3, 10, 42}.

$$\left\{ v_{t+\frac{\Delta t}{2}} \right\} = \left\{ v_{t-\frac{\Delta t}{2}} \right\} + \{a_t\} \frac{\Delta t_t + \Delta t_{t+\Delta t}}{2} \quad 1.3$$

kde: $\{a_t\}$ [m/s²] - vektor zrychlení v čase t,
 Δt_t [s] - velikost časového kroku,

$\{v_t\}$ [m/s] - vektor rychlosti v čase t .

Posuvy dostaneme ze vztahu (1.4)^{3, 10, 42}.

$$\{u_{t+\Delta t}\} = \{u_t\} + \left\{v_{t+\frac{\Delta t}{2}}\right\} \Delta t_{t+\Delta t} \quad 1.4$$

kde: $\{u_t\}$ [m] - vektor posunutí v čase t ,
 Δt_t [s] - velikost časového kroku,
 $\{v_t\}$ [m/s] - vektor rychlosti v čase t .

V dalším časovém kroku se geometrie, přidáním posuvů k původní geometrické konfiguraci, změní (1.5)^{3, 10, 42}.

$$\{x_{t+\Delta t}\} = \{x_0\} + \{u_{t+\Delta t}\} \quad 1.5$$

kde: $\{x_t\}$ [m] - poloha vektoru v čase t ,
 $\{x_0\}$ [m] - výchozí poloha vektoru,
 $\{u_t\}$ [m] - vektor posunutí v čase t .

Předchozí rovnice vyjadřují rovnováhu v uzlech a stanovují jejich posuvy, rychlosti a zrychlení. V dalších krocích se počítá změna přetvoření prvků $d\varepsilon$ z rychlosti deformace $\dot{\varepsilon}$ a pomocí konstitutivních vztahů (1.6) se stanoví napětí σ ^{3, 10, 42}.

$$\sigma_{t+\Delta t} = f(\sigma_t, d\varepsilon) \quad 1.6$$

kde: σ_t [MPa] - napětí v čase t ,
 $d\varepsilon$ [-] - změna přetvoření prvků.

Následně se spočítá nový vektor vnitřních sil pro uzly. Veličiny s označením $t + \Delta t$ se přeznačí na t a výpočet pokračuje do dalšího kroku.

1.1.2 Kritická hodnota časového kroku

Explicitní algoritmus je podmíněně stabilní, což je jeho největší nevýhodou. To znamená, že stabilních výsledků dosáhneme pouze tehdy, pokud časový krok nepřekročí svoji kritickou hodnotu. Kritická hodnota Δt^{crit} je definována jako čas, za který čelo napěťové vlny projde přes element a je dána vztahem (1.7)^{3, 10, 13, 24, 42}.

$$\Delta t \leq \Delta t^{\text{crit}} = \frac{2}{\omega_{\text{max}}} \quad 1.7$$

kde: Δt [s] - časový krok,
 Δt^{crit} [s] - kritický časový krok,
 ω_{max} [s⁻¹] - nejvyšší vlastní frekvence prvku, která je dána vztahem (1.8)^{3, 10, 13, 24, 42}.

$$\omega_{\max} = \frac{2c}{l} \quad 1.8$$

kde: c [m/s] - rychlost šíření vlnění v materiálu,
 l [m] - charakteristický rozměr prvku (hrana prvku),

Kritickou hodnotu Δt^{crit} je možné vyjádřit vztahem (1.9)^{8, 10, 13, 58, 62}.

$$\Delta t \leq \Delta t^{\text{crit}} = \frac{l}{c} \quad 1.9$$

kde: Δt [s] - časový krok,
 Δt^{crit} [s] - kritický časový krok,
 l [m] - charakteristický rozměr prvku (hrana prvku),
 c [m/s] - rychlost šíření vlnění v materiálu, které je dáno vztahem (1.10)^{8, 58, 62}.

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad 1.10$$

kde: E [MPa] - modul pružnosti,
 ρ [kg/m³] - hustota materiálu.

Po dosazení dostáváme vztah (1.11)^{3, 8, 10, 24, 42}.

$$\Delta t^{\text{crit}} = l * \sqrt{\frac{\rho}{E}} \quad 1.11$$

kde: E [MPa] - modul pružnosti,
 ρ [kg/m³] - hustota materiálu,
 l [m] - charakteristický rozměr prvku (hrana prvku).

Z rovnice (1.11) je patrné, že délka časového kroku a tím i rychlost výpočtu je závislá přímo úměrně na velikosti prvku, na druhé odmocnině hustoty a nepřímo úměrně na druhé odmocnině modulu pružnosti v tahu (čili tuhosti materiálu)^{3, 10, 13, 24, 42}.

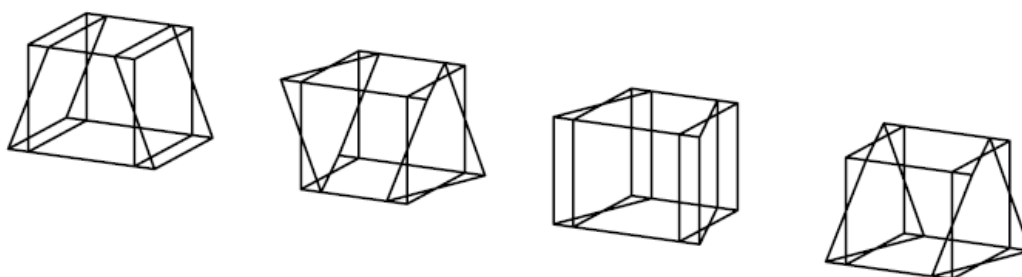
Řešič si časový krok určuje sám. Postupně projde všechny prvky a z jejich rozměru a materiálových vlastností určí jednotlivé kritické časové kroky. Pro výpočet se potom použije ten nejmenší a z důvodu zlepšení stability se ještě sníží o 10%.

Pokud se tedy v síti vyskytuje pouze jeden jediný výrazně menší prvek, tak se čas výpočtu kvůli tomuto prvku významně prodlouží. Z toho vyplývá, že pro explicitní metodu MKP musí být obzvlášť pečlivě vytvářena síť konečných prvků s co nejmenšími rozdíly ve velikosti prvků^{3, 10, 13, 24, 42}.

1.1.3 Jednobodová integrace prvků

V explicitně řešených úlohách se obvykle využívají prvky s jedním Gaussovým integračním bodem. Použití jednobodové integrace zjednoduší metodu a uspoří výpočtové časy. Prvky jsou díky této vlastnosti vhodné pro velké deformace sítě. V tomto jediném bodě se zaznamenává hodnota napětí a vyhodnocuje se v něm energie. Nevýhoda jednobodové integrace je ve snížení numerické stability oproti vícebodové integraci^{3, 10, 13, 24, 42}.

Problém se vyskytne, pokud se element začne deformovat symetricky kolem Gaussova bodu, (viz Obr. 1.1) takže tato deformace nemá vliv na vnitřní energii prvku, ale má vliv pouze na geometrii prvků a tudíž i na celé těleso. Toto chování je nepřirozené, protože ve skutečnosti dochází k tomu, že každé deformaci přísluší odpovídající změna vnitřní energie^{3, 10, 13, 24, 42}.

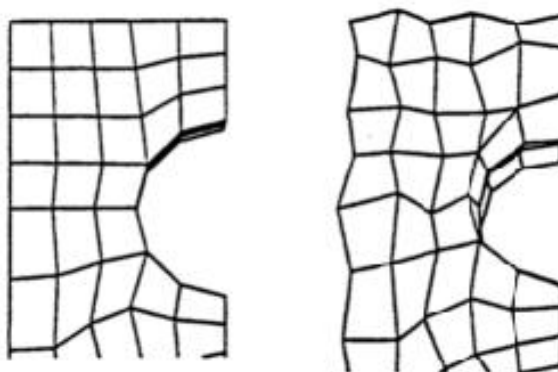


Obr. 1.1 Stavby deformace prostorového prvku s jedním integračním bodem s nulovou vnitřní energií^{3, 24, 42}.

Tento problém je čistě numerický a do výsledného výpočtu vnáší chybu. Pro charakteristickou deformaci sítě se o jevu hovoří jako o hourglassingu.

1.1.4 Hourglassing

Hourglassing neboli také problém „přesýpacích hodin“ se vyskytuje u prvků s jednobodovou integrací. Hourglassing je deformační mód, který se vyznačuje nulovou energií kmitající s frekvencí mnohem větší než je celková odezva struktury. Hourglassing má nulovou tuhost a projevuje se, jako cikcak deformace sítě konečných prvků (viz Obr. 1.2.) Při hourglassingu může dojít ke znehodnocení výsledků až ke zhroucení výpočtu a proto by měl být vždy minimalizován^{3, 10, 13, 24, 42, 44, 61}.



Obr. 1.2 Hourglassingem znehodnocená konečně-prvková síť⁴⁴.

K omezení hourglassingu přispívají následující činitelé:

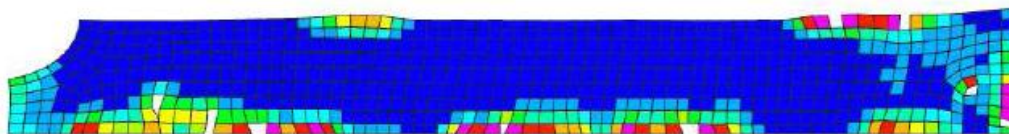
- používání spojitých zatížení – při bodovém zatížení se často vyskytuje hourglassing. Je dobré rozložit zatížení na několik sousedních prvků,
- zjemnění konečně-prvkové sítě – často vede k poklesu energie hourglassingu, ale prodlužují se časy výpočtu a vzrůstá objem dat úlohy,
- používání plně integrovaných elementů – použitím integrovaných elementů zcela zamezíme hourglassingu, ale opět se prodlužují časy výpočtu. Integrované elementy jsou tužší oproti skutečnosti, a proto mohou být výsledky méně přesné,
- zvýšení viskozity – používá se při problémech, kde je deformace vysoká například u rázových vln,
- zvýšení tuhosti - vhodné pro nižší rychlosti deformace – například při tváření^{3, 10, 13, 24, 42, 44, 61}.

Výskyt hourglassing je ve výpočtech nežádoucím jevem a je potřeba jej minimalizovat. Za mezní hodnotu energie hourglassingu se považuje 5% celkové vnitřní energie soustavy. S hourglassingem je třeba počítat již při samotném návrhu konečně-prvkového modelu.

1.1.5 Zaokrouhlovací chyby

Při řešení problému explicitní metodou je třeba velké množství kroků. Řádově to jsou desítky až stovky tisíc cyklů. Při takovém množství kroků mohou mít nasčítané zaokrouhlovací chyby vliv na přesnost řešení. Vliv chyb se může někdy projevit ukončením výpočtu nebo jindy může materiál explodovat, (viz Obr. 1.3). Proto se v instalacích nacházejí řešiče obvykle ve dvou variantách^{3, 10, 42}.

- single precision (jednoduchá přesnost),
- double precision (dvojitá přesnost).



Obr. 1.3 Nestabilita způsobená zaokrouhlovacími chybami^{3, 42}.

Kvůli zaokrouhlovacím chybám nemusí některé úlohy konvergovat ve standardním řešiči. Pokud se použije řešič s dvojitou přesností, potom je problém s konvergencí odstraněn. Jestliže ovšem počet kroků dosáhne určité kritické hodnoty (například 3 000 000), tak nás od problémů se zaokrouhlovacími chybami neochrání ve většině případů ani řešiče s dvojitou přesností^{3, 10, 42}.

1.1.6 Vhodné typy úloh

Explicitní metoda konečných prvků byla od svého vzniku v šedesátých letech vyvíjena pro rychlé dynamické děje. Výhodou explicitní MKP je, že v oblasti

velkých nelinearit (geometrických, kontaktních, deformačních a materiálových) má velkou stabilitu. Explicitní MKP je využívána pro přechodové děje, které probíhají ve velmi krátkých časových úsecích, při balistických testech, simulacích výbuchu a jiných typech úloh^{3, 10, 13, 42}. Řešení v explicitních programech je vhodné pro tyto typy úloh:

- rychlé dynamické děje (rázové děje),
- složité kontaktní úlohy,
- úlohy stability (ztráta stability),
- silně nelineární kvazi-statické úlohy,
- materiály s degradací a porušováním^{3, 10, 13, 42}.

Rychlé dynamické děje

V explicitních programech je řešení rychlých dynamických dějů efektivnější, jelikož z důvodů časové náročnosti výpočtu je použití implicitních programů nevhodné. Dynamické chování soustavy je ovlivněno tlakovými vlnami, které se materiálem šíří rychlostí zvuku. Vzhledem k této skutečnosti je potřeba použít velmi mnoho malých časových kroků k dosažení dostatečně přesného výsledku. Příkladem dynamického chování by mohla být odezva součásti (materiálu) na tlakovou vlnu způsobenou výbuchem či jiným rázovým zatížením^{3, 13, 42}.

Složité kontaktní úlohy

Definování kontaktních povrchů je v explicitních metodách snadnější. U většiny explicitních programů se zadají pouze komponenty, mezi kterými se kontakt uskuteční. Program si potom automaticky detekuje volný povrch a zahrne kontaktní síly do vektoru vnitřních sil. Při složitých kontaktních úlohách s více tělesy to usnadňuje definování problému. Příkladem by mohl být pád spotřebiče, zabaleného do ochranného obalu z polystyrénu, který se při pádu rozlomí^{3, 13, 42}.

Úlohy stability

Při řešení úloh dochází ke změnám tuhosti a deformace součásti v krátkém časovém úseku. V určitém okamžiku malý nárůst síly vyvolá velkou deformaci, čili dojde k výraznému snížení tuhosti. Úlohy jsou mnohdy doprovázeny složitým kontaktem ploch^{3, 13, 42}.

Silně nelineární kvazi-statické úlohy

V oblasti nelinearit jsou explicitní metody velmi stabilní. I když se jedná o úlohy v podstatě statické, musíme se při těchto technologických procesech vypořádat s řadou dalších problémů, které nejsou jednoduché. Při objemovém tváření dochází k velkým deformacím, u protahování, válcování, kování a u plošného tváření není jednoduchá simulace jejich kontaktu. Je nutné se vypořádat s vysokými membránovými napětími, vlněním plechu a složitými třecími podmínkami^{3, 13, 42}.

Materiály s degradací a porušováním

Explicitní kódy umožňují zahrnout do materiálových vlastností degradaci a porušování. Této vlastnosti se využívá při šíření trhlin a při technologických operacích jako je stříhání, obrábění či řezání^{3, 13, 42}.

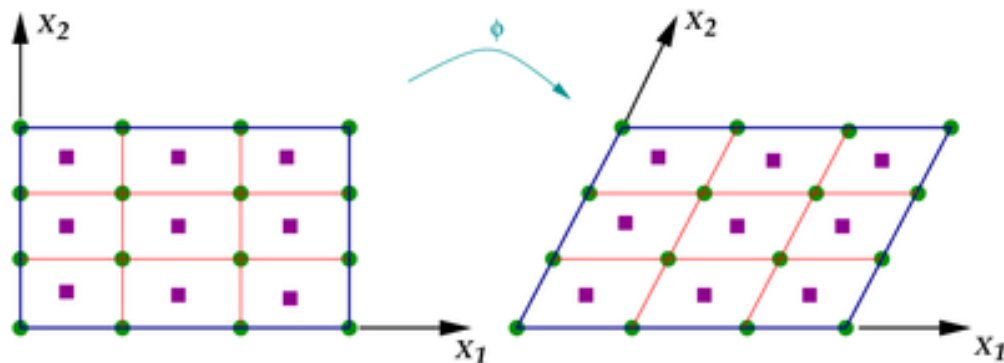
1.2 Formulace explicitní MKP

Před samotným výpočtem daného problému je potřeba formulovat vhodný model sítě konečných prvků. K nejpoužívanějším formulacím patří^{2, 24, 35}:

- Lagrangeův,
- Eulerův,
- ALE (Arbitrary Lagrange-Euler),
- SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics).

1.2.1 Lagrangeova formulace

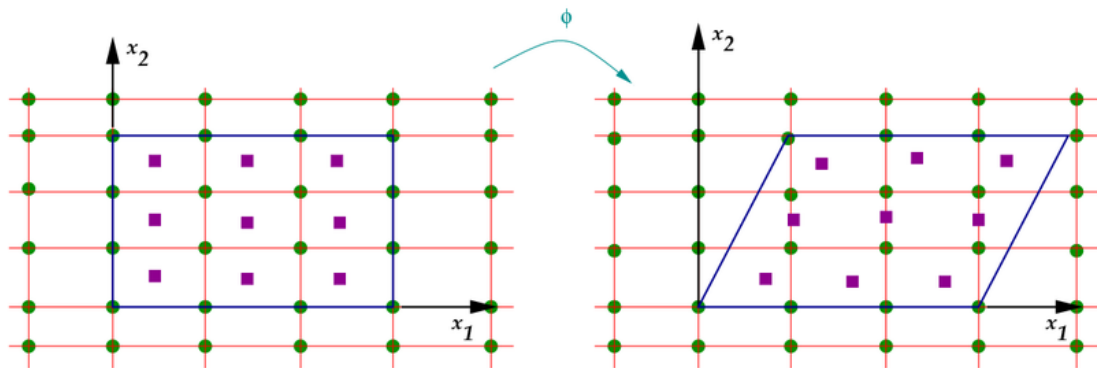
V Lagrangeově formulaci je síť pevně spojená s materiálem a deformuje se společně s ním. V simulacích pomocí Lagrangeovi formulace se pohybují uzly spolu s materiálem. Proto jsou známy okamžité hodnoty a historie zatěžování v každém elementu materiálu. Nevýhodou Lagrangeovy formulace je nárůst časového kroku což zvyšuje výpočetní zátěž a ztrátu stability při velkých zkrouceních elementu. Tyto problémy občas vyžadují regeneraci sítě a mají za následek nepřesnost analýzy. Tato formulace je vhodná pro malé zkroucení a velké deformace. Model je vhodný pro simulaci obrábění kovů. Lagrangeova formulace je zobrazena na Obr. 1.4^{2, 24, 35}.



Obr. 1.4 Grafické zobrazení Lagrangeovy formulace při natočení prvku o úhel φ . Modrá linka - okraj prvku, zelené body - uzly, fialové body - materiálové body, oranžové čáry – síť konečných prvků⁷⁹.

1.2.2 Eulerova formulace

Eulerova formulace se vyznačuje tím, že se materiál volně pohybuje skrz síť. Oblast pro deformace je nutné vytvořit větší než je výchozí síť. To vylučuje možnost modelování neomezeného toku materiálu. Nevýhodou je velký výpočetní čas a nutnost jemné sítě. Po celou dobu simulace se tvar sítě konečných prvků nemění, a proto není potřeba ji přegenerovat v průběhu simulace. Toto je hlavní výhodou z hlediska výpočetní efektivity. Metoda je vhodnější pro problémy mechaniky tekutin, spíše než pro obrábění. Eulerova formulace je zobrazena na Obr. 1.5^{2, 24, 32, 35}.



Obr. 1.5 Grafické zobrazení Eulerova formulace při natočení elementu o úhel ϕ . Modrá linka - okraj prvku, zelené body - uzly, fialové body - materiálové body, oranžové čáry – síť konečných prvků⁷⁹.

1.2.3 ALE (Arbitrary Lagrange-Euler)

Metoda ALE vhodně kombinuje vlastnosti Lagrangeovi a Eulerovi analýzy. Soustava není upevněna v prostoru ani připojena k materiálu. Proto se může síť pohybovat libovolně a optimalizovat tvary prvků, zatímco síť na hranicích se může pohybovat spolu s materiálem. Formulace ALE může být použita na mnoho technických problémů, například na tváření kovů, odlévání, obrábění, přenos tepla, proudění tekutin apod.^{24, 32, 35, 38, 71}

1.2.4 SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics)

SPH formulace nevyužívá síť konečných prvků a tímto se odlišuje od uvedených metod. Zásadní rozdíl je v aplikaci rovnic na sousedící částice nikoliv na pevně spojené body v elementech. Materiálové vlastnosti jsou definovány na diskretních oblastech, kterým říkáme SPH částice. Výhodou metody SPH je, že nemá pevně spojené body. A proto se vyhne problému s nepřesností a nestabilitou spojenou se zachováním integrity a kvality sítě při velkých deformacích. Metoda se používá ve fluidním inženýrství, při simulaci obráběcích procesů a jiných dynamických jevů^{4, 24}.

1.3 Materiálové modely v explicitní MKP

Pomocí obecných rovnic je do programu MKP implementováno chování materiálu při simulacích. Tyto rovnice vystihují chování implementovaného materiálu za daných zatížení^{24, 19}.

V této kapitole je popsán model Johnson-Cook a lineárně plastický model. Tyto modely jsou součástí programu ANSYS LS-DYNA^{24, 19}.

1.3.1 Lineárně plastický model

Material Piecewise Linear Plasticity - tento model popisuje elasticko-plastické vlastnosti materiálu na základě křivky napětí-přetvoření a rychlosti přetvoření^{24, 19}.

Rychlost přetvoření může být definována pomocí Cowper-Symondova modelu, který násobí mez pružnosti faktorem (1.12)^{8, 24}.

$$f_{cs} = 1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C}\right)^{\frac{1}{p}} \quad 1.12$$

kde: $\dot{\epsilon}$ [s⁻¹] - rychlost přetvoření,
 C [-] - konstanta Cowper-Symondova modelu,
 p [-] - konstanta Cowper-Symondova modelu.

1.3.2 Model Johnson-Cook

Materiálový model Johnson-Cook byl vyvinut v 80. letech pro studium průstřelů, rázů a problematiky výbušnin³. Tento materiálový model lze použít na problémy vysokých rychlostí deformace a vysokých přetvoření⁴⁵. Zpevnění materiálového modelu je závislé na rychlosti deformace a teplotě dle vztahu (1.13)^{8,29,31}.

$$\sigma_y = [A + B \cdot (\bar{\epsilon}^p)^n] \cdot \left[1 + C \ln\left(\frac{\dot{\bar{\epsilon}}^p}{\dot{\epsilon}^0}\right)\right] \cdot \left[1 - \left(\frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}}\right)^m\right] \quad 1.13$$

kde: σ_y [MPa] - zpevnění materiálového modelu,
 A [MPa] - materiálová konstanta modelu materiálu Johnson - Cook,
 B [MPa] - materiálová konstanta modelu materiálu Johnson - Cook,
 C [-] - materiálová konstanta modelu materiálu Johnson - Cook,
 m [-] - materiálová konstanta modelu materiálu Johnson - Cook,
 n [-] - materiálová konstanta modelu materiálu Johnson - Cook,
 $\bar{\epsilon}^p$ [-] - redukované plastické přetvoření,
 $\dot{\bar{\epsilon}}^p$ [s⁻¹] - rychlost redukovaného plastického přetvoření,
 $\dot{\epsilon}^0$ [s⁻¹] - počáteční bezrozměrná rychlost redukovaného přetvoření,
 T [°C] - okamžitá teplota,
 T_{melt} [°C] - teplota tavení materiálu,
 T_{room} [°C] - pokojová teplota.

Materiálové konstanty A , B , C , m , n se zjišťují na základě experimentálních měření a současných počítačových simulací. Tyto konstanty jsou k dispozici v knihovně materiálu AUTODYN⁴⁵. Podkladem pro vyhodnocení křivky napětí-přetvoření ve smluvních hodnotách jsou výstupy z tahových zkoušek^{3, 24, 35, 42}.

1.4 Kritérium porušení materiálu

V této kapitole jsou uvedeny modely Johnson-Cook a Kritérium redukovaného přetvoření, které jsou součástí programu ANSYS. Kritérium redukovaného přetvoření je jednoduché jednoparametrické kritérium. Naopak Johnson-Cook kritérium patří mezi nepoužívanější víceparametrická kritéria^{3,13,42}.

1.4.1 Kritérium Johnson-Cook

V literatuře je toto kritérium porušení zmiňováno často. Kritérium Johnson-Cook se může využívat při simulacích obrábění či při penetračních zkouškách. Toto kritérium se uplatní i při velkých rychlostech deformace. Jelikož je toto kritérium obsaženo v programu ANSYS, je zde tento model popsán^{3, 13, 37, 42}. K lomu dojde, pokud lomový parametr D dosáhne jednotkové velikosti podle rovnice (1.14)²⁹.

$$D = \sum \frac{\Delta \bar{\epsilon}^p}{\epsilon^f} \quad 1.14$$

kde: D [-] - lomový parametr,
 $\Delta \bar{\epsilon}^p$ [-] - přírůstek redukovaného plastického přetvoření,
 ϵ^f [-] - lomové přetvoření, které je definováno rovnicí (1.15)²⁹.

$$\epsilon^f = [D_1 + D_2 \exp(D_3 \eta)] \cdot \left[1 + D_4 \ln \left(\frac{\dot{\bar{\epsilon}}^p}{\dot{\bar{\epsilon}}^0} \right) \right] \cdot \left[1 + D_5 \cdot \left(\frac{T - T_{\text{room}}}{T_{\text{melt}} - T_{\text{room}}} \right) \right] \quad 1.15$$

kde: $D_1, D_2, D_3,$
 D_4, D_5 [-] - materiálová konstanta modelu materiálu Johnson - Cook,
 $\dot{\bar{\epsilon}}^p$ [s^{-1}] - rychlost redukovaného plastického přetvoření,
 $\dot{\bar{\epsilon}}^0$ [s^{-1}] - referenční rychlost redukovaného přetvoření,
 T [$^{\circ}\text{C}$] - okamžitá teplota,
 T_{melt} [$^{\circ}\text{C}$] - teplota tavení materiálu,
 T_{room} [$^{\circ}\text{C}$] - pokojová teplota,
 η [-] - parametr triaxiality, které je definováno rovnicí (1.16)²⁹.

$$\eta = \frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}} \quad 1.16$$

kde: σ_m [MPa] - makroskopické hydrostatické napětí,
 $\bar{\sigma}$ [MPa] - makroskopické HMM ekvivalentní napětí.

Z numerických simulací podle literatury²⁹ vyplynulo, že materiálové konstanty D_4 a D_5 nemají podstatný vliv na proces oddělování třísky od materiálu. Materiálové konstanty D_1, D_2, D_3 jsou experimentálně zjištěny z tahových zkoušek²⁹.

1.4.2 Kriterium redukovaného přetvoření

Podle tohoto kritéria nastane tvárné porušení v okamžiku, kdy redukované přetvoření v daném místě dosáhne své kritické hodnoty $\bar{\epsilon}_{\text{krit}}$ (1.17)²⁴.

$$\bar{\epsilon} = \bar{\epsilon}_{\text{krit}} \quad 1.17$$

kde: $\bar{\epsilon}$ [-] - ekvivalentní plastické přetvoření,
 $\bar{\epsilon}_{\text{krit}}$ [-] - kritické ekvivalentní plastické přetvoření.

Kritérium redukovaného přetvoření vzniklo počátkem 20. století a je implementováno ve všech hlavních komerčních programech. Kritérium je velmi jednoduché na pochopení, na použití i na kalibraci. Redukované přetvoření při lomu závisí na stavu napjatosti, a proto není zcela korektní^{3, 13, 42}.

1.5 Přehled explicitních programů

Všechny uvedené programy využívají metodu konečných prvků a je v nich možné provádět simulace:

- Ansys LS-Dyna,
- PamCrash,
- Abaqus,
- Deform,
- AdvantEdge.

Práci v simulačních programech je možné rozdělit do tří základních fází⁵⁹:

- **preprocessing** – v preprocessingu se vytvoří model nebo se geometrie importuje z CAD systému, určí se materiálové konstanty, parametry pracovního procesu, parametry stroje apod.,
- **processing** – zde dochází k vlastnímu výpočtu s vlastnostmi implementovanými do systému,
- **postprocessing** – v postprocessingu se zobrazují výsledky provedené analýzy.

1.5.1 ANSYS LS-Dyna

Program ANSYS je produktem americké společnosti ANSYS, Inc., která vznikla v roce 1970. Program prošel za tuto dobu dlouhým vývojem. Firma ANSYS, Inc. má od roku 2009 certifikaci ISO 9001^{16, 72}.

Programový balík ANSYS je založený na metodě konečných prvků a je určen pro řešení rozsáhlých lineárních i nelineárních (fyzikálně i geometricky) úloh mnoha různých kategorií: strukturální, teplotní, teplotně-mechanické, elektromagnetické, akustické atd^{66, 83}.

Řešič LS-Dyna se spustí pomocí aplikace Configure ANSYS Products nebo se může vytvořit krátký spouštěcí soubor start.bat, který obsahuje 2 řádky. Nejprve se přesuneme do adresáře s výpočtem³:

```
CD /D "D:\Vypocty\Grant\LS-Dyna" a potom se spustí řešič ls970.exe
```

```
"C:\Program Files\Ansys Inc\v81\ANSYS\bin\Intel\ls970.exe" PR=DYNA  
i="upsetting.k" MEMORY=48500000
```

V průběhu výpočtu se může stisknutím kláves CTRL+C pozastavit výpočet. Poté je možné vložit kód, který ovlivní chování řešiče^{3,42}:

- sw1:** zapsání restart-souboru a ukončení výpočtu,
- sw2:** zjištění doby výpočtu, počtu cyklů, časového kroku,
- sw3:** zapsání restart-souboru, výpočet pokračuje,

sw4: zapsání výsledkového stavu, výpočet pokračuje.

Výsledky je možné si prohlédnout v prostředí ANSYS nebo pomocí programu lepost.

1.5.2 PamCrash

Průmyslově orientovaný softwarový systém PAM-CRASH je od firmy ESI Group. Francouzská firma ESI Group byla založena v roce 1973. V roce 2000 získala firma certifikát ISO 9001⁵².

Program je určený pro bezpečný návrh dopravních prostředků, výkonné numerické simulace testu mechanických struktur a provádění standardních bariérových testů. PAM-CRASH je založen na numerických metodách používající explicitní MKP⁸⁴.

Vstupní podmínky jako je geometrie těles, materiálové parametry těles, rychlosti, nastavení polohy těles se mohou specifikovat v grafickém prostředí preprocesoru (PAM-GENERIS)⁷⁸.

Výstupem programu PAM-CRASH jsou tři soubory. První je protokolem úloh s příponou *.out* a je v ASCII kódu. Tento soubor obsahuje i případné chyby. Další dva soubory jsou binární a jsou s příponami *.dsy* a *.thp*. V těchto souborech jsou uložena data pro postprocesor (PAMVIEW). Před zpracováním dat je nutné se přesvědčit, zda úloha skončila správně. To se zjistí na posledním řádku souboru *vstup.out*^{78, 84}.

Preprocesor i postprocesor jsou vybaveny nabídkovým menu, které umožní uživateli konkretizovat své požadavky. Uživatel s ním pracuje interaktivně pomocí myši a klávesnice⁷⁸.

1.5.3 Abaqus

Výrobcem programu ABAQUS je americká společnost ABAQUS, Inc. Firma nabízí řešení v oblasti lineárních, nelineárních, explicitních a multi-bodových dynamických problémů. Společnost byla založena v roce 1978 a v roce 2005 se stala součástí společnosti Dassault Systèmes^{16, 74, 75}.

Systém ABAQUS se sestává z preprocesoru (ABAQUS/Pre), vlastního řešení a postprocesoru (ABAQUS/Post). Tyto moduly spolu navzájem nekomunikují a jsou samostatné a nezávislé^{42, 77}.

Abaqus se ovládá pomocí příkazového řádku. Nejčastěji používané příkazy v programu Abaqus jsou^{3, 42}:

Zobrazení informací o programu (help):	abaqus help,
Spouštění výpočtu:	abaqus job=jméno interactive,
Prohlížení výsledků:	abaqus view,
Ukončení běžícího výpočtu:	abakus terminate.

1.5.4 Deform

Program vlastní firma Scientific Forming Technologies Corporation (SFTC) z USA. Program DEFORM je zkratkou slov Design Environment for Forming^{50, 76}.

Původní oblastí použití programu Deform byly tvářecí operace kovů. Program je možné využít k simulaci následujících operací^{42, 54}:

Tváření: kování, lisování, válcování apod.

Obrábění: soustružení, frézování, vrtání atd.

Teplné zpracování: kalení, popouštění, stárnutí atd.

V programu je třeba nastavit parametry obrobku a geometrie nástroje. V dalším kroku se nastavuje velikost sítě, uzlové okrajové podmínky a vzájemné působení obrobku a nástroje⁴².

Postprocesor (FLOWNET nebo WINDOW) v programu umožňuje vizualizaci řešeného problému a také grafický výstup⁷⁶.

1.5.5 AdvantEdge

Výrobce programu AdvantEdge je americká společnost Third Wave System. Program AdvantEdge využívá metodu konečných prvků⁷⁰.

V programu je možné simulovat 2D a 3D obráběcí operace. Mezi obráběcí operace patří soustružení, frézování, vrtání, řezání, drážkování, protahování⁷⁰. Zadávání vstupních podmínek jako je vložení materiálu, nástroje, geometrie obrobku tak i procesních parametrů je uživatelsky jednoduché. U složitých geometrií je možné použít import. V programu AdvantEdge je využita adaptivní tvorba sítě, která zlepší přesnost řešení v oblasti vysokých deformací⁴².

2 ZÁKLADNÍ POJMY PŘI TVÁŘENÍ VÁLEČKOVÁNÍM

Technologie tváření patří do oblasti beztržiskových technologií a rozděluje se do dvou základních skupin a to:

- plošné tváření,
- objemové tváření.

Válečkování se podle vztahu deformační zóny k objemu polotovaru řadí do skupiny objemového tváření. Objemové tváření lze dále rozdělit do čtyř dalších skupin a to:

- kování (pěchování),
- válcování,
- protlačování,
- tažení.

Válečkování se řadí do podskupiny válcování. Při válečkování součásti vznikají vnější účinky. Za tyto účinky jsou považovány vnější síly a teplota. Vnější účinky vyvolávají pod povrchem tvářené součásti napětí. Z hlediska časového působení síly na povrch rozlišujeme statické (stálé a proměnné) a dynamické válečkování⁶⁸.

2.1 Průběh tváření povrchu válečkováním

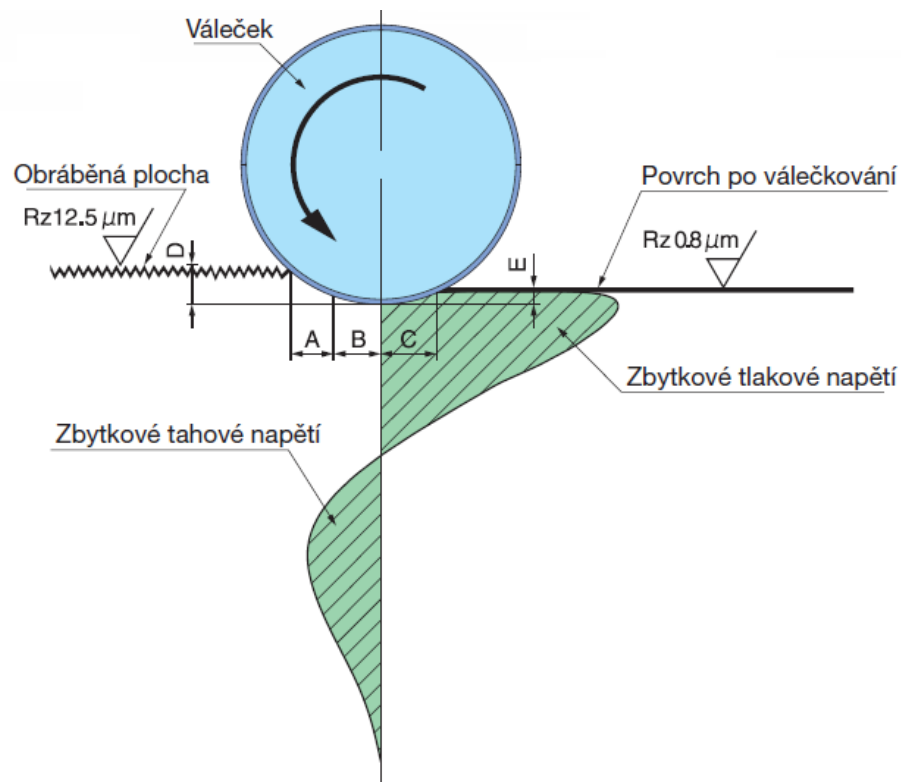
Na Obr. 2.1 je zobrazen průběh válečkování povrchu součásti. Tento průběh je možné rozdělit do několika částí:

- **A** - tlaková zóna,
- **B** - zóna plastické deformace,
- **C** - vyhlazovací zóna,
- **D** - velikost stlačení,
- **E** - pružná deformace.

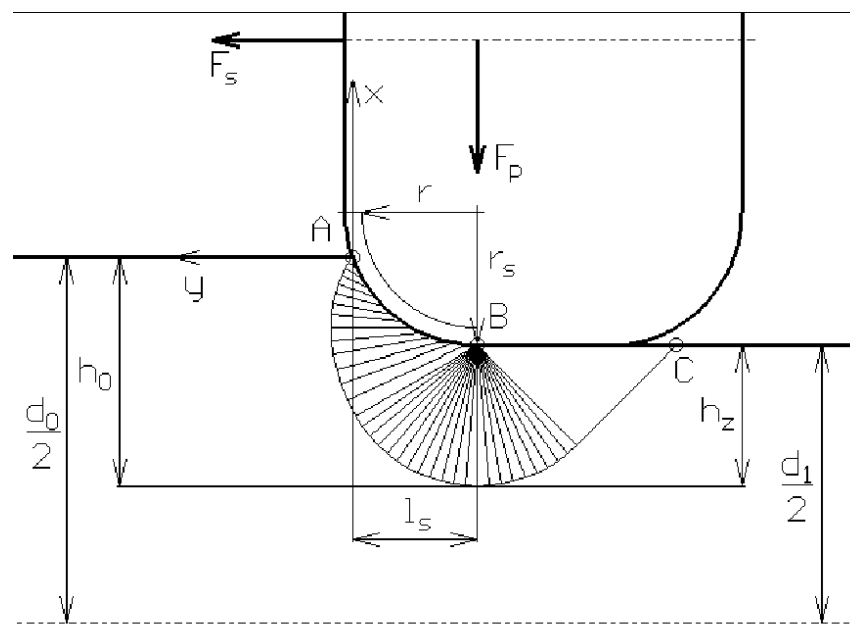
V části A přichází váleček do styku s povrchem dokončované součásti a postupně se zvyšuje tlakové napětí. V části B je překročena mez kluzu a pružná deformace se mění na deformaci trvalou. V oblasti C dochází k opouštění pracovní plochy válečkem. Dochází zde jen k velmi malému uvolnění pružnou deformací. V oblasti D je zakótována hloubka stlačeného materiálu při válečkování. Nejvíce je materiál stlačen přímo pod válečkem. V oblasti E je pružnost materiálu obnovena^{69, 82}.

Plasticky deformovanou oblast ohraničují body AC (viz Obr. 2.2). Křivka má tvar evolvent kružnice profilu tvářecího prvku. Oblast plastické deformace pak udává tloušťku zpevněné vrstvy.

Při těchto procesech dochází za působení tvářecí síly ke stavům napjatosti i deformace, které jsou při válečkování obecně prostorové.

Obr. 2.1 Schéma průběhu napětí při válečkování⁶⁹.

V Obr. 2.2 je zobrazen detailní pohled na plasticky deformovanou oblast.

Obr. 2.2 Pole charakteristik ve směru posuvové síly φ ⁵⁷.

Vzhledem k Haar-Kármánovým podmínkám lze válečkování řešit jako superpozici stavů rovinných ve směru posuvu a obvodové rychlosti. Intenzita deformace je dána změnou tloušťky zpevněné vrstvy (2.1)^{11,57}.

$$\varphi_i = \ln \frac{h_0}{h_z} \quad 2.1$$

kde: φ_i [-] - intenzita plastické deformace,
 h_0 [mm] - výchozí výška vrstvy před válečkováním (viz Obr. 2.2),
 h_z [mm] - výška vrstvy po válečkování (viz Obr. 2.2).

Při stanovování přirozeného přetvárného odporu se vychází z rovnice (2.2)^{11,57}.

$$\sigma_{pd} = \sigma_{ps} * \left(\frac{\dot{\varphi}}{\dot{\varphi}_s} \right)^m \quad 2.2$$

kde: σ_{pd} [MPa] - dynamický přirozený přetvárný odpor,
 σ_{ps} [MPa] - statický přirozený přetvárný odpor,
 $\dot{\varphi}$ [s⁻¹] - rychlost deformace,
 $\dot{\varphi}_s$ [s⁻¹] - průřezová rychlost deformace,
 m [-] - rychlostní exponent.

Velikost tvářecích parametrů podstatně ovlivňuje tření mezi povrchem obrobku a tvářecím elementem. Styk, který zde vzniká, má charakter valivý, smykový nebo sdružený. Složka tlaku na povrch elementu ve směru x kolmém k povrchu se vypočítá ze vztahu (2.3)^{11,57}.

$$p_x = \int_A^B (\sigma_h * \sin \alpha \pm f * \sigma_p * \cos \alpha) d\alpha \quad 2.3$$

kde: p_x [MPa] - složka tlaku na povrch elementu ve směru kolmém k povrchu,
 σ_h [MPa] - hydrostatické napětí,
 α [rad] - rovinný úhel,
 f [-] - součinitel tření mezi povrchem válečkované součásti a nástrojem,
 σ_p [MPa] - přirozený přetvárný odpor,
 A [rad] - dolní integrační mez,
 B [rad] - horní integrační mez.

Složka tlaku na povrch elementu ve směru y působící síly je dána vztahem (2.4)^{11,57}.

$$p_y = \int_A^B (\sigma_h * \sin \alpha \pm f * \sigma_p * \cos \alpha) d\alpha \quad 2.4$$

kde: p_y [MPa] - složka tlaku na povrch elementu ve směru y působící síly,

σ_h [MPa]	- hydrostatické napětí,
α [rad]	- rovinný úhel,
f [-]	- součinitel tření mezi povrchem válečkované součásti a nástrojem,
σ_p [MPa]	- přirozený přetvárný odpor,
A [rad]	- dolní integrační mez,
B [rad]	- horní integrační mez.

Přičemž hydrostatické napětí vypočteme ze vztahu (2.5)^{11,57}.

$$\sigma_h = \sigma_p * [1 + (i + j) * \Delta\alpha] \quad 2.5$$

kde:	σ_h [MPa]	- hydrostatické napětí,
	σ_p [MPa]	- přirozený přetvárný odpor,
	j [-]	- index uzlových bodů,
	i [-]	- index uzlových bodů,
	$\Delta\alpha$ [rad]	- konstantní úhlový krok v poli charakteristik.

Válečkovací nástroj je zpravidla konstrukčně sestaven s empiricky daného počtu tvářecích prvků. Výsledná posuvová síla se vypočítá ze vztahu (2.6)^{11,57}.

$$F_s = p_{ys} * \pi * d_1 * (h_o + h_z) * k_n \quad 2.6$$

kde:	F_s [N]	- výsledná posuvová síla,
	p_{yo} [MPa]	- složka obvodového tlaku na povrch elementu ve směru y působící síly,
	π [-]	- Ludolfovo číslo,
	d_1 [mm]	- \emptyset součásti po válečkování,
	h_o [mm]	- výchozí výška vrstvy před válečkováním (viz Obr. 2.2),
	h_z [mm]	- výška vrstvy po válečkování (viz Obr. 2.2),
	k_n [ks]	- počet tvářecích prvků.

Stejně lze tuto situaci řešit i ve směru obvodu. Výsledná obvodová síla bude (2.7)^{11,57}.

$$F_o = p_{yo} * \pi * d_1 * (h_o + h_z) * k_n \quad 2.7$$

kde:	F_o [N]	- výsledná obvodová síla,
	p_{yo} [MPa]	- složka obvodového tlaku na povrch elementu ve směru y působící síly,
	π [-]	- Ludolfovo číslo,
	d_1 [mm]	- \emptyset součásti po válečkování,
	h_o [mm]	- výchozí výška vrstvy před válečkováním (viz Obr. 2.2),
	h_z [mm]	- výška vrstvy po válečkování (viz Obr. 2.2),

k_n [ks] - počet tvářecích prvků.

Vzhledem k větším odporům ve směru posuvu bude celková tloušťka zpevněné vrstvy ve směru posuvu směrodatná pro celkovou deformaci. Celková přitlačná síla se stanoví superpozicí složek tlaků ve směru kolmém k povrchu materiálu (2.8)^{11,57}.

$$F_p = (p_{x_o} + p_{x_s}) * L_o * L_s * k_n \quad 2.8$$

kde: F_p [N] - výsledná přitlačná síla,
 p_{x_o} [MPa] - složka obvodového tlaku na povrch elementu ve směru kolmém k povrchu materiálu,
 p_{x_s} [MPa] - složka posuvového tlaku na povrch elementu ve směru kolmém k povrchu materiálu,
 L_o [mm] - výchozí délka válečkované součásti,
 L_s [mm] - délka kontaktu kuličky s obrobkem,
 k_n [ks] - počet tvářecích prvků.

Jako technologický parametr se místo obvodové síly využívá kroutící moment na stopce nástroje (2.9)^{11,57}.

$$M_k = F_o * \frac{d_o}{2} \quad 2.9$$

kde: M_k [Nm] - kroutící moment na stopce nástroje,
 F_o [N] - výsledná obvodová síla,
 d_o [mm] - výchozí \varnothing válečkované součásti.

Obvodová síla se vypočítá dle vztahu (2.10)^{11,57}.

$$F_o = f_o * F_p \quad 2.10$$

kde: F_o [N] - výsledná obvodová síla,
 f_o [-] - součinitel tření mezi povrchem válečkované součásti a nástrojem v obvodovém směru,
 F_p [N] - výsledná přitlačná síla.

A posuvová síla se vypočítá podle vztahu (2.11)^{11,57}.

$$F_s = f_s * F_p \quad 2.11$$

kde: F_s [N] - výsledná posuvová síla,

f_s [-]	- součinitel tření mezi povrchem válečkované součásti a nástrojem ve směru posuvu,
F_p [N]	- výsledná přítláčná síla.

2.2 Podmínky plasticity

Plastické deformace se dosáhne vyvoláním tlakové síly válečkovacího elementu na povrch součásti. Po překročení meze kluzu nastane plastická deformace. Podmínka plasticity je matematické vyjádření experimentálně stanovených podmínek vzniku plastického toku⁶⁸. V další části jsou uvedeny dvě nejpoužívanější podmínky plasticity, a sice podmínka plasticity HMM a podmínka maximálních smykových napětí.

2.2.1 Podmínka plasticity HMM

V literatuře je rovněž označována jako podmínka Mises. Podmínka plasticity HMM má formální tvar (2.12)⁸⁵.

$$\tau_o = \tau_{oM} \quad 2.12$$

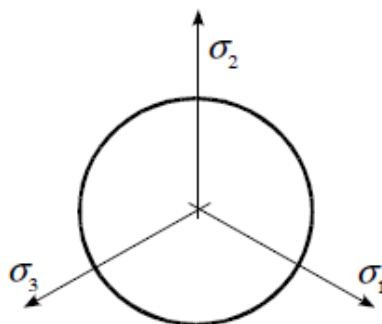
kde: τ_o [MPa] - smykové napětí v oktaedrické rovině,
 τ_{oM} [MPa] - mezní smykové napětí v oktaedrické rovině.

Dosazením do rovnice (2.12) se dostane vztah (2.13)^{68, 85}.

$$\sigma_K = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2]} \quad 2.13$$

kde: σ_K [MPa] - mez kluzu,
 $\sigma_1, \sigma_2,$
 σ_3 [MPa] - hlavní napětí.

Podmínka HMM lépe vystihuje charakter napjatosti, jelikož na rozdíl od podmínky maximálních smykových napětí zahrnuje střední napětí σ_2 . Tato podmínka plasticity je součástí programů metody konečných prvků⁸⁵. Podmínku HMM je možné graficky znázornit v oktaedrické rovině (viz Obr. 2.3).



Obr. 2.3 Grafické znázornění podmínky plasticity HMM⁵⁷.

2.2.2 Podmínka plasticity maximálního smykového napětí

Podmínka maximálních smykových napětí je nejstarší známou podmínkou plasticity⁶. Podmínka maximálních smykových napětí má formální tvar (2.14)⁸⁵.

$$\tau_{\max} = \tau_M \quad 2.14$$

kde: τ_{\max} [MPa] - maximální smykové napětí,
 τ_M [MPa] - mezní smykové napětí.

Dosazením do rovnice (2.14) se získá vztah (2.15)^{68, 85}.

$$\sigma_K = \sigma_1 - \sigma_3 \quad 2.15$$

za podmínky $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$.

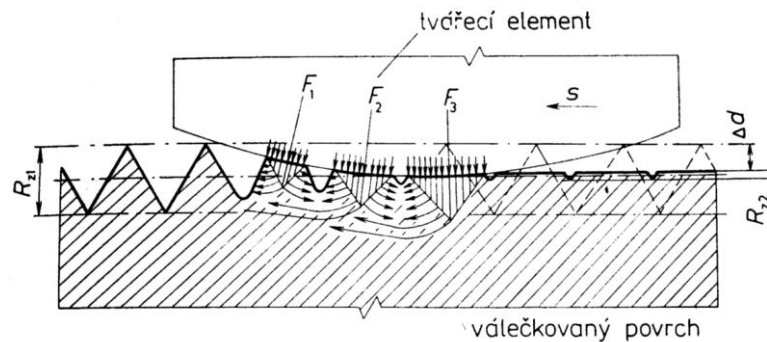
kde: σ_K [MPa] - mez kluzu,
 $\sigma_1, \sigma_2,$
 σ_3 [MPa] - hlavní napětí.

2.3 Válečkování

Technologie válečkování je jednou z dokončovacích metod strojních součástí. Je to jedna z metod, při které se dokončováním obrobených povrchů neodebírá materiál ve formě třísky. Válečkování je možné použít na rotační plochy vnitřní i vnější, ale i na rovinné plochy^{6, 12, 17, 34, 31, 39}.

Válečkováním se zpevní povrch materiálu vyvoláváním tlakových pnutí v povrchových vrstvách materiálu. Tohoto pnutí se dosáhne vyvozením tlakové síly. Síla působí na nástroj, ve kterém je upevněn tvrdý tvářecí element například kulička, váleček (viz Obr. 2.10 a Obr. 2.11), a ten tlačí na povrch součásti. Na povrchu materiálu vyvolá tlaková pnutí, a tím překročí mez kluzu. Aby nedošlo při tomto procesu k poškození tvářecího elementu je zapotřebí, aby měl vyšší tvrdost než válečkový materiál. Materiál se díky těmto pnutím posouvá po skluzových rovinách a vyplňuje prohlubně nerovností. Touto metodou se sníží vrcholky nerovností a docílí se daleko jemnější struktury povrchu. Jedná se o přetváření povrchu materiálu za studena^{6, 12, 17, 34, 31, 39}.

Při válečkování probíhá v materiálu řada procesů. Z Obr. 2.4 je zřejmý průběh objemových a geometrických změn, ale i působení tvářecích sil. Válečkováním povrchu strojních součástí se zatlačují vrcholky mikronerovností do prohlubní. Tato stlačená výška materiálu se může vyjádřit následujícím vztahem (2.16)³⁹.



Obr. 2.4 Schéma průběhu napětí, geometrických a objemových změn materiálu při válečkování³⁹.

$$\Delta d = \frac{R_{z1} - R_{z2}}{1000} \quad 2.16$$

kde: Δd [mm] - výška stlačení materiálu (zahlazovací výška),
 R_{z1} [(μm)] - největší výška profilu před válečkováním,
 R_{z2} [(μm)] - největší výška profilu po válečkování.

Vlivem tvářecích sil nedochází u válečkovaného povrchu jen ke zmenšení mikronerovnosti a vyhlazení povrchu, ale procesy probíhající pod povrchem materiálu zapříčiňují změny v krystalické mřížce a mechanických vlastnostech. Vzniklou deformací od tvářecí síly se trvale přemísťují jednotlivé vrstvy atomů po skluzových rovinách. Pod povrchem materiálu vzniká textura, která je charakteristická prodloužením zrn a usměrněnými krystalografickými osami^{6, 12, 17, 34, 31, 39}.

Změny, které se v materiálu dějí, zapříčiňují růst tvrdosti, kluzu a pevnosti. Zvyšuje se odolnost proti opotřebení a korozi, což příznivě ovlivňuje funkční spolehlivost a životnost strojních součástí. Naopak se snižuje vrubová houževnatost a tažnost. Při válečkování se mění nepříznivá tahová napětí na tlaková, která uzavírají případné mikrotrhliny vzniklé při obrábění a dalším provozu^{6, 12, 17, 34, 31, 39}.

Válečkováním se zpevňují povrchové vrstvy materiálu. Zpevnění se projevuje narůstajícím odporem materiálu proti přetvoření. Do jaké míry bude součást zpevněna, je dáno materiálem součásti, jelikož různé materiály mají rozdílnou strukturu krystalové mřížky. Největšího zpevnění povrch strojních součástí získá ve vrstvách, které jsou v kontaktu s tvářecím elementem. Ve vrstvách, které nemají kontakt s nástrojem je zpevnění materiálu nižší^{6, 12, 17, 34, 31, 39}.

Konečný efekt dokončené plochy se odvíjí od volby jednotlivých parametrů válečkovací technologie. Především záleží na zvolené metodě válečkování, na mechanických vlastnostech materiálu, a na dalších podmínkách použitých při válečkování. Jednotlivá hlediska jsou rozebrána v následujících kapitolách^{6, 12, 17, 34, 31, 39}.

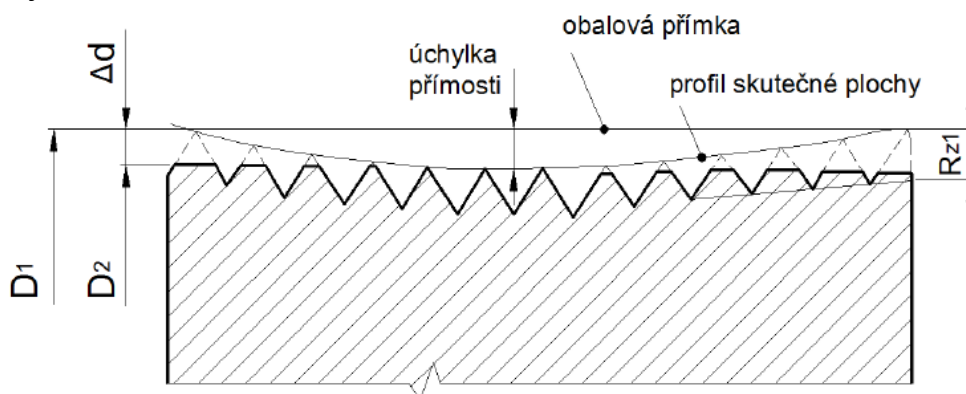
2.3.1 Rozdělení technologie válečkování

Technologie válečkování můžeme rozčlenit do tří základních skupin podle výsledného efektu dokončeného povrchu³¹:

- kalibrování povrchu strojních součástí (tj. získání požadované tolerance rozměrů, úchylek tvaru a polohy),
- zpevnění povrchové vrstvy materiálu strojních součástí (tj. zvýšení meze únavy, zpevnění povrchové vrstvy do hloubky, tvrdost a pevnost),
- hlazení strojních součástí (tj. zmenšení výšky mikronerovnosti).

Kalibrování povrchů válečkováním

U procesu kalibrování se požaduje získání co nejlepší tolerance rozměrů, úchylek tvaru a polohy (rovinost, kruhovitost, přímota, válcovitost) s přiměřenou jakostí povrchu dokončené součásti. Na velikosti tvářecí síly F i výšky mikronerovností R_{Z1} od předešlého obrábění závisí konečná hodnota stlačení vrcholků mikronerovností Δd dokončené součásti. Tyto skutečnosti znázorňuje Obr. 2.5^{31, 39, 55}.



Obr. 2.5 Znárodnění kalibrované plochy s úchylkami přímoty³¹.

Při kalibrování strojních součástí je třeba provést daleko preciznější opatření ve smyslu připravení pracovních podmínek nežli u technologií zpevňování nebo hlazení povrchů. Jedná se zejména o kontrolu přesnosti a pevnosti stroje, příprava strojní součásti a její správné upnutí do přípravků a v neposlední řadě o zajištění stálých podmínek (velikost tvářecí síly, pracovní posuv, rychlost válečkování) v procesu celé aplikace kalibrovací metody. Kalibrování se využívá obzvláště na speciálních dvoukotoučových nebo tříkotoučových strojích v sériové nebo hromadné výrobě. Metoda se používá zejména u strojních součástí do průměrů 50 mm, jako jsou nýty, kolíky, čepy a jiné^{31, 39, 55}.

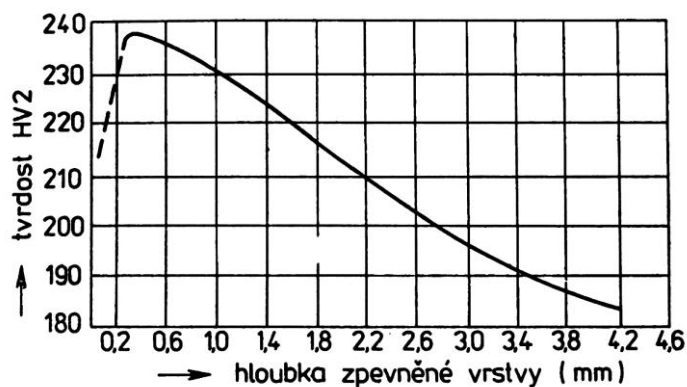
Zpevňování povrchů válečkováním

Charakteristikou zpevňovacího válečkování je dosažení vyšší meze únavy, zpevnění povrchové vrstvy do hloubky a tvrdost dokončené součásti. Tlaková pnutí, která vznikají při zpevňování strojních součástí, se vyskytují do několika milimetrů pod povrchem dokončované součásti. Tlaková pnutí jsou žádoucí

z hlediska eliminace vzniku koroze, různých mikrovrubů a podílejí se i na snížení vzniku trhlin^{31, 39, 41}.

Negativní jev, který má velký dopad na únavovou pevnost materiálu je zejména nekvalitně obrobený povrch součástí. Dále se zde projevuje koncentrace napětí. Koncentrace napětí se vyskytuje především u členitých ploch, jako jsou zápichy, zaoblení či různá osazení strojních součástí^{31, 39, 41}.

Maximálního zpevnění strojních součástí se nedosáhne na povrchu, ale 0,01 až 0,3 mm pod ním. Působením adhezních sil se vrchní vrstva materiálu přimkne k válečkovacím elementům. Plastická deformace v povrchové vrstvě dokončovaného obrobku nastává pod touto kontaktní plochou. Tvrdost válečkované součásti je pod kontaktní plochou největší. S přibývajícím hloubkou se tvrdost materiálu snižuje. V Obr. 2.6 je znázorněna tato skutečnost^{31, 39, 41}.



Obr. 2.6 Typický průběh tvrdosti válečkované plochy v závislosti na hloubce ovlivněné vrstvy³⁹.

Při zpevňovacím účinku válečkování je třeba u dokončovaných ploch strojních součástí tvářením změnit mechanické vlastnosti. Požadovaná hloubka zpevnění povrchových vrstev musí sahát do oblastí, kde již nedochází ke koncentraci napětí, jako jsou vady na povrchu tělesa či trhliny v materiálu. Není-li splněno toto kritérium, nezíská se požadované zvýšení meze únavy^{31, 39, 41}.

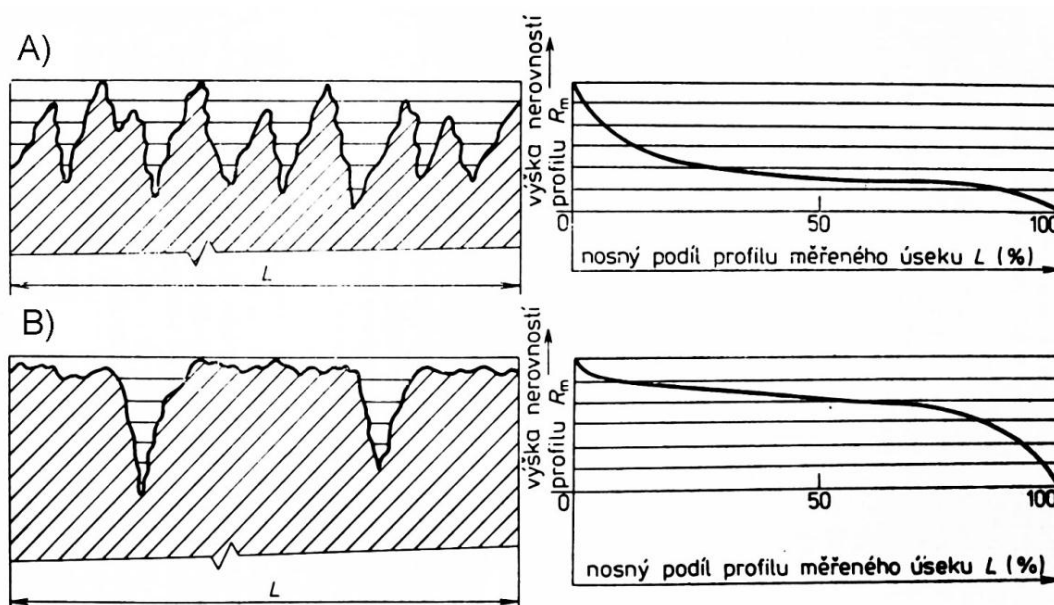
Při technologii válečkování je využito větších sil než při ostatních metodách. Tvářecí síly dosahují hodnot mezi 20 až 40 * 10⁴ N. Síla se volí podle požadavků na hloubku zpevnění a podle vlastností součástí^{31, 39, 41}.

Zpevňování povrchové vrstvy materiálu strojních dílů přináší pozitivní výsledky na povrchovou únosnost ploch a na zvýšenou odolnost třecích ploch proti jejich opotřebením. Tyto lepší vlastnosti se podílí na větší provozní spolehlivosti strojních součástí^{31, 39, 41}.

Hlazení povrchů válečkováním

Při této metodě se požaduje vyhlazený povrch součástí. Vyhlazený povrch součástí se dosáhne zmenšením výšky mikronerovnosti po předešlém opracování. Změny v materiálu se dějí díky plastické deformaci, která vzniká tvářecí silou mezi nástrojem a povrchem součástí^{17, 31, 39}.

V Obr. 2.7 A) je ukázán skutečný profil polotovaru vzniklý po třískovém obrábění s nosnou křivkou. Na Obr. 2.7 B) je zobrazen výsledný profil polotovaru dokončený válečkováním s nosnou křivkou. Při srovnatelné výšce R_a se profil povrchu po válečkování výrazně odlišuje od povrchu dokončeného třískovým obráběním. Stav opracované plochy pro různé dokončovací metody lze také vyhodnotit pomocí křivky nosného podílu. Jak je zřejmé z obrázku, nosný podíl při metodě válečkování je výrazně vyšší než při obrábění třískovou metodou^{17, 31, 39}.



Obr. 2.7 Typický tvar skutečného profilu drsnosti povrchu a nosná křivka této plochy A) po třískovém obrábění B) po válečkování³¹.

Měřením, pomocí dotykového profiloměru například Diavite DH-7 od firmy Diavite AG, se vyhodnotí stav povrchu strojní součásti a získá se nosná křivka. Nosná křivka (křivka materiálového podílu profilu) je tvarová charakteristika povrchu. Křivka má význam z hlediska posouzení zatěžovaných funkčních povrchů a je charakteristická pro jednotlivé technologie dokončování strojních součástí^{51, 65}.

V Tab. 2.1 jsou pro názornost uvedeny hodnoty dosažených středních aritmetických úchylek profilu v závislosti na různých technologiích opracování povrchů při velikosti nosného profilu povrchu. Z tabulky je na první pohled zřejmé, že použitím metody válečkování se dosáhne značné hodnoty nosného podílu povrchu³¹.

Vhodně zvolené pracovní podmínky a další faktory mají vliv na výslednou drsnost povrchu součásti. Mezi tyto vlivy náleží mechanické vlastnosti zvoleného materiálu, velikost tvářecí síly, pracovní posuv válečkovacího nástroje, vlastnost funkční plochy tvářecího elementu, drsnost a stav povrchu po třískovém obrábění^{17, 31, 39}.

Na konečné drsnosti válečkové součásti se podílí i další činitelé vstupující do procesu. Patří mezi ně zejména počet pracovních cyklů, rychlost válečkování a volba prostředku na mazání a chlazení^{17, 31, 39}.

Tab. 2.1 Velikost nosného podílu profilu při odlišných technologiích obrábění³¹.

Způsob obrábění	Střední aritmetická úchylka profilu Ra [μm]	Nosný podíl [%]
Hrubé soustružení a vrtání	6 ÷ 25	10
Soustružení na čisto	2,5 ÷ 10	25
Jemné soustružení a stružení	1 ÷ 4	40
Broušení na čisto	0,6 ÷ 2,5	40
Jemné broušení, honování, lapování	0,16 ÷ 0,6	80
Superfinašování	0,04 ÷ 0,1	90
Válečkování	0,02 ÷ 0,4	80 ÷ 90

Na rozdíl od technologií soustružení či vyvrtávání vzniká u metody válečkování lesklý povrch, na němž jsou zřetelnější vady materiálu. Tyto vady vznikají metalurgickými vlivy (vměstky, poréznost), poškozením činné plochy válečkovacího elementu (studené svař, otěr) nebo vady vzniklé předešlou metodou třískového obrábění (vytrhaný materiál). Tyto vady se na dokončené ploše projevují místně nebo se pravidelně opakují. Vznikají zpravidla u nekvalitních odlitků^{17, 31, 39}.

Jak je patrné z následující Tab. 2.2, válečkováním se dosahuje nízké drsnosti povrchu. Ve srovnání s jinými metodami dokončování povrchu jako je lapování, leštění a honování není válečkování náročné na strojní vybavení a kvalifikaci obsluhy³⁹.

Tab. 2.2 Běžně dosažená střední aritmetická úchylka profilu při různých technologiích dokončování povrchu³⁹.

Způsob dokončování povrchu	Střední aritmetická úchylka profilu Ra [μm]
Válečkování	0,1 až 0,8
Leštění	0,1 až 0,4
Honování	0,1 až 0,4
Lapování	0,1 až 0,4
Broušení	0,3 až 0,9
Vyvrtávání	1,1 až 1,6
Vystružování	0,9 až 1,6
Soustružení + smirkování	1,0 až 1,6
Soustružení	1,6 a víc

Na základě hodnot obsažených v ČSN 01 4450 a statistických šetřeních provedených měření v podmínkách k. p. ŠKODA Plzeň byly sestaveny rozsahy těchto aritmetických úchylek profilu³⁹.

2.3.2 Charakter působení tvářecí síly při válečkování

Charakter časové závislosti styku tvářecího elementu s válečkovanou, původně obrobenou plochou rozděluje metodu na statické a dynamické válečkování³⁹.

Statické válečkování

Podstatou statického válečkování je odvalující se váleček po povrchu dokončované součásti. Tvářecí prvek je přitlačován k povrchu součásti, kde vyvolá tlakové napětí, které zpevní povrchové vrstvy materiálu. Tvářecí element je s dokončovaným povrchem neustále v kontaktu. Přítlačná síla je konstantní nebo se pozvolna mění. U statického válečkování, které je zobrazeno na Obr. 2.8, může být přítlačná síla vyvozena například pružinou nebo hydraulicky^{12, 26, 31}.

Nástroje určené ke statickému válečkování jsou univerzálnější a jejich konstrukční provedení je jednodušší. Proto jsou metody pro staticky pracující nástroje^{12, 26, 31} oproti dynamicky pracujícím nástrojům v dnešní době více rozšířeny.



Obr. 2.8 Nástroj pro statické válečkování vnějších ploch⁴⁶.

Dynamické válečkování

Při dynamickém válečkování je tvářecí prvek v kontaktu s povrchem součásti omezenou dobu. Je to dáno tím, že válečkovací element působí na povrch dokončované součásti v pulsových intervalech. Tyto intervaly mohou být pravidelné či nepravidelné. U dynamického válečkování je přítlačná síla vyvozena například mechanicky či odstředivou silou^{12, 26, 31, 41}. Příklad nástroje pro dynamické válečkování je zobrazen na Obr. 2.9. Nástroj je využíván při válečkování vnitřních ploch.



Obr. 2.9 Nástroj pro dynamické válečkování vnitřních ploch⁸¹.

Frekvence rázu válečkovacího elementu je důležitým měřítkem, které má vliv na kvalitu dokončené plochy. Velikost frekvence rázu se pohybuje v rozmezí od 10 do 5000 cyklů/s podle použitého mechanického zdroje vyvolávajícího ráz (vačky pneumatických pulzátorů, ultrazvukové zdroje). Dynamického válečkování se využívá nejčastěji při hladícím a zpevňovacím válečkování, jelikož při tomto účinku dynamických sil dochází ke značné hloubce zpevnění dokončované součásti^{12, 26, 31, 41}.

2.3.3 Pracovní podmínky

Správně zvolené pracovní podmínky ovlivňují kvalitu dokončeného povrchu i ekonomické zhodnocení. Nevhodně určené podmínky zapříčiní nekvalitně opracovanou plochu dokončované součásti i nízkou produktivitu válečkování^{14, 20, 31, 34, 39}.

Kvalita dokončeného povrchu je závislá na následujících pracovních podmínkách:

- velikost tvářecí síly,
- pracovní posuv válečkovacího nástroje,
- rychlost válečkování dokončované plochy,
- počet pracovních cyklů,
- mazání a chlazení válečkovacích elementů.

Pracovní podmínky se volí podle požadované jakosti opracované plochy, přesnosti rozměrů a tvaru, tvrdosti povrchové vrstvy a hloubky zpevnění. Celková deformace povrchu je dána materiálem obrobku, tlakem válečků, přídatkem a jakostí předobrobené plochy. Výsledná jakost povrchu po válečkování závisí kromě uvedených faktorů také na posuvu a počtu průchodů nástroje^{14, 20, 31, 34, 39}.

Tvářecí síla při válečkování

Na tvářecí síle závisí výsledná drsnost povrchu, hloubka i kvalita zpevněného povrchu součásti. Výsledná produktivita válečkovací metody je dána vhodně

zvolenou velikostí tvářecí síly. Velikost tvářecí síly omezuje tlak v místě styku mezi tvářecím elementem a dokončovanou plochou, proto je v kapitole pojednáno i o tlaku. Při použití nedostatečně velké síly se nedosáhne požadovaného zahlazení výchozí drsnosti a zpevnění. U takto vzniklé situace se můžou aplikovat vícenásobné průchody nástroje nebo snížit pracovní posuv nástroje. Taková řešení, ale vedou ke snížení produktivity válečkovací metody. Z toho plyne, že vhodně zvolená tvářecí síla je důležitá pro technicko-ekonomické zhodnocení válečkovací metody^{12, 17, 27, 39}.

Následující výpočetní vztah je získán na základě ověřovacích zkoušek pro ocelové materiály. Pro výpočet velikosti tlaku lze využít následující výraz (2.17)^{34,57}.

$$p_k = (1,8 \div 2,1) \times R_e \quad 2.17$$

kde: p_k [MPa] - tlak mezi válečkem a plochou obrobku,
 R_e [MPa] - mez kluzu materiálu.

Velikost tlaku se volí podle použitého materiálu určeného k válečkování a způsobu předobrobené plochy součásti. Hodnoty tlaků jsou uvedeny v Tab. 2.3 a jsou určeny pro materiály, které mají lepší tvárnost³⁴.

K výpočtu tvářecí síly se využívá empirických vztahů. Nejčastěji se tvářecí síla stanoví pokusnou metodou, jelikož vztahy pro výpočet tvářecí síly jsou složité. Pro přítláčnou sílu pro válečkování válcové součásti je možné využít následující vztah (2.18)^{11, 57}.

$$F = \frac{d_0 * L * p_k}{0,126 * E * \left(\frac{d_0}{d_n} + 1\right)} \quad 2.18$$

kde: F [N] - tvářecí síla,
 d_0 [mm] - \varnothing obtisku kuličky v povrchu kovu,
 d_n [mm] - \varnothing kuličky,
 L [mm] - délka kontaktu kuličky s obrobkem,
 p_k [MPa] - tlak tvářecího elementu,
 E [MPa] - Youngův modul pružnosti válečkováného materiálu.

Nepříznivým následkem, který vzniká na povrchu strojní součásti po dosáhnutí střední aritmetické úchytky profilu 0,3 až 0,1 μm je vlnitost. Dalším následkem, který má vliv na jakost povrchu je jeho rozrušení. Rozrušení vzniká po překročení meze pevnosti materiálu. Všechny tyto nepříznivé jevy jsou zapříčiněny zvyšující se tvářecí silou, která je potřebná pro zpevňování strojních součástí do hloubky. Válečkovací síla je pro zpevňování povrchu do hloubky větší než při hlazení či kalibrování. Proto se při válečkování nedosáhne současně lesklého povrchu součásti a potřebné hloubky zpevnění^{12, 17, 27, 39}.

Tab. 2.3 Doporučené velikosti tlaků pro dokončování povrchu tvářením³⁴.

Obráběný materiál	Předchozí operace obrábění		Doporučený tlak [MPa . 10 ²]			
	Způsob obrábění	Střední aritmetická úchylka profilu Ra [μm]	Statičké tváření	Protlačování	Válečkování - válečkovací tělísko váleček	Kuličkování - válečkovací tělísko kulička
Uhlíková ocel	Soustružení	6,3 ÷ 50	9 ÷ 13	7 ÷ 10	8 ÷ 11	7 ÷ 11
	Vyrtávání	6,3 ÷ 25	7 ÷ 11	4 ÷ 8	4 ÷ 8	6 ÷ 10
	Hoblování	3,2 ÷ 12,5	4 ÷ 7	2 ÷ 4	2 ÷ 4	3 ÷ 6
	Broušení	1,6 ÷ 3,2	5 ÷ 8	3 ÷ 6	3 ÷ 6	3 ÷ 7
	Vystružování	do 1,6	2 ÷ 5	2 ÷ 4	2 ÷ 4	2 ÷ 4
Legovaná ocel	Soustružení	6,3 ÷ 50	13 ÷ 16	7 ÷ 10	12 ÷ 14	11 ÷ 13
	Vyrtávání	6,3 ÷ 25	11 ÷ 14	5 ÷ 8	10 ÷ 12	9 ÷ 11
	Hoblování	3,2 ÷ 12,5	8 ÷ 10	4 ÷ 7	5 ÷ 8	4 ÷ 7
	Broušení	1,6 ÷ 3,2	6 ÷ 9	4 ÷ 8	5 ÷ 8	4 ÷ 7
	Vystružování	do 1,6	4 ÷ 6	3 ÷ 5	4 ÷ 6	3 ÷ 4
Mosaz	Soustružení	6,3 ÷ 50	9 ÷ 12	7 ÷ 10	8 ÷ 11	7 ÷ 11
	Vyrtávání	6,3 ÷ 25	7 ÷ 10	4 ÷ 7	6 ÷ 8	6 ÷ 8
	Hoblování	3,2 ÷ 12,5	4 ÷ 7	3 ÷ 5	4 ÷ 6	3 ÷ 6
	Vystružování	1,6 ÷ 3,2	2 ÷ 5	2 ÷ 4	2 ÷ 5	2 ÷ 4
Litina	Soustružení	6,3 ÷ 50	9 ÷ 13	8 ÷ 11	9 ÷ 11	8 ÷ 10
	Vyrtávání	6,3 ÷ 25	8 ÷ 11	5 ÷ 8	6 ÷ 8	6 ÷ 8
	Hoblování	3,2 ÷ 12,5	5 ÷ 7	3 ÷ 6	6 ÷ 8	6 ÷ 8
	Broušení	1,6 ÷ 3,2	5 ÷ 7	3 ÷ 6	4 ÷ 7	4 ÷ 7
	Vystružování	1,6 ÷ 3,2	3 ÷ 5	3 ÷ 5	2 ÷ 5	2 ÷ 4

V situacích kdy se vyžaduje značné zpevnění válečkované součásti do hloubky, neklade se takový důraz na jakost povrchu. Po dosažení potřebné hloubky se povrch materiálu dokončí broušením, eventuálně se aplikuje další hladící převálečkování^{12, 17, 27, 39}.

Při volbě tvářecí síly u technologie válečkování je třeba vzít v úvahu maximální hodnotu předepsanou od výrobce nástrojů. Maximální hodnota tvářecí síly je různá pro konkrétní válečkovací nástroje. Například u nástroje typu EG14 od firmy Winter servis je maximální tvářecí síla 10 000 N. U nástroje typu EG5 od stejné firmy je maximální tvářecí síla 3000 N⁸⁰. Velikost tvářecí síly závisí na materiálu součásti a pohybuje se v rozsahu od 500 do 5000 N¹⁷.

Pracovní posuv válečkovacího nástroje

Výsledná drsnost povrchu a produktivita metody je ovlivněna pracovním posuvem nástroje. Velkým zvětšením posuvu nástroje se nedocílí požadované jakosti povrchové vrstvy, nýbrž se dosáhne nežádoucí vlnitosti a rozrušené povrchové vrstvy. Z Obr. 2.12 vyplývá, že střední aritmetická úchylka profilu je závislá na poloměru zaoblení válečkovacího elementu. Se snižujícím se poloměrem tvářecího prvku roste drsnost povrchu. Z toho plyne, že při zvolení menších posuvů nástroje se dosáhne lepších výsledků drsnosti povrchu³⁹.

Pracovní posuv válečkovacího nástroje na jednu otáčku dokončované součásti nemá být stejný jako posuv při předchozím obrábění a volí se v rozsahu 0,12 až 3,40 mm/otáčku^{12,17} podle zvoleného účinku metody válečkování a charakteru působení tvářecí síly. Aby se válečkovací element dostal na všechny části dokončovaného povrchu, musí pro posuv nástroje platit následující vztah (2.19)³⁹.

$$s < 0,087 * r \quad 2.19$$

kde: s [mm] - posuv nástroje,
 r [mm] - poloměr zaoblení válečku nebo kuličky.

Přibližné výpočetní vztahy k určení velikosti posuvu nástroje s přihlédnutím na střední aritmetickou úchylku profilu před válečkováním a na poloměr zaoblení tvářecího prvku jsou zobrazeny v Tab. 2.4. Tyto vztahy vycházejí z praktických zkušeností³⁹. Vztahy pro určení velikosti posuvu nástroje s , vycházejí ze střední aritmetické úchylky profilu před válečkováním R_a a poloměru zaoblení tvářecího prvku r ³⁹.

Tab. 2.4 Vztahy pro určení velikosti posuvu nástroje s ³⁹.

Střední aritmetická úchylka profilu před válečkováním R_a [μm]	Požadovaná střední aritmetická úchylka profilu po válečkování R_a [μm]	Vztah pro stanovení velikosti posuvu s [mm/ot]
3,2	1,6	$s \leq \frac{2a}{1,5} \leq \frac{0,087}{1,5} * r \leq 0,058 * r$
	0,8	$s \leq \frac{2a}{3} \leq \frac{0,087}{3} * r \leq 0,029 * r$
	0,4	$s \leq \frac{2a}{6} \leq \frac{0,087}{6} * r \leq 0,0145 * r$

Posuv nástroje je 0,2 až 1 mm/otáčku při statickém válečkování. U dynamického válečkování je posuv nástroje 0,04 až 0,16 mm/otáčku^{17, 34}.

Pracovní posuv se volí s ohledem na válečkováný průměr a otáčky. Při volbě pracovního posuvu je potřeba přihlédnout také k tomu, jaká plocha se bude válečkovat, zda vnitřní nebo vnější. Pracovní podmínky jsou uvedeny v

Tab. 2.5. Doporučené otáčky lze v případě speciálních požadavků snížit nebo zvýšit o 50%, posuv na otáčku zvýšit o 30%^{12, 64}.

Tab. 2.5 Pracovní podmínky válečkování⁶⁴.

Válečkový průměr [mm]	Vnější válečkování		Vnitřní válečkování	
	Otáčky [min-1]	Posuv na otáčku [mm]	Otáčky [min-1]	Posuv na otáčku [mm]
5	1500	0,12	1000	0,15
12	1000	0,32	700	0,3
40	600	1,3	400	1,0
65	300	1,5	250	1,8
95	250	1,8	200	2,7
165	200	3,4		

Rychlost válečkování

Rychlostí válečkování se vyjadřuje pohyb válečkovacího elementu po povrchu součásti. U statického válečkování za určitých podmínek lze rychlost válečkování vyjádřit vztahem (2.20)³¹.

$$v = \frac{\pi * d * n}{1000} \quad 2.20$$

kde: v [m/min] - rychlost válečkování,
 d [mm] - \varnothing válečkované součásti nebo válečkovacího nástroje,
 n [1/min] - otáčky válečkované součásti nebo válečkovacího nástroje.

Podmínky, při kterých se může tento vzorec použít, je rotační způsob válečkování povrchu s malým podélným posuvem nástroje nebo při zapichovacím způsobu válečkování³⁹.

Obvodová rychlost při válečkování dosahuje hodnot 20 až 100 m/min (viz Tab. 2.5). V literatuře³⁴ se uvádí obvodová rychlost 10 až 120 m/min při statickém válečkování. U dynamického válečkování se uvádí 20 m/s. Obvodová rychlost při válečkování dosahuje 50 až 100 m/min¹⁷.

Při statickém válečkování neovlivňuje rychlost významně výsledné parametry povrchu. Naopak u dynamického válečkování má rychlost válečkování daleko větší vliv. Při dynamickém účinku tvářecí síly působí rychlost na intenzitu i frekvenci silových impulsů válečkovacího elementu^{17, 31, 39}.

Teplota omezuje použití větších rychlostí při válečkování. Ta vzniká v důsledku tření mezi nástrojem a dokončovanou plochou a je způsobena vznikem plastické deformace v materiálu dokončované součásti. Teplota se redukuje

snížením válečkovací rychlosti a použitím mazacích a chladících prostředků^{17, 31, 39}.

Počet pracovních cyklů

Pod pojmem počet pracovních cyklů se rozumí počet průchodů nástroje dokončovanou plochou. Tento počet je však limitován. U druhého průchodu se povrch součásti viditelně zlepšuje ve srovnání s prvním. U následujících průchodů nástroje zůstává drsnost povrchu nezměněna. Po určitém počtu průchodů se drsnost povrchu značně zhorší⁹.

Kdy se překročí takové množství cyklů, ve kterém vznikne rozrušení povrchové vrstvy, záleží na vlastnostech dokončovaného materiálu, ale i na dalších podmínkách při válečkování. Jedná se především o velikost válečkovací síly, jakou působí tvářecí prvek na dokončovaný povrch součásti, rychlost válečkování a posuv nástroje. Tyto podmínky se můžou formulovat takzvanou četností tvářecích kontaktů, která je dána vztahem (2.21)³⁹.

$$P_k = \frac{\check{s} * N * n_1}{s} \quad 2.21$$

kde: P_k [-] - četnost tvářecích kontaktů,
 \check{s} [mm] - šířka plochy plastického obtisku tvářecího prvku ve směru posuvu nástroje,
 N [ks] - počet tvářecích prvků,
 n_1 [ks] - počet průchodů nástroje,
 s [mm] - posuv nástroje.

Literatura³⁴ uvádí pro statické válečkování jeden průchod nástroje. Při tomto počtu průchodů nehrozí nebezpečí odlupování nebo šupinatosti dokončeného povrchu. Pro dynamické válečkování je možné použít dva až tři průchody nástroje.

V situacích, kdy se vyžaduje značné zpevnění válečkované součásti do hloubky, které činí 10 a více mm, se neklade takový důraz na kvalitu povrchu. Po dosažení potřebné hloubky, se povrch materiálu dokončí broušením, eventuálně se aplikuje další převálečkování³⁹.

Mazání a chlazení tvářecích elementů

V materiálu vlivem válečkování vznikají tangenciální složky sil. K jejich eliminování se používají maziva. Při použití maziv u válečkované součásti se dosáhne rovnoměrnějšího rozložení průběhu napětí při plastické deformaci a zajistí se vyšší trvanlivost válečkovacích elementů. Mazáním se dosáhne i lepší kvality dokončené součásti. Mazáním tvářeného povrchu se docílí menší drsnosti a můžou se použít větší tvářecí síly. S růstem teploty se snižuje tloušťka maziva, omezuje se rychlost válečkování a produktivita metody klesá. Proto se požaduje při válečkování použít mazací prostředky^{5, 12, 17, 34, 39, 64}.

Podle náročnosti válečkování se vybírají vhodné mazací a chladicí prostředky. Mezi ně patří běžně používané směsi oleje s petrolejem, minerální roztoky či rostlinné oleje. Může se využít i emulze, které bývají součástí obráběcích strojů. Ty mají ovšem větší podíl chladícího nežli mazacího účinku^{5, 12, 17, 34, 39, 64}.

Z experimentu provedeného v japonské laboratoři vyplynulo, že použití maziva se projevilo na zlepšení jakosti povrchu více než při použití řezného oleje²¹.

2.3.4 Další činitelé působící na kvalitu dokončované součásti

Následující skutečnosti ovlivňují jakost dokončené plochy strojní součásti, proto je třeba na ně brát zřetel. Především se jedná o volbu materiálu, rozměrový charakter polotovaru pro válečkování, tvary a rozměry ploch dokončované součásti a další provozní předpoklady válečkování. K dalším provozním předpokladům patří odpovídající kvalifikace pracovníka, úkony prováděné před započnutím a po skončení operace válečkování³⁹.

Materiály vhodné k válečkování

Z hlediska vhodnosti válečkování materiálů, není omezení. Prakticky se můžou dokončovat touto metodou jakékoliv kovové materiály, ať už se jedná o šedou litinu, hliníkové slitiny, ocele, bronz, mosaz či ocelolitinu^{17, 34, 39}.

U kalených či legovaných ocelí se požaduje, aby povrch obrobku byl pečlivě opracován před touto technologií. Je to dáno tím, že válečkováním těchto materiálů se nedosáhne již velké změny na povrchu součásti. Naopak u měkkých materiálů může být povrch součásti opracován hruběji. Tyto materiály mají lepší tvárnost, a proto po válečkování dochází k větší změně na dokončeném povrchu^{17, 34, 39}.

Materiál limituje užití metody válečkování, zejména jde o posuv nástroje, velikost tvářecí síly a rychlost válečkování. Při výběru materiálu se vychází z obecně platných norem a předpokladů pro tváření kovů za studena. Kovy vhodné pro technologii válečkování je možné vybrat podle jejich mechanických vlastností, deformačních křivek či chemického složení^{17, 34, 39}.

Z mechanického hlediska se posuzují hodnoty, mezi které patří tažnost A (%), pevnost R_m (Mpa), mez kluzu R_e (MPa) a koncentrace Z (%). Přibližné hodnoty, které vyhovují metodě válečkování, se dostanou z následujících vztahů (2.22, 2.23, 2.24)³⁹.

Poměr hodnot meze kluzu a pevnosti (2.22)³⁹.

$$\frac{R_e}{R_m} \leq 0,65 \text{ až } 0,7 \quad 2.22$$

kde: R_e [MPa] - mez kluzu materiálu,
 R_m [MPa] - mez pevnosti materiálu.

Tažnost (2.23)³⁹.

$$A \geq 15\% \qquad 2.23$$

kde: A [%] - tažnost.

Koncentrace (2.24)³⁹.

$$Z \geq 60\% \qquad 2.24$$

kde: Z [%] - koncentrace.

Z hlediska chemického složení materiálu je důležitý procentuální obsah uhlíku. Při zvyšujícím se procentuálním obsahu uhlíku narůstá deformační odpor materiálu a klesá jeho tvárnost. K dalším nevhodným chemickým prvkům se řadí chróm, mangan, fosfor, křemík a jiné. Tyto prvky mají neblahý dopad na tvárnost materiálu a tím i na aplikovanou technologii válečkování^{17, 34, 39}.

Struktura povrchu materiálu ovlivňuje výslednou jakost povrchu. Při požadavku vysoké kvality válečkované plochy se klade důraz na stejnorodou strukturu. Zvolený materiál se nesmí vyznačovat velkým obsahem vměstků, rýh, porézności, segregace či bublin. Pokud se tyto vady vyskytují, musí se počítat s jejich zvýrazněním na povrchu součásti. Tím dojde ke snížení kvality válečkované plochy^{17, 34, 39}.

Válečkováním lze opracovávat všechny kovové materiály běžně do pevnosti $R_m = 750 \text{ MPa}$ (výjimečně do $R_m = 1400 \text{ MPa}$) a do tvrdosti HB 220 a tažností 8%^{17, 34, 39}.

Rozměrový charakter polotovaru pro válečkování

Výsledný efekt válečkování je ovlivněn tvarem a rozměrem povrchu součásti před válečkováním. Zejména jde o následující charakter součásti³⁹:

- charakteristika povrchu po obrábění,
- charakteristika rozměru pro válečkování.

➤ Drsnost povrchu po obrábění

Před válečkováním je potřeba, aby součást dokončená obráběním, soustružením, frézováním či vystružováním měla odpovídající drsnost povrchu. Ta je zapotřebí z hlediska materiálu zohlednit. U kalených či legovaných ocelí, je třeba mít po třískovém obrábění součást s nízkou drsností povrchu. U těchto materiálů se dosáhne po válečkování jen nepatrných změn. Válečkování u těchto ocelí se provádí zejména kvůli zlepšení kluzných vlastností povrchu součásti³⁹.

Naopak u měkkých materiálů může být povrch součásti opracován s vyšší drsností než u výše zmíněných ocelí. Tyto materiály mají lepší tvárnost, a proto

po válečkování dochází k větším změnám na dokončené součásti. Pro tyto materiály se může vyjít z následujících skutečností³⁹.

Nejvhodnější střední aritmetická úchylka profilu před válečkováním je $R_a = 3,2\mu\text{m}$, avšak minimálně $R_a = 1,6\mu\text{m}$. V literatuře³⁶ se uvádí, že střední aritmetická úchylka profilu má být v rozmezí $R_a = 0,8$ až $3,2\mu\text{m}$. K určení střední aritmetické úchylky profilu před válečkováním se může použít následující vztah (2.25)³⁴.

$$R_{a1} = \frac{R_{a2}}{K} \quad 2.25$$

kde: R_{a1} [μm] - střední aritmetická úchylka profilu před válečkováním,
 R_{a2} [μm] - střední aritmetická úchylka profilu, kterou chceme získat válečkováním,
 K [-] - součinitel, jehož hodnoty jsou uvedeny v

Tab. 2.6.

Tab. 2.6 Hodnoty součinitele K ³⁴.

Ocel R_m [MPa]	Tlak na váleček [MPa]			
	200	500	1000	1500 až 2200
850	Součinitel K			
	0,40	0,30	0,12	0,12
750	0,40	0,20	0,08	0,06
450	0,12	0,10	0,08	0,06

➤ Technologický přídavek pro válečkování

Technologický přídavek pro válečkování se volí s ohledem na následující skutečnosti. V první řadě je třeba zohlednit, jaký materiál se bude válečkovat a následovně jaký účinek se požaduje od metody válečkování. Zda se bude provádět hladící, zpevňovací či kalibrovací válečkování³⁹.

U kalených či legovaných ocelí se přídavek na válečkování nedává. Hodnota těchto přídaveků je dána výchozí výškou mikronerovnosti po předešlém třískovém opracování součásti. U těchto materiálů se požaduje obrobení plochy s malou drsností. Je to zapříčiněno tím, že u těchto ocelí se dosáhne válečkováním jen malých změn. Na straně druhé máme materiály, které se lépe tváří. U takových materiálů může být povrch součásti opracován na vyšší hodnotu drsnosti³⁹.

U technologie, kde se požaduje značné zpevnění do hloubky, je využito větších tvářecích sil než při hlazení či kalibrování povrchů. Za působení těchto sil dochází mezi materiálem obrobku a válečkovacím elementem k vyšším tlakům. Tím je dosaženo větší hloubky plastické deformace. Materiál je po vyhlazení povrchu součásti stále přesouván kolem pracovního profilu válečkovacího elementu. Z těchto důvodů se dává přídavek na opracování v rozmezí $\Delta d = 0,1$ až 1mm na plochu³⁹. V literatuře³⁴ jsou přídávky voleny v závislosti

na jakosti plochy obrobené před válečkováním a je v rozsahu 0,02 až 0,08 mm³⁹.

Přídavek při hladícím válečkování je dán hodnotou stlačení vrcholů mikronerovností Δd (viz Obr. 2.4 v kapitole 2.3 na straně 29). Velikost výsledné zahlazené výšky se odvíjí od řady parametrů vstupujících do procesu válečkování. Zejména záleží na velikosti tvářecí síly F , na nepravidelném charakteru výšky mikronerovností R_{Z1} od předešlého třískového obrábění a v neposlední řadě i na vlastnostech válečkováného materiálu. Z provozních měření vychází skutečnost, že zahlazovací výška materiálu se může vyjádřit přibližně vztahem (2.16)³⁹ uvedeným v kapitole 2.3 na straně 29.

Tento vztah (2.16) byl sestaven za následujících předpokladů. Technologie válečkování probíhá při statickém působení tvářecí síly. Konečnou vlastností strojní součásti je vyhlazený povrch materiálu. Válečkování se provádí nástrojem s jedním tvářecím elementem ve tvaru zaobleného kotouče. Tento válečkový element je opracovaný na soustruhu soustružnickým nožem s poloměrem špičky $r = 0,3\text{mm}$ ³⁹.

Tab. 2.7 Přídavky na válečkování a střední aritmetická úchylka profilu⁶⁴.

Válečkováná součást		Vnitřní povrchy			Vnější povrchy		
Materiál	Průměr D [mm]	Přídavek [mm]	Střední aritmetická úchylka profilu Ra [μm]		Přídavek [mm]	Střední aritmetická úchylka profilu Ra [μm]	
			Obrobený	Válečkový		Obrobený	Válečkový
Materiály s vysokou houževnatostí, A>18%, tvrdost <25 HRC, žíhané oceli, tvárné litiny, slitiny Al, bronzy, mosazi	3 ÷ 12	0,010	2,0	0,2	0,010	2,0	0,2
		0,017	3,1		0,015	2,5	
	12 ÷ 25	0,017	1,5		0,012	2,0	
		0,040	3,1		0,025	4,5	
	25 ÷ 50	0,025	1,5		0,017	2,5	
		0,050	3,1		0,025	4,5	
	50 ÷ 165	0,040	1,5		0,025	3,1	
		0,075	5,0		0,050	10,1	
Materiály s nízkou houževnatostí, A<18%, tvrdost <40 HRC, zušlechtnuté oceli, šedé litiny, slitiny Mg, tvrdé slitiny Cu	3 ÷ 12	0,010	1,5	0,4	0,012	2,0	0,4
		0,017	3,1		0,025	4,5	
	12 ÷ 25	0,017	1,5		0,017	2,5	
		0,025	3,1		0,018	3,5	
	25 ÷ 50	0,025	3,1		0,012	2,5	
		0,040	4,5		0,025	4,5	
	50 ÷ 165	0,040	3,0		0,020	3,1	
		0,050	5,0		0,035	5,0	

Tab. 2.7 ukazuje typické přídavky pro válečkování. Jelikož je mnoho faktorů, které ovlivňují válečkování, je potřeba tyto údaje považovat pouze za orientační. Hodnoty v tabulce jsou stanoveny z experimentů⁶⁴.

Hodnoty přídavek pro hladící i kalibrovací účinek válečkování jsou dány výškou výchozí mikronerovnosti. Výška mikronerovnosti se změří pomocí dotykového profiloměru například Diavite DH-7 od výrobce Diavite AG. Výstupem přístroje jsou mimo jiné hodnoty mikronerovnosti povrchu a křivka nosného profilu^{39, 65}.

Tvary a rozměry ploch dokončované součásti

Výběr vhodného nástroje se odvíjí od řady požadavků zejména na tvar a konečné vlastnosti dokončené plochy. Pro různé tvary a rozměry strojních součástí se v dnešní době volí vhodný válečkovací nástroj³⁹.

Nejvíce aplikovanými technologiemi válečkování jsou kalibrování, hlazení a zpevňování válcových ploch (vnitřních i vnějších). Nejběžnější průměry, které válečkujeme, jsou v rozsahu $D = 30$ až 150 mm. Hladící a zpevňovací válečkování se obvykle použije k dokončení ploch u kroužků valivých ložisek, u zalomených hřídelí a jiných. Kalibračním válečkováním se dokončují součásti, které se vyrábějí velkosériově. Jedná se především o čepy či kolíky. Rozměry těchto dokončovaných součástí mají průměr $D_{\max} \leq 50$ mm a dosahují délek $L \leq 100$ až 120 mm³⁹.

Mezi další běžně válečkované tvary strojních součástí se řadí zejména zaoblené přechody či válečkování zápichů. V těchto částech se koncentruje napětí. Jedním z příznivých vlivů válečkování je zvýšení meze únavy u takto namáhaných ploch. Méně častou situací je válečkování kulových, kuželových, šroubovitých tvarů či rovinných ploch (vodící plochy strojních součástí)³⁹.

Další provozní předpoklady válečkování

Na kvalifikaci pracovníka nejsou kladeny žádné vysoké nároky, přesto při méně častých a náročnějších operacích je potřeba, aby školením prošli všichni účastníci procesu válečkování. V případech, kdy se válečkují neobvyklé tvary, či nové materiály strojních součástí je dobré, aby u průběhu válečkování byli přítomni technolog i konstruktér³⁹.

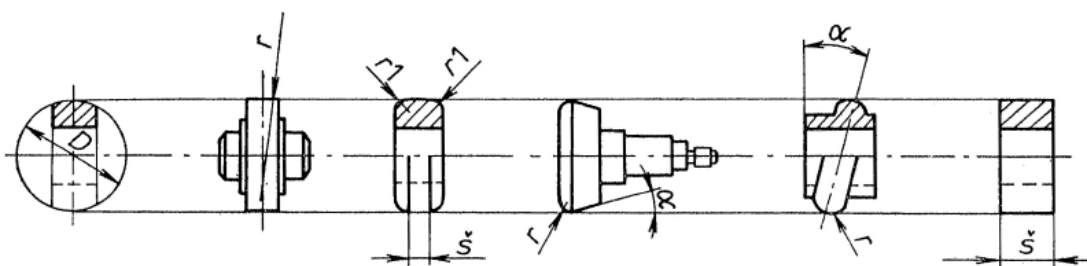
Před započítím válečkovacích operací na univerzálních obráběcích strojích jako je frézka, soustruh a další, je třeba zrevidovat, zdali parametry stroje jsou vhodné pro danou metodu válečkování. Je třeba zkontrolovat parametry, mezi které patří výkon, přesnost, pevnost, pracovní rozsah stroje apod³⁹.

K dalším důležitým úkonům, které je třeba provést po skončení válečkovacích operací, patří řádné vyčištění a ošetření použitých nástrojů, odstranění nečistot filtrací chladicí a mazací kapaliny, doplnění mazacích a chladících prostředků, a uskladnění nástrojů na patřičné místo, kde budou zkontrolovány před dalším použitím a případně opraveny funkční části válečkovacích elementů. Těmito kroky se minimálně prodlouží životnost strojních součástí, nástrojů, strojů a případně i budoucí součásti³⁹.

2.4 Tvářecí elementy

Válečkovací prvky ovlivňují kvalitu dokončené plochy. Před dokončením strojní součásti je třeba vhodně zvolit rozměr a geometrický tvar tvářecího elementu. Špatně zvolený či nesprávně ukotvený tvářecí prvek má za následek nesprávný průběh plastické deformace. Na povrchu takto dokončené součásti vznikají vizuální stopy a je na ní patrná vlnitost povrchu. Další následky jsou vysoké ztráty, které vzniknou vlivem třecích sil mezi nástrojem a dokončovanou plochou, nepřijatelné zahřívání nástroje a opotřebení funkčních ploch tvářecího elementu^{31, 34, 39}.

Z Obr. 2.10 a Obr. 2.11 jsou patrné charakteristické tvary válečkovacích elementů. Tyto prvky můžeme dělit do tří skupin podle typu uložení v nástroji^{31, 34, 39}.

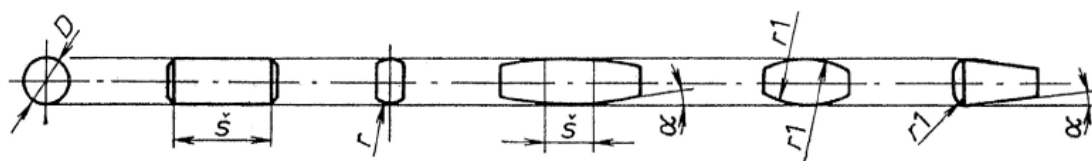


Obr. 2.10 Charakteristické tvary tvářecích elementů nesené středovým čepem³¹.

Jednu skupinu tvoří uložení se středovým čepem, jenž zadržuje dílčí složky tvářecích sil. Tohoto uložení využívají tvářecí prvky, které jsou zobrazeny v Obr. 2.10 (např. válečky, kotouče). Otočné uložení je zajištěno pomocí valivých ložisek^{31, 34, 39}.

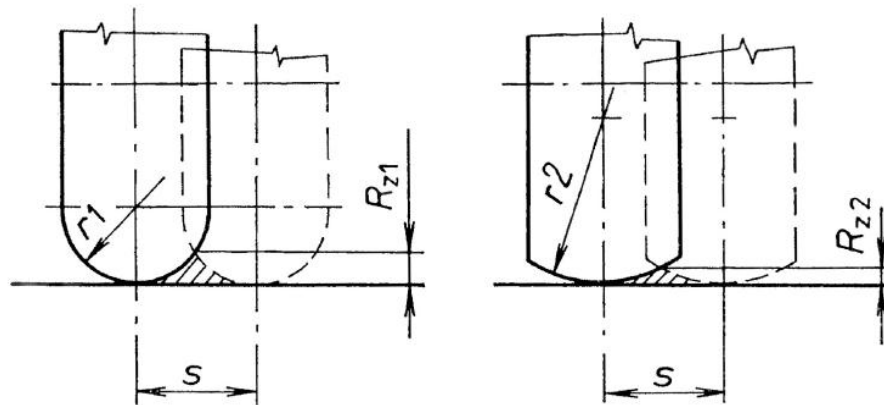
Další skupina obsahuje odvalující se válečkovací elementy po vodící dráze tvářecího nástroje. Jak je vidět z Obr. 2.11 nejčastěji používanými tvary těchto prvků jsou soudečky, válečky a kuželíky. Při dokončování součásti vznikají tvářecí síly, které působí na válečkovací elementy. Tyto síly, vzniklé válečkováním, pohlí vodící dráha tvářecího nástroje^{31, 34, 39}.

Poslední skupina možného rozdělení obsahuje běžné geometrické tvary. Tyto tvářecí elementy jsou zobrazeny v Obr. 2.10 a Obr. 2.11. Prvky patřící k této skupině mají tvar například válečku či kuličky. Síla působící na válečkovací elementy je vyvozena excentrickou vačkou či odstředivou silou^{31, 34, 39}.



Obr. 2.11 Charakteristické tvary válečkovacích elementů odvalujících se po vodící dráze nástroje³¹.

Na jakost dokončené plochy mají vliv rozměry a geometrický tvar funkční části tvářecího elementu, jenž je ve styku s povrchem součásti. Tvar elementu je dán poloměrem náběžové hrany r_1 , šířkou válcové části s , poloměrem zaoblení r a úhlem zkosení α . Tyto parametry jsou při válečkování důležité, jelikož mají vliv na posuv nástroje a velikost tvářecích sil. Jak je patrné z Obr. 2.12 má poloměr zaoblení r vliv na výslednou drsnost povrchu. V případě, že se zvolí menší poloměr tvářecího elementu, vzroste hodnota výsledné drsnosti povrchu. Velikost šířky válcové plochy, která je ve styku s plochou obrobku má za následek při neměnných podmínkách tvářecí síly zhoršení drsnosti povrchu a vede k nižšímu zpevnění povrchové vrstvy^{31, 34, 39}.



Obr. 2.12 Ukázka vlivu velikosti poloměru zaoblení válečkovacího elementu na výsledné drsnosti povrchu³¹.

Tvářecí elementy se vyrábí z rychlořezných, diamantových, karbidových nebo nástrojových ocelí. Nezbytné je, aby válečkovací elementy měly dobrou jakost povrchu a mechanické vlastnosti. Proto se materiály pro tvářecí elementy tepelně zušlechťují (tj. provádí se kalení a popouštění). Válečkovací prvky po tepelné úpravě mívají tvrdost povrchu 60 až 65 HRC. Část tvářecího elementu, která přichází do kontaktu s obrobkem má drsnost povrchu $R_a = 0,025\mu\text{m}$. Přítlačná síla, která působí na tyto prvky, je vyvolána mechanicky pružinami, vačkou nebo hydraulicky. Při opotřebení válečkovacích elementů je stačí vyměnit v nástroji^{31, 34, 39}.

2.5 Nástroje používané při válečkování

Volba vhodného nástroje se odvíjí od řady požadavků. Zejména se jedná o tvar válečkované plochy, vlastnosti dokončeného povrchu (mechanické vlastnosti a drsnost povrchu) a také záleží na konkrétních technologických podmínkách (velikost tvářecí síly, rychlost válečkování, pracovní posuv, materiál součásti a jiné). Pro různé tvary dokončovaných ploch, jsou různé typy válečkovacích nástrojů, které se mohou použít. Například pro válečkování vnitřních nebo vnějších válcových otvorů můžeme použít nástroj s jedním tvářecím prvkem (viz Obr. 2.13 a Obr. 2.14)³⁹.

2.5.1 Nástroje pro vnější válcové plochy

Při válečkování vnějších válcových ploch je využito jednoho a více tvářecích prvků. Tvářecí elementy mají tvar kuličky, válečku nebo zaobleného kotouče.

Válečkování se používá na univerzálních strojích. K mazání a chlazení postačí běžné chladicí emulze, které má stroj k dispozici^{34, 39, 46, 47}.

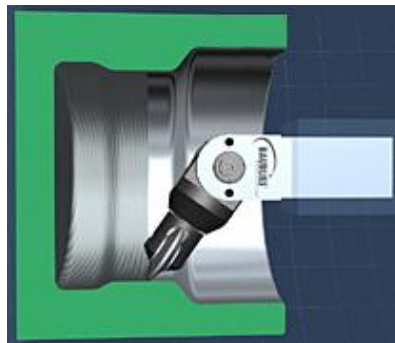
Na Obr. 2.13 je znázorněno válečkování vnější válcové plochy s provedením nástroje s jedním tvářecím elementem ve tvaru zaobleného kotouče. Válečkování tímto nástrojem je uplatněno hlavně v kusové výrobě pro objemnější součásti. Jak je patrné z kapitol 2.5.2 a 2.5.4 má tento nástroj velký okruh využití^{34, 39, 46, 47}.



Obr. 2.13 Schematické znázornění válečkování vnější válcové plochy s provedením nástroje s jedním tvářecím prvem^{34, 46, 47}.

2.5.2 Nástroje pro vnitřní válcové plochy

Dokončování vnitřních válcových ploch běžnými dokončovacími metodami, jakými mohou například být honování či broušení, si žádají nemalé prostředky na stroje a zařízení. Přičemž produktivita je u těchto metod nízká, což se odráží v ekonomické neefektivnosti. Použitím metody válečkování se dosáhne ekonomického zvýhodnění ve srovnání s běžnými metodami třískového obrábění. Dokončená plocha vykazuje značné zkvalitnění povrchové vrstvy, což se projeví například na zvýšené únosnosti povrchové vrstvy či odolnosti dokončené plochy vůči korozi^{39, 46, 47, 63, 63}.



Obr. 2.14 Ukázka nástroje s jedním tvářecím prvem k válečkování vnitřních válcových ploch⁴⁶.

Při válečkování vnitřních ploch je použito více tvářecích elementů, ale jak je zobrazeno v Obr. 2.14 je možné tyto plochy dokončit nástrojem, který má jeden tvářecí prvek ve tvaru zaobleného kotouče^{39, 46, 47, 63, 63}.

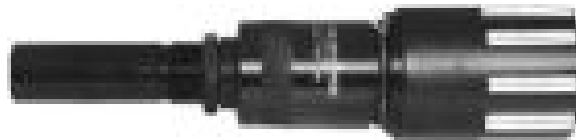
Nejčastěji používanými tvary elementů jsou kuličky, soudečky, válečky a kuželíky. Dokončování těchto ploch je více rozšířené než dokončování vnějších válcových ploch. Válečkováním se běžně dokončují minimální vnitřní průměry 30 mm a maximální délky otvorů do 120 mm. Schematické znázornění

nástroje s více tvářecími prvky k válečkování vnitřních válcových ploch je uvedeno na Obr. 2.15^{39, 46, 47, 63, 63}.



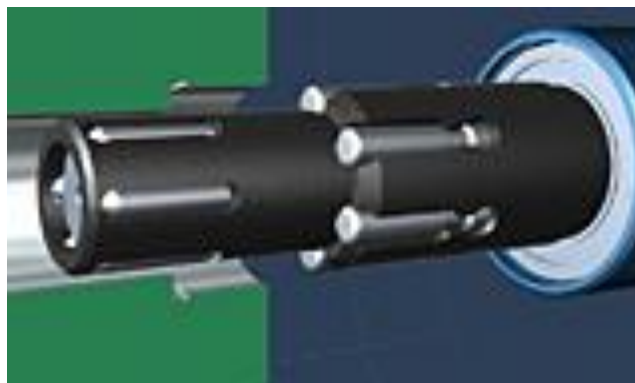
Obr. 2.15 Schematické znázornění nástroje s více tvářecími prvky k válečkování vnitřních válcových ploch⁶³.

Ukázka zobrazení takového nástroje je na Obr. 2.15 od výrobce Elliott Tool Technologies. Zobrazený válečkový nástroj je zpracován ve 13 rozměrových typech pro průměry 4,7 až 165,1 mm. Od typové řady 5405 je válečkový průměr větší jak průměr těla nástroje. To znamená, že válečkováná délka je dána délkou nástroje nebo upínacím držákem. Typovou řadou jsou dány rozměry nástroje, mezi které patří rozsah válečkování průměru, maximální délka válečkování, efektivní délka nástroje a průměr těla nástroje. Upínací stopka nástroje je zhotovena ve tvaru válcovém nebo Morse kužele^{39, 46, 47, 63, 63}.



Obr. 2.16 Zobrazení válečkovacího nástroje podle Obr. 2.15⁶⁷.

K dokončení povrchu odstupňovaných otvorů se může použít speciální nástroj, který je uveden na Obr. 2.17. Povrch součásti před válečkováním je vystružen a drsnost povrchu po této operaci je $R_a = (0,5 - 1,5) \mu\text{m}$. Technologický přídavek na opracování volíme v rozmezí $\Delta d = (0,01 - 0,02) \text{mm}$ ^{39, 46, 47, 63, 63}.



Obr. 2.17 Speciální nástroj pro odstupňované otvory⁴⁷.

2.5.3 Nástroje pro rovinné plochy

Rovinné plochy se dokončují například broušením či frézováním, ale jejich pracnost je vysoká a produktivita nízká. Při použití metody válečkování dojde ke zkvalitnění povrchu a k jeho zpevnění. Povrch vykazuje větší otěruvzdornost a olejový film lépe přilne k povrchu. Tím se snižuje součinitel kluzného tření^{36, 47}.

Válečkování rovinných ploch sice není v dnešní době tak běžné jako u válcových ploch, ale nástroje pro dokončení těchto ploch jsou již známy. Těmito nástroji je možné válečkovat téměř jakékoliv formy rovinných ploch. U válečkování rovinných ploch klademe důraz na univerzálnost a nízkou cenu nástroje. Válečkování se provádí na běžných univerzálních strojích, jakými jsou například soustruhy, vrtačky, frézky^{36, 47}.

V Obr. 2.18 je schematicky naznačen způsob válečkování čelních rovinných ploch s vyobrazením celého nástroje a pohledem na nástroj ze strany tvářecích elementů^{36, 47}.



Obr. 2.18 Způsob válečkování čelních ploch a provedení nástroje pro tyto plochy⁴⁹.

2.5.4 Nástroje pro tvarové plochy

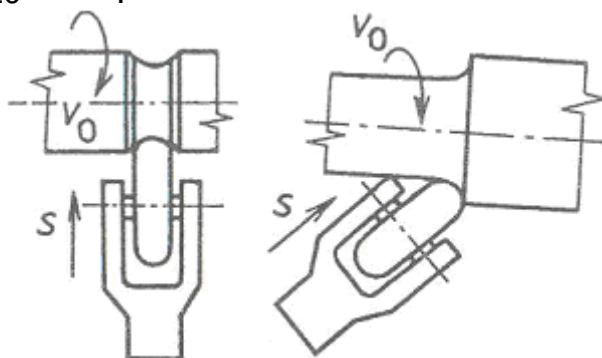
Nástroje pro tvarové plochy se použijí při válečkování zaoblených přechodů u zalomených hřídelů, závitů a také u zubů ozubených kol. Na těchto plochách je větší koncentrace napětí. Válečkováním takto namáhaných ploch dosáhneme nejenom zlepšení mechanických vlastností a snížení mikronerovnosti povrchu, ale dojde i k jeho zpevnění a vyhlazení^{34, 39, 49}.



Obr. 2.19 Zobrazení nástrojů k válečkování vnitřních kuželových ploch a vnějších a vnitřních kulových ploch⁴⁹.

Nástroje k válečkování tvarových ploch mají různá konstrukční řešení podle toho, jaký typ plochy válečkují. Může se například jednat o vnitřní či vnější kulové plochy, vnitřní nebo vnější kuželové plochy nebo vnitřní či vnější zaoblené plochy. Některé příklady nástrojů k válečkování tvarových ploch jsou uvedeny v Obr. 2.19^{34, 39, 49}.

K válečkování těchto ploch se volí běžně používané tvary tvářecích elementů, jako jsou válečky, kuličky, kuželíky. Pro válečkování zápichu či zaobleného přechodu se použije nástroj s jedním tvářecím prvkem ve tvaru zaobleného kotouče. Příklad dokončení zápichu a zaobleného přechodu je vidět z Obr. 2.20^{34, 39, 49}.

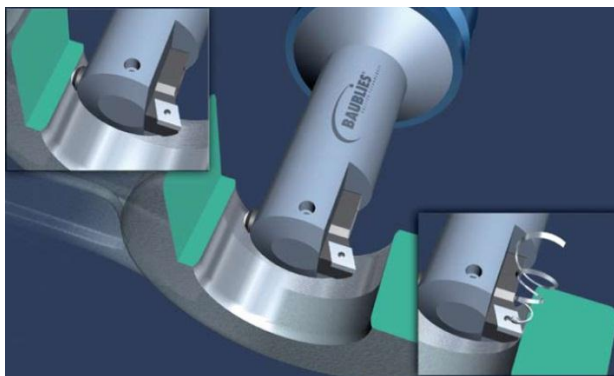


Obr. 2.20 Schematické znázornění válečkování zápichu a zaobleného přechodu³⁴.

2.5.5 Nástroje pro speciální použití

Jedná se o speciálně vyvinuté nástroje, které povrch součásti třískově obrábí a dokončují válečkováním v jedné operaci. Kombinované nástroje ovlivní a zkrátí strojní časy, což je ekonomicky přijatelnější⁴⁸.

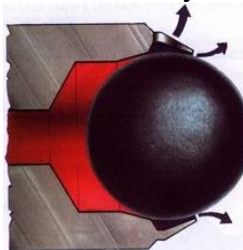
Na Obr. 2.21 je zobrazen nástroj, který slouží ke kombinovanému třískovému obrábění s válečkováním v jedné operaci. Nástroj se sestává ze soustružnického segmentu a válečkovacího diamantového elementu. Tento nástroj je vhodný k dokončování vnitřních válcových ploch. Při zajištění do otvoru součásti je prováděna soustružnická operace a při zpětném pohybu nástroje z otvoru je využito válečkovacího elementu. Touto aplikací sdruženého nástroje se výrazně zkrátí strojní časy potřebné k opracování výrobku⁴⁸.



Obr. 2.21 Speciální válečkovací nástroj⁴⁸.

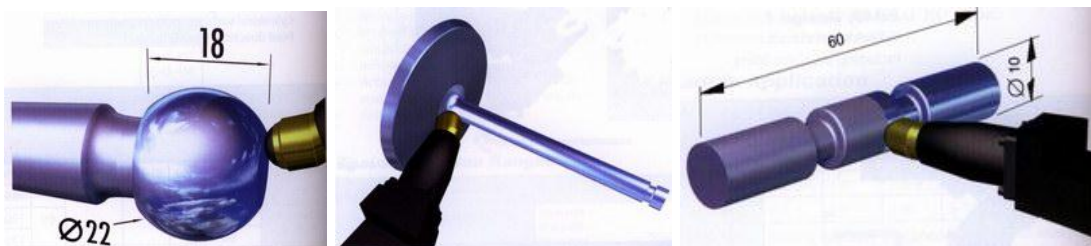
2.5.6 Hydrostatické nástroje

U hydrostatických nástrojů je síla na kuličku vyvolána tlakem kapaliny, nejčastěji olejem nebo olejovou emulzí. Síla kuličky působící na dokončovanou plochu se reguluje na čerpadle nastavením tlaku. Na Obr. 2.22 je detailní pohled na kuličku hydrostatického nástroje. Kolem kuličky uniká kapalina, která zajišťuje potřebné mazání mezi nástrojem a dokončovanou plochou⁸⁰.



Obr. 2.22 Pohled na kuličku hydrostatického nástroje⁸⁰.

Hydrostatickými nástroji se dokončují mimo jiné kulové tvary, rovinné plochy, zaoblení hran, jak je patrné z Obr. 2.23⁸⁰.



Obr. 2.23 Příklady použití hydrostatického nástroje⁸⁰.

2.6 Stroje a zařízení

Válečkování nepotřebuje speciální stroje. Válečkovací operace lze provádět na běžných vřetenových strojích, CNC soustruzích, konvenčních strojích, vrtačce, frézce a v obráběcích centrech^{34, 36}.

Na Obr. 2.24 je uveden CNC univerzální hrotový soustruhu od výrobce Kovosvit MAS, a.s., na kterém probíhají běžné soustružnické operace a zároveň je stroj uzpůsoben k válečkování válcových a přechodových rádiusových ploch. Tento stroj je vybaven několika válečkovacími hlavami⁶⁰.



Obr. 2.24 Masturn 70/3000 CNC - Roller⁶⁰.

V Obr. 2.25 je detailní pohled do pracovního prostoru CNC univerzálního hrotového soustruhu od výrobce Kovosvit MAS, a.s., kde probíhá válečkování jednokotoučovými válečkovacími nástroji přechodových rádiusových ploch u válcové součásti⁶⁰.



Obr. 2.25 Masturn 70/3000 CNC - Roller⁶⁰.

V důsledku použití konvekčních obráběcích strojů neinvestujeme do dalšího strojního zařízení. Zkrátí se tím i časy manipulace materiálu z jednoho stroje na druhý. Válečkování není složitá operace, a proto obsluha při ní nemusí být speciálně vyškolená³⁹.

3 SIMULACE VÁLEČKOVÁNÍ POMOCÍ EXPLICITNÍ MKP

Příprava a samotná simulace s výsledky se skládá ze tří základních kroků:

- preproceing,
- simulace v programu ANSYS LS-DYNA,
- postproceing.

Preproceing v sobě zahrnuje vytvoření modelu (2D nebo 3D), na kterém se bude provádět simulace v prostředí ANSYS LS-DYNA. 2D model byl vytvořen v programu AutoCad 2010. V další části preproceingu se v programu LS-PrePost 2_4 vygeneruje síť konečných prvků (viz. Obr. 3.6), nastaví se podmínky simulace, jako jsou rychlosti, materiálové konstanty obrobku a kuličky. Po zadání všech potřebných podmínek se výstupní .k soubor uloží a následně je načten do programu ANSYS LS-DYNA 12.0.1, kde se spustí samotný výpočet zadaného problému podle nastavených podmínek. Vypočtené hodnoty a práce s nimi je možné provést ve třetím kroku v LS-PrePost 2_4.

3.1 Vstupní podmínky válečkování pro simulaci

Materiál modelu součásti byl z ušlechtilé uhlíkové oceli ČSN12 050 s mezí kluzu 400 MPa. Válečkování probíhalo pro 3 různé tvářecí síly. Pro každou tvářecí sílu byl použit materiálový model o rozměrech 7 x 2 mm a váleček o průměru 30 mm. Struktura povrchu materiálového modelu je převzata z literatury⁸⁶. Válečkování je zobrazen na Obr. 3.6. V Tab. 3.1 jsou uvedeny vstupní hodnoty vybraných parametrů, které byly při výpočtu použity.

Tab. 3.1 Vstupní hodnoty vybraných parametrů.

Modul pružnosti materiálu a kuličky E_1, E_2	$2,1 \cdot 10^5$ MPa
Poissonovo číslo materiálu a kuličky ν_1, ν_2	0,3
Mez kluzu materiálu R_e	400 MPa
Průměr válečkované součásti	34 mm
Počet otáček	800 min^{-1} (určeno z grafu na Obr. 3.1)
Průměr tvářecího elementu	30 mm
Délka válečkování	7 mm
Počet pracovních cyklů	1
Délka kontaktu	1 mm

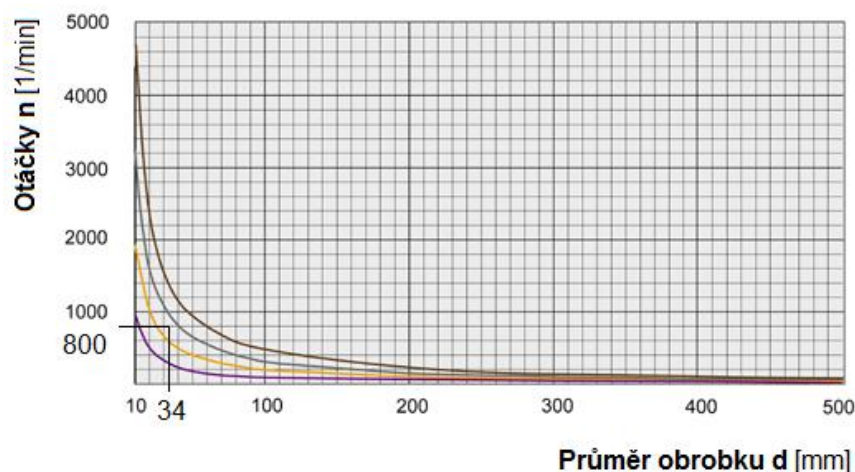
Tlak na váleček byl vypočten podle vztahu 2.17 v kapitole 2.3.3 (str. 35). Tlak byl určen pro 3 různé hodnoty. Podle uvedeného vztahu 2.17 byl tlak získán pro maximální, niminální a průměrnou hodnotu koeficientu. Podle uvedených vztahů v kapitole 3.1 (str. 55) byla vypočtena tvářecí síla a hloubka vtažení kuličky do materiálu. Vypočtené hodnoty jsou zobrazeny v Tab. 3.2

Tab. 3.2 Vypočtené hodnoty válečkovacích parametrů pro simulaci.

Tlak na váleček p_k [MPa]	Koeficient	Tvářecí síla F [N]	Hloubka vtlačení kuličky do materiálu d [mm]
720	1,80	113	0,0012
780	1,95	132	0,0015
840	2,10	153	0,0017

Redukovaný modul pružnosti E^*	115384,6154 MPa
Ekvivalentní poloměr zakřivení R	7,96875 mm
Rychlost válečkování	75,4 m/min (1,2566 m/s)

Počet otáček byl zjištěn z grafu závislosti válečkovací rychlosti na průměru obrobku (viz Obr. 3.1). Graf závislosti je určen pro jednokotoučový variabilní nástroj od firmy Baublies.

Obr. 3.1 Graf závislosti válečkovací rychlosti na průměru obrobku⁴⁶.

3.1 Hloubka průniku válečku do materiálu

Hloubka průniku válečku do materiálu se stanovila na základě Herzova vztahu. Herzovy vztahy jsou v literatuře⁸⁷ uvedeny pro několik kontaktů mezi dvěma tělesy. Při válečkování dochází ke kontaktu mezi válečkováným materiálem a válečkem tj. jako mezi dvěma válci s paralelními osami (viz Obr. 3.3), proto je pro hloubku průniku válečku do materiálu uveden vztah (3.1)^{87, 88}. Hloubka průniku válečku do materiálu je znázorněna na Obr. 3.2. U tohoto typu kontaktu je síla lineárně úměrná hloubce vtlačení^{87, 88}.

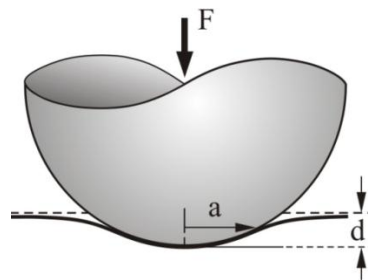
$$F = \frac{\pi}{4} * E^* * L * d \quad 3.1$$

kde: F [N] - tvářecí síla,
 π [-] - Ludolfovo číslo,
 L [mm] - délka kontaktu kuličky s obrobkem,

d [mm] - hloubka vtlačení kuličky,
 E^* [MPa] - redukovaný modul pružnosti, který se vypočte ze vztahu (3.2)^{87, 88}.

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \quad 3.2$$

kde: E_1 [MPa] - Youngův modul pružnosti válečkovaného materiálu,
 E_2 [MPa] - Youngův modul pružnosti pro materiál tvářecího elementu,
 ν_1 [-] - Poissonovo číslo pro válečkovaný materiál,
 ν_2 [-] - Poissonovo číslo pro materiál tvářecího elementu.



Obr. 3.2 Vtisk kuličky do materiálu silou F ,
 d – hloubka vtlačení kuličky, a - poloměr vtlačené kuličky⁸⁷.

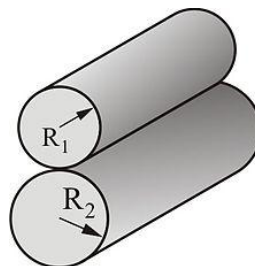
Poloměr vtlačené kuličky je popsán pomocí vztahu (3.3)^{87, 88}.

$$a = \sqrt{R * d} \quad 3.3$$

kde: a [mm] - poloměr vtisku,
 d [mm] - hloubka vtlačení kuličky do materiálu,
 R [mm] - ekvivalentní poloměr zakřivení, který se vypočte ze vztahu (3.4)^{87, 88}.

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad 3.4$$

kde: R_1 [mm] - poloměr tvářecího elementu,
 R_2 [mm] - poloměr válečkovaného materiálu.



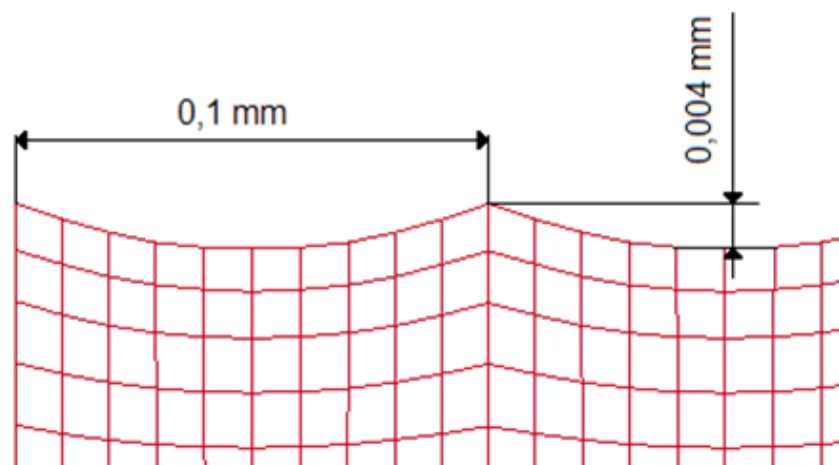
Obr. 3.3 Kontakt mezi dvěma válci s paralelními osami⁸⁷.

Maximální tlak lze vypočítat ze vztahu (3.5)^{87, 88}.

$$p_0 = \left(\frac{E^* * F}{\pi * L * R} \right)^{1/2} \quad 3.5$$

3.2 Preprocessing

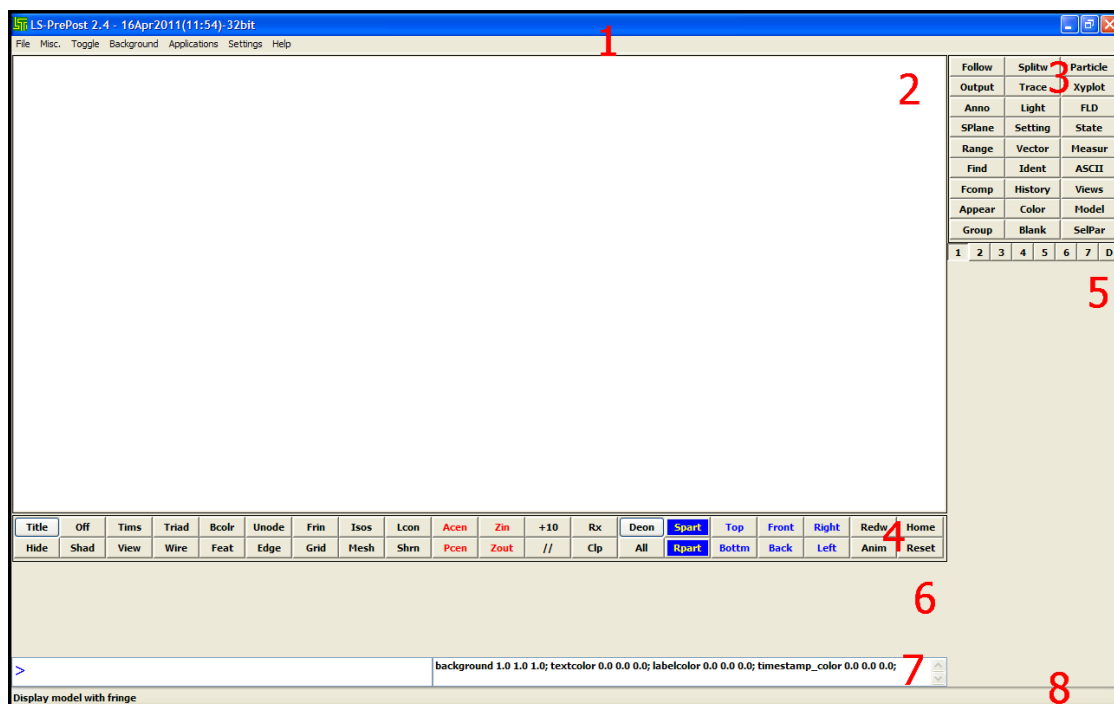
Pro simulace prováděné v programu ANSYS LS-DYNA byl vytvořen 2D model kuličky a obrobku. Rozměr obrobku a kuličky je pro všechny prováděné simulace shodný. Pro obrobek byl vytvořen model o rozměrech 7 x 2 mm a pro kuličku model o průměru 30 mm. Drsnost povrchu dokončované součásti po obrábění byla převzata z literatury⁸⁶ a podle ní vytvořena (viz Obr. 3.4).



Obr. 3.4 Drsnost povrchu součásti před válečkováním.

Po vytvoření modelu se spustil program LS-PrePost. Prostředí LS-PrePost je vidět v Obr. 3.5. Čísla označují jednotlivé části v programu. Legenda k číslům zobrazeným v Obr. 3.5²⁴:

- **1. hlavní nabídka** – import, otevírání a ukládní souborů, nastavení programu,
- **2. grafické okno** – zobrazení modelu,
- **3. stránky** – funkce pro práci se zobrazeným modelem (posun modelu, vytvoření sítě konečných prvků, zobrazení výsledků apod.),
- **4. ovládání vzhledu** – funkce pro rychlou práci s modelem (zobrazení sítě konečných prvků, zoom +, zoom - apod.),
- **5. primární zadání příkazu** – podle vybrané funkce v bodě 3, se zobrazí její vlastnosti (2. stránka/Translt - posun modelu ve vybrané ose o zvolenou délku),
- **6. sekundární zadání příkazu** – okno pro simulaci namodelované součásti,
- **7. příkazová řádka** – v poli se zadávají příkazy a zobrazují se zde chybová hlášení,
- **8. stavový řádek** – zobrazení informací o příkazu a rychlé nápovědy.

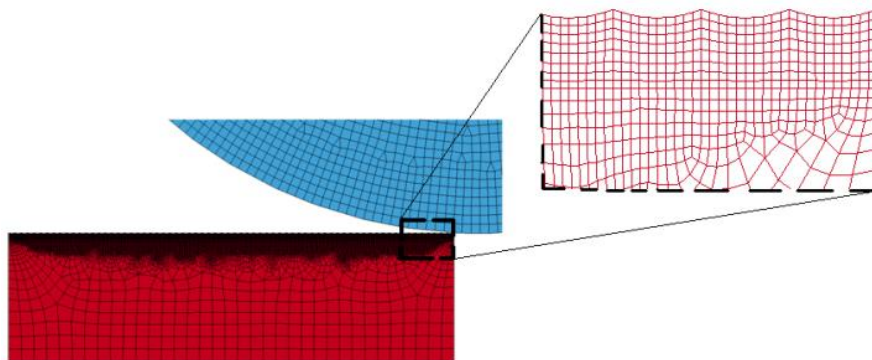


Obr. 3.5 Programové prostředí Lsprepost.

Vytvořené modely obrobku a kuličky byly uloženy ve formátu IGS a načteny do programu LS-PrePost příkazem **File -> Import**.

V prvním kroku je potřeba pro obě tělesa vytvořit v programu síť konečných prvků. U obrobku je potřeba, aby elementy ve vrchní části byly co nejjemnější, jelikož se budou nejvíce deformovat při válečkování. Kvůli této skutečnosti bylo na jeden „oblouk“ vytvořeno 10 elementů (viz Obr. 3.4). U kuličky se neklade takový důraz na jemnost sítě konečných prvků.

Síť konečných prvků se vytvořila na stránce 7 v položce SurMesh. Na této stránce jsou i funkce pro práci se sítí. Zde po vybrání plochy a zvolení velikosti elementu se automaticky provede výpočet sítě. Síť se vytvářela ve dvou krocích a to postupně pro obrobek a následně pro kuličku. Po vygenerování se zkontroluje, zda se síť správně vytvořila. Pokud není správně vytvořena je potřeba provést korekce. Vygenerovaná síť je zobrazena na Obr. 3.6.



Obr. 3.6 Síť konečných prvků mesh.

V dalším kroku je potřeba vytvořit skupinu uzlů pro definici vazeb a pohybu. To je provedeno na stránce 5, kde je vybráno tlačítko SetD. V zobrazené části 5 (viz Obr. 3.5) se v roletce vybere položka *SET_NODE a je potřeba definovat vazby kuličky, obrobku, spodní řady uzlů a krajní stranu obrobku.

Dále je potřeba určit rychlost posuvu obrobku a rychlost otáčení kuličky. Otáčky kuličky byly získány z grafu v Obr. 3.1 a jsou 800 min^{-1} . Obrobek se pohybuje stejnou rychlostí, kterou se kulička otáčí. Na stránce 3 v položce *Define se nadefinují křivky rychlosti. V zobrazeném seznamu je potřeba vymazat všechny položky tlačítkem Delete až na jednu. Ta se upraví podle potřeb zadaných rychlostí. Rychlosti jsou v Tab. 3.3 uvedeny v m/s.

Tab. 3.3 Hodnoty křivek rychlosti.

A1	O1
0	0,395
0	32,000
0	1,2566

Po tomto kroku je nutné identifikovat skupinu uzlů, na které se křivka rychlosti aplikuje. To se provede v položce *Boundry a vybere se ze seznamu PRESCRIBED_MOTION_SET.

Stejně tak je potřeba zavazbit skupiny uzlů, které jsou nadefinované. Ze seznamu zvolte položku SPC_SET. Obrobek se bude pohybovat v ose X, a proto pro pole DOFY a DOFZ budou mít položky hodnotu 1. Ta omezuje pohyb součásti v těchto osách. Dále se zde provede zavazbení spodní a boční strany obrobku.

V BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION_RIGID se nastaví pohyb nástroje a provede se výběr skupin a křivek.

Na stránce 3 v položce *Contact je v seznamu upravena položka kontaktu CONTACT_2D_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE. Zde se nadefinují součásti, které jsou v kontaktu. Kontakt definuje obrobek – nástroj.

Na stránce 3 v položce *Define se nadefinuje křivka skutečného napětí (logaritmické přetvoření) pro zvolený materiálový model.

Materiál je nadefinován na 3. stránce v položce *Mat. Pro obrobek je zvolen model materiálu PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY. Materiál odpovídá podmínce redukovaného přetvoření (viz kapitola 1.4.2). Parametry jsou uvedeny v Tab. 3.4.

Tab. 3.4 Hodnoty materiálového modelu Piecewise_Linear_Plasticity.

RO	7.840e-006
E	208.00000
PR	0.3000000

Pro kuličku byl zvolen tuhý materiálový model RIGID. Parametry tohoto materiálu jsou uvedeny v Tab. 3.5.

Tab. 3.5 Hodnoty materiálového modelu Mat_Rigid.

RO	7.840e-006
E	210.00000
PR	0.3000000

Na straně 5 v položce PartD se kuličce a obrobku přiřadí materiálový model.

Na stránce 3 v položce ***Control** je potřeba provést následující kroky²⁴:

- nastavit chování skořepinových elementů při výpočtu. To se provede v položce SHELL.
- nastavit výpočet energií, které se provedou v položce ENERGY. U této položky je potřeba všechny hodnoty nastavit na 2.
- nastavit časový krok. Ten se nastaví v položce TIMESTEP.
- nastavit konec výpočtu. Nastavení se provede v položce TERMINATION a je povinné. Do pole ENDTIME se zapíše časová hodnota v ms. Po této době se výpočet v programu ANSYS LS-DYNA ukončí.

Na stránce 3 v položce ***Dbase** se nastavuje časový interval mezi výstupy z programu ANSYS LS-DYNA a je potřeba zde provést následující kroky:

- nastavit vytvoření zálohy výpočtu. K tomuto slouží položka BINARY_D3DUMP. Zapsaný výpočet zálohy bude mít název D3DUMP. Číslo za D3DUMP označuje krokování uložených souborů. Tento soubor se nachází ve složce uložených výsledků. Soubor se použije v případech, kdy je potřeba zastavit výpočet (restartování PC) a v budoucnu se k němu vrátit. Více o možnostech práce s tímto souborem v kapitole 3.1.2.
- nastavit uložení vypočtených výsledků. Nastavení se provede v položce BINARY_D3PLOT. Zapsaný výpočet zálohy bude mít název D3PLOT. Číslo za D3PLOT označuje krokování uložených souborů. Tento soubor se nachází ve složce uložených výsledků.
- nastavit časovou historii skupin. Nastavení se provede v položce BINARY_D3THDT. Zapsaný výpočet zálohy bude mít název D3THDT. Číslo za D3THDT označuje krokování uložených souborů. Tento soubor se nachází ve složce uložených výsledků.
- nastavit zápis binárních souborů. K tomuto slouží položka EXTENT_BINARY. Zde možné nastavit v položce DT časový interval pro grafický výstup.

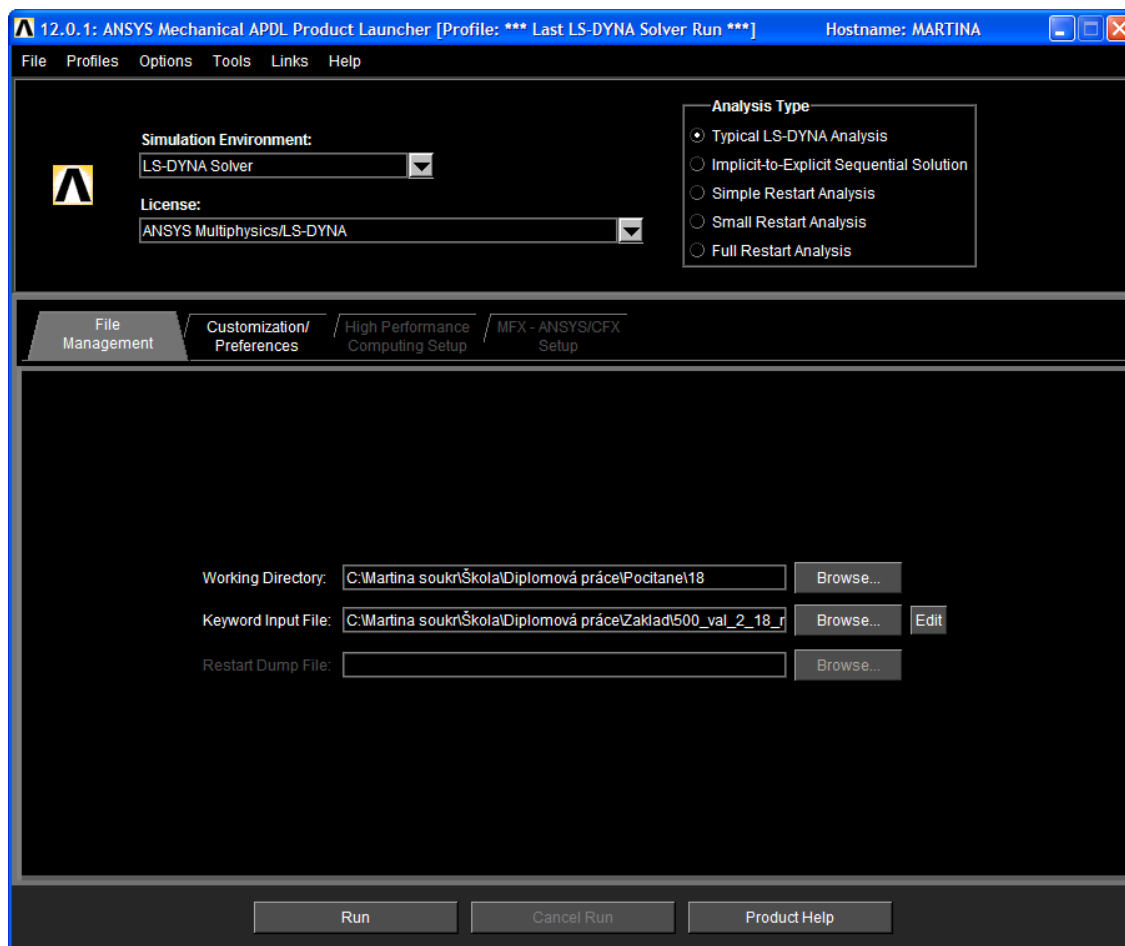
Po zadání všech potřebných podmínek se výstupní .k soubor uloží v menu **File -> Save Keyword**.

3.3 Výpočet problému v programu ANSYS LS-DYNA

Výpočet je proveden v programu ANSYS LS-DYNA. Proto je potřeba otevřít soubor s názvem **Mechanical APDL Product Launcher**. V zobrazeném okně (viz Obr. 3.7) je potřeba vybrat v poli:

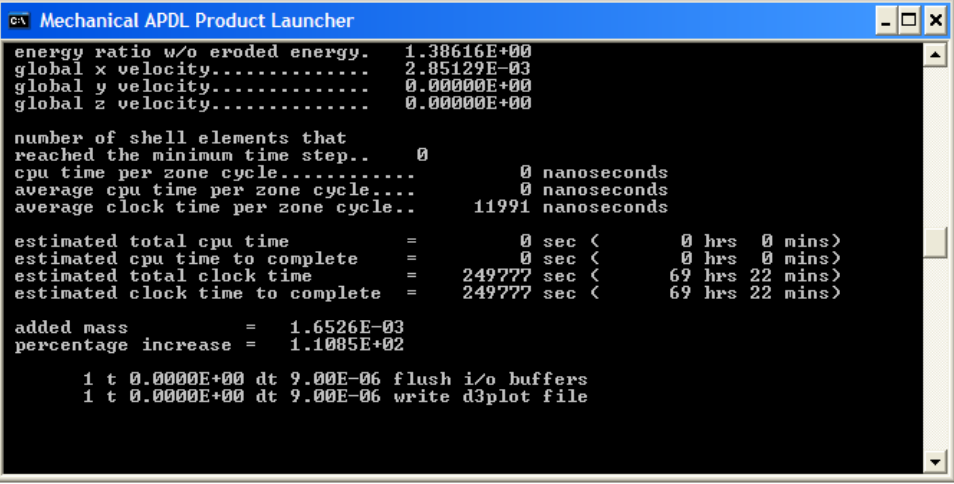
- **Simulation Environment** položku LS-DYNA Solver
- **License** položku ANSYS Multiphysics/LS-DYNA

Dále je potřeba v záložce **Customization/Preferences** zadat do pole **Number of CPUs** počet procesorů. V záložce **File Management** v poli **Working Directory** nastavíme cestu k souboru, do kterého se budou zapisovat vypočtené výsledky programem ANSYS. Naopak v poli **Keyword Input File** je potřeba nastavit cestu k souboru, který obsahuje vstupní data k výpočtu (.k soubor).



Obr. 3.7 Prostředí programu ANSYS Mechanical APDL Product Launcher.

Samotný výpočet se spustí kliknutím na tlačítko **Run**. Po tomto kroku se zobrazí okno s textovým výpisem stavu úlohy (viz Obr. 3.8).



```

Mechanical APDL Product Launcher
energy ratio w/o eroded energy. 1.38616E+00
global x velocity..... 2.85129E-03
global y velocity..... 0.00000E+00
global z velocity..... 0.00000E+00

number of shell elements that
reached the minimum time step.. 0
cpu time per zone cycle..... 0 nanoseconds
average cpu time per zone cycle... 0 nanoseconds
average clock time per zone cycle.. 11991 nanoseconds

estimated total cpu time = 0 sec < 0 hrs 0 mins>
estimated cpu time to complete = 0 sec < 0 hrs 0 mins>
estimated total clock time = 249777 sec < 69 hrs 22 mins>
estimated clock time to complete = 249777 sec < 69 hrs 22 mins>

added mass = 1.6526E-03
percentage increase = 1.1085E+02

1 t 0.0000E+00 dt 9.00E-06 flush i/o buffers
1 t 0.0000E+00 dt 9.00E-06 write d3plot file

```


Obr. 3.8 Okno s textovým výpisem o stavu úlohy.

V průběhu výpočtu lze výpočet přerušit stisknutím klávesových zkratk **Ctrl+C**. Program poté čeká na další příkaz, který může být:

- **sw1** – zapsání restart-souboru a ukončení výpočtu,
- **sw2** – zjištění doby výpočtu, počtu cyklů, časového kroku, pokračování ve výpočtu,
- **sw3** – zápis restartovaného souboru a pokračování ve výpočtu,
- **sw4** – zápis výsledného souboru a pokračování ve výpočtu.

Pokud je potřeba výpočet zastavit (restartování PC) a v budoucnosti se k němu vrátit, použije se příkaz **sw1**. Příkazem se uloží (zapiší) vypočtené hodnoty a ukončí se výpočet. S výpočtem je možné pokračovat později tak, že v prostředí programu ANSYS Mechanical APDL Product Launcher v části **Analysis Type** se zatrhne pole **Simple Restart Analysis**. Po tomto kroku se v záložce **File Management** zvýrazní pole **Restart Dump File**. Do tohoto pole se nastaví cesta k souboru **D3DUMP**. Tento soubor se nachází ve složce uložených výsledků. Číslo za d3dump označuje krokování uložených restart souborů. Tudíž je potřeba vybrat soubor s nejvyšším číslem.

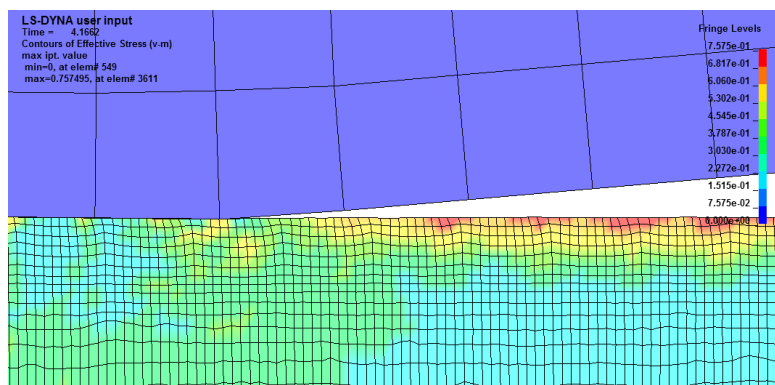
3.4 Postprocessing

Po skončení výpočtu je možné výsledný soubor d3plot načíst do programu LS-PrePost a zobrazit výsledky výpočtu (viz Obr. 3.9). Po načtení souboru je zobrazen model a v dolní části programu se zobrazí panel pro simulaci výsledků. Simulaci lze ovládat šipkami doprava nebo doleva. Simulaci je možné prohlédnout po jednotlivých krocích a to stiskem tlačítka + nebo -. Pokud je potřeba simulaci zastavit, provede se to stiskem tlačítka  nebo pauzou



Pro vyhodnocení výsledků získaných z výpočtu slouží v prvním listu tlačítko **Fcomp**. V zobrazeném menu v pravé dolní části je potřeba stisknout na tlačítko **Stress**. V pravé části se zobrazí seznam, kde je možné vybrat označením zbytkovou napjatost, ekvivalentní napětí, přetvoření, **Pressure** (tlak),

Von Mises Stress (napětí HMH) a mnoho dalších. Je jenom na uživateli, kterou položku v seznamu si vybere. Pro vytvoření grafického výstupu z programu LS-PrePost se použije příkaz v menu **File/Print**. Pro vytvoření animace je potřeba použít příkaz v menu **File/Movie**.

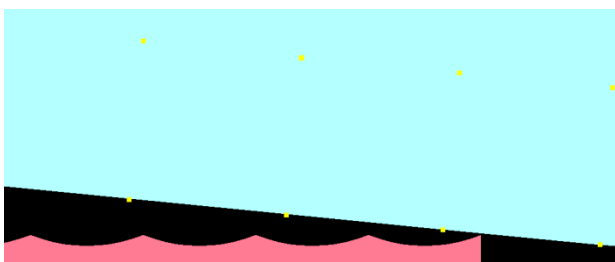


Obr. 3.9 Výsledek výpočtu zobrazený v LS-PrePost.

3.5 Generování .k souboru pro jiný tlak válečku

Válečkování je simulováno pro tři různá nastavení tlaku. Proto je potřeba upravit .k soubor pro další simulace. Tlak vyvozený na váleček se projeví v hloubce vniku válečku do materiálu.

Nastavení se provede v programu LS-PrePost na druhé stránce stiskem tlačítka **Translt**. Je potřeba vybrat těleso (váleček) pro posun v souřadnicovém systému. V levé dolní části se zatrhne položka **Area** a následně stiskem levého tlačítka myši a tahem se vyberou všechny body (viz žluté body v Obr. 3.10) na ploše tělesa. Pro lepší zobrazení vybíraných bodů je možné použít tlačítko **Zin** (přiblížení tělesa).



Obr. 3.10 Zin válečku a obrobku v programu LS-PrePost.

Po výběru všech bodů je potřeba se přiblížit tlačítkem **Zin** tak, aby bylo vidět jen část válečku a mikronerovnost simulované plochy (viz Obr. 3.10). Následně se v pravé části vybere posun v ose x a nastaví se hodnota pro posun do pole **Translate distance**. Tlačítkem **Tran +**, **Tran -** se pohybuje ve vybrané ose (x, y, z). Váleček posuneme tak, aby byl v největší hloubce v obrobku. Poté se zvolí posun v ose y tak, aby se váleček dotýkal obrobku. Následně se váleček posune do obrobku o vypočtenou hodnotu. Po provedení se zvolí opět posun v ose x a odjede se s válečkem mimo materiál. Změna nastavení se uloží v menu **File/Save keyword As...** a spustí se simulace s novým nastavením.

4 PRAKTICKÁ ČÁST: VÁLEČKOVÁNÍ VNITŘNÍ KUŽELOVÉ PLOCHY

4.1 Úvod k praktické části

Praktická část probíhala na Vysokém učení technickém na fakultě strojního inženýrství v Brně. Cílem bylo zjistit hodnoty zbytkových napětí po válečkování. Proto jsou v kapitole předně uvedeny možné metody měření zbytkových napětí.

4.2 Metody a možnosti měření zbytkových napětí

Při výrobě strojních součástí dochází k silovému či teplotnímu ovlivnění materiálu. Tím vznikají v materiálu napětí. Pokud není splněna podmínka plasticity a dojde k odstranění zdroje příčiny, napětí zcela vymizí. Napětí působí v tomto případě v oblasti pružných deformací. Pokud je splněna podmínka plasticity, napětí působí v plastických deformacích, která v materiálu zůstávají. Těmto napětím se říká zbytková napětí. Zbytková napětí ovlivňují mechanické vlastnosti strojních součástí. Zbytková napětí mohou být škodlivá či prospěšná. Příznivá zbytková napětí jsou například tlaková, která vznikají při technologii válečkování. Metody měření zbytkových napětí můžeme například dělit z hlediska poškození součásti po měření a to na^{89, 90}:

- destruktivní – dojde ke znehodnocení součásti,
- polodestruktivní – znehodnocení součásti nemá vliv na jeho funkci, případně lze toto poškození odstranit,
- nedestruktivní – do součásti není proveden zásah.

Mechanické metody patří do destruktivních až polodestruktivních metod zjišťování zbytkových napětí. Mezi mechanické metody se řadí například metody odvrtávací, uvolnění sloupku, odstraňování povrchové vrstvy materiálu či dělicí metoda. Naopak mezi nedestruktivní možnosti zjištění zbytkových napětí patří například metody difrakční, ultrazvuková, magnetická či metoda měření mikrotvrdosti^{89, 90}.

4.2.1 Mechanické metody

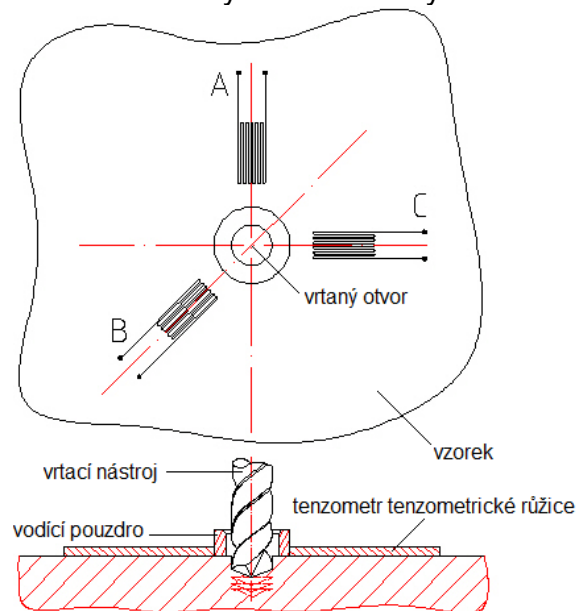
Odvrtávací metoda

Odvrtávací metoda je jednou z nejpoužívanějších metod pro zjištění zbytkových napětí a je normována standardem ASTM E 837. Vzhledem k malému poškození měřeného vzorku je metoda označována za semidestruktivní^{89, 90}.

Při měření zbytkového napětí pomocí odvrtávací metody se postupuje následovně^{89, 90}:

- do místa, kde bude probíhat měření zbytkového napětí, se upevní tenzometrická růžice a připojí se k přístroji (viz Obr. 4.1),
- nad střed tenzometrické růžice se upevní nástroj (zpravidla vrták nebo fréza).
- před začátkem vrtání (frézování) se provede takzvané nulové čtení,
- pro lepší výsledky měření napětí pod povrchem se odvrtávání provádí v krocích o velikosti 0,005 až 0,1 mm a odvrtný otvor má v průměru obvykle 1 až 4 mm,

- na konci každého kroku se provede odečet údajů z jednotlivých tenzometrů v růžici, na jejichž základě se získá původní zbytkové napětí,
- měření se obvykle provádí do hloubky, která je přibližně rovna průměru otvoru,
- vyhovujícím softwarem se vyhodnotí směry a velikosti hlavních napětí.



Obr. 4.1 Odvrtávací metoda⁹¹.

Metodu je možné použít za následujících podmínek^{89, 90}:

- v oblasti tenzometrické růžice je na povrchu homogenní zbytková napjatost,
- hlavní zbytkové napětí kolmé k povrchu je ve všech hloubkách nulové,
- před i po vyvrtání otvoru je v tělese lineárně elastická napjatost.

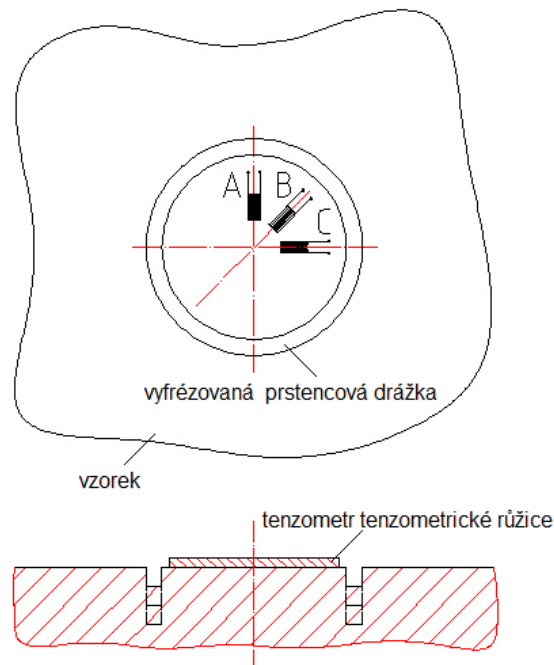
Tenzometry se dají využít pro měření jen do určité teploty. Použití tenzometrů je proto z tohoto hlediska limitováno. Při umístění nástroje je nutné dbát na maximální nároky a na minimální úchylny tvaru a polohy. Pokud by nebyla růžice umístěna na středu otvoru, vyplývá z toho excentricita, ze které mohou plynout chyby při měření. Pomocí moderních souprav lze excentricitu změřit a softwarově zajistit korekci naměřených hodnot^{89, 90}.

Metoda sloupku

Metoda sloupku je další z nejčastěji používaných metod pro zjištění zbytkových napětí. Vzhledem k většímu poškození měřeného vzorku je metoda polodestruktivní^{90, 91}.

Měření zbytkového napětí pomocí metody sloupku je obdobné jako při měření metodou odvrtávací. Rozdíl u metody spočívá v tom, že se frézuje drážka (viz Obr. 4.2), jejíž vnitřní průměr má od 15 do 150 mm. Drážka je frézovaná do hloubky, která odpovídá 0,25 až 1,5 velikosti vnitřního průměru. Oddělením sloupku se uvolní zbytkové napětí, která se nejčastěji měří odporovými tenzometry^{90, 91}.

Oproti odvrtávací metodě jsou zde menší nároky na minimální úchytky tvaru a polohy uvolněného sloupku. U metody sloupku je předpoklad, že oblast homogení zbytkové napjatosti na povrchu bude větší. Metoda je vcelku rychlá a hodí se pro aplikace v technické praxi, tím vyniká nad metodami, které jsou destruktivní^{90, 91}.



Obr. 4.2 Metoda sloupku⁹¹.

Metoda odstraňování povrchové vrstvy materiálu

Metoda odstraňování povrchových vrstev materiálu se řadí mezi metody, při kterých dochází ke znehodnocení vyšetřované součásti. Vhodnými tělesy pro odstraňování povrchové vrstvy materiálu jsou prutová tělesa. Mohou to, ale být i tělesa typu deska^{90, 94}.

Při odstraňování povrchových vrstev materiálu dochází k porušení podmínky rovnováhy vnitřní sil. Tato skutečnost se projevuje deformací vzorku, například jeho průhybem. Zbytkové napětí se stanoví v rozmezí každé odebrané vrstvy. Pro lepší výsledky měření zbytkových napětí se odebírají malé vrstvy materiálu řádově i 0,01 mm^{90,94}.

Pokud se vrstvy materiálu odstraňují pomocí obrábění, zanesou se do materiálu, do hloubek větších než 0,1 mm, další zbytková pnutí. Tato skutečnost je nevyhovující. Z tohoto důvodu se přistupuje k dalším metodám, jako je elektro-chemické či elektrolytické odleptávání povrchových vrstev materiálu^{90, 94}.

Metoda dělicí

Dělicí metoda patří k nejznámější metodě. Základní princip zjišťování zbytkových napětí vychází z relaxační metody. Na základě uvolněných deformací se stanoví zbytkové napětí, které působilo na nově vytvořený povrch před jeho vznikem^{90,94}.

4.2.2 Fyzikální metody

Rentgenografická difrakční metoda

Rentgenografická difrakční metoda se řadí mezi metody, u nichž nedochází k poškození vzorku, tedy jde o metodu nedestruktivní. Provedení metody v praxi vyžaduje odborné pracovníky a přístrojové vybavení, na které jsou kladeny velké nároky^{90, 94}.

Při experimentu se určí^{90, 94}:

- mřížkové deformace,
- pomocí lineární teorie elasticity se deformace přepočtou na napětí,
- výstupem je informace o stavu napjatosti v povrchových vrstvách materiálu do tloušťky 10 μm .

Nevýhodou rentgenové difrakční metody je, že je použitelná pouze na krystalické materiály a její přesnost klesá s rostoucími rozměry zrn^{90, 94}.

Magnetické metody

Při použití magnetické metody nedochází k porušení materiálu a řadí se proto k metodám nedestruktivním. Metodu je možné použít ke zjištění zbytkových napětí u feromagnetických materiálů. Na základě Barkhausenova jevu či magnetostrikce jsou měřena zbytková napětí. Při využití metody Barkhausenova šumu se získá informace o stavu napjatosti v hloubce od 0,01 do 3 mm. U magnetostrikční metody při kmitočtu 50 Hz je ekvivalentní hloubka 1 až 2 mm, při 5 kHz je to 0,1 až 0,2 mm^{90, 94}.

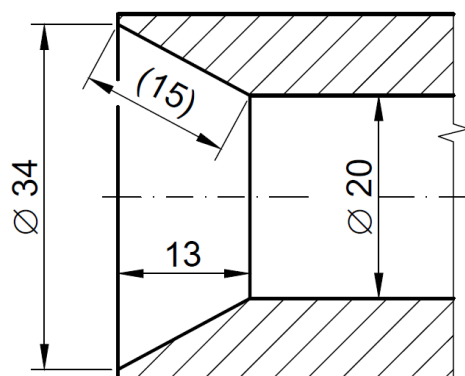
Ultrazvukové metody

Ultrazvukové metody se řadí k metodám, které jsou nedestruktivní. Tyto metody využívají změnu rychlosti šíření ultrazvukových vln v kovech v závislosti na jeho namáhání. Při uplatnění povrchových akustických vln neboli Rayleighových vln, které prochází těsně pod povrchem, je možné vyšetřovat hloubku 1 mm při frekvenci 3 MHz^{90, 94}.

4.3 Vstupní podmínky válečkování pro praktickou část

Válečkování probíhalo na vnitřní kuželové ploše válcové součásti v délce 15 mm a průměru od 34 do 20 mm. Součást byla vyrobena z konstrukční oceli EN ISO E335 (ČSN 11 600) s mezí kluzu 300 MPa a tvrdostí 30 HRC. Náčrt válečkované součásti je zobrazen na Obr. 4.3.

Tlak na váleček byl vypočten podle vztahu 2.17 v kapitole 2.3.3 (str. 35). Dle uvedeného vztahu 2.17 byl tlak získán pro minimální hodnotu koeficientu. Podle uvedených vztahů v kapitole 3.1 (str. 55) byla vypočtena tvářecí síla a hloubka vtlačení kuličky do materiálu. V Tab. 4.1 jsou zaznamenány hodnoty vybraných parametrů, které byly při výpočtu použity. Podle největšího průměru válečkované součásti se z grafu na Obr. 4.4 stanovily otáčky součásti. Z druhého grafu na Obr. 4.5 se stanovil posuv válečkovacího nástroje na otáčku. Vypočtené hodnoty a dílčí výsledky výpočtu jsou uvedeny v Tab. 4.2.



Obr. 4.3 Náskres součásti, jejíž kuželová plocha se opracovávala.

Tab. 4.1 Vstupní hodnoty vybraných parametrů.

Modul pružnosti materiálu a kuličky E_1, E_2	$2,1 \cdot 10^5$ MPa
Poissonovo číslo materiálu a kuličky ν_1, ν_2	0,3
Mez kluzu materiálu R_e	300 MPa
Průměr válečkové součásti	20 až 34 mm
Počet otáček	800 min^{-1} (určeno z grafu na Obr. 4.4)
Posuv f	0,6 mm/otáčku (určeno z grafu na Obr. 4.5)
Průměr tvářecího elementu	5 mm
Délka válečkování	15 mm
Počet pracovních cyklů	1
Mazání	Chladicí emulze, minerální olej

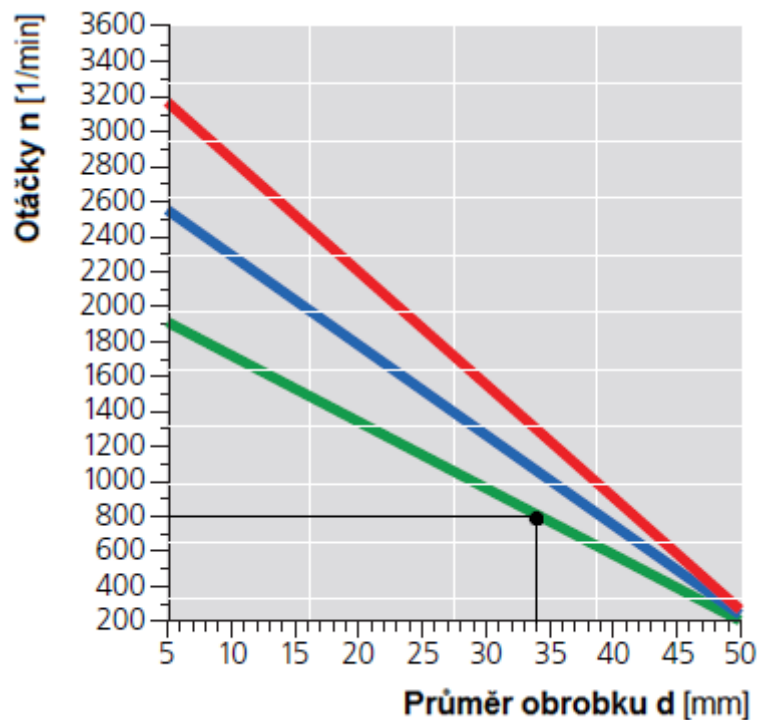
Tab. 4.2 Vypočtené hodnoty válečkových parametrů.

Tlak na váleček p_k	540 MPa
Koeficient	1,80
Tvářecí síla F	305 N
Hloubka vtažení kuličky do materiálu d	0,0002 mm
Redukovaný modul pružnosti E^*	115384,6154 MPa
Ekvivalentní poloměr zakřivení R	2,1795 mm
Rychlost válečkování	85 m/min

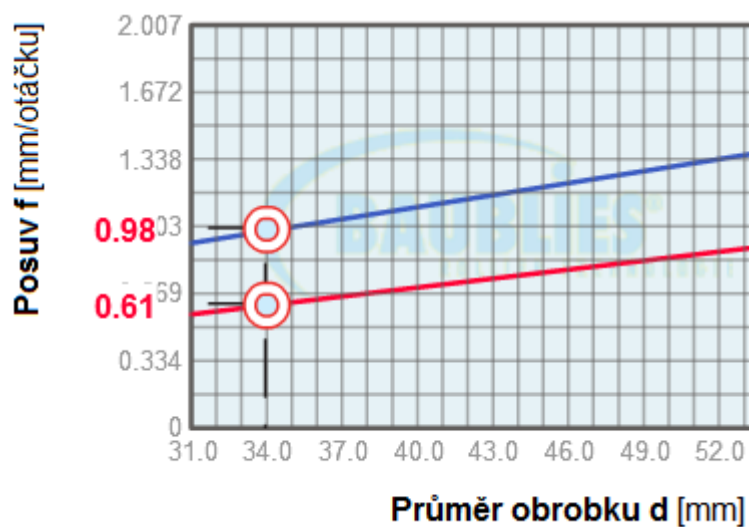
Po soustružení kuželové plochy součásti byly zjištěna střední aritmetická úchylka profilu R_a a největší výška profilu R_z . Naměřené hodnoty jsou uvedeny v Tab. 4.3.

Tab. 4.3 Parametry povrchu před válečkováním.

Střední aritmetická úchylka profilu R_a	3,5569 μm
Největší výška profilu R_z	20,3960 μm



Obr. 4.4 Graf závislosti otáček na průměru obrobku⁹².



Obr. 4.5 Graf závislosti posuvu nástroje na průměru obrobku⁹².

4.4 Průběh válečkování

Prvním krokem bylo upnutí válcové součásti do sklíčidla univerzálního hrotového soustruhu SV-18-RD. Poté bylo provedeno soustružení (viz Obr. 4.6) vnitřní kuželové plochy součásti. Po dokončení soustružení se součást vyjmula ze sklíčidla a provedlo se měření drsnosti povrchu na dotykovém profiloměru Form Talysuf Intra (viz Obr. 4.12).



Obr. 4.6 Soustružení vnitřní kuželové plochy součásti.

Po upnutí válečkovacího nástroje Baubles ERG-K-3 do pinoly koníku byla zpět upnuta válcová součást do sklíčidla a byly nastaveny potřebné válečkovací podmínky. Na válečky bylo před operací nanášeno mazivo. Po přípravě následovalo samotné válečkování (viz Obr. 4.7) vnitřní kuželové plochy součásti, jejíž průměry byly od 20 do 34 mm. Válečkování tohoto otvoru trvalo jen pár sekund. Po dokončení opět proběhlo měření drsnosti povrchu.



Obr. 4.7 Válečkování vnitřní kuželové plochy.

4.5 Dosažené výsledky po válečkování

Po válečkování byla zjištěna drsnost povrchu vnitřní kuželové plochy součásti. Parametry použité při měření parametrů povrchu dotykovým profiloměrem jsou zaznamenány v Tab. 4.4.

Tab. 4.4 Parametry použité při měření parametrů povrchu.

Vyhodnocovaná délka l_n	1,25 mm
Základní délka měření l_r	0,25 mm
Rychlost měření	1 mm/s
Cut-off	0,25 mm

Naměřená data se přenáší z přístroje do PC, kde jsou zpracovávána. Zpracované výstupy z měření dotykovým profiloměrem Form Talysurf Intra uvedeny v příloze 1 a 2. Naměřené hodnoty, které byly zjištěny i po soustružení, jsou uvedeny v Tab. 4.5.

Tab. 4.5 Dosažené parametry povrchu po válečkování.

Střední aritmetická úchylka profilu R_a	0,0562 μm
Největší výška profilu R_z	0,7594 μm

Válečkováním se snížila střední aritmetická úchylka profilu a i největší výška profilu. Dokončená vnitřní kuželová plocha součásti válečkováním je i lesklejší než vnitřní válcová plocha dokončená soustružením, což je zřejmé z Obr. 4.8.



Obr. 4.8 Opracovaná kuželová plocha součásti válečkovacím nástrojem.

4.6 Nástroje a zařízení použité v průběhu praktické části

Soustružení a válečkování kuželové plochy součásti bylo provedeno na univerzálním hrotovém soustruhu SV-18-RD. Po každé operaci byla zjištěna drsnost opracovaného povrchu. Drsnost povrchu byla zjištěna na přístroji Form Talysurf Intra. Válečkování bylo zajištěno válečkovacím nástrojem Baublies IRG-K-3.

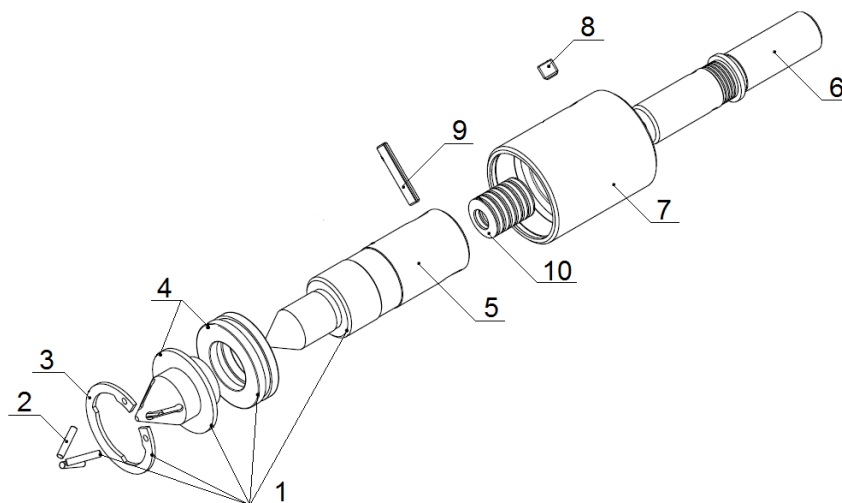
4.6.1 Válečkovací nástroj Baublies IRG-K-3

Kuželová plocha součásti byla dokončena válečkovacím nástrojem Baublies ERG-K-3. Nástroj je určen pro válečkování vnitřních kuželových ploch. Schéma použitého válečkovacího nástroje je znázorněno na Obr. 4.9.



Obr. 4.9 Válečkovací nástroj Baublies IRG-K-3⁹².

Jednotlivé části použitého válečkovacího nástroje jsou zřejmé z Obr. 4.10. V Tab. 4.6 jsou následně popsány tyto jednotlivé komponenty válečkovacího nástroje.



Obr. 4.10 Jednotlivé komponenty válečkovacího nástroje IRG-K-3⁹².

Tab. 4.6 Popis komponent válečkovacího nástroje⁹².

1.	Válečkovací hlava	6.	Upínací stopka
2.	Váleček	7.	Pouzdro
3.	Pojistný kroužek	8.	Upevňovací kolík pro pouzdro
4.	Klec včetně kuličkového ložiska	9.	Zajišťovací (stavěcí) šroub pro kužel
5.	Kužel	10.	Talířová pružina

Skutečné vyobrazení nástroje, který byl použit při válečkování kuželové plochy součásti, je možné vidět z Obr. 4.11. Jak je vidět z Obr. 4.11 je nástroj již upnutý v pinole koníku.



Obr. 4.11 Válečkový nástroj Baublies ERG-K-3 upnutý v pinole koníku.

Pokud je potřeba jednotlivé komponenty vyčistit, zkontrolovat jejich poškození či provést výměnu, postupuje se následovně:

- **klec** - sejmutí pojistný kroužek (3) a následně vysunout klec dopředu,
- **válečky** – výměna komponenty je stejná jako u klece,
- **kužel** – odšroubovat zajišťovací šroub (9) a vyjmout kužel (5) z pouzdra (7).

Při výměně dílů válečkovacího nástroje je nutné komponenty zbavit nečistot a provést kontrolu jejich poškození. V případě opotřebení či poškození požadované komponenty vyměnit. Po vyčištění je vhodné komponenty lehce promazat. Nečistoty snižují životnost nástroje a kvalitu obrobků. Pokud jsou komponenty (klece, válečky) opotřebované, mohou snížit životnost kuželu⁹².

Technické parametry použitého válečkovacího nástroje jsou zřejmé z přílohy 6. Doporučené technologické podmínky válečkování pro nástroj Baublies IRG-K-3 jsou uvedeny v příloze 7. Tlak na nástroji se nastavuje pomocí dělicí rysky. Jedna dělicí ryska odpovídá tlaku 100N⁴⁸. Hodnoty parametrů jsou pouze orientační a pro konkrétní případy jsou upraveny.

4.6.2 Dotykový profiloměr Form Talysurf Intra

Měření drsnosti povrchu bylo provedeno na měřícím přístroji Form Talysurf Intra. Tímto přístrojem je možné měřit rozměry, tvar a texturu povrchu. Vlnitost a materiálový poměr je možné měřit, pokud není použita opěrka pro ramínko⁹³. Technické parametry dotykového profiloměru Form Talysurf Intra jsou uvedeny v příloze 5. V příloze 4 jsou zaznamenány některé parametry, které mohou být

dotykovým profiloměrem Form Talysurf Intra změřeny. Použitý měřicí přístroj je znázorněn na Obr. 4.12.



Obr. 4.12 Měření povrchu kuželové plochy součásti dotykovým profiloměrem Form Talysurf Intra.

4.6.3 Univerzální hrotový soustruh SV-18-RD

Nespornou výhodou metody válečkování je, že proces může probíhat na běžných vřetenových strojích, CNC soustruzích, vrtačce či frézce. V tomto případě bylo provedeno válečkování kuželové plochy součásti na univerzálním hrotovém soustruhu SV-18-RD. Technické parametry univerzálního hrotového soustruhu SV-18-RD jsou uvedeny v příloze 3.

5 PREZENTACE VÝSLEDKŮ

Cílem práce bylo zjistit hodnoty zbytkových napětí po válečkování. Jelikož nebylo možné využít v praktické části žádnou z uvedených metod měření zbytkových napětí (viz kapitola 4.2), byla pro zjištění zbytkových napětí použita literatura. Experimentálně byla zjištěna drsnost vnitřní kuželové plochy po soustružení a následně po válečkování.

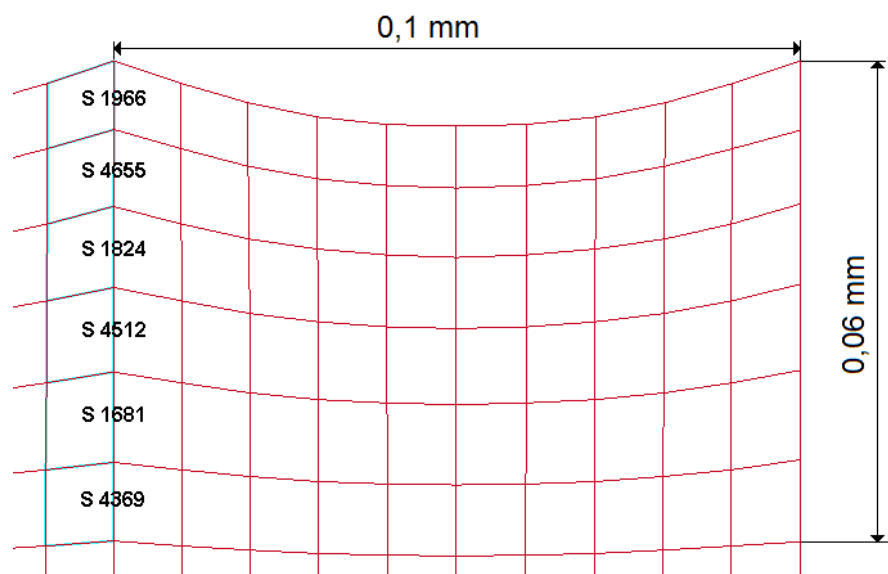
5.1 Presentace výsledků z praktické části

Cílem praktické části bylo zjistit, jakých parametrů povrchu můžeme válečkováním dosáhnout. Střední aritmetická úchylka profilu a největší výška profilu jsou parametry povrchu, jejichž hodnoty byly měřením zjištěny. Soustružením byl povrch opracován na $R_a = 3,5569 \mu\text{m}$ a $R_z = 20,3960 \mu\text{m}$. Z původních hodnot po soustružení, bylo válečkováním dosaženo $R_a = 0,0562 \mu\text{m}$ a $R_z = 0,7594 \mu\text{m}$. Z výsledků plyne, že válečkováním se sníží mikronerovnost povrchové vrstvy. Zlepšení povrchu součásti je možné rozpoznat i vizuálně, jak je patrné z Obr. 4.8. Povrch dokončený válečkováním je lesklejší než ten, který je dokončen obráběním.

Takovéto hodnoty R_a je možné dosáhnout například superfinišováním nebo lapováním. Nevýhodou lapování je pracnost a vysoké náklady. Superfinišování mohou předcházet některé jiné metody dokončení strojních součástí, což prodlužuje čas dokončení povrchu strojní součásti. Nespornou výhodou je, že válečkování lze provádět na stávajícím strojním zařízení, což má za následek zkrácení nevýrobního času. Válečkováním je možné nahradit i některé časově náročné dokončovací operace, například broušení.

5.2 Presentace výsledků ze simulace

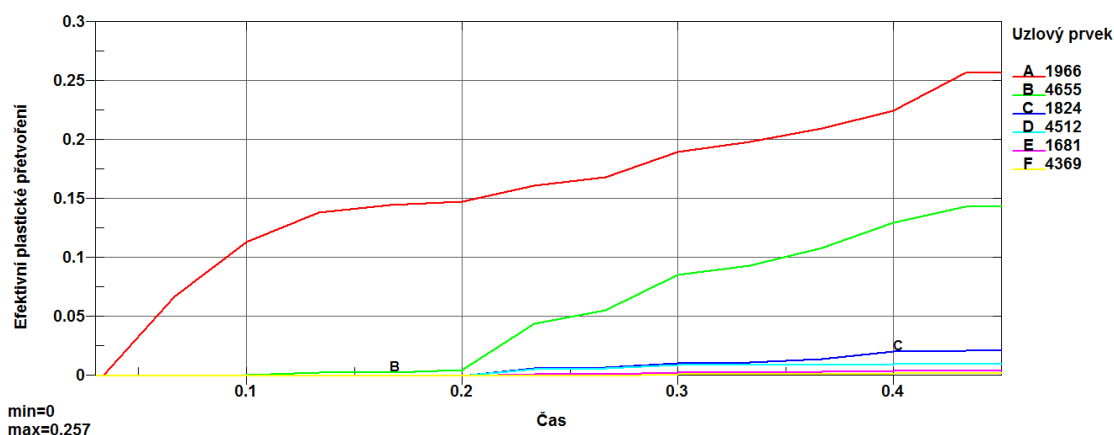
Pro vyhodnocení výstupů ze simulace byly použity konkrétní uzlové prvky. Jejich umístění i čísla jsou znázorněny v Obr. 5.1.



Obr. 5.1 Umístění uzlového prvku od začátku simulace.

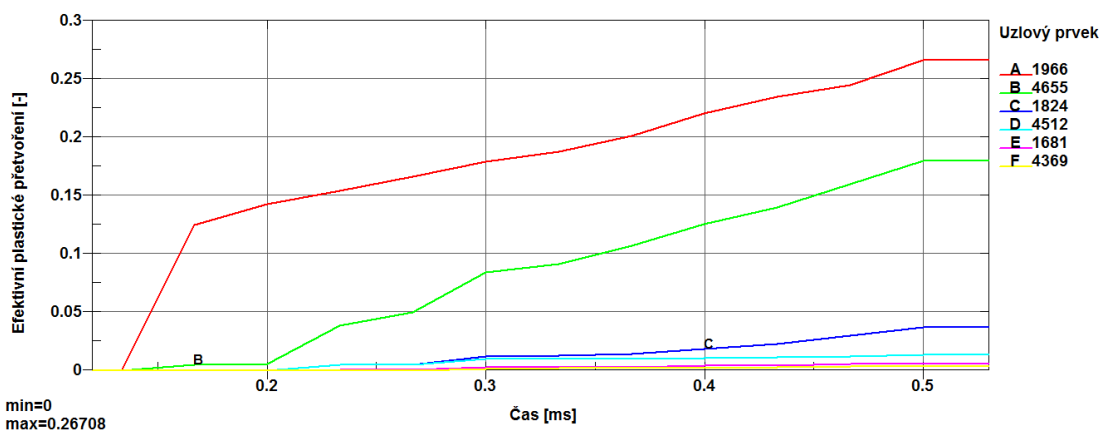
5.2.1 Efektivní plastické přetvoření

Na Obr. 5.2 je zobrazen průběh plastického přetvoření vybraných uzlových prvků pro tvářecí sílu 113 N. Z obrázku vyplývá, že plastické přetvoření roste až do času 0,434 ms, kde dosáhne své maximální hodnoty. V tomto časovém okamžiku dosáhne váleček největšího zaboření do materiálu. Hloubka průniku tvářecího elementu s materiálem je 0,0012 mm. V časovém okamžiku 0,434 ms dosáhne uzlový prvek A 1966 svého maximálního plastického přetvoření 0,257. Pro uzlový prvek B 4655 je tato hodnota 0,143 a u uzlového prvku C 1824 je hodnota plastického přetvoření 0,021. V dalších časových krocích nedochází k plastickému přetvoření uzlových prvků.



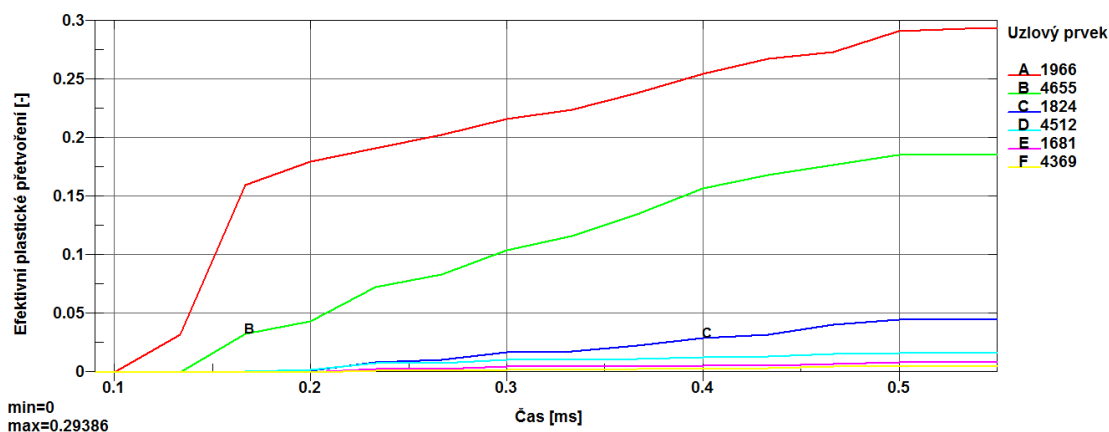
Obr. 5.2 Graf závislosti efektivního plastického přetvoření vybraných uzlových prvků v podpovrchových vrstvách pro tvářecí sílu 113 N.

Na Obr. 5.3 je zobrazen průběh plastického přetvoření vybraných uzlových prvků pro tvářecí sílu 132 N. Z obrázku vyplývá, že plastické přetvoření roste až do času 0,533 ms, kde dosáhne své maximální hodnoty. V tomto časovém okamžiku dosáhne váleček největšího zaboření do materiálu. Hloubka průniku tvářecího elementu s materiálem je 0,0015 mm. V časovém okamžiku 0,533 ms dosáhne uzlový prvek A 1966 svého maximálního plastického přetvoření 0,267. Pro uzlový prvek B 4655 je tato hodnota 0,180 a u uzlového prvku C 1824 je hodnota plastického přetvoření 0,037. V dalších časových krocích nedochází k plastickému přetvoření uzlových prvků.



Obr. 5.3 Graf závislosti efektivního plastického přetvoření vybraných uzlových prvků v podpovrchových vrstvách pro tvářecí sílu 132 N.

Na Obr. 5.4 je zobrazen průběh plastického přetvoření vybraných uzlových prvků pro tvářecí sílu 153 N. Z obrázku vyplývá, že plastické přetvoření roste až do času 0,533 ms, kde dosáhne své maximální hodnoty. V tomto časovém okamžiku dosáhne váleček největšího zaboření do materiálu. Hloubka průniku tvářecího elementu s materiálem je 0,0017 mm. V časovém okamžiku 0,533 ms dosáhne uzlový prvek A 1966 svého maximálního plastického přetvoření 0,294. Pro uzlový prvek B 4655 je tato hodnota 0,185 a u uzlového prvku C 1824 je hodnota plastického přetvoření 0,045. V dalších časových krocích nedochází k plastickému přetvoření uzlového prvku.

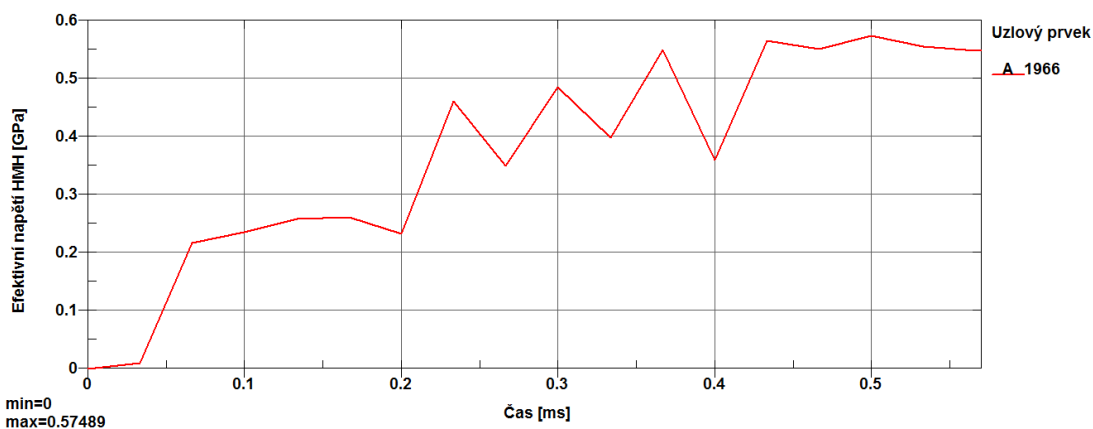


Obr. 5.4 Graf závislosti efektivního plastického přetvoření vybraných uzlových prvků v podpovrchových vrstvách pro tvářecí sílu 153 N.

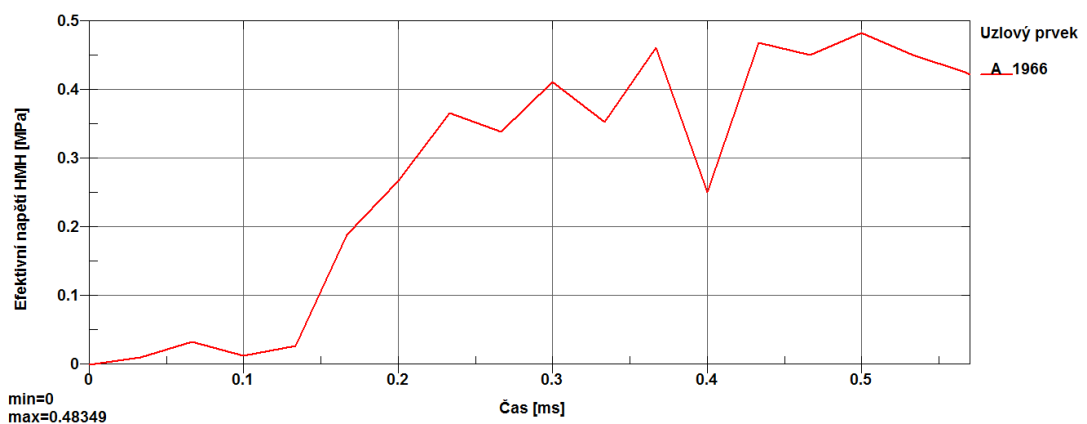
Jak je patrné z grafů (Obr. 5.2, Obr. 5.3, Obr. 5.4) s narůstající silou roste i velikost plastického přetvoření. Toto plastického přetvoření roste i v podpovrchových vrstvách. Nejzřetelnější průběh, jak je vidět z grafů, je do 0,03 mm. Rozdíl v čase, ve kterém dojde k maximálnímu plastickému přetvoření, může být dán větší hloubkou průniku válečku do materiálu, ale i nastavenou vzdáleností válečku od obrobku.

5.2.2 Efektivní napětí HMM

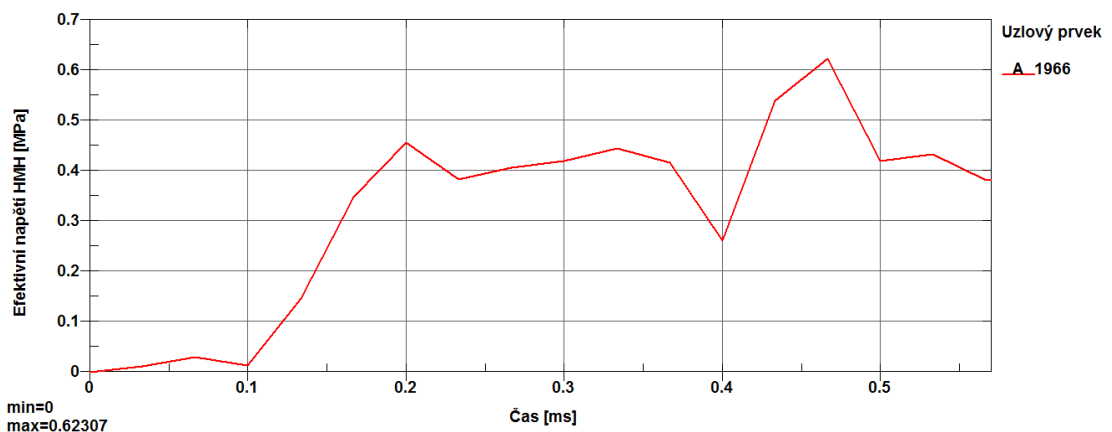
V následujících grafech (Obr. 5.5, Obr. 5.6, Obr. 5.7) je průběh rozložení efektivního napětí v čase uzlového prvku 1966.



Obr. 5.5 Graf závislosti efektivního napětí HMM uzlového prvku pro tvářecí sílu 113 N.



Obr. 5.6 Graf závislosti efektivního napětí HMH uzlového prvku pro tvářecí sílu 132 N.



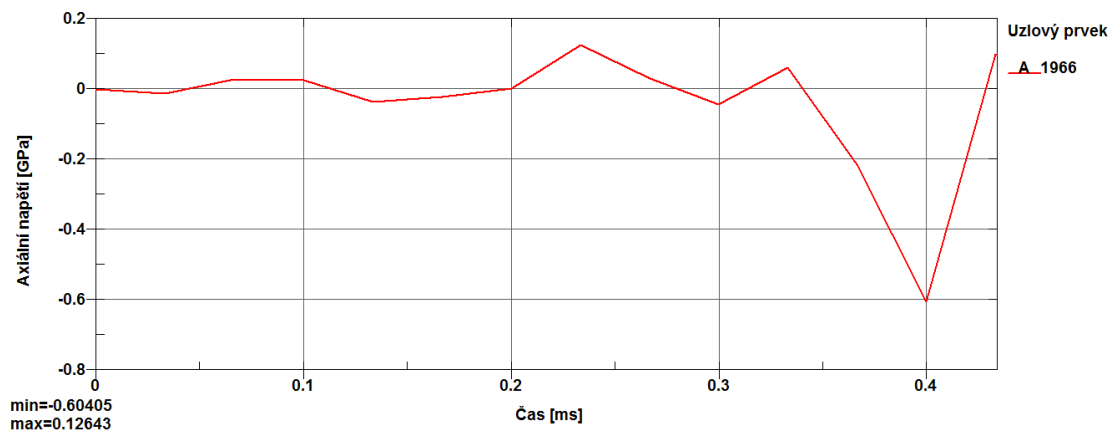
Obr. 5.7 Graf závislosti efektivního napětí HMH uzlového prvku pro tvářecí sílu 153 N.

Z grafů je zřejmé, že se zvětšující se silou roste i hodnota efektivního napětí podle podmínky plasticity HMH. Pro tvářecí sílu 113 N je toto napětí 575 MPa, u tvářecí síly 132 N dělá efektivní napětí 483 MPa. Nejvyššího napětí 623 MPa se dosáhne u tvářecí síly 153 N. Rozdíl v čase, ve kterém dojde k maximálnímu efektivnímu napětí, může být dán větší hloubkou průniku válečku do materiálu, ale i nastavenou vzdáleností válečku od obrobku.

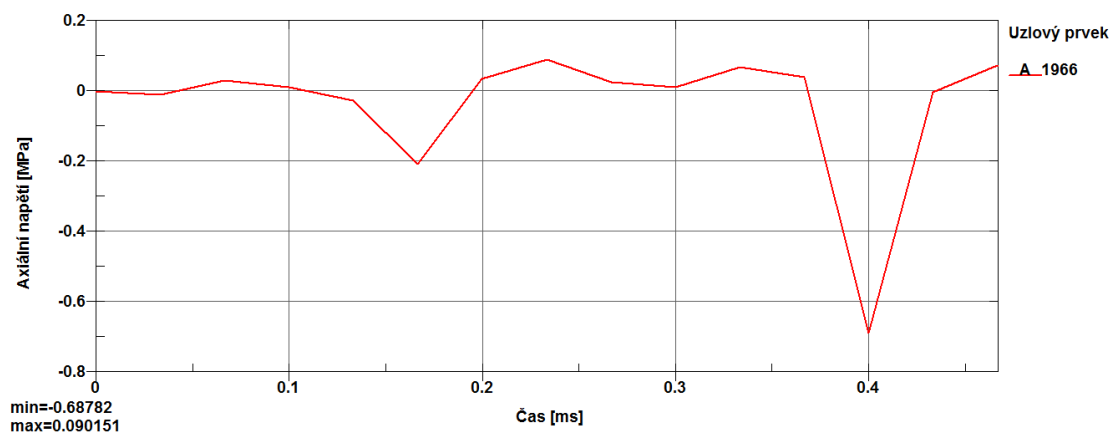
5.2.3 Průběhy axiálního a tangenciálního zbytkového napětí

V následujících grafech (Obr. 5.8, Obr. 5.9, Obr. 5.10) je zobrazen průběh axiálního zbytkového napětí v závislosti na čase. Hodnoty pro axiální zbytkové napětí byly zjištěny pro uzlový prvek 1966.

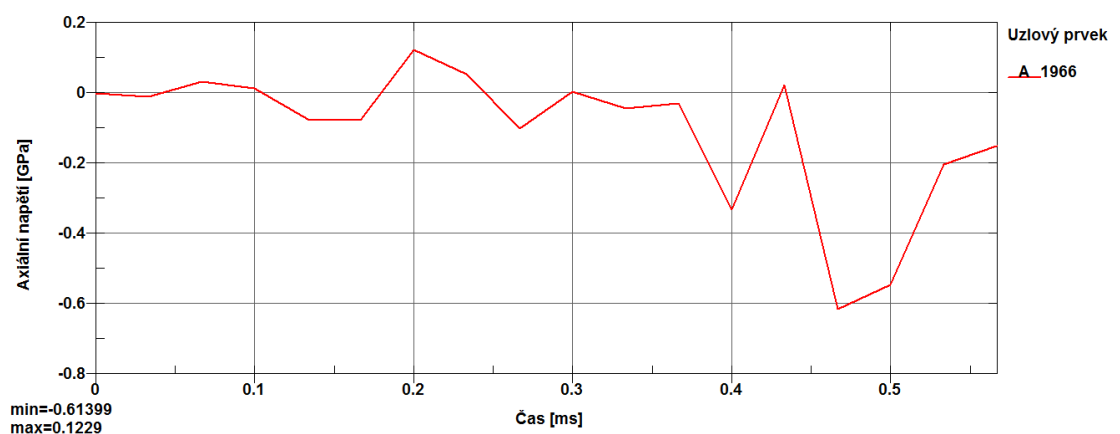
Z grafů vyplývá, že se vzrůstající silou roste hodnota tlakového axiálního napětí. Pro tvářecí sílu 113 N je hodnota tlakového axiálního napětí 604 MPa, u tvářecí síly 132 N dosahuje toto napětí hodnoty 687 MPa. Axiální zbytkové napětí u tvářecí síly 153 N dosahuje hodnoty 614 MPa. Tato tlaková pnutí, která jsou vyvozená působením tvářecí síly, zpevňují povrch součástí.



Obr. 5.8 Graf závislosti axiálního zbytkového napětí uzlového prvku pro tvářecí sílu 113 N.

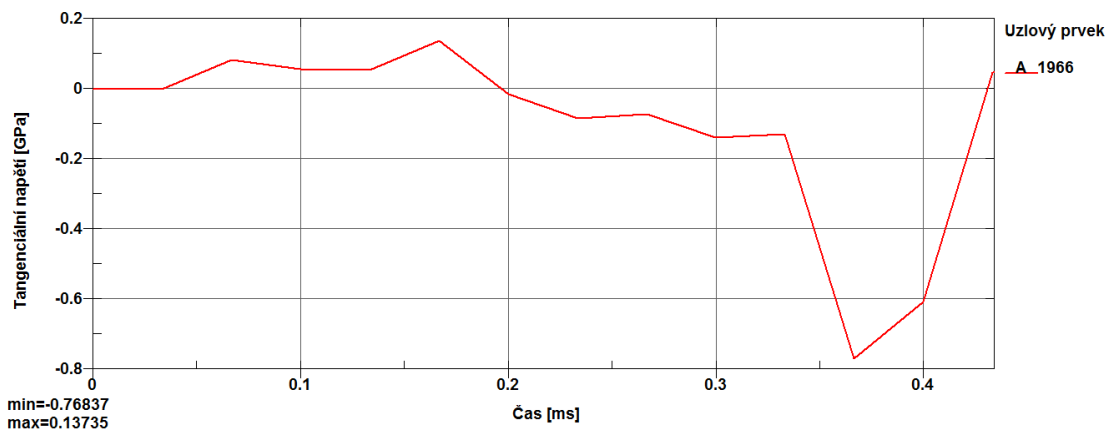


Obr. 5.9 Graf závislosti axiálního zbytkového napětí uzlového prvku pro tvářecí sílu 132 N.

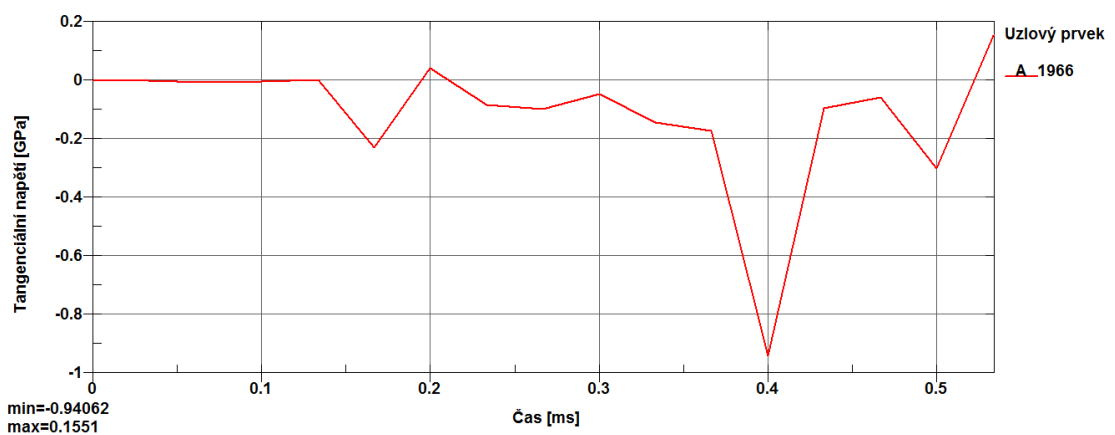


Obr. 5.10 Graf závislosti axiálního zbytkového napětí uzlového prvku pro tvářecí sílu 153 N.

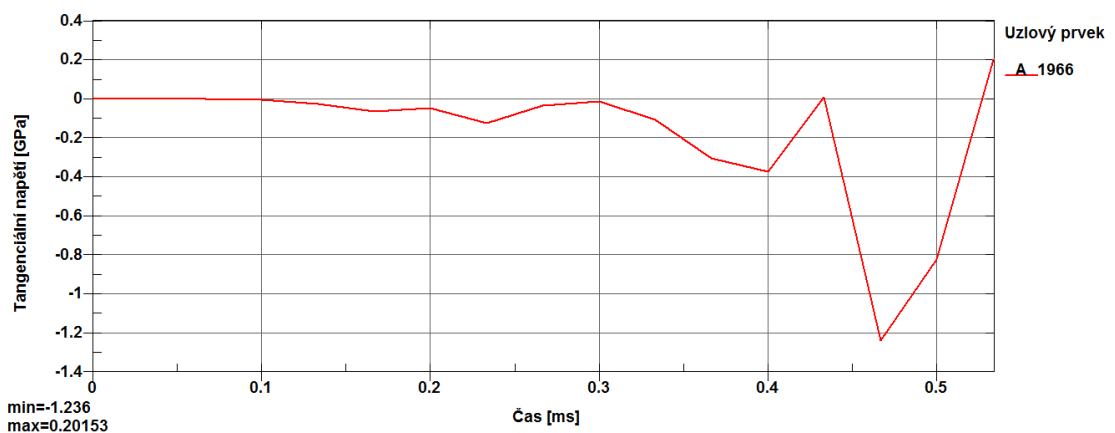
U následujících grafů (Obr. 5.11, Obr. 5.12, Obr. 5.13) je zobrazen průběh tangenciálního zbytkového napětí v závislosti na čase. Hodnoty pro tangenciální zbytkové napětí byly zjištěny pro uzlový prvek 1966.



Obr. 5.11 Graf závislosti tangenciálního zbytkového napětí uzlového prvku pro tvářecí sílu 113 N.



Obr. 5.12 Graf závislosti tangenciálního zbytkového napětí uzlového prvku pro tvářecí sílu 132 N.

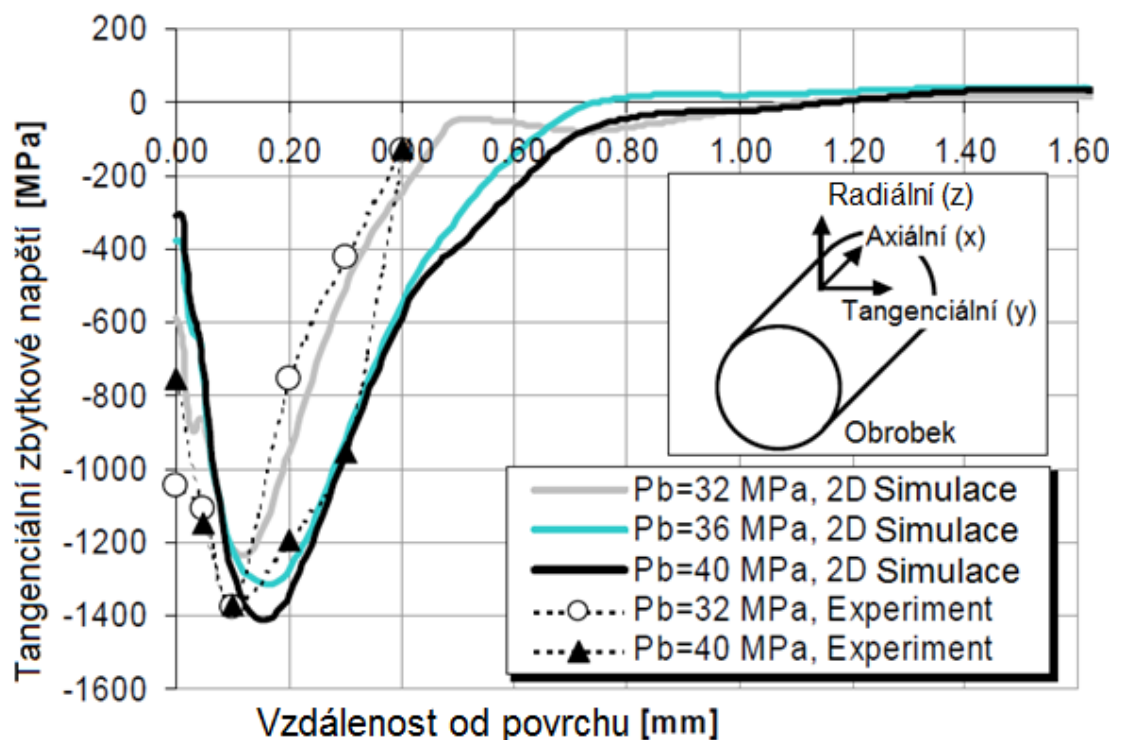


Obr. 5.13 Graf závislosti tangenciálního zbytkového napětí uzlového prvku pro tvářecí sílu 153 N.

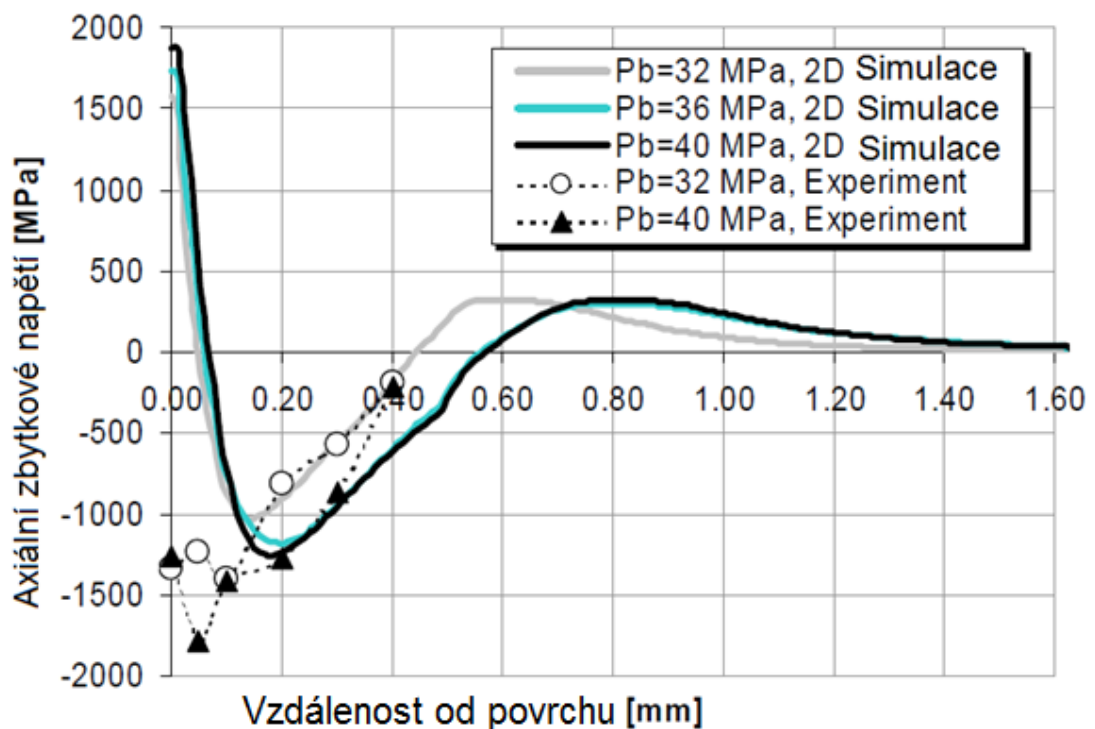
Se vzrůstající silou roste i hodnota tlakového tangenciálního napětí. Pro tvářecí sílu 113 N je hodnota tlakového tangenciálního napětí 768 MPa, u tvářecí síly 132 N dosahuje tangenciální zbytkové napětí hodnoty 941 MPa. Tangenciální tlakové napětí u tvářecí síly 153 N dosahuje hodnoty 1236 MPa. Tato tlaková pnutí, která jsou vyvozená působením tvářecí síly, zpevňují povrch součásti. U průběhu tangenciálního napětí ve zvoleném uzlovém prvku 1966 se dosáhlo vyšších hodnot napětí.

5.3 Prezentace výsledků v literatuře

Experiment i simulace byly provedeny válečkovacím hydrostatickým nástrojem s tvářecím elementem kulička o průměru 6 mm. Posuv válečku byl 0,05 mm/ot. Axiální a tangenciální zbytkové napětí bylo zkoumáno v závislosti na měnícím se tlaku. Simulace byla provedena pro tři tlaky (32 MPa, 36 MPa, 40 MPa). Experiment byl proveden pro dva tlaky (32 MPa a 40 MPa)⁸⁶.



Obr. 5.14 Tangenciální zbytkové napětí v závislosti na hloubce⁸⁶.



Obr. 5.15 Axiální zbytkové napětí v závislosti na hloubce⁸⁶.

Ze simulací a experimentu provedených ve studii⁸⁶ a z Obr. 5.14, Obr. 5.15 vyplývá:

- provedenou simulací byla odhadnuta zbytková napětí při experimentu,
- tlaková zbytková napětí se nacházejí v podprovrchových vrstvách,
- se zvětšujícím se tlakem vzrůstá tlakové zbytkové napětí,
- zvýšení tlaku vede ke zvýšení plastické deformace,
- hloubka, do které dosahují tlaková zbytková napětí, jsou v simulaci o něco větší než v experimentu,
- tangenciální zbytková napětí provedená v simulaci se liší od experimentu jen nepatrně.

6 TECHNICKO - EKONOMICKÝ PŘÍNOS METODY VÁLEČKOVÁNÍ

6.1.1 Vlastnosti povrchu po válečkování

Dokončený povrch při použití technologie válečkování může dosáhnout následujících parametrů^{12, 17, 20, 34, 53, 56, 82}.

- rozměrová přesnost IT6 až IT8,
- střední aritmetická úchylna profilu statickým válečkováním $R_a = 0,05$ až $0,4 \mu\text{m}$,
- střední aritmetická úchylna profilu dynamickým válečkováním $R_a = 0,2$ až $0,8 \mu\text{m}$,
- zvýšení nosného podílu povrchu až 95 %,
- geometrická přesnost se zvýší o 16%,
- zpevnění povrchové vrstvy o 30 až 50%,
- snížení tření na povrchu až o 35%,
- zvýšení odolnosti proti korozi 2 až 2,5 krát,
- odolnost proti otěru 1,5 až 6 krát.

6.1.2 Využití technologie válečkování v praxi

Metoda válečkování se s úspěchem využívá v lékařství, ve strojírenském, automobilovém a leteckém průmyslu. Technologie je často využita u hydraulických a pneumatických komponent. Na Obr. 6.1 jsou zobrazeny komponenty, u kterých je tato technologie provedena. Technologie válečkováním se používá na dokončování^{5, 22, 28, 34, 36, 43, 53, 81}.

- brzdových a hydraulických pístů,
- brzdových kotoučů,
- hydraulických a pneumatických válců,
- kluzných a těsnících ploch přístrojů a strojů,
- válců spalovacích motorů,
- vodících ploch obráběcích strojů,
- vnitřních a vnějších povrchů hydraulických komponent,
- vnitřních povrchů mosazných vložek pro litinové ventily,
- vnitřních povrchů nábojnic,
- vnitřních a vnějších ložisek,
- sedel ventilů palivových čerpadel,
- trubek, hřidelů, náprav,
- čepů, spojek, držáků,
- chirurgických nástrojů.



Obr. 6.1 Příklady využití technologie válečkování v praxi⁸¹.

6.1.3 Zhodnocení technologie válečkování

Technologií válečkování můžeme uspořit náklady z několika hledisek. Jedná se o následující^{1, 9, 15, 23, 30, 33, 34, 40, 53, 56, 64, 69, 80}.

- časové úspory,
- úspory výrobních ploch,
- úspory v oblasti infrastruktury,
- úspory energetické.

Časová úspora vzniká zkrácením času nutným pro zhotovení výrobku a to zkrácením času výrobního a zkrácením času nevýrobního.

Zkrácení nevýrobního času se dosáhne v případech, kdy se nemusí manipulovat se strojní součástí přesunem z jednoho stroje na druhý, kdy není nutné součást opakovaně upínat a podobně. Válečkovací operace se mohou provádět na konvekčních obráběcích strojích jako je například soustruh, frézka a jiné, na kterých případně probíhaly předchozí výrobní operace, a tím technologie válečkování zkracuje nevýrobní časy^{1, 9, 15, 23, 30, 33, 34, 40, 53, 56, 64, 69, 80}.

Technologie válečkování v některých případech může zajistit i zkrácení výrobního času například nahrazením časově náročné dokončovací operace jako je tepelné zpracování. Při tepelném zpracování je třeba strojní součást ohřát na teplotu dle zvolené metody. Následuje výdrž na teplotě, která trvá zpravidla jednu až dvě hodiny. Poté následuje řízené ochlazování (v peci, na vzduchu). Celý proces tepelného zpracování je tak časově náročný. U válečkování postačí mnohdy i jeden průchod nástroje k tomu, aby proběhly procesy vyvolávající změny mechanických vlastností, a aby došlo k vyhlazení povrchu strojní součástí. Z tohoto ohledu se zkracuje čas potřebný k výrobě strojních součástí.

V Obr. 6.2 je názorný příklad jak se při použití technologie válečkování sníží časy výrobní i nevýrobní. V obrázku je porovnání technologie broušení s technologií válečkování⁶⁹.



Obr. 6.2 Časová náročnost technologie broušení a technologie válečkování⁶⁹.

Energetické úspory vyplývají z podstaty technologie. Na rozdíl od technologie tepelného zpracování je válečkování časově méně náročné a technologická spotřeba energií je minimalizována. Úspora výrobních ploch redukuje potřebné náklady na vytápění a osvětlení, což sekundárně také ovlivňuje vznik energetických úspor.

Technologie válečkování nevyžaduje použití speciálních strojů k dokončení strojních součástí. Použitím stávajících konvenčních obráběcích strojů dochází k úspoře výrobních ploch. Dokončování součásti na konvenčním univerzálním stroji může příznivě ovlivnit i minimalizaci meziskladů, což se promítne do úspory výrobních ploch^{1, 9, 15, 23, 30, 33, 34, 40, 53, 56, 64, 69, 80}.

U obráběcích technologií jako je například soustružení a vrtání je potřeba zajistit sběr, manipulaci, dopravu, skladování a následnou likvidaci třísek vzniklých obráběním. Válečkování je tvářecí technologie, a proto nevzniká odpadní materiál ve formě třísek. Volbou metody válečkování není třeba řešit běžnou problematiku v oblasti třískového hospodářství, což přispívá k zjednodušení infrastruktury výrobního závodu a opět sekundárně ovlivňuje vznik energetických úspor^{1, 9, 15, 23, 30, 33, 34, 40, 53, 56, 64, 69, 80}.

Válečkování je technologicky méně složitá operace, a proto obsluha při ní nemusí být speciálně vyškolená a na výkon nejsou kladeny mimořádné kvalifikační požadavky. Z toho vyplývá, že obsluhu můžou provádět univerzálně vyškolení pracovníci. Naproti tomu například technologie tepelného zpracování vyžaduje specializované pracoviště, a proto je nutné, aby byli pracovníci speciálně vyškoleni. To přispívá k úspoře finančních prostředků na zaškolení jednotlivých pracovníků^{1, 9, 15, 23, 30, 33, 34, 40, 53, 56, 64, 69, 80}.

Jedině metodou válečkování dosáhneme optimální kombinace zlepšení geometrických a mechanických parametrů vyráběné strojní součásti. Vyhlazení a změna mechanických vlastností materiálu představují základní požadavky na dynamicky namáhané strojní součásti. Technologie válečkování je vhodná pro sériovou a hromadnou výrobu^{1, 9, 15, 23, 30, 33, 34, 40, 53, 56, 64, 69, 80}.

ZÁVĚR

V technologické studii jsem se zabývala problematikou simulace válečkování pomocí explicitní MKP. Cílem práce bylo uvedení do problematiky explicitních metod MKP a seznámení s komerčními programy, ve kterých je možné provádět simulace. V další části byly specifikovány technologické podmínky a oblasti použití válečkování. Součástí této práce bylo vytvoření modelu pro simulaci válečkování. Výpočty byly provedeny v programu ANSYS LS-DYNA.

V technologické studii byly v simulaci sledovány jevy v podpovrchových vrstvách, zejména průběh napětí a deformací.

Z analýzy efektivního plastického přetvoření je zřejmé, že se zvyšující se tvářecí silou roste hodnota efektivního plastického přetvoření. Tato velikost plastického přetvoření roste i v podpovrchových vrstvách. Pro tvářecí sílu 113 N je hodnota efektivního plastického přetvoření 0,257. U tvářecí síly 153 N hodnota efektivního plastického přetvoření vzroste na 0,294.

Z výstupů provedených simulací vyplývá, že efektivní napětí podle podmínky plasticity HMM vzrůstá se zvyšující se tvářecí silou. U tvářecí síly 113 N je hodnota efektivního napětí 575 MPa. Efektivního napětí 623 MPa bylo dosaženo tvářecí silou 153 N.

Z výsledků axiálního a tangenciálního zbytkového napětí vyplynulo, že se vzrůstající hodnotou tvářecí síly rostou i tato napětí. Pro tvářecí sílu 113 N je hodnota axiálního tlakového napětí 604 MPa a u tvářecí síly 154 N dosahuje tlakového axiálního napětí hodnoty 614 MPa.

Pro tvářecí sílu 113 N je hodnota tlakového tangenciálního napětí 768 MPa a u tvářecí síly 153 N dosahuje hodnota tlakového tangenciálního napětí 1236 MPa. Ve srovnání s axiálním tlakovým napětím se u tangenciálního tlakového napětí dosáhlo vyšších hodnot napětí. Tlaková zbytková napětí, která jsou vyvozená působením tvářecí síly, zpevňují povrch součásti.

Z provedených simulací vyplývá, že se zvyšující se tvářecí silou rostou hodnoty všech sledovaných parametrů.

Dosažené hodnoty zbytkových napětí byly porovnány s literaturou⁸⁶, jelikož nebylo možné využít v praktické části žádnou z metod měření zbytkových napětí. Podobné výsledky, které byly dosaženy simulací, uvádí i literatura.

Z výsledků axiálního a tangenciálního zbytkového napětí v literatuře⁸⁶ vyplynulo, že se vzrůstajícím tlakem rostou i tato napětí. Pro tlak 32 MPa byla zjištěna hodnota axiálního tlakového napětí 1000 MPa a u tlaku 40 MPa dosahuje axiální tlakové napětí hodnoty 1300 MPa. V provedeném experimentu bylo axiální zbytkové napětí pro tyto tlaky větší. U tlaku 32 MPa dosahovalo axiálního tlakového napětí hodnoty 1500 MPa a pro tlak 40 MPa bylo axiální tlakové napětí 1700 MPa.

Pro tlak 32 MPa byla zjištěna hodnota tangenciálního tlakového napětí 1200 MPa a u tlaku 40 MPa dosahuje tlakové tangenciální napětí hodnoty

1400 MPa. V provedeném experimentu se hodnoty tangenciálního zbytkového napětí příliš od simulace nelišily. U tlaku 32 MPa bylo tangenciální zbytkové napětí 1400 MPa a pro tlak 40 MPa byla naměřena stejná hodnota tangenciálního zbytkového napětí.

V těchto případech se jedná o tlak hydrostatický, kterým je kulička tlačena k povrchu dokončované součásti.

Simulací válečkování pomocí explicitní MKP je možné provést analýzu zbytkových napětí, průběh deformací v podpovrchových vrstvách materiálu.

Při studiu problematiky autor našel málo studií zaměřených na jevy probíhající v podpovrchových vrstvách. Toto tvrzení podporuje i zmínka v literatuře²⁸. Více studií je zaměřeno na zkoumání vlivu válečkových parametrů (tvářecí síla, posuv, válečková rychlost) v závislosti na konečné jakosti povrchu. Proto je potřeba se problematikou válečkování pomocí explicitní MKP dále zabývat a rozšiřovat ji.

Možnosti dalšího rozšíření problematiky:

- vytvoření 3D modelu,
- zjištění zbytkových napětí v závislosti na vzdálenosti od povrchu (na hloubce),
- zjištění skutečné tvářecí síly při simulaci,
- zjištění zbytkových napětí pro různé posuvy,
- zjištění zbytkových napětí pro různé průměry kuličky (válečku),
- srovnání výstupů z 2D, 3D modelu a experimentálního ověření,
- experimentální ověření zbytkových napětí v podpovrchových vrstvách.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka	Jednotka	Popis
ALE	[-]	Arbitrary Lagrange-Euler
ČSN	[-]	česká technická norma
DEFORM	[-]	Design Environment for Forming
FEM	[-]	finite element method
HB	[-]	tvrdost podle Brinella
HMH	[-]	Huber, Mises, Hencky
HRC	[-]	tvrdost podle Rockwella
ISO	[-]	International Standard Organisation
MKP	[-]	metoda konečných prvků
SFTC	[-]	Scientific Forming Technologies Corporation
SPH	[-]	Smoothed Particle Hydrodynamics
Symbol	Jednotka	Popis
A	[MPa]	materiálová konstanta modelu materiálu Johnson - Cook
A	[rad]	dolní integrační mez
A	[%]	tažnost
B	[MPa]	materiálová konstanta modelu materiálu Johnson - Cook
B	[rad]	horní integrační mez
[B]	[-]	prvková matice tvarových funkcí přetvoření
C	[-]	materiálová konstanta modelu materiálu Johnson - Cook
C	[-]	konstanta Cowper-Symondova modelu
D	[-]	lomový parametr
D ₁ , D ₂ , D ₃ , D ₄ , D ₅	[-]	materiálová konstanta modelu materiálu Johnson - Cook
E	[MPa]	Youngův modul pružnosti válečkovaného materiálu
E*	[MPa]	redukovaný modul pružnosti
E ₁	[MPa]	Youngův modul pružnosti válečkovaného materiálu
E ₂	[MPa]	Youngův modul pružnosti pro materiál tvářecího elementu

Symbol	Jednotka	Popis
F	[N]	tvářecí síla
F_o	[N]	výsledná obvodová síla
F_p	[N]	výsledná přitlačná síla
F_s	[N]	výsledná posuvová síla
$\{F^{cont}\}$	[N]	vektor kontaktních sil
$\{F^{hg}\}$	[N]	vektor tlumících sil hourglassingu
$\{F_t^{ext}\}$	[N]	vektor aplikovaných sil v čase t
$\{F_t^{int}\}$	[N]	vektor vnitřních sil v čase t
K	[-]	součinitel
L	[mm]	délka kontaktu kuličky s obrobkem
L_o	[mm]	výchozí délka válečkové součásti
L_s	[mm]	délka kontaktu kuličky s obrobkem
M_k	[Nm]	kroutící moment na stopce nástroje
[M]	[kg]	matice hmotnosti
N	[ks]	počet tvářecích prvků
P_k	[-]	četnost tvářecích kontaktů
R	[mm]	ekvivalentní poloměr zakřivení
R_{a1}	[μm]	střední aritmetická úchylka profilu před válečkováním
R_{a2}	[μm]	střední aritmetická úchylka profilu, kterou chceme získat válečkováním
R_e	[MPa]	mez kluzu materiálu
R_m	[MPa]	mez pevnosti materiálu
R_{Z1}	[μm]	největší výška profilu před válečkováním
R_{Z2}	[μm]	největší výška profilu po válečkování
R_1	[mm]	poloměr tvářecího elementu
R_2	[mm]	poloměr válečkového materiálu
T	[°C]	okamžitá teplota
T_{melt}	[°C]	teplota tavení materiálu
T_{room}	[°C]	pokojeová teplota
Z	[%]	koncentrace
a	[mm]	poloměr vtisku
$\{a_i\}$	[m/s^2]	vektor zrychlení v čase t
c	[m/s]	rychlost šíření vlnění v materiálu

Symbol	Jednotka	Popis
d	[mm]	Ø válečkové součásti nebo válečkovacího nástroje
d	[mm]	hloubka vtlačení kuličky do materiálu
d_n	[mm]	Ø kuličky
d_o	[mm]	výchozí Ø válečkové součásti
d_o	[mm]	Ø obtisku kuličky v povrchu kovu
d_1	[mm]	Ø součásti po válečkování
$d\varepsilon$	[-]	změna přetvoření prvků
f	[-]	součinitel tření mezi povrchem válečkové součásti a nástrojem
f_o	[-]	součinitel tření mezi povrchem válečkové součásti a nástrojem v obvodovém směru
f_s	[-]	součinitel tření mezi povrchem válečkové součásti a nástrojem ve směru posuvu
h_o	[mm]	výchozí výška vrstvy před válečkováním
h_z	[mm]	výška vrstvy po válečkování
i	[-]	index uzlových bodů
j	[-]	index uzlových bodů
k_n	[ks]	počet tvářecích prvků
l	[m]	charakteristický rozměr prvku (hrana prvku)
m	[-]	rychlostní exponent
m	[-]	materiálová konstanta modelu materiálu Johnson - Cook
n	[1/min]	otáčky válečkové součásti nebo válečkovacího nástroje
n	[-]	materiálová konstanta modelu materiálu Johnson - Cook
n_1	[ks]	počet průchodů nástroje
p	[-]	konstanta Cowper-Symondova modelu
p_k	[MPa]	tlak mezi válečkem a plochou obrobku
p_x	[MPa]	složka tlaku na povrch elementu ve směru kolmém k povrchu
p_{x_o}	[MPa]	složka obvodového tlaku na povrch elementu ve směru kolmém k povrchu materiálu
p_{x_s}	[MPa]	složka posuvového tlaku na povrch elementu ve směru kolmém k povrchu

Symbol	Jednotka	Popis
p_y	[MPa]	složka tlaku na povrch elementu ve směru y působící síly
p_{y0}	[MPa]	složka obvodového tlaku na povrch elementu ve směru y působící síly
r	[mm]	poloměr zaoblení válečku nebo kuličky
s	[mm]	posuv nástroje
δ	[mm]	šířka plochy plastického obtisku tvářecího prvku ve směru posuvu nástroje
$\{u_t\}$	[m]	vektor posunutí v čase t
v	[m/min]	rychlost válečkování
$\{v_t\}$	[m/s]	vektor rychlosti v čase t
$\{x_0\}$	[m]	výchozí poloha vektoru
$\{x_t\}$	[m]	poloha vektoru v čase t
Δd	[mm]	výška stlačení materiálu (zahlazovací výška)
Δt	[s]	časový krok
Δt^{crit}	[s]	kritický časový krok
Δt_t	[s]	velikost časového kroku
$\Delta \alpha$	[rad]	konstantní úhlový krok v poli charakteristik
$\Delta \bar{\epsilon}^p$	[-]	přírůstek redukovaného plastického přetvoření
α	[rad]	rovinný úhel
ϵ^f	[-]	lomové přetvoření
$\bar{\epsilon}$	[-]	ekvivalentní plastické přetvoření
$\bar{\epsilon}^p$	[-]	redukované plastické přetvoření
$\bar{\epsilon}_{\text{krit}}$	[-]	kritické ekvivalentní plastické přetvoření
$\dot{\epsilon}$	[s ⁻¹]	rychlost přetvoření
$\dot{\epsilon}^0$	[s ⁻¹]	počáteční bezrozměrná rychlost redukovaného přetvoření
$\dot{\epsilon}^0$	[s ⁻¹]	referenční rychlost redukovaného přetvoření
$\dot{\bar{\epsilon}}^p$	[s ⁻¹]	rychlost redukovaného plastického přetvoření
η	[-]	parametr triaxiality
ν_1	[-]	Poissonova konstanta pro válečkový materiál

Symbol	Jednotka	Popis
ν_2	[-]	Poissonova konstanta pro materiál tvářecího elementu
π	[-]	Ludolfovo číslo
ρ	[kg/m ³]	hustota materiálu
σ_K	[MPa]	mez kluzu
σ_h	[MPa]	hydrostatické napětí
σ_m	[MPa]	makroskopické hydrostatické napětí
σ_p	[MPa]	přirozený přetvárný odpor
σ_{pd}	[MPa]	dynamický přirozený přetvárný odpor
σ_{ps}	[MPa]	statický přirozený přetvárný odpor
σ_t	[MPa]	napětí v čase t
σ_y	[MPa]	zpevnění materiálového modelu
$\bar{\sigma}$	[MPa]	makroskopické HMH ekvivalentní napětí
$\{\sigma_n\}$	[MPa]	prvková matice vnitřních napětí
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	[MPa]	hlavní napětí
τ_M	[MPa]	mezní smykové napětí
τ_{max}	[MPa]	maximální smykové napětí
τ_o	[MPa]	smykové napětí v oktaedrické rovině
τ_{oM}	[MPa]	mezní smykové napětí v oktaedrické rovině
φ_i	[-]	intenzita plastické deformace
$\dot{\varphi}$	[s ⁻¹]	rychlost deformace
$\dot{\varphi}_s$	[s ⁻¹]	průřezová rychlost deformace
ω_{max}	[s ⁻¹]	nejvyšší vlastní frekvence prvku

SEZNAM POUŽITÝCH TABULEK

Tab. 2.1 Velikost nosného podílu profilu při odlišných technologiích obrábění ³¹	33
Tab. 2.2 Běžně dosažená střední aritmetická úchylnka profilu při různých technologiích dokončování povrchu ³⁹	33
Tab. 2.3 Doporučené velikosti tlaků pro dokončování povrchu tvářením ³⁴	37
Tab. 2.4 Vztahy pro určení velikosti posuvu nástroje s ³⁹	38
Tab. 2.5 Pracovní podmínky válečkování ⁶⁴	39
Tab. 2.6 Hodnoty součinitele K ³⁴	43
Tab. 2.7 Přídavky na válečkování a střední aritmetická úchylnka profilu ⁶⁴	44
Tab. 3.1 Vstupní hodnoty vybraných parametrů	54
Tab. 3.2 Vypočtené hodnoty válečkovacích parametrů pro simulaci	55
Tab. 3.3 Hodnoty křivek rychlosti.....	59
Tab. 3.4 Hodnoty materiálového modelu Piecewise_Linear_Plasticity	59
Tab. 3.5 Hodnoty materiálového modelu Mat_Rigid	60
Tab. 4.1 Vstupní hodnoty vybraných parametrů	68
Tab. 4.2 Vypočtené hodnoty válečkovacích parametrů	68
Tab. 4.3 Parametry povrchu před válečkováním	68
Tab. 4.4 Parametry použité při měření parametrů povrchu	71
Tab. 4.5 Dosažené parametry povrchu po válečkování.....	71
Tab. 4.6 Popis komponent válečkovacího nástroje ⁹²	72

SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ

Obr. 1.1 Stav deformace prostorového prvku s jedním integračním bodem s nulovou vnitřní energií ^{3, 24, 42}	12
Obr. 1.2 Hourglassingem znehodnocená konečně-prvková síť ⁴⁴	12
Obr. 1.3 Nestabilita způsobená zaokrouhlovacími chybami ^{3, 42}	13
Obr. 1.4 Grafické zobrazení Lagrangeovy formulace při natočení prvku o úhel φ . Modrá linka - okraj prvku, zelené body - uzly, fialové body - materiállové body, oranžové čáry – síť konečných prvků ⁷⁹	15
Obr. 1.5 Grafické zobrazení Eulerova formulace při natočení elementu o úhel φ . Modrá linka - okraj prvku, zelené body - uzly, fialové body - materiállové body, oranžové čáry – síť konečných prvků ⁷⁹	16
Obr. 2.1 Schéma průběhu napětí při válečkování ⁶⁹	23
Obr. 2.2 Pole charakteristik ve směru posuvové síly φ ⁵⁷	23
Obr. 2.3 Grafické znázornění podmínky plasticity HMM ⁵⁷	27
Obr. 2.4 Schéma průběhu napětí, geometrických a objemových změn materiálu při válečkování ³⁹	29
Obr. 2.5 Znázornění kalibrované plochy s úchylkami přímosti ³¹	30
Obr. 2.6 Typický průběh tvrdosti válečkované plochy v závislosti na hloubce ovlivněné vrstvy ³⁹	31
Obr. 2.7 Typický tvar skutečného profilu drsnosti povrchu a nosná křivka této plochy A) po třískovém obrábění B) po válečkování ³¹	32
Obr. 2.8 Nástroj pro statické válečkování vnějších ploch ⁴⁶	34
Obr. 2.9 Nástroj pro dynamické válečkování vnitřních ploch ⁸¹	35
Obr. 2.10 Charakteristické tvary tvářecích elementů nesené středovým čepem ³¹	46
Obr. 2.11 Charakteristické tvary válečkovacích elementů odvalující se po vodící dráze nástroje ³¹	46

Obr. 2.12 Ukázka vlivu velikosti poloměru zaoblení válečkovacího elementu na výsledné drsnosti povrchu ³¹	47
Obr. 2.13 Schematické znázornění válečkování vnější válcové plochy s provedením nástroje s jedním tvářecím prvkem ^{34, 46, 47}	48
Obr. 2.14 Ukázka nástroje s jedním tvářecím prvkem k válečkování vnitřních válcových ploch ⁴⁶	48
Obr. 2.15 Schematické znázornění nástroje s více tvářecími prvky k válečkování vnitřních válcových ploch ⁶³	49
Obr. 2.16 Zobrazení válečkovacího nástroje podle obr. 2.15 ⁶⁷	49
Obr. 2.17 Speciální nástroj pro odstupňované otvory ⁴⁷	49
Obr. 2.18 Způsob válečkování čelních ploch a provedení nástroje pro tyto plochy ⁴⁹	50
Obr. 2.19 Zobrazení nástrojů k válečkování vnitřních kuželových ploch a vnějších a vnitřních kulových ploch ⁴⁹	50
Obr. 2.20 Schematické znázornění válečkování zápichu a zaobleného přechodu ³⁴	51
Obr. 2.21 Speciální válečkovací nástroj ⁴⁸	51
Obr. 2.22 Pohled na kuličku hydrostatického nástroje ⁸⁰	52
Obr. 2.23 Příklady použití hydrostatického nástroje ⁸⁰	52
Obr. 2.24 Masturn 70/3000 CNC - Roller ⁶⁰	52
Obr. 2.25 Masturn 70/3000 CNC - Roller ⁶⁰	53
Obr. 3.1 Graf závislosti válečkovací rychlosti na průměru obrobku ⁴⁶	55
Obr. 3.2 Vtisk kuličky do materiálu silou F, d – hloubka vtlačení kuličky, a - poloměr vtlačené kuličky ⁸⁷	56
Obr. 3.3 Kontakt mezi dvěma válci s paralelními osami ⁸⁷	56
Obr. 3.4 Drsnost povrchu součásti před válečkováním.	57
Obr. 3.5 Programové prostředí Lsprepost.	58
Obr. 3.6 Síť konečných prvků mesh.	58

Obr. 3.7 Prostředí programu ANSYS Mechanical APDL Product Launcher.....	61
Obr. 3.8 Okno s textovým výpisem o stavu úlohy.....	62
Obr. 3.9 Výsledek výpočtu zobrazený v LS-PrePost.	63
Obr. 3.10 Zin válečku a obrobku v programu LS-PrePost.	63
Obr. 4.1 Odvrtávací metoda ⁹¹	65
Obr. 4.2 Metoda sloupku ⁹¹	66
Obr. 4.3 Náskres součásti, jejíž kuželová plocha se opracovávala.	68
Obr. 4.4 Graf závislosti otáček na průměru obrobku ⁹²	69
Obr. 4.5 Graf závislosti posuvu nástroje na průměru obrobku ⁹²	69
Obr. 4.6 Soustružení vnitřní kuželové plochy součásti.	70
Obr. 4.7 Válečkování vnitřní kuželové plochy.	70
Obr. 4.8 Opracovaná kuželová plocha součásti válečkovacím nástrojem.	71
Obr. 4.9 Válečkovací nástroj Baublies IRG-K-3 ⁹²	72
Obr. 4.10 Jednotlivé komponenty válečkovacího nástroje IRG-K-3 ⁹²	72
Obr. 4.11 Válečkovací nástroj Baublies ERG-K-3 upnutý v pinole koníku.	73
Obr. 4.12 Měření povrchu kuželové plochy součásti dotykovým profiloměrem Form Talysurf Intra.	74
Obr. 5.1 Umístění uzlového prvku od začátku simulace.....	75
Obr. 5.2 Graf závislosti efektivního plastického přetvoření vybraných uzlových prvků v podpovrchových vrstvách pro tvářecí sílu 113 N.	76
Obr. 5.3 Graf závislosti efektivního plastického přetvoření vybraných uzlových prvků v podpovrchových vrstvách pro tvářecí sílu 132 N.	76
Obr. 5.4 Graf závislosti efektivního plastického přetvoření vybraných uzlových prvků v podpovrchových vrstvách pro tvářecí sílu 153 N.	77

Obr. 5.5 Graf závislosti efektivního napětí HMM uzlového prvku pro tvářecí sílu 113 N.	77
Obr. 5.6 Graf závislosti efektivního napětí HMM uzlového prvku pro tvářecí sílu 132 N.	78
Obr. 5.7 Graf závislosti efektivního napětí HMM uzlového prvku pro tvářecí sílu 153 N.	78
Obr. 5.8 Graf závislosti axiálního zbytkového napětí uzlového prvku pro tvářecí sílu 113 N.	79
Obr. 5.9 Graf závislosti axiálního zbytkového napětí uzlového prvku pro tvářecí sílu 132 N.	79
Obr. 5.10 Graf závislosti axiálního zbytkového napětí uzlového prvku pro tvářecí sílu 153 N.	79
Obr. 5.11 Graf závislosti tangenciálního zbytkového napětí uzlového prvku pro tvářecí sílu 113 N.	80
Obr. 5.12 Graf závislosti tangenciálního zbytkového napětí uzlového prvku pro tvářecí sílu 132 N.	80
Obr. 5.13 Graf závislosti tangenciálního zbytkového napětí uzlového prvku pro tvářecí sílu 153 N.	80
Obr. 5.14 Tangenciální zbytkové napětí v závislosti na hloubce ⁸⁶	81
Obr. 5.15 Axiální zbytkové napětí v závislosti na hloubce ⁸⁶	82
Obr. 6.1 Příklady využití technologie válečkování v praxi ⁸¹	84
Obr. 6.2 Časová náročnost technologie broušení a technologie válečkování ⁶⁹	85

SEZNAM POUŽITÝCH VZORCŮ

Vzorec 1.1 Vektor zrychlení v čase t ^{3, 10, 13, 24, 42}	9
Vzorec 1.2 Vektor vnitřních sil v čase t interpretovaný vztahem ^{3, 10, 13, 24, 42}	9
Vzorec 1.3 Vektor rychlosti v čase t ^{3, 10, 42}	9
Vzorec 1.4 Vektor posunutí v čase t ^{3, 10, 42}	10
Vzorec 1.5 Poloha vektoru v čase t ^{3, 10, 42}	10
Vzorec 1.6 Napětí v čase t ^{3, 10, 42}	10
Vzorec 1.7 Časový krok ^{3, 10, 13, 24, 42}	10
Vzorec 1.8 Nejvyšší vlastní frekvence prvku ^{3, 10, 13, 24, 42}	11
Vzorec 1.9 Časový krok ^{8, 10, 13, 58, 62}	11
Vzorec 1.10 Rychlost šíření vlnění v materiálu ^{8, 58, 62}	11
Vzorec 1.11 Kritický časový krok ^{3, 8, 10, 24, 42}	11
Vzorec 1.12 Rychlost přetvoření definována pomocí Cowper-Symondova modelu ^{8, 24}	17
Vzorec 1.13 Zpevnění materiálového modelu ^{8, 29, 31}	17
Vzorec 1.14 Lomový parametr ²⁹	18
Vzorec 1.15 Lomové přetvoření ²⁹	18
Vzorec 1.16 Parametr triaxiality ²⁴	18
Vzorec 1.17 Kritérium tvárného porušení v okamžiku, kdy redukované přetvoření v daném místě dosáhne své kritické hodnoty ²⁴	18
Vzorec 2.1 Intenzita plastické deformace ^{11, 57}	24
Vzorec 2.2 Dynamický přirozený přetvárný odpor ^{11, 57}	24
Vzorec 2.3 Složka tlaku na povrch elementu ve směru kolmém k povrchu ^{11, 57}	24
Vzorec 2.4 Složka tlaku na povrch elementu ve směru y působící síly ^{11, 57}	24
Vzorec 2.5 Hydrostatické napětí ^{11, 57}	25
Vzorec 2.6 Výsledná posuvová síla ^{11, 57}	25
Vzorec 2.7 Výsledná obvodová síla ^{11, 57}	25

Vzorec 2.8 Výsledná přítláčná síla ^{11, 57}	26
Vzorec 2.9 Krouticí moment na stopce nástroje ^{11, 57}	26
Vzorec 2.10 Výsledná obvodová síla ^{11, 57}	26
Vzorec 2.11 Výsledná posuvová síla ^{11, 57}	26
Vzorec 2.12 Podmínka plasticity HMM (podmínka Mises) ⁸⁵	27
Vzorec 2.13 Mez kluzu ^{68, 85}	27
Vzorec 2.14 Podmínka maximálních smykových napětí ⁸⁵	28
Vzorec 2.15 Mez kluzu ^{68, 85}	28
Vzorec 2.16 Výška stlačení materiálu (zahlazovací výška) ³⁹	29
Vzorec 2.17 Tlak mezi válečkem a plochou obrobku ^{34, 57}	36
Vzorec 2.18 Tvářecí síla ^{11, 57}	36
Vzorec 2.19 Posuv nástroje ³⁹	38
Vzorec 2.20 Rychlost válečkování ³¹	39
Vzorec 2.21 Četnost tvářecích kontaktů ³⁹	40
Vzorec 2.22 Poměr hodnot meze kluzu a pevnosti ³⁹	41
Vzorec 2.23 Tažnost ³⁹	42
Vzorec 2.24 Koncentrace ³⁹	42
Vzorec 2.25 Střední aritmetická úchylka profilu před válečkováním ³⁴	43
Vzorec 3.1 Tvářecí síla ^{87, 88}	55
Vzorec 3.2 Redukovaný modul pružnosti ^{87, 88}	56
Vzorec 3.3 Poloměr vtisku ^{87, 88}	56
Vzorec 3.4 Ekvivalentní poloměr zakřivení ^{87, 88}	56
Vzorec 3.5 Maximální tlak ^{87, 88}	57

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] BABU, P. R., PRASAD, T. S., RAJU, A. V. S.: *The Effect of External Roller-Burnishing on the Surface Roughness and Surface Hardness of EN 31 Alloy Steel*. International Journal of Machine Tools & Manufacture. 2010.
- [2] BELYTSCHKO, T., LIU, W. K., MORAN, B.: *Nonlinear Finite Elements for Continua and Structures*. John Wiley and Sons, 2000.
- [3] BOŘKOVEC, J., SUCHÁNEK, M.: *Výpočtové modely tvárného porušování kovů v simulaci technologických procesů*. Závěrečná zpráva projektu FRVŠ 2842/2006/G1.
- [4] DAS. R., CLEARY. P. W.: *Effect of rock shapes on brittle fracture using Smoothed Particle Hydrodynamics*. Theoretical and Applied Fracture Mechanics. 2010, Vol. 53, p. 47-60.
- [5] EL-TAYEB, N. S. M., LOW, K. O., BREVERN, P. V.: *Influence of roller burnishing contact width and burnishing orientation on surface quality and tribological behaviour of Aluminium 6061*. Journal of Materials Processing Technology. 2007, Vol. 186, p. 272-278.
- [6] FOREJT, M., PÍŠKA M.: *Teorie obrábění, tváření a nástroje 1. vyd.* Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. 225s. ISBN 80-214-2374-9.
- [7] HALAMA, R.: *Řešení elastoplastické napjatosti v bodovém styku dvou zakřivených těles pomocí MKP*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2005. 130s. Vedoucí disertační práce prof. Ing. Jiří Lenert, CSc.
- [8] HALLQUIST, J. O.: *LS-DYNA theoretical manual*. 2006. Livermore Software technology Corporation, USA: California, Livermore, 2206 p.
- [9] HASSAN A. M.: *The effects of ball- and roller-burnishing on the surface roughness and hardness of some non-ferrous metals*. Journal of Materials Processing Technology. 1997, Vol. 72, p. 385-391.
- [10] HRUBÝ, J.: *Deformačně napěťová analýza rázem zatížené přední části automobilu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 135 s. Vedoucí diplomové práce prof. RNDr. Ing. Jan Vrbka, DrSc., dr. h. c.
- [11] HRUBÝ, J., ČADA, R., RUSZ, S.: *Strojírenské tváření*. Ostrava, VŠB 1993
- [12] HUMÁR, A.: *Technologie I. Technologie obrábění – 3. část*. 2005.

- [13] HŮLKA, J.: *Aplikace modelů tvárného porušování při výpočtové simulaci technologických operací*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 84s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
- [14] IBRAHIM, A. A., ABD RABBO, S. M., EL-AXIR, M. H., EBIED, A. A.: *Center rest balls burnishing parameters adaptation of steel components using fuzzy logic*. Journal of Materials Processing Technology. 2009, Vol. 209, p. 2428-2435. ISSN 0924-0136.
- [15] JAWALKAR, C. S., WALIA, R. S.: *Study of roller burnishing process on En-8 specimens using design of experiments*. Journal of Mechanical Engineering Research. 2009, p. 038-045.
- [16] KLOFÁČ, O.: *Programové prostředky modelování*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky 2007. 57s. Vedoucí diplomové práce Ing. Lubomír Macků, Ph.D.
- [17] KOČMAN, K., PROKOP, J.: *Technologie obrábění*. Brno: Akademické vydavatelství CERM, s. r. o., 2001. 270 s. ISBN 80-214-1996-2.
- [18] KORZYNSKI, M.: *A model of smoothing slide ball-burnishing and an analysis of the parameter interaction*. Journal of Materials Processing Technology. Vol. 209, 2009, p. 625-633.
- [19] LIANG, R., KHAN, A. S.: *A critical review of experimental results and constitutive models for BCC and FCC metals over a wide range of strain rates and temperatures*. Elsevier. In International Journal of Plasticity. 1999, Vol. 15/9, p. 963-980.
- [20] LIN, Y. C., WANG, S. W., LAI, H. Y.: *The relationship between surface roughness and burnishing factor in the burnishing process*. International Journal of Machine Tools & Manufacture. 2004, Vol. 23, p. 666-671.
- [21] LOH, N. H., TAM, S. C., MIYAZAWA, S.: *Ball burnishing of tool steel*. Precision Engineering. 1993, Vol. 15, p. 100-105.
- [22] LÓPEZ de LACALLE, L. N., LAMIKIZ, A., MUÑO A, J., SÁNCHEZ, J. A.: *Quality improvement of ball-end milled sculptured surfaces by ball burnishing*. International Journal of Machine Tools & Manufacture. 2005, Vol. 45, p. 1659-1668.
- [23] LUCA, L., NEAGU-VENTZEL, S., MARINESCU, I.: *Effects of working parameters on surface finish in ball-burnishing of hardened steels*. Precision Engineering. 2005, Vol. 29, p. 253-256.
- [24] MADAJ, M., PÍŠKA, M., ZOUHAR, J.: *Moderní metody konstruování rezných nástrojů pomocí systémů CAD/CAM/CAE*. Závěrečná zpráva projektu FRVŠ 2636/2009/G1.

- [25] MAMALIS, A. G., GRABCHENKO, A. I., HORVÁTH, M., MÉSZÁROS, I., PAULMIER, D.: *Ultraprecision metal removal processing of mirror-surfaces*. Journal of Materials Processing Technology. Vol. 108, 2001, p. 269-277. ISSN 0924-0136.
- [26] MÁDL, J.: *Technologie obrábění*. 1. vyd. Praha: ČVUT, 2000. 79 S. ISBN 80-01-02091-6.
- [27] MURTHY, R. L., KOTIVEERACHARI, B.: *Burnishing of metallic surfaces – a review*. Precision Engineering. IPC Business Press Pre. 1981.
- [28] NEAGU-VENTZEL, S., LUCA, L., CIOC, S., SCHUSTER, M., PILLAR, J., MARINESCU, I.: *FE 3D Burnishing model*. Precision Engineering.
- [29] PANTALÉ, O., BACARIA, J. L., DALVERNY, O., RAKOTOMALALA, R., CAPERAA, S.: *2D and 3D numeric models of metal cutting with damage effects*. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 2004, Vol. 193, pp. 4383-4399.
- [30] PÁSEK, V.: *Pokrokové způsoby tváření*. 1. vyd. Praha SNTL 1964. 204s.
- [31] PÍŠKA, M., a kolektiv.: *Speciální technologie obrábění*. Akademické nakladatelství CERM, s. r. o. Brno, 2009. ISBN 978-80-214-4025-8.
- [32] QIU, G., HENKE, S., GRABE, J.: *Application of a Coupled Eulerian-Lagrangian approach on geomechanics problems involving large deformations*. Computers and Geotechnics. 2010, Vol. 38, p. 30-39.
- [33] RAJESHAM, S., TAK, J. CH.: *A study on the surface characteristics of burnished components*. Journal of Mechanical Working Technology. 1989, Vol. 20, p. 129-138.
- [34] ŘASA, J., POKORNÝ, P., GABRIEL, V.: *Strojírenská technologie – 3.1. Metody, stroje a nástroje pro obrábění*. Scientia, 2001.
- [35] SOO, S. J. a ASPINWALL, D. K.: *Developments in modelling of metal cutting processes*. In Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Vol. 221, N. 4/2007, p. 197-211, ISSN 1464-4207.
- [36] STOIĆ, A., LACKOVIĆ, I., KOPAČ, J., SAMARDŽIĆ, I., KOZAK, D.: *An investigation of machining efficiency of internal roller burnishing*. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. 2010, 40/2, p. 188-194.
- [37] TENG, X., WIERZBICKI, T.: *Evolution of six fracture models in high velocity perforation*. Engineering Fracture Mechanics, in press.

- [38] TOLOOIYAN, A., GAVIN, K.: *Modelling the Cone Penetration Test in sand using Cavity Expansion and Arbitrary Lagrangian Eulerian Finite Element Methods*. Computers and Geotechnics. 2011.
- [39] VAJSKEBR, J., ŠPETA, Z.: *Dokončování a zpevňování povrchu strojních součástí válečkováním*. SNTL, 1984.
- [40] YELDOSE, B. C., RAMAMOORTHY, B.: *An investigation into the high performance of TiN-coated rollers in burnishing process*. Journal of Materials Processing Technology. 2008, Vol. 207, p. 350-355.
- [41] ZEMČÍK, O.: *Změna vlastností oběžných drah valivých ložisek po aplikaci válečkování*. Brno. VUT FSI, 2001. 136 s. + Příloha teze. Vedoucí diplomové práce Prof. Ing. Karel Kocman, DrSc.
- [42] ZVĚŘINA, M.: *Výpočtová simulace procesu třískového obrábění*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
- [43] ALTENBEGER, I. *Deep rolling – the past, the present and the future*. [online]. [cit. 2011-02-02].
URL: <<http://www.shotpeener.com/library/pdf/2005065.pdf>>
- [44] ANSYS RELEASE. *Hourglassing*. Documentation for ANSYS. [online]. [cit. 2011-02-02].
URL: <http://www.kxcad.net/ansys/ANSYS/ansyshelp/Hlp_L_hour1.html>
- [45] ANSYS RELEASE. *Johnson-Cook Model*. Documentation for ANSYS Workbench. [online]. [cit. 2011-02-02].
URL: <http://www.kxcad.net/ansys/ANSYS/AUTODYN/Material_Models/Johnson_Cook_Model.htm>
- [46] BAUBLIES AG, *Katalog nástrojů*, [online]. [cit. 2011-04-02].
URL: <http://www.baublies.com/de/einrollenwerkzeuge_variabel.html>
- [47] BAUBLIES AG, *Katalog nástrojů*, [online]. [cit. 2011-04-02].
URL: <http://www.baublies.com/en/irg_st_sp.html>
- [48] BAUBLIES AG, *Katalog nástrojů*, [online]. [cit. 2011-03-02].
URL: <<http://www.baublies.com/en/index.html>>
- [49] BRIGHT BURNISHING TOOLS PRIVATE Ltd, *Katalog nástrojů*, [online]. [cit. 2011-03-02]. URL: <<http://www.brightbright.com/BBT2006.pdf>>
- [50] DEFORM – firemní stránky. [cit. 2011-03-02].
URL: <<http://www.deform.com/>>
- [51] Diavite AG, *Katalog přístrojů*, [online]. [cit. 2011-03-02].
URL: <http://www.uzimex.cz/soubory/20060725_dh-7_prospekt_cz.pdf>

- [52] ESI GROUP – firemní stránky. [cit. 2011-03-02].
URL: <<http://www.esi-group.com>>
- [53] FLOW TECH – firemní stránky. [cit. 2011-03-02].
URL: <<http://www.flowtech.cms-studio.net/index.php?docid=38>>
- [54] FX6.NET. *Deform v. 10.0. 2009*. [online]. [cit. 2011-03-02].
URL: <<http://www.fx6.net/applications/156672-deform-v-10-0-2009-a.html?language=cs>>
- [55] HAVELKA, T.: *Obrábění válečkováním*. [online]. 2007. [cit. 2011-03-02].
URL: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/obrabeni-valeckovanim>>.
- [56] HAVELKA, T.: *Hladký povrch s dvojitým efektem*. [online]. 2007.
[cit. 2011-03-02]. URL: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/hladky-povrch-s-dvojitym-efektem>>
- [57] HRUBÝ, J. *Tváření kovů – analýza procesů*. 2008. [online].
[cit. 2011-03-02]
URL: <<http://www.345.vsb.cz/jirihruby/texty/TvareniKovuAnalyzaProcesu.pdf>>
- [58] JUŘÍČEK, L., NOVOTNÝ, P.: *Modelování průstřelu ocelové desky malorážovou průbojnou střelou*. Vojenská akademie, Brno. 2004. [online].
[cit. 2011-03-02].
URL: <http://www.pmfhk.cz/VZL/VZL3_2004/4Juricek.pdf>
- [59] KOPŘIVA, M.: *Počítačová podpora technologie*. Sylaby. Brno, 2002.
[online]. [cit. 2011-03-02].
URL: <<http://drogo.fme.vutbr.cz/opory/pdf/PocitacovaPodporaTechnologie.pdf>>
- [60] KOVOSVIT MAS, *Katalog strojů*, [online]. [cit. 2011-03-02].
URL: <<http://www.kovosvit.cz/cz/roller-2800-cnc/>>
- [61] LS-DYNA SUPUPPORT. *Hourglass*. [online]. [cit. 2011-03-02].
URL: <<http://www.dynasupport.com/howtos/element/hourglass>>
- [62] LS-DYNA SUPUPPORT. *Time step size*. [online]. [cit. 2011-03-02].
URL: <<http://www.dynasupport.com/tutorial/ls-dyna-users-guide/time-step-size>>
- [63] NÁSTROJE-NÁŘADÍ-MĚŘIDLA.: *Válečkovací nástroje*, [online].
[cit. 2011-03-02]. URL: <<http://nastroje.hyperlink.cz/burn/burn.htm>>
- [64] MECH-INDIA. *Roller Burnising Tools*. [cit. 2011-03-02].
URL: <<http://www.mechindia.com/cat/pdfs/RollerBurnishing.pdf>>

- [65] *Meranie a kontrola drsnosti povrchu*, [online]. [cit. 2011-03-02], URL: <<http://www.kvs.sjf.stuba.sk/TOaM/drsnost.pdf>>
- [66] META CENTRUM VIRTUAL ORGANIZATION. *Ansys*. [online]. [cit. 2011-03-02]. URL:<<http://metavo.metacentrum.cz/cs/docs/aplikace/software/ansys.html>>
- [67] MONAGHAN & ASSOCIATES, INC. – firemní stránky. [cit. 2011-03-02]. URL: <<http://monaghaninc.com/>>
- [68] PETRUŽELKA, J., BŘEZINA, R.: *Úvod do tváření I*. Technická Univerzita Ostrava, 2001. [online]. [cit. 2011-03-02]. URL: <http://www.345.vsb.cz/jiripetruzelka/Texty/Uvod_TV1.pdf>
- [69] SUGINO MACHINE LIMITED. *Válečkovací nástroje Superoll*. [online]. [cit. 2011-03-02]. URL:<<http://www.sugino.cz/pdf/Sugino%20SUPEROLL%20L2215CZ.pdf>>
- [70] THIRD WAVE SYSTEMS. *AdvantEdge*. [online]. [cit. 2011-03-02]. URL: <<http://www.thirdwavesys.com/>>
- [71] University of South Carolina, College of Engineering and Computing Mechanical Engineering. *Arbitrary Lagrangian-Eulerian Method*. [online]. [cit. 2011-03-02]. URL: <http://www.me.sc.edu/research/jzuo/Contents/ALE/ALE_1.htm>
- [72] ÚSTAV APLIKOVANÉ MECHANIKY BRNO, s. r. o. *Ansys*. [online]. [cit. 2011-03-02]. URL:<<http://www.uam.cz/?page=ansys>>
- [73] *Válcování a povrchové tváření*. [online]. SVT 4 FS 2307. [cit. 2011-03-02]. URL: <http://www.345.vsb.cz/jirihruby/Texty/Surf_Rolling.pdf>
- [74] V BULETIN. *Simulia Abaqus 6.9.3 EF1 (rozšířené funkce)*. [online]. [cit. 2011-03-02]. URL: <<http://wiaderko.net/cs/download-programy/70625-simulia-abaqus-6-9-3-ef1-extended-functionality.html>>
- [75] V BULETIN. *Simulia Abaqus 6,9 EF1*. [online]. [cit. 2011-03-02]. URL: <<http://wiaderko.net/cs/download-programy/57082-simulia-abaqus-6-9-ef1.html>>
- [76] VÝPOČETNÍ A INFORMAČNÍ CENTRUM ČVUT. *Deform*. [online]. [cit. 2011-03-02]. URL: <<http://www.civ.cvut.cz/info/info.php?did=108>>
- [77] VÝPOČETNÍ A INFORMAČNÍ CENTRUM ČVUT. *Abaqus*. [online]. [cit. 2011-03-02]. URL:<<http://www.civ.cvut.cz/info/info.php?did=103>>
- [78] VÝPOČETNÍ A INFORMAČNÍ CENTRUM ČVUT. *Pam*. [online]. [cit. 2011-03-02]. URL:<<http://www.civ.cvut.cz/info/info.php?did=156>>

- [79] WIKIVERSITY. *Nonlinear finite elements/Lagrangian and Eulerian descriptions*. [online]. [cit. 2011-03-02].
URL:<http://en.wikiversity.org/wiki/Nonlinear_finite_elements/Lagrangian_and_Eulerian_descriptions>
- [80] WINTER SERVIS, *Katalog nástrojů*, [online]. [cit. 2011-03-02].
URL:<http://www.winter-servis.cz/index.php?page=ecoroll/nastroje_ecoroll>
- [81] YAMASA – firemní stránky. [cit. 2011-03-02].
URL:<http://www.yamasa.com.tr/eng/roll_burn2.htm>
- [82] YAMATO MACHINE AND TOOL ORGANIZATION. *Robuto roller burnishing tools*. [online]. [cit. 2011-03-02].
URL: <<http://www.yamato.com.tr/pdf/CatRbtEn.pdf>>
- [83] ZÁPADOČESKÉ SUPERPOČÍTAČOVÉ CENTRUM. *Ansys*. [online]. [cit. 2011-03-02]. URL: <<http://zsc.zcu.cz/sw/ansys.html>>
- [84] ZÁPADOČESKÉ SUPERPOČÍTAČOVÉ CENTRUM. *Pam Crash, Pam Shock*. [online]. [cit.2011-03-02].
URL:<<http://zsc.zcu.cz/sw/pam-crash.html>>
- [85] JANÍČEK, P.: *Systémové pojetí vybraných oborů pro techniky, hledání souvislostí, učební texty*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2007. ISBN 978-80-7204-556-3 (CERM 1. díl).
- [86] SARTKULVANICH, P., ALTAN, T., JASSO, F., RODRIGUEZ, C.: S.: *Finite Element Modeling of Hard Roller Burnishing: An Analysis on the Effects of Process Parameters Upon Surface Finish and Residual Stresses*. Journal of Manufacturing Science and Engineering. 2007, Vol. 129/705.
- [87] POPOV, VALENTIN L.: *Contact Mechanics and Friction. Physical Principles and Applications*. 2010, Springer-Verlag, 362 p. ISBN 978-3-642-10802-0.
- [88] JOHNSON, K. L.: *Contact mechanics*. 1985, Cambridge University Press.
- [89] GRANT P. V., LORD J. D., WHIEHEAD P. S.: *The Measurement of Residual Stresses by the Incremental Hole Driling Technique*. Measurement Good Practice Guide No. 53, National Physics Laboratory, Teddington, 2002.
- [90] VLK M., HOUFEK L., HLAVOŇ P., KREJČÍ P., KOTEK. V., KLEMENT J.: *Experimentální mechanika*. Brno, 2003.

- [91] CIVÍN A., VLK M.: *Theoretical Analysis of Ring-core Method for Residual Stress Determination. Conference ANSYS 2009.* Institute of Solid Mechanics, Mechatronics and Biomechanics. Faculty of Mechanical Engineering. Brno University of technology. TechSoft Engineering & SVS FEM.
- [92] BAUBLIES AG, *Katalog nástrojů*, [online]. [cit. 2012-04-02].
URL:<http://www.albaprecision.cz/admin/ke_stazeni/BAUBLIES_KATALOG_ED100509.pdf>
- [93] IMECO TH. *S Katalog dotykového profiloměru Form Talysurf Intra*, [online]. [cit. 2012-04-02]. URL: <<http://www.imeco-th.cz/Download/Prospekty/INTRA%28CZ%29.pdf>>
- [94] CVÍN A. *Stanovení zbytkové napjatosti metodou vrtání otvoru s využitím MKP.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 93 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Pavel Hlavoň, Ph.D.

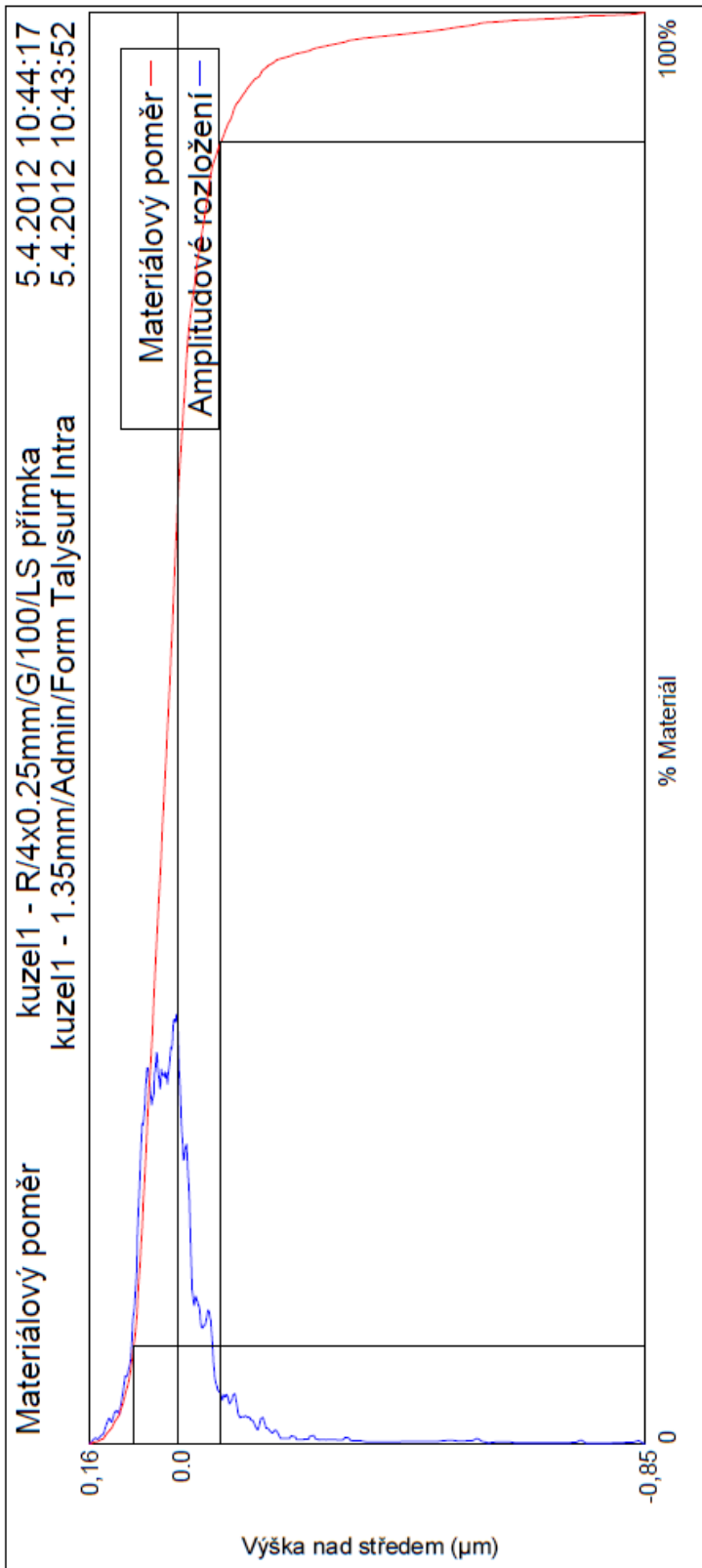
SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1** Výsledek měření dotykovým profiloměrem Form Talysurf Intra
Materiálový poměr
- Příloha 2** Výsledek měření dotykovým profiloměrem Form Talysurf Intra
Změněný profil
- Příloha 3** Technické parametry univerzálního hrotového soustruhu
SV-18-RD
- Příloha 4** Výběr měřených parametrů dotykovým profiloměrem Form
Talysurf Intra⁹³
- Příloha 5** Technické parametry dotykového profiloměru Form Talysurf Intra
- Příloha 6** Technické parametry válečkovcího nástroje Baublies IRG-K-3
- Příloha 7** Technické podmínky pro válečkování nástrojem Baublies
IRG-K-3⁹²

Příloha 1 - Výsledek měření dotykovým profiloměrem Form Talysurf Intra
Materiálový poměr



5.12.6.29

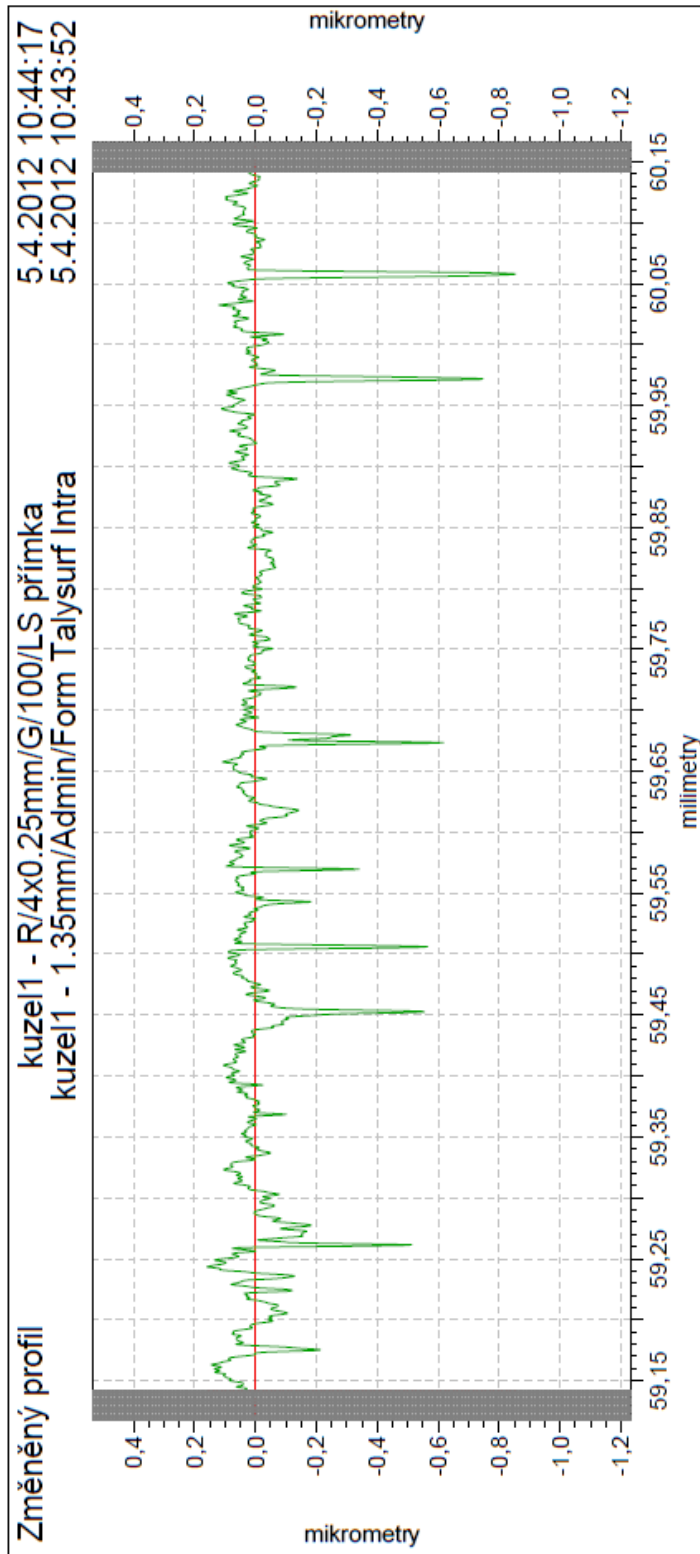


Upper Cursor		Band		Lower Cursor	
Úroveň	0,08 µm	Pásmo/Htp	0,16 µm	Úroveň	-0,08 µm
mr 1%	6,8 %	Delta mr%	84,2 %	mr 2%	91,0 %
HSC	6 výstupků	Počet výstupků	100	výst/cm HSC	17 výstupků

**Příloha 2 - Výsledek měření dotykovým profiloměrem Form Talysurf Intra
Změněný profil**



5.12.6.29



Ra	0,0562	μm	Rq	0,1000	μm		
Rsk	-4,1036		Rv	0,6365	μm		
Rp	0,1229	μm	Rt	1,0126	μm	Rmr(c)	64,71
			Rz	0,7594	μm	% Výška (stř. hod.)	0,000
			Rc	0,4534	μm		μm

**Příloha 3 – Technické parametry univerzálního hrotového soustruhu
SV-18-RD**

Výrobce	TOS Trenčín
Typ	SV-18-RD
Výrobní číslo	0151
Rozměry stroje (š x d x v)	950 x 2720 x 1210 mm
Zastavěná plocha	950 x 3200 x 1520 mm
Váha stroje	2100 kg
Největší hmotnost obrobku	300 kg
Maximální počet otáček	2800 min ⁻¹
Výkon motoru při maximálních otáčkách	14 kW
Maximální krouticí moment včetně	207 Nm
Vzdálenost hrotu	750 mm
Oběžný průměr nad ložem	380 mm
Oběžný průměr nad suportem	250 mm
Rozsah podélného posuvu na otáčku	0,02 až 2,8 mm
Rozsah příčného posuvu na otáčku	0,01 až 1,4 mm
Šířka lože	340 mm
Průměr upínací desky	360 mm
Kužel dutiny včetně	50 (metrický)
Kužel pinoly	4 (Morse)

Příloha 4 – Výběr měřených parametrů dotykovým profiloměrem Form Talysurf Intra⁹³

Standardy	DIN, ISO, JIS
Parametry základního profilu	Pa, Pc, Pp, Pq, Pt, Pv, Pz
Parametry drsnosti	R3z, Ra, Rc, Rsk, Rp, Rq, Rv, Rt, Rz
Parametry vlnitosti	Wa, Wc, Wp, Wq, Wt, Wv, Wz
Rk parametry	Mr1, Mr2, Rk, Rpk, Rvk
R + W parametry	AR, Pt, R, Rx, Sar, Sw, W, Wx
Rozměrové parametry	Sklon, Sklon reference, Rozdíl sklonů, Průsečík X / Průsečík Z
Cut-off	0,08; 0,25; 0,8; 2,5; 8 a 25 mm

Příloha 5 – Technické parametry dotykového profiloměru Form Talysurf Intra

Výrobce	Taylor Hobson Ltd
Typ	Form Talysurf Intra
Výrobní číslo	112-2936-02-D4143
Rozměry přístroje (š x d x v)	343 x 116 x 160 mm
Hmotnost	4,9 kg
Typ snímače	indukční
Měrná jednotka	µm/µin volitelně
Délka snímání	0,1 – 50 mm
Rychlost posuvu	10 mm/s
Rychlost měření	1 mm/s
Úchylka přímosti (Pt)	0,4 µm – 50 mm
Nominální rozsah měření (Z)	16 nm v rozsahu 1 mm 3,2 nm v rozsahu 0,2 mm
Délka raménka	60 mm
Hrot raménka	kuželový diamantový hrot
Úhel diamantového kužele	90°
Poloměr hrotu snímače	2 µm
Síla	1 Nm

Příloha 6 – Technické parametry válečkovcího nástroje Baublies IRG-K-3

Výrobní číslo	50-396-00; No: 0818790
Zpracování	Kuželové otvory
Standardní montáž	Válcová stopka nebo Morseho kužel
Rozsah průměrů	Ø 17-38/56°36'
Typ otvoru	vnitřní kužel 60° – 90° – 120°
Materiál válečků	SK
Počet válečků	3
Průměr válečků	5 mm
Délka válečků	20 mm

**Příloha 7 – Technické podmínky pro válečkování nástrojem Baublies
IRG-K-3⁹²**

Střední aritmetická úchylka profilu před válečkováním	do 15 μm
Přídavek materiálu	do 0,01 mm
Mazání	chladicí emulze, minerální olej
Válečkovací rychlost	až 40 m/min
Posuv	0,1 – 0,3 mm/otáčku
Maximální tvrdost obrobku	45 HRC
Předpětí nástroje	do 4 mm
Doba válečkování	1 až 2 sekundy