

**ZISŤOVANIE VPLYVU FAKTOROV
NA SÚDKOVITOSŤ PRI UBÍJANÍ
ZA TEPLA POMOCOU NUMERICKEJ
SIMULÁCIE**

Ing. Róbert SOBOTA, PhD.

Táto vedecká monografia je prezentáciou práce autora, ktorá bola recenzovaná, obhájená a schválená Vedeckou radou Materiálovo-technologickej fakulty STU v Trnave dňa 13. 5. 2010 vo vednom odbore 23-07-9 Strojárske technológie a materiály.

**Recenzenti: prof. Ing. Ján Boroška, CSc.
 doc. Ing. Peter Kostka, CSc.
 Ing. Ladislav Jílek, CSc.**

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE

Materiálovotechnologická fakulta so sídlom v Trnave

Ing. Róbert SOBOTA, PhD.

**ZISŤOVANIE VPLYVU FAKTOROV
NA SÚDKOVITOSŤ PRI UBÍJANÍ ZA TEPLA
POMOCOU NUMERICKEJ SIMULÁCIE**

**DETERMINATION OF INFLUENCE
OF VARIOUS FACTORS ON BARRELLING AT HOT
UPSETTING USING NUMERICAL SIMULATION**

Ing. Róbert Sobota, PhD., Ústav výrobných technológií,
Materiálovotechnologická fakulta STU, Jána Bottu 24, 917 24 Trnava

e-mail: robert.sobota@stuba.sk

Abstrakt

Táto monografia sa zaoberá ubíjaním za tepla ako predkovacej operácie pred zápustkovým kovaním. Pri ubíjaní ocelového valčeka je dôležité poznať tvar súdka, čo umožní jednoduchšiu manipuláciu s predkovkom a ľahšie vycentrovanie (ustavenie) do zápustkovej dutiny.

V monografii sú ďalej popísané faktory, ktoré majú vplyv na súdkovitý tvar (súdkovitosť). Skúmaný bol vplyv štíhlostného pomeru a vplyv koeficientu trenia na súdkovitosť. Riešenie bolo realizované experimentálne a pomocou numerickej simulácie, ktorá bola vykonaná pomocou simulačných programov ANTARES a MSC.SuperForge. Z výsledkov získaných experimentom a pri simuláciách boli zostrojené grafické závislosti percentuálnej výšky súdka od priemeru súdka a následne boli porovnané. Ďalej boli pomocou polynómu 3. stupňa popísané. Tieto výsledné polynómy presne popisujú celý tvar súdka, a preto boli z nich zostrojené grafické závislosti, ktoré možno nazývať nomogrammi.

V práci sa zistilo, aký veľký vplyv má štíhlostný pomer a koeficient trenia na súdkovitý tvar. Zistilo sa tiež, že pri koeficiente trenia $f = 0,2 \div 0,5$ sa tvar súdka mení len minimálne. Výsledky tiež ukazujú zónu, kde tvar súdka nezávisí od koeficientu trenia. Táto zóna sa nachádza asi v 20 % výšky súdka. Pri vstupnom priemere polotovaru 50 mm je v tejto výške priemer súdka 70,8 mm.

Kľúčové slová: ubíjanie, numerická simulácia, štíhlostný pomer, koeficient trenia, súdkovitosť.

Abstract

This monograph deals with hot upsetting as preforming operation before drop forging. During upsetting of steel cylinder it is important to know the shape of barrel that simplifies the manipulation with preforms and provides their easier aligning into forging die cavity.

The factors influencing the barrel shape (barrelling) are described. The influence of slenderness ratio and coefficient of friction on barrelling of preform was studied. The problem was solved experimentally and by numerical simulation, using simulation softwares ANTARES and MSC.SuperForge. From the gained results of experiments and simulations the curves of relative height of barrel versus diameter of barrel were obtained and compared. The

curves then were described by 3rd degree polynomial. These polynomials precisely describe the whole shape of barrel, so the curves can be considered as nomographs.

There was established the concrete influence of slenderness ratio and coefficient of friction on the barrel shape. It was determined that at coefficient of friction in the range of $f = 0.2 \div 0.5$ the shape of the barrel changes minimally. The results also show zone, where the shape of barrel does not depend on coefficient of friction. This zone is located approximately in the one fifth (20 %) of the barrel height. At initial diameter of steel cylinder 50 mm the barrel diameter in this height is 70.8 mm.

Key words: upsetting, numerical simulation, slenderness ratio, coefficient of friction, barrelling.

ZOZNAM SKRATIEK A SYMBOLOV

Pokiaľ nie je uvedená iná definícia použitého označenia v práci, potom platí nasledovná definícia označenia:

Symbol	Veličina	Rozmer
f	koeficient trenia	[-]
h_0	výška polotovaru	[mm]
h	výška súdka po ubíjaní	[mm]
d_0	priemer polotovaru	[mm]
$d_{\check{c}}$	priemer čela	[mm]
d	maximálny priemer súdka	[mm]
d_{str}	priemer stredného valca	[mm]
d_i	priemer súdka vo zvolenej výške	[mm]
λ	štíhlostný pomer	[-]
κ	ubíjací pomer	[-]
Γ	súčiniteľ súdkovitosti	[-]
Θ	pomerný objem súdkovitosti	[%]
ε	pomerné pretvorenie	[-]
φ	skutočné pretvorenie	[-]
V	objem polotovaru	[m ³]
$V_{súdka}$	objem súdka	[m ³]
k_o	pretvárny odpor kovaného materiálu	[MPa]
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	hlavné normálové napätia	[MPa]
a, b_1, b_2, b_3	regresné konštanty jednotlivých ubíjacích pomerov	[-]
A, B_1, B_2, B_3	regresné konštanty jednotlivých regresných konštánt	[-]
Ψ_x	koeficient nerovnomernosti pretvorenia v smere osi x	[-]
Ψ_z	koeficient nerovnomernosti pretvorenia v smere osi z	[-]
$\dot{\varepsilon}$	rýchlosť pomerného pretvorenia	[s ⁻¹]
$\dot{\varphi}$	rýchlosť skutočného (logaritmického) pretvorenia	[s ⁻¹]

ÚVOD

Vo všeobecnosti technológia tvárnenia patrí k najhospodárnejším technológiám, a to nielen z dôvodu úspory materiálu, ale i energie. Ďalšou prednosťou tejto technológie je zlepšenie akosti výrobkov a zvýšenie produktivity práce.

V súčasnosti vývoj tvárnenia smeruje k výrobe súčiastok s úzkymi toleranciami a geometriou blízkou ku konečnému tvaru. Do pozornosti sa dávajú aj vysoko procesne riadené mechanicko-technologické vlastnosti výrobkov a zvýšenie flexibility technológií tvárnenia, a tým aj ekonomické výhodnosti pri menších sériách.

Aby sa výhody technológie čo najviac využívali, vyžadujú sa najmä od projektantov výrobkov, výrobných procesov a systémov komplexnejšie teoretické a metalurgicko-technologické poznatky. Navyše, v dobe informačných technológií aj poznatky zo simulácie a jej využitia.

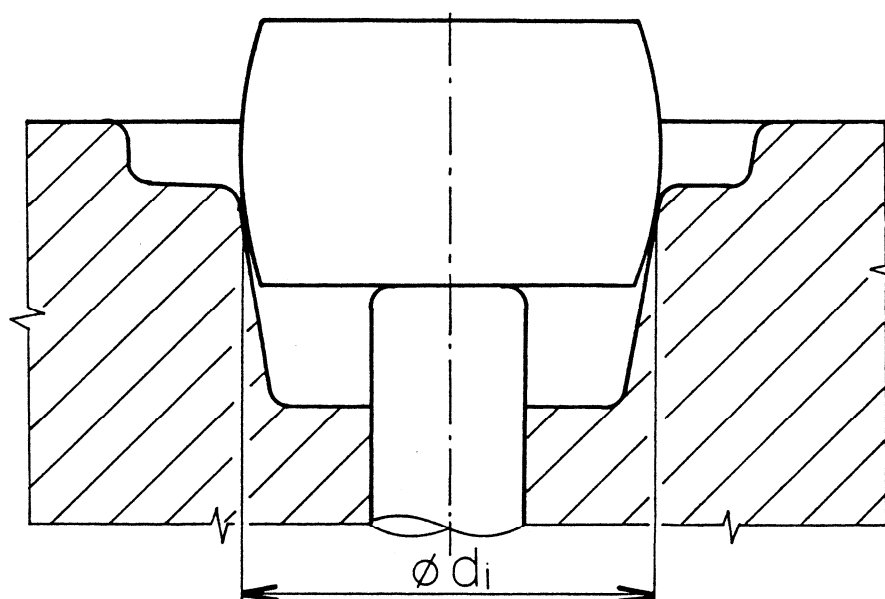
V súčasnej dobe je v popredí záujem o využívanie simulačných programov, a to vo všetkých oblastiach strojárskych technológií. Tieto programy uľahčujú prácu pri návrhu technologického procesu, keďže umožňujú dopredu nasimulovať a vyskúšať, ako bude daný proces prebiehať v praxi. Toto je možné preto, lebo programy majú veľkú databázu materiálov s mechanickými vlastnosťami a s príslušnými fyzikálnymi veličinami, je možné si zvoliť teplotné podmienky procesu, trenie a iné parametre procesu, ktoré nám dopomáhajú k tomu, aby tento proces bol čo najviac podobný tomu, aký prebieha v praxi.

Témou monografie je overiť výsledky získané simulačným programom a porovnať ich s výsledkami získanými pri praktických experimentoch. Simulácia a experimenty budú vykonané pre operáciu ubíjanie za tepla. Cieľom bude optimalizovať a matematicky vyjadriť tvar súdka. Tento tvar súdka je veľmi dôležitý pri zavádzaní mechanizácie kovania najmä pri vsúvaní do zápustky v druhej operácii.

1 PREHĽAD POZNATKOV O UBÍJANÍ ZA TEPLA

Ubíjanie za tepla patrí do oblasti objemového tvárnenia za tepla. Pri tvárnení za tepla je tvárniaca teplota vyššia, ako je teplota rekryštalizácie, a teda spevnenie materiálu v dôsledku pretvorenia je približne v rovnováhe s odpevnením vyvolaným dynamickou rekryštalizáciou. Navonok sa teda deformačné spevnenie materiálu neprejavuje. Ocele sa pri tvárnení za tepla tvárnia v oblasti austenitu. Preto i pri tvárnení za tepla materiál vykazuje väčšie pretvorenie. Zvýšenie mechanických vlastností výtvarkov pri tvárnení za tepla súvisí so zjemnením zrna (1).

Ubíjanie za tepla je základnou kováckou operáciou voľného kovania a používame ho aj v spojení s inými kováckymi operáciami ako predlžovanie či dierovanie v prípravnej etape zápusťkového kovania a pretlačovania. Ubíjanie používame na dosiahnutie požadovaných mechanických vlastností, tvaru a rozmerov telesa (2).



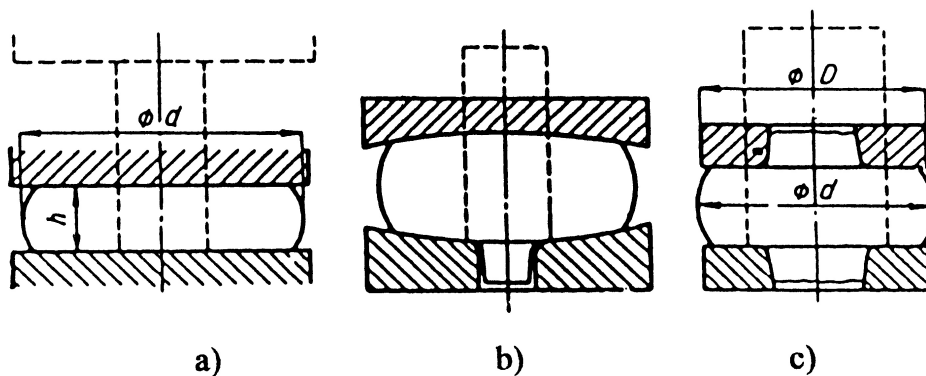
Obr. 1. Centrovanie na dotykovú kružnicu súdka (3)

V praxi je ubíjanie za tepla používané ako prípravná etapa zápusťkového kovania. Je dôležité poznať tvar súdka vzhľadom na tvar druhej operácie zápusťkovej dutiny pri návrhu nástroja pre zápusťkové kovanie (obr. 1).

Charakteristika ubíjania za tepla

Pri ubíjaní materiál zohriaty na HKT sa stláča v smere svojej jeho osi a súčasne sa zväčšuje priečny prierez. Používa sa najmä pri kovaní kotúčov a iných rotačných výkovkov. Pri ubíjaní za tepla sa vznik súdkovitého tvaru prejavuje viac ako pri ubíjaní za studena, pretože okrem trenia na čelách dochádza aj k rýchlejšiemu ochladzovaniu na kontaktných plochách. Výška ubíjaného polotovaru nemá byť väčšia ako 2,5 násobok priemeru (1, 4, 5, 6, 7).

Na ubíjanie sa používajú ubíjacie dosky (obr. 2a) ak východiskový polotovár je z odstrihnutého alebo z odrezaného kusa, ktorý nemá čap na manipuláciu. Ak sa s ubitým kusom ďalej manipuluje, potom má predkovok manipulačný čap a v spodnej doske je vybranie. V týchto prípadoch sú ubíjacie dosky vyduté (obr. 2b). Táto úprava ubíjacích dosiek uľahčí tok materiálu v osi výkovku bez premiestnenia okrajov. Okrem toho vydutie zvyšuje tlakovú napätosť, čo sa prejavuje zvýšením tvárnosti materiálu, ale za cenu zvýšeného ubíjacieho odporu. Tvarové ubíjacie dosky sa používajú na vyrobenie výkovkov s nábojom a s inými výstupkami. Aby materiál do dutiny ľahko natiekol, majú tieto dosky v otvoroch úkosy asi $5 \div 7^\circ$. Priemer dosiek je rovnaký ako priemer výkovku ($D = d$, obr. 2c) (4).



Obr. 2. Spôsoby ubíjania pri voľnom kovaní (4)

a) rovnými kovačkami, b) vydutými kovačkami, c) ubíjanie s vytlačovaním

Účelom ubíjania je zvýšenie stupňa pretvorenia, zníženie anizotropie mechanických vlastností, dosiahnutie radiálneho priebehu vlákien, zhotovenie výkovkov s väčším priečnym prierezom, ako mal polotovár, príprava kovaných polotovarov na nasledujúce dierovanie, predlžovanie alebo zápustkové kovanie (8).

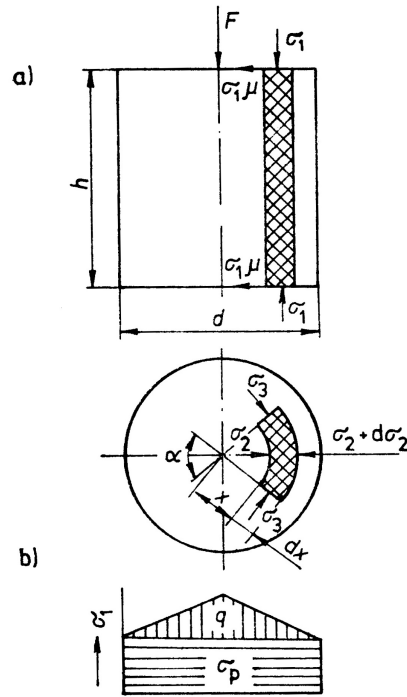
2 ANALÝZA PODMIENOK TVORENIA SÚDKOVITOSTI PRI UBÍJANÍ

2.1 Analýza napät'ovo-deformačných stavov a energosilové charakteristiky

Ubíjanie je stláčanie tvárneného telesa medzi rovnobežnými plochami nástroja, pri ktorom sa znižuje výška polovýrobku a zväčšuje prierez kolmý na smer ubíjania (obr. 3).

Priebeh deformácie pri ubíjaní valcových telies aj keď ide o jednoduchú technologickú operáciu, je veľmi zložitý. Závisí od pomeru priemeru valca k jeho výške, od stupňa deformácie vyjadrenej pomerným zmenšením výšky a od súčiniteľa vonkajšieho trenia na stykovej (dotykovej) čelnej ploche valca a kovadla. Preto je zložitý a premenlivý i stav napätí v rôznych miestach tvárneného objemu. Ide o trojosový stav osovo súmernej deformácie a trojosový stav napätosti (9).

Pri ubíjaní vznikajú v materiáli napätia (obr. 3b) v smere a aj kolmo na smer pôsobiacej sily. Z ubíjaného materiálu oddelíme nekonečne malý hmotný bod (element) ohraničený dvoma sústrednými oblúkmi (valcovými plochami) o polomeroch x a $x + dx$, o výške h a hrúbke dx . Element je tiež ohraničený dvoma bočnými rovinami zvierajúcimi uhol α . Na priečnom reze ubíjaného materiálu tvaru valca sily pôsobiace na vybraný element sú v rovnováhe. Ak vzdialenosť elementu od zvislej osi je x , potom na jeho vnútornú stenu o ploche $x \cdot \alpha \cdot h$ pôsobí napätie σ_2 , na vonkajšiu stenu o ploche $(x + dx) \cdot \alpha \cdot h$ napätie $\sigma_2 + d\sigma_2$, na dve bočné steny o ploche $h \cdot dx$ napätie σ_3 a na dve základne s plochou $x \cdot \alpha \cdot dx$ napätie $\sigma_1 \cdot \mu$ (μ je súčiniteľ vonkajšieho trenia) (6, 7, 8, 10, 11, 12, 13, 14, 15).



Obr. 3. Ubíjanie valcového telesa (8)

- a) pôsobenie hlavných napätí na stenu elementu,
 b) priebeh hlavných napätí σ_1 na priemere telesa

Diferenciálna rovnica rovnováhy síl vo vodorovnej rovine má tvar

$$\sigma_2 \cdot x \cdot \alpha \cdot h - (\sigma_2 + d\sigma_2) \cdot (x + dx) \cdot \alpha \cdot h + 2 \cdot \sigma_3 \cdot \sin \frac{\alpha}{2} \cdot h \cdot dx - 2 \cdot \sigma_1 \cdot \mu \cdot x \cdot \alpha \cdot dx = 0. \quad [1]$$

Pre veľmi malý uhol α platí, že $\sin(\alpha/2) \cong \alpha/2$. Osovo symetrická deformácia umožňuje prijať zjednodušenie $\sigma_2 = \sigma_3$, a potom rovnica [1] bude mať tvar

$$d\sigma_3 = -2\sigma_1 \cdot \mu \cdot \frac{dx}{h}. \quad [2]$$

Pri uvažovaní Treskovej podmienky plasticity $\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_p = \text{konšt}$, a po úprave dostaneme rovnicu

$$\sigma_1 = 2\sigma_p \cdot \mu \cdot \left(\frac{d}{2} - x \right) \frac{1}{h} + \sigma_p, \quad [3]$$

ktorú možno upraviť na tvar

$$\sigma_1 = \sigma_p + q, \quad [4]$$

kde q je pomerná veličina, ktorá vyjadruje vplyv trecích síl (obr. 3b).

Elementárnu tvárniacu silu určuje vzťah

$$dF = \sigma_1 \cdot dS, \quad [5]$$

kde dS je elementárna plocha priečného prierezu ubíjaného telesa

$$dS = 2\pi \cdot x \cdot dx. \quad [6]$$

Celková tvárniaca sila na ubíjanie sa určí podľa vzťahu

$$F = \int_0^{d/2} \sigma_1 \cdot 2\pi \cdot x \cdot dx, \quad [7]$$

za σ_1 sa dosadí výraz [3] a po integrácii dostaneme

$$F = \sigma_p \left(1 + \frac{\mu d}{3h} \right) \cdot \frac{\pi d^2}{4} = \sigma_d \cdot S \quad k_0 S = k_p \cdot m S \quad [N], \quad [8]$$

kde $S = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$ je plocha priečného prierezu telesa,

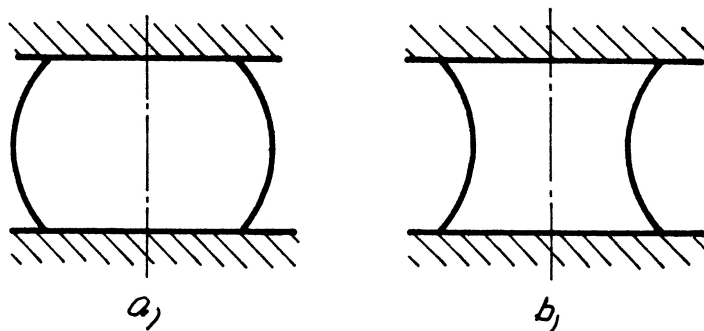
σ_d je deformačný odpor (k_0),

$\sigma_p = k_p$ a $\sigma_d = k_0 = k_p \cdot m = k_p \cdot [1 + (f/3) \cdot (d/h)]$,

$\mu = f$, a to je súčiniteľ vonkajšieho trenia.

Vplyvom trenia na stykových plochách materiálu s kovacím nástrojom vzniká nerovnomerné rozloženie plastických deformácií v materiáli, a tým súdkovitost' (10).

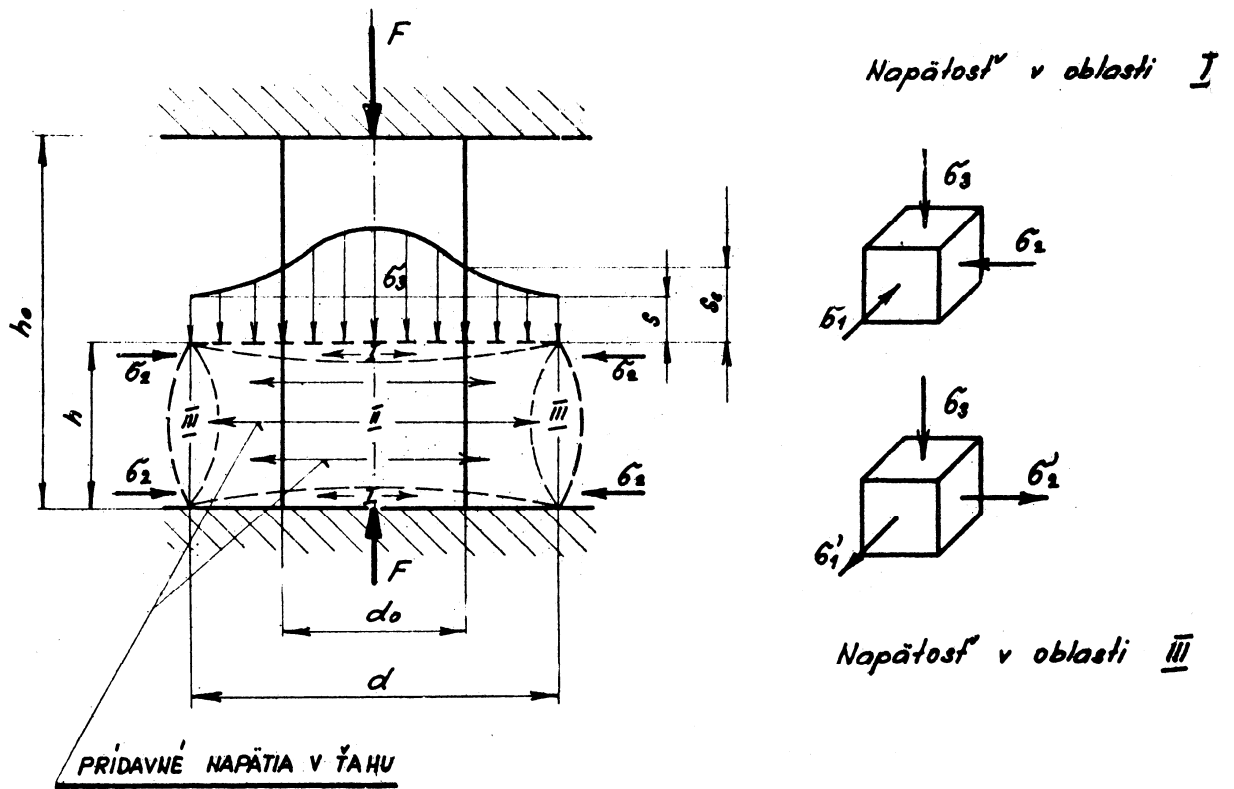
Súdkovitý tvar sa vytvorí následkom trecích síl na stykových plochách nástroja s ubíjaným materiálom vtedy, keď deformačná sila nie je príliš malá a jej účinok trvá dostatočne dlhú dobu. Pri príliš rýchlej deformácii alebo malej deformačnej sile vznikne kalíškovitý tvar, pretože deformácia neprenikla dostatočne do hĺbky materiálu, obr. 4b (5).



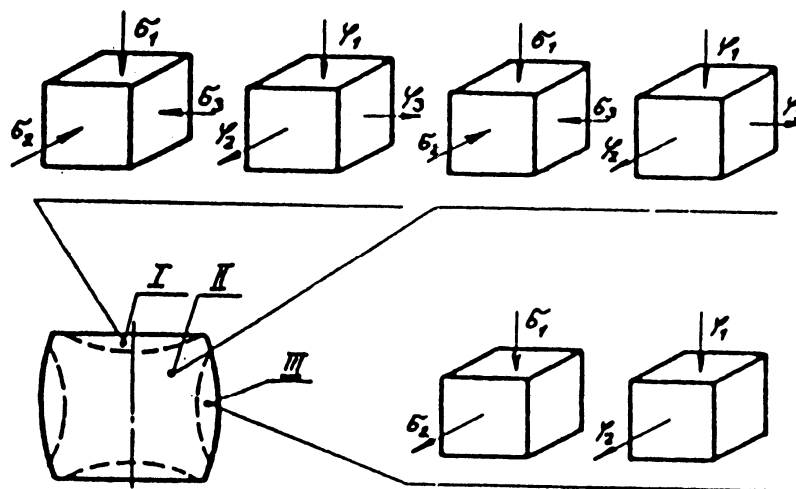
Obr. 4. Správny a nesprávny priebeh ubíjania (5)
a) súdkovitý tvar, b) kalíškovitý tvar

Pri ubíjaní sa v tvárnenom objeme, najmä z dôvodu vonkajšieho trenia, vyvolá vonkajším zaťažením pomerne zložitý priestorový stav napätosti. Priestorový stav je príčinou aj zložitého nerovnomerného pretvorenia v objeme tvárneného telesa.

Priestorové stavy napätosti pri ubíjaní medzi rovnými doskami za tepla sú na obr. 5 a pri ubíjaní za studena sú na obr. 6.



Obr. 5. Stav napätosti pri ubíjaní za tepla medzi rovnými doskami (16)

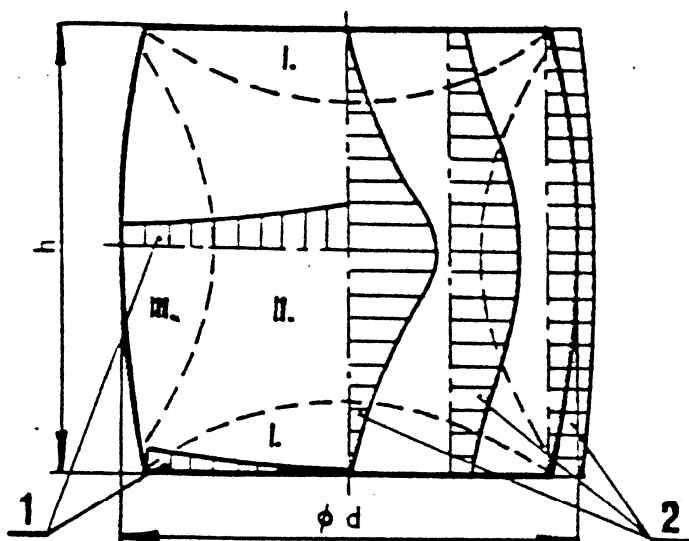


Obr. 6. Stav napätosti a pretvorenia pri ubíjaní za studena medzi rovnými doskami (1)

Nerovnomerná deformácia spôsobuje hromadenie doplnkových (prídavných, druhotných) ťahových napätí, ktoré nepriaznivo menia začiatočnú tlakovú schému stavu napätosti (3).

2.2 Analýza procesu ubíjania z hľadiska veľkosti pretvorenia

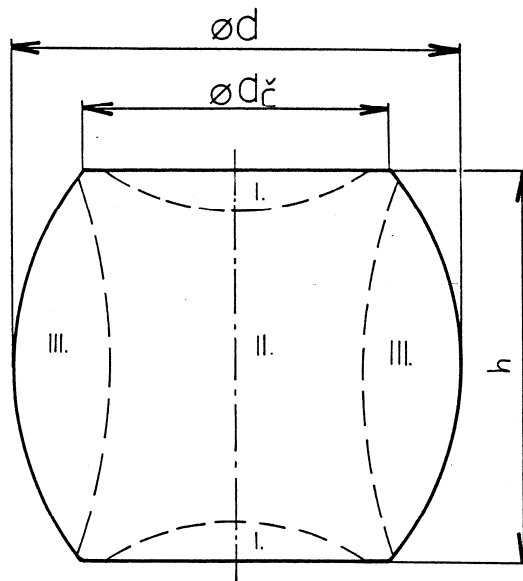
Tvorenie súdkovitého tvaru sa vysvetľuje zadržiavaním priečných pretvorení vplyvom protibežných síl trenia, ktoré sú v blízkosti dotykových plôch maximálne a smerom ku stredu výšky klesajú. Takto sa vytvoria zóny sťaženého pretvorenia, ktoré majú kopulovitý tvar, pričom kov nachádzajúci sa medzi nimi radiálne roztláčajú. Pri sledovaní veľkosti pretvorenia po celom priereze axiálne pretvorenia v smere výšky sú dvakrát väčšie ako radiálne - obr. 7. (3).



Obr. 7. Rozloženie veľkostí pretvorenia v stláčanom valčeku (3)

1. radiálne pretvorenia, 2. axiálne pretvorenia

Rozloženie deformácie na dotykových plochách výrazne ovplyvňujú deformáciu vnútornej časti valca, kde v bežnom prípade rozoznávame tri pásma deformácie (obr. 8).



Obr. 8. Tri pásma ubíjaného valčeka (3)
 I. pásmo zabrzdzenia deformácie
 II. pásmo maximálnych deformácií
 III. pásmo stredných deformácií

Pod dotykovými plochami nástroja v oblasti priľnutia sa do určitej hĺbky rozprestiera pásmo utlmenej deformácie. Je to následok zabrzdzenia radiálneho pohybu kovu na čelnej ploche. Kov ako by bol v pásme I. menej poddajný (pásmo zabrzdzenia). V pásme II. prebieha najintenzívnejšia deformácia v osovom i radiálnom smere. V hraničných oblastiach prvého a druhého pásma kov obteká pásmo utlmenej deformácie smerom k čelným plochám. Tým sa vysvetľuje výskyt prechodu časti vonkajších povrchov na kontaktné, najmä pri $d/h < 1$. V pásme voľného šírenia III. hodnota stupňa deformácie sa nachádza medzi dvoma prvými pásmami (17).

Kritický stupeň deformácií zodpovedajúci maximu nerovnomernosti závisí od pomeru rozmerov deformovaného telesa. Čím nižší je ubíjaný valec, tým pri nižšom stupni deformácie pozorujeme maximum nerovnomernosti. V celom objeme ubitého valca je nerovnomernosť deformácie rozložená tiež rovnako. Je maximálna v osovej zóne (pásme) a znižuje sa smerom k bočným plochám (3).

Stupeň nerovnomernosti pretvorenia v smere ubíjania je funkciou osi z . Ale ako ukazujú pokusy, je nerovnomernosť pretvorenia v rôznych zvislých rezoch rôzna. To znamená, že koeficient nerovnomernosti pretvorenia ψ_z je tiež funkciou osi x .

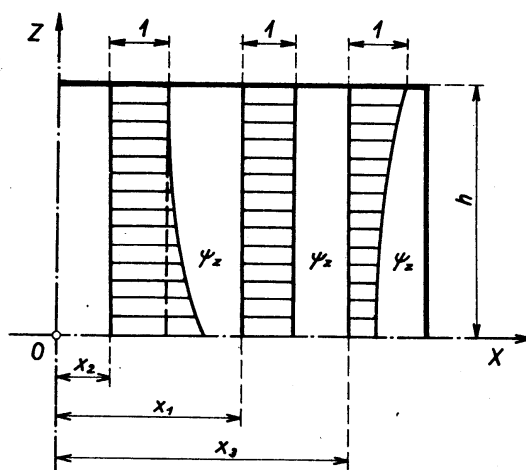
Pri rovnomernom pretvorení sa oba koeficienty rovnajú jednej: $\psi_z = 1$, $\psi_x = 1$. Pri určitom stupni ubíjania vyjadrenom pomerom dh/h môžu mať obidve veličiny ψ_z aj ψ_x

hodnoty väčšie aj menšie ako je jedna. Závisí to od polohy skúmanej častice materiálu v ubíjanom valci.

Na čelnej dotykovej ploche ubíjaného valca, t.j. pre $z = h$, je koeficient nerovnomernosti pretvorenia $\psi_z = 1$. Vo zvislých rezoch blízko osi z je potom $\psi_z > 1$, ale v rezoch vzdialených od osi z (blízko povrchu ubíjaného valca) je $\psi_z < 1$. Z toho vyplýva, že vo valci musí existovať zvislý rez, kde $\psi_z = 1$, teda kde je rovnomerné pretvorenie.

V každom zvislom reze pri určitej osi x je ψ_z funkciou osi z . Pri $z = h$, ako už bolo povedané, je $\psi_z = 1$. V rezoch medzi rezom s rovnomernou deformáciou ($\psi_z = 1$) a osou z sa koeficient nerovnomernosti pretvorenia ψ_z zväčšuje so znižujúcou sa súradnicou z . V rezoch medzi vonkajším obrysom valca a rezom s rovnomerným pretvorením sa koeficient nerovnomernosti pretvorenia ψ_z naopak znižuje so znižujúcou sa súradnicou z .

Tento priebeh veličiny ψ_z je znázornený na obr. 9. V reze so súradnicou x_1 je rovnomerné pretvorenie $\psi_z = 1$, v reze so súradnicou $x_2 < x_1$ je $\psi_z > 1$ a v reze so súradnicou $x_3 > x_1$ je $\psi_z < 1$ (9).

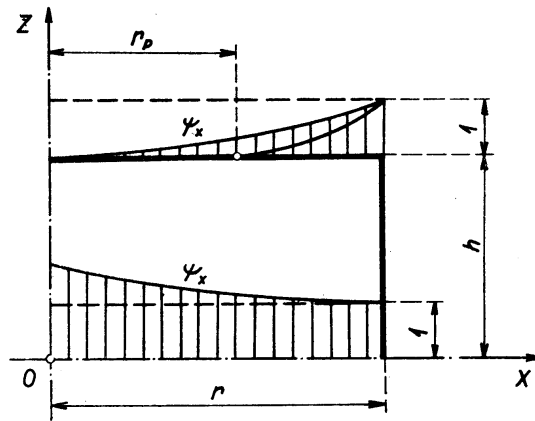


Obr. 9. Stupeň nerovnomernosti pretvorenia vo zvislých rezoch valca (9)

Koeficient nerovnomernosti pretvorenia vo vodorovných rezoch v smere osi x má na vonkajšom povrchu pri $x = r$ hodnotu $\psi_x = 1$. So znižujúcou sa veľkosťou súradnice x sa jeho veľkosť zväčšuje a je $\psi_x > 1$. To platí pre častice materiálu v rezoch blízko osi x (obr. 10).

Na čelnej ploche ubíjaného valca a v rezoch blízko tejto plochy je koeficient nerovnomernosti pretvorenia ψ_x ovplyvnený vonkajším trením na dotykovej ploche. Priebeh veličiny ψ_x je taký, že sa jej veľkosť na dotykovej ploche a vo vodorovných rezoch pod touto plochou znižuje z hodnoty $\psi_x = 1$ na vonkajšom povrchu na hodnotu $\psi_x = 0$ v strede prierezu. Ak je vonkajšie trenie na dotykovej ploche dostatočne veľké, existuje v strede tejto

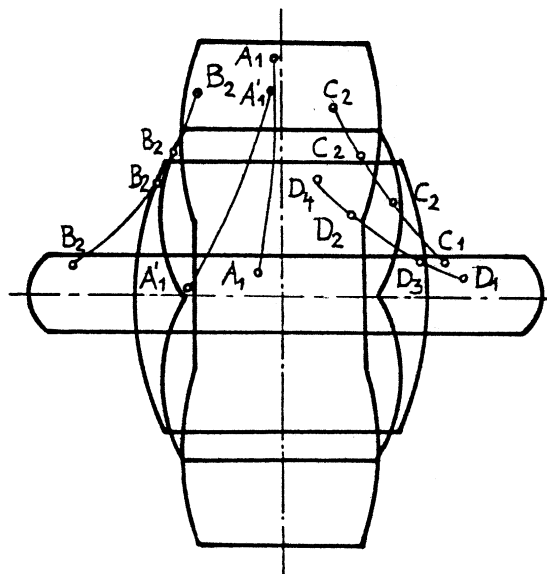
plochy pásmo priľnutia materiálu, v ktorom sa častice vo vodorovnom smeru nepohybujú. Veličina ψ_x bude rovná nule v celom rozsahu tohto pásma, ktorého povrch (obrys) určuje polomer r_p . Potom od tohto polomeru sa bude ψ_x zväčšovať až na $\psi_x = 1$ na vonkajšom povrchu valca ako je vidieť na obr. 10 (9).



Obr. 10. Stupeň nerovnomernosti pretvorenia vo vodorovných rezoch valca (9)

2.3 Analýza procesu ubíjania pri premiestňovaní častíc

Dráhy premiestnenia rôznych častíc na pozdĺžnych rezoch skúšobných telies môžeme sledovať pri ubíjaní valca so začiatočným pomerom $h_0/d_0 = 2,5$ a konečným pomerom ubíjania $h_0/d_0 = 0,2$ (obr. 11).



Obr. 11. Dráhy premiestnenia rôznych častíc na pozdĺžnych rezoch skúšobných telies (3)

Častice A_1 zo zóny I blízko čela ubíjaného valčeka zostávajú v zóne I. Body A'_1 zo zóny I umiestnené blízko zóny II sa na konci ubíjania nachádzajú v zóne II.

Častica B_2 sa na začiatku ubíjania nachádza v zóne II (na polomere $d/4$ od bočnej plochy). V druhom ($h/d = 1,4$) a treťom ($h/d = 0,8$) štádiu ubíjania zostala v tej istej zóne, no na konci ubíjania už bola v zóne I.

Častica D_4 zo zóny IV sa premiestnila do zóny II, potom do zóny III a nakoniec do zóny I.

Týmto je dokázané, že nerovnomerné pretvorenie pri ubíjaní je sprevádzané medzizonálnym premiestňovaním častíc. Kov sa premiestňuje zo zóny I do zóny II a zo zóny II do zóny III. Tieto premiestnenia charakterizujú úbytok kovu zo zóny I. Objem kovu zóny I sa v celom procese ubíjania aj tak zväčšuje, a to v dôsledku intenzívneho vzrastu priemeru zóny I.

Tento proces prechodu kovu z jednej zóny do druhej je tým intenzívnejší, čím väčšia je hodnota kontaktných síl trenia (3).

2.4 Príčiny nerovnomernosti pretvorení

Rozoznávame dve skupiny príčin nerovnomernosti pretvorení (3):

1. skupina: Prírodné,
 2. skupina: Umelé.
1. Prírodné:
 - ◆ nedokonalosť kryštálovej mriežky,
 - ◆ zvláštne roviny a smery pohybu kryštálov, v ktorých nastáva sklz,
 - ◆ anizotropia vlastností (plastickosti, pevnosti, trvanlivosti) rôznych kryštálov; rôzne priestorové uloženie, ktoré spôsobuje nerovnaké možnosti ich pretvorení,
 - ◆ kryštálová štruktúra kovov s rôznym tvarom, veľkosťou a orientáciou zrn,
 - ◆ heterogénnosť štruktúry zliatiny,
 - ◆ spevnenie (fyzické), ktoré je veľké pri zrnách, ktoré sa vyznačujú značným stupňom pretvorenia, čo zväčšuje nerovnomernosť plastickej deformácie,
 - ◆ procesy odpevnenia a rekryštalizácie pri pretvorení s vysokou teplotou nemôžu byť rovnomernými v podmienkach rôznych kryštálov,
 - ◆ nerovnomernosť liatej štruktúry kovov a zliatin,
 - ◆ existencia (prítomnosť) hraničných plôch deformujúceho sa telesa.

2. Umelé:

- ◆ kontaktné trenie spôsobené povrchovou deformáciou spôsobuje nerovnomerné rozloženie napätí a vytvorenie zón vo vnútri deformovaného objemu; anizotropia kontaktného trenia je takisto príčinou nerovnomernosti pretvorenia,
- ◆ tvar a pomer rozmerov telesa pred deformáciou,
- ◆ tvar a rozmery nástroja,
- ◆ vláknovitosť kovu (je charakteristická najväčšou zmenou mechanických vlastností pod uhlom 90° a ich násobkov),
- ◆ zväčšenie rýchlosti pretvorenia napomáha k sústredeniu stláčania do prikontaktnej oblasti a spôsobuje nerovnomernosť pretvorenia, nerovnomernosť teploty kovu, ktorá spôsobuje nerovnaké podmienky pretvorenia pre rôzne vrstvy vo výkovku.

2.5 Vplyv faktorov na súdkovitosť telesa

Medzné stlačenia pri ubíjaní nezávisia len od chemického zloženia a štruktúry kovu, no i od radu faktorov určujúcich napätovo-deformačný stav kovu v závislosti od bočnej plochy skúšobného telesa. K týmto faktorom patrí štíhlostný pomer h_0/d_0 , vlastnosti povrchu čiel a mazív výkovku (ovplyvňujúcich veľkosť kontaktných síl trenia), rýchlosť ubíjania, teplota ohrevu nástroja a skúšobného telesa, nerovnomernosť teplotného poľa v objeme výkovku, atď.

Pod vplyvom týchto faktorov proces ubíjania sprevádzajú rôzne tvarové zmeny vzorky-valčeka, charakterizované vytváraním súdka (3).

2.5.1 Vplyv štíhlostného pomeru λ na súdkovitosť (9, 18)

Pri ubíjaní sme obmedzení z hľadiska namáhania na vzper a nebezpečenstvom vybočenia tzv. štíhlostným pomerom λ . Pri voľnom ubíjaní má byť $\lambda \leq 2,5$ (1, 4, 5, 6, 7).

$$\lambda = \frac{h_0}{d_0} \quad [-], \quad [9]$$

kde h_0 - počiatočná výška polotovaru,

d_0 - počiatočný priemer polotovaru.

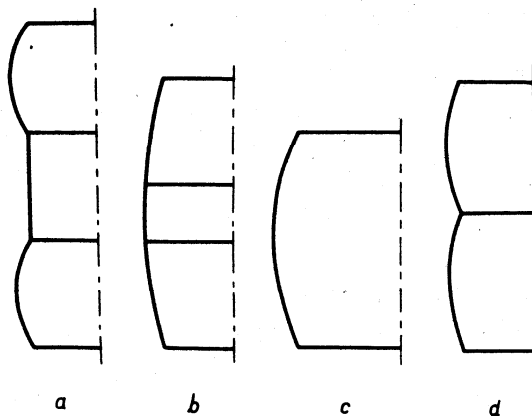
Podľa Ochrimenka sa súdkovitosť pri voľnom ubíjaní valca mení v závislosti od pomeru d/h .

Pre nízke polotovary ($d/h > 1$) stredný prierez má maximálny priemer, čiže výtvarok získava ihneď tvar súdka, pričom súčiniteľ súdkovitosti Γ sa znižuje s rastom pomeru d/h .

Súčiniteľ súdkovitosti vypočítame z priemeru čela súdka d_c a z maximálneho priemeru meraného v strede súdka d (3):

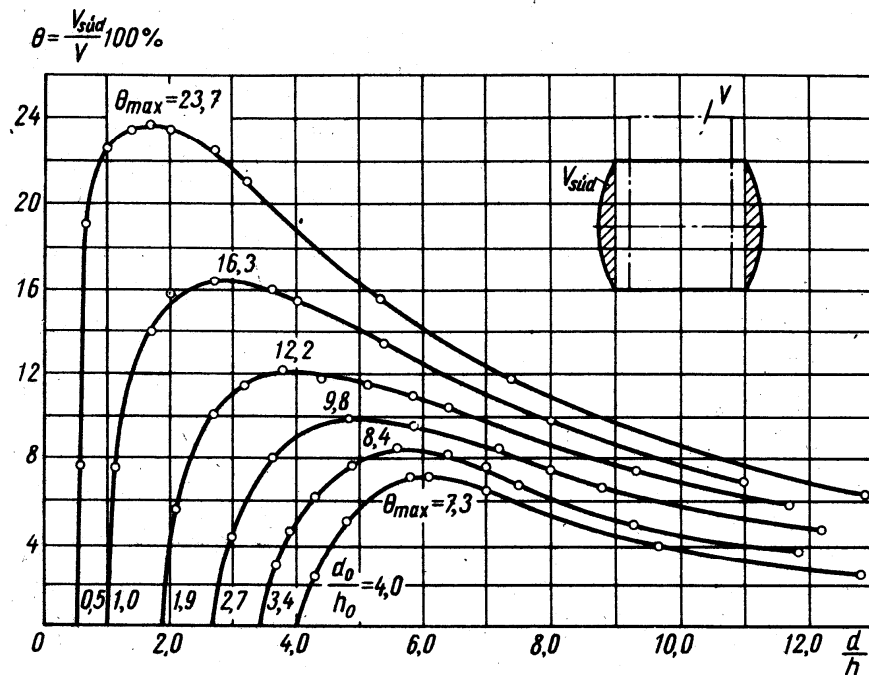
$$\Gamma = \frac{d - d_c}{d} \quad [-]. \quad [10]$$

Ako dokázal F. Riedel (19), vzorka s pomerom $d/h = 0,35$ pre malé stupne ubíjania získa tvar akoby dvoch súdkov, blízko čiel spojených valcovou časťou (obr. 12a). Pri ďalšom ubíjaní sa priemer valcovej časti zväčšuje a polotovar získa tvar valca zakončeného kolmými kužeľmi s menšou základňou na čelách (obr. 12b). Pri ešte väčšom pretvorení (rádovo 40 ÷ 50 %) priemer stredného rezu rastie najintenzívnejšie, a preto výtvarok získava tvar úplného súdka (obr. 12c). Pre väčšie pomery d/h , ale menšie ako 0,5 môžeme získať dvojité súdky (obr. 12d), ktorý pri ďalšom ubíjaní v dôsledku najväčšieho rastu priemeru stredného rezu sa mení na jednoduchý s maximálnym priemerom v strede (19).



Obr. 12. Tvary súdkov pre rôzne stupne ubíjania (19)

Súhrnné výskumy podľa J. M. Ochrimenka ukazujú, že s narastaním stupňa pretvorenia, súdkovitosť spočiatku rastie až do maxima a potom klesá. Pritom čím je väčší začiatočný pomer d/h , tým menšia je súdkovitosť a pri menšom stupni pretvorenia dosahuje svoje maximum (17, 19, 20, 21).



Obr. 13. Závislosť súdkovitosti od veľkosti deformácie vyjadrenej pomerom d/h (19)

Relatívna hodnota maximálnej súdkovitosti pre nízke vzorky ($d/h = 4$) je viac ako 3 krát menšia ako pre vysoké vzorky ($d/h = 0,5$). Rast súčiniteľa trenia v každom prípade zväčšuje súdkovitosť a mení hodnotu stupňa pretvorenia, pri ktorom sa nachádza maximum.

Táto problematika je znázornená na obr. 13, kde je na osi x nanesený pomer d/h a na osi y pomerný objem súdkovitosti $\Theta = \frac{V_{súdka}}{V} \cdot 100\%$ (17, 19).

Príčinou zmeny tvaru vonkajšieho obrysu je nehomogénnosť pretvorenia vo vnútorných zónach a častíc stláčaného výtvarku (17, 19). Súdkovitosť sa pri ubíjaní mení tiež v závislosti od pomerného výškového stlačenia a štíhlosti východiskového polotovaru (22).

Znížiť súdkovitosť, a tým aj nerovnomerné pretvorenie, sa môže dosiahnuť použitím východiskového polotovaru o najmenšom možnom štíhlostnom pomere a jeho ubítie s veľkým výškovým stlačením. Znížiť súdkovitosť môžeme aj všetkými ďalšími opatreniami, ktorými možno obmedziť veľkosť trecích síl na stykovej ploche nástroja a ubíjaného telesa (22).

2.5.2 *Vplyv súčiniteľa trenia na súdkovitosť (11, 12, 14, 15, 20, 23)*

Vonkajšie trenie (kontaktné trenie) je charakteristickou veličinou pri popise trecích procesov medzi tvárneným materiálom a tvárniacim nástrojom. V tvárniacich procesoch má vonkajšie trenie dvojakú úlohu (9, 24, 25):

1. úlohu pasívneho činiteľa, ktorý brzdí rozvoj plastickej deformácie, zvyšuje spotrebu energie potrebnej na proces pretvorenia a spôsobuje opotrebenie tvárniacich nástrojov,
2. úlohu aktívneho činiteľa, lebo bez existencie vonkajšieho trenia by nemohli prebehnúť také tvárniace procesy, ako je valcovanie, kde vonkajšie trenie podmieňuje záber tvárneného materiálu valcom.

Vonkajšie trenie pôsobí na technologické tvárniace procesy takto (9, 24, 25):

- ◆ Má vplyv na stav napätosti a pretvorenia v tvárnenom objeme, a tiež na stupeň pretvorenia v blízkosti stykových plôch.
- ◆ Pôsobí na rozloženie a veľkosť pretvárneho odporu, a tým má vplyv aj na výsledný silový účinok v tvárniacom nástroji.
- ◆ Má vplyv na spotrebu energie v uskutočnenom tvárniacom procese .
- ◆ Má priamy vplyv na opotrebenie, a tým i na životnosť nástrojov.
- ◆ Pôsobí na stav, priebeh a rovnomernosť pretvorenia, a tým i na mechanické vlastnosti tvárneného kovu.
- ◆ Má vplyv na celý priebeh tvárniaceho procesu.

Na veľkosť súčiniteľa kontaktného trenia v tvárnení kovov vplýva celý rad faktorov (19, 26, 27):

- ◆ stav povrchu činných častí nástroja,
- ◆ chemické zloženie materiálu tvárniaceho nástroja a tvárneného materiálu,
- ◆ teplota pretvorenia,
- ◆ rýchlosť pretvorenia,
- ◆ veľkosť a charakter zaťaženia.

Stav povrchu tvárniaceho nástroja je jedným zo základných faktorov, ktoré vplývajú na veľkosť súčiniteľa kontaktného plastickeho trenia. Čím je kvalita opracovania povrchu nástroja vyššia, tým bude pri ostatných rovnakých podmienkach menší súčiniteľ trenia. Vplyv opracovania je taký veľký, že veľkosť súčiniteľa trenia sa mení aj v závislosti od smeru

tečenia kovu voči smeru opracovania kontaktného povrchu tvárniaceho nástroja (anizotropia). Túto skutočnosť skúmal I. M. Pavlov (19) a nazval ju anizotropia trenia. Dokonca po brúsení nástroja aj s použitím maziva je súčiniteľ kontaktného trenia kolmo na smer brúsenia o 20 % väčší ako v smere brúsenia. Pri hrubom opracovaní a bez použitia maziva je táto anizotropia výraznejšia.

Anizotropiu trenia súčasne študovali V. P. Severdenko a A. V. Stepanenko (19) a zistili, že pri práci na hrubo opracovanom tvárniacom nástroji dosahuje anizotropia trenia až 60 %. Mazanie znižuje anizotropiu trenia, ale jeho účinok sa úmerne znižuje s drsnosťou povrchu nástroja. Anizotropia trenia sa znižuje aj s teplotou pretvorenia pre ocele v oblasti $20 \div 800$ °C.

Spôsob opracovania kontaktných plôch tvárneného telesa podľa názoru J. P. Unksova má význam na začiatku pretvorenia (19). V ďalšom rozvoji pretvorenia sa kontaktný povrch výtvarku zahladzuje a stáva sa akoby odtlačkom povrchu nástroja.

Na súčiniteľ plastického trenia má rozhodujúci vplyv aj fyzikálnochemický stav povrchu. Z prác A. K. Čertavského a K. N. Kana (19) a iných vyplýva, že pri tvárnení za studena a pri dôkladnom očistení kontaktného povrchu vzoriek od kyslíčnikov a nečistôt získava súčiniteľ plastického trenia zvýšené hodnoty až v oblasti zachytávania lepenia trecích sa kovov (zadretie).

Minimálne hodnoty súčiniteľa plastického trenia sa nachádzajú pri určitej veľmi malej hrúbke kysličníkového filmu. Zväčšovaním hrúbky kysličníkového filmu súčiniteľ trenia rastie. Citlivý je najmä kysličníkový film z krehkých kysličníkov, napríklad okoviny pri tvárnení ocele za tepla, ktoré nielen že zvyšujú trenie, ale po ich vtlačení do kovu zapríčiňujú rôzne povrchové defekty.

Priečne prierezy valcových polotovarov (za predpokladu, že sa neprejaví anizotropia trenia) si zachovávajú kruhový tvar a pozdĺžne sú súdkovité.

Stupeň a charakter súdkovitosti závisia od súčiniteľa trenia. Čím je tento väčší, tým väčšie je zabrzdzenie bodov na čelách, a tým je väčší rozdiel medzi priemermi čiel a priemermi ostatných rezov pri zachovaní ostatných podmienok.

Teplota tvárnenia má tiež veľký vplyv aj na súčiniteľa plastického trenia. Pri tvárnení za studena je súčiniteľ plastického trenia najmenší. S rastom teploty rastie a v určitom teplotnom intervale dosahuje maximum, potom znovu klesá, ale jeho hodnota zostáva väčšia ako pri tvárnení za studena.

V. P. Severdenko a J. S. Vojaček pri skúmaní súčiniteľa trenia ocele zistili, že okrem výskytu intervalu minima súčiniteľa trenia, čo je $600 \div 750$ °C v závislosti od druhu ocele, aj

dve oblasti jeho maxima: prvé maximum v teplotnom intervale $450 \div 500$ °C a druhé v intervale $900 \div 1050$ °C. Tento jav vysvetľujú v súvislosti s kvalitatívnou zmenou okovín, v ktorých vzniká nová fáza FeO a spôsobuje ďalšie intenzívne okysličovanie ocele, čím vzniká druhé maximum.

Zníženie súčiniteľa trenia v oblasti vysokých teplôt za druhým maximom vysvetľuje J. P. Unksov rastom plasticity a poklesom medze plasticity. V. P. Severdenko poukazuje aj na kladný vplyv zníženia intenzity okysličenia v oblasti teplôt $1000 \div 1100$ °C, ako aj mazivového účinku okovín pri teplotách blízkyh k 1200 °C, kedy začína ich čiastočné natavenie.

Na vplyv kontaktného tlaku na súčiniteľ trenia nie je jednotný názor. Tento problém si vyžaduje ďalšie experimentálne skúmanie so zreteľom na všetky spolupôsobiace sprievodné faktory.

Mnohé pokusy S. I. Gubkina, M. O. Vrackého, I. M. Pavlova a iných vedcov ukázali, že súčiniteľ kontaktného trenia klesá s rastom pomernej rýchlosti toku kovu po povrchu nástroja, teda aj s rastom rýchlosti tvárnenia. Konkrétne, súčiniteľ kontaktného trenia pri tvárnení na bucharoch je o $20 \div 25$ % menší ako pri tvárnení na lisoch.

Charakter zaťaženia má tiež vplyv na súčiniteľ trenia. Napríklad tvárnenie s vibráciami môžeme realizovať pri nižších tvárniacich silách (1,5 až dvojnásobné zníženie). V tomto prípade sa veľmi znižuje aj nerovnomernosť pretvorenia (menšia súdkovitosť, priaznivé vlákna makroštruktúry, rovnorodá mikroštruktúra, rovnomerné rozloženie dislokácií). Toto všetko je dôkazom značného zníženia súčiniteľa trenia.

Vieme teda, že trenie je vo väčšine prípadov záporným faktorom technológie tvárnenia. Preto musíme robiť opatrenia na zníženie jeho hodnoty. Z nich najdôležitejším je zvýšenie kvality opracovania povrchu a činných plôch nástroja a dokonalé technologické mazivá (19).

2.5.3 Vplyv rýchlosti tvárnenia a rýchlosti pretvorenia na súdkovitosť (18, 28, 29)

Pri tvárnení sa pohybuje nástroj určitou rýchlosťou, ktorá je závislá od druhu použitého tvárniaceho stroja. Zmena logaritmickej deformácie za jednotku času alebo tiež aj prvá derivácia deformácie podľa času je daná vzťahom [11]. Platí to i pre rýchlosť pomernej deformácie [12]. Všeobecne teda hovoríme o rýchlosti deformácie (pretvorenia) (11, 12, 14, 15, 30).

$$\dot{\varphi} = \frac{d\varphi}{dt} = \frac{dh}{h} \cdot \frac{1}{dt} = \frac{v_n}{h} \quad [s^{-1}], \quad [11]$$

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{dh}{h_0} \cdot \frac{1}{dt} = \frac{v_n}{h_0} \quad [s^{-1}], \quad [12]$$

kde h_0 - počiatočná výška polotovaru [m],

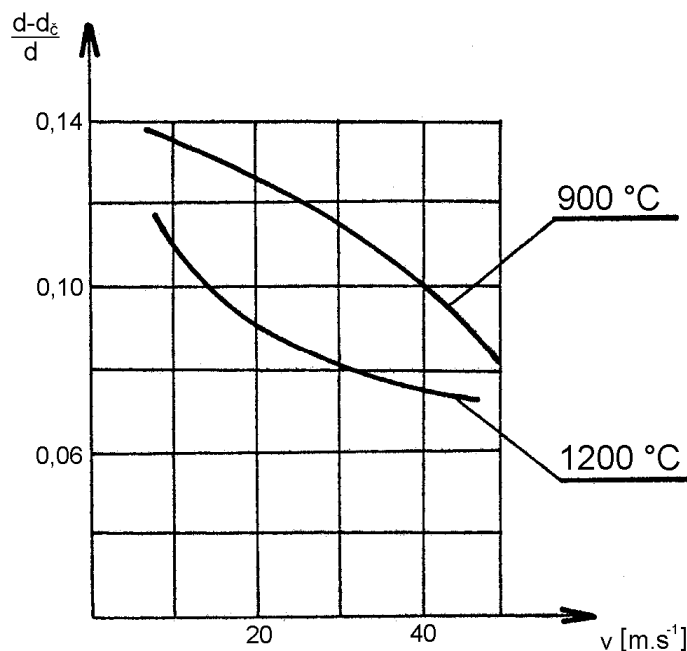
h - okamžitá výška polotovaru [m],

v_n - okamžitá rýchlosť pohybu nástroja [$m \cdot s^{-1}$].

Rýchlosť deformácie je rýchlosť, ktorou sa k sebe blížia dva prierezy tvárneného kovu vzdialené od seba o jednotku dĺžky. Preto je rýchlosť deformácie závislá nielen od rýchlosti nástroja, ale tiež od stlačovanej (ubíjanej) výšky (12, 14, 15, 30).

Od rýchlosti deformácie musíme odlišovať ako rýchlosť tvárnenia (nástroja), tak aj rýchlosť presunutia tých alebo iných bodov telesa v procese pretvorenia (19).

Kontaktné trenie klesá so zvyšovaním tvárniacej rýchlosti. Nepriame merania súdkovitosti tento predpoklad plne potvrdili (obr. 14).



Obr. 14. Závislosť súčiniteľa súdkovitosti od rýchlosti tvárnenia pri rôznych teplotách

Vplyv deformačnej rýchlosti na tváriteľnosť je pri malých rýchlostiach deformácie zanedbateľný. Vo všeobecnosti vyššia deformačná rýchlosť vedie k zníženiu tváriteľnosti a k zvýšeniu pretvárneho odporu. Avšak pri veľmi vysokých deformačných rýchlostiach môže dôjsť vplyvom tepelného účinku k zvýšeniu tváriteľnosti a k zníženiu pretvárneho odporu.

Pri kovaní, ktoré je plastickou deformáciou za tepla, môže vplyv deformačnej rýchlosti viesť k nasledujúcim prípadom (7):

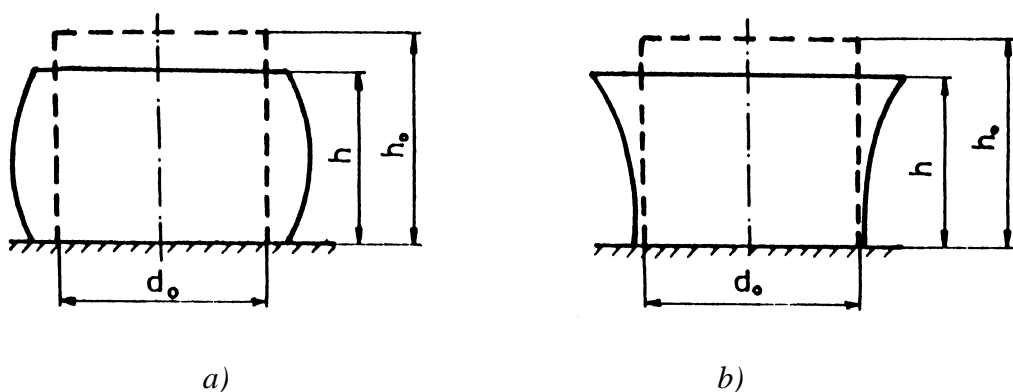
1. pri bežných deformačných rýchlostiach prebehne úplná rekryštalizácia,
2. pri zvýšených rýchlostiach deformácie nedôjde k úplnej rekryštalizácii,
3. pri veľmi vysokých deformačných rýchlostiach môže byť vplyv tepelného účinku taký výrazný, že prebehne úplná rekryštalizácia, čím kov získa normálnu tvárnosť a pretvárný odpor.

Akékoľvek zvýšenie deformačnej rýchlosti znamená (8):

1. zvýšenie hustoty mriežkových porúch, a tým i zvýšenie deformačného odporu,
2. zvýšenie potenciálnej energie tvárneného kovu, čím môže nastať i zvýšenie jeho teploty (tzv. tepelný efekt),
3. skrátenie doby deformácie, a tým obmedzenie dejov prebiehajúcich počas tvárnenia (dynamické uzdravenie a dynamická precipitácia).

Zjednodušene môžeme povedať, že pri zvyšovaní rýchlosti deformácie medza plasticity rastie a plasticita kovu klesá (19).

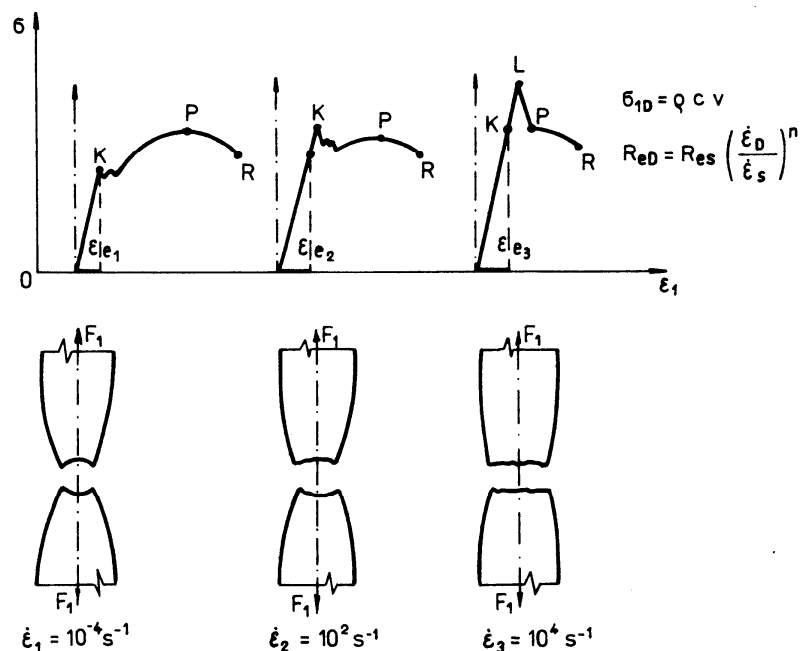
Ak rýchlosť pretvorenia (rýchlosť pomerného pretvorenia $\dot{\epsilon}$ alebo skutočného pretvorenia $\dot{\phi}$) prekročí hodnotu 10^3 s^{-1} , hovoríme o vysokorýchlostnom tvárnení. So zvyšovaním rýchlosti pretvorenia rastie deformačný odpor materiálu $\sigma_d (k_o)$ a zvyšuje sa tvárnosť. Pri vysokorýchlostnom tvárnení sa lokalizuje pretvorenie do povrchových vrstiev, ktoré sú v kontakte s pohyblivou časťou nástroja (obr. 15) (1).



Obr. 15. Rozloženie pretvorenia (1)
a) pri klasickom tvárnení, b) pri vysokorýchlostnom tvárnení

Zvyšovanie rýchlosti pretvorenia značne ovplyvňuje vlastnosti materiálu. S rastom rýchlosti pretvorenia vzrastá hodnota napätia na medzi sklzu, medzi pevnosti a mení sa tvar

diagramu ťahovej skúšky (obr. 16). Pri tvárnení so zvýšenými a vysokými rýchlosťami pretvorenia materiály strácajú pri kritických rýchlostiach plasticitu a stávajú sa krehkými (1, 10, 31).



Obr. 16. Vplyv pomernej rýchlosti pretvorenia na plasticitu nízkouhlíkovej ocele (0,1 % C) pri teplote 20 °C (10)
 σ_{1D} – nestabilná dynamická medza sklzu, R_{eD} – stabilná dynamická medza sklzu

2.5.4 Vplyv teploty tvárnenia na súdkovitost' (19)

Tepelný režim utvára teplotné pole, ktoré tvoria:

- ◆ čas a výška východiskového ohrevu,
- ◆ stupeň vychladnutia počas manipulácie pred kovaním,
- ◆ veľkosť teplotných prírastkov a strát v procese kovania.

Pri kovaní na mechanických lisoch teplota kovu klesá v dôsledku kontaktu tvárneného materiálu s nástrojom (čas kontaktu $10^1 \div 10^{-1}$ s) a okolím, kedy dochádza k odvodu tepla do nich.

Rýchlosť a čas ohrevu pred pretvorením zapríčiňuje viaceré nepriaznivé sprievodné javy:

1. opal,

2. oduhličenie a nerovnomerný ohrev, čo má za následok:

- ◆ vznik vlastných napätí,
- ◆ nehomogénne pretvorenie,
- ◆ rast pretvárných odporov,
- ◆ zníženie presnosti výkovkov.

Napríklad pri nerovnomernosti ohrevu jadro-povrch s rozdielom $200 \div 300$ °C vzniknú nepresnosti rozmerov výtvarku v rozsahu $8 \div 12$ %.

Pri určovaní rýchlosti ohrevu je nutné ohrievaný polotovár prehriať pokiaľ možno rovnomerne po celom priereze, aby rozdiel teplôt medzi povrchovou vrstvou a stredom polotovaru bol čo najmenší.

3 MODELOVANIE A SIMULÁCIA V TVÁRNENÍ

Súčasná doba je charakterizovaná rozvojom technológií. V posledných rokoch ide hlavne o „počítačové technológie“ a „informačné technológie“. Výpočtová technika zasahuje výrazne do všetkých oblastí nášho života. Presadila sa aj v strojárskvej výrobe.

Špičkové firmy začali investovať do výkonnej výpočtovej techniky a softvérov, ktoré postupne nahrádzajú rutinnú prácu konštruktérov, „výpočtárov“, technológov a programátorov číslicovo riadených strojov. Aby sme z výkonných počítačov dostali výsledky požadované a využiteľné pri návrhu technologického procesu, musia byť vybavené vhodným softvérom, ktorý má definovaný vplyv faktorov zúčastňujúcich sa procesu na jeho výsledok (32).

3.1 Počítačová podpora v strojárstve (33)

Veľký význam majú a samostatnú oblasť implementácie informačných technológií v strojárskom priemysle predstavujú počítačom podporované systémy – CA systémy. Tento pojem sa často skloňuje v odbornej i populárnej literatúre. Popularita a pozornosť, ktorá je venovaná CA systémom, je daná predovšetkým ekonomickými prínosmi po zavedení takýchto systémov do praxe. Je možné sa stretnúť s veľkým počtom rôznych CA systémov, s rôznym stupňom komplexnosti, v rôznych cenových reláciách, od zahraničných, ale takisto aj našich vývojových pracovníkov.

Počítačom podporovaný systém je nástroj, ktorý výrazne môže zvýšiť konkurencieschopnosť podniku, ale pred jeho zavedením je potrebné uskutočniť celý rad analýz a rozhodnúť sa pre taký systém, ktorý je určený na konkrétne podmienky v podniku.

CA systémy sú počítačové systémy určené na podporu činností vo všetkých etapách výroby – od vývoja a navrhovania súčiastky, plánovania výroby, až po samotnú výrobu a montáž, skladovanie a expedíciu. Používajú sa v rôznych odvetviach priemyslu a na rôznych stupňoch riadenia. Umožňujú urýchliť a zjednodušiť predovšetkým tzv. inžinierske činnosti, ako sú kreslenie a modelovanie, dimenzovanie, uskutočňovanie analýz, projektovanie, ale aj rôzne administratívne činnosti, ako sú archivovanie, vyhľadávanie, reprodukovanie a iné (34).

Realizáciu súčiastky, ktorá sa chápe ako súhrn všetkých prípravných a realizačných prác zúčastňujúcich sa na zhotovení výrobku do konečnej podoby danej technickou dokumentáciou, je možné rozdeliť do dvoch etáp:

- ◆ etapa vývojovo–návrhová a plánovacia,
- ◆ etapa technologicko–realizačná.

V návrhovej a plánovacej etape sa po modelovacích, simulačných a analyzačných činnostiach vyhotovuje kompletná konštrukčná a technologická dokumentácie, respektíve sú generované CAD a CAPP dáta. Pri počítačovej podpore sa tieto systémy alebo táto etapa realizácie súčiastky nazýva ako počítačová podpora inžinierskych prác – CAE. Pre druhú etapu sú charakteristické rôzne automatizované systémy (výroba, montáž, doprava, skladovanie) s počítačovou podporou. Táto etapa sa nazýva počítačová podpora výrobného inžinierstva a označuje sa CAPE.

Vo všeobecnosti sa počítačom podporované systémy označujú ako CAx, CAi alebo CA. Ide o programové systémy, respektíve softvér, ktorý je aplikačne využitý v konkrétnej oblasti podniku. Skratka CA (Computer Aided) naznačuje, že činnosť, metóda, technika alebo systém je počítačom podporovaný (34).

Najznámejšie používané skratky v CA systémoch (32, 34)

CAI (computer aided information) – automatizovaný informačný systém: pracuje s vedecko-technickými a ekonomickými informáciami, s archívom výkresovej dokumentácie a s poznatkami z vyrobených a odskúšaných strojov, zariadení, overených postupov a ostatnými najnovšími informáciami použiteľnými vo výrobnom procese.

CAD (computer aided design) – automatizácia konštruovania a projektovania pomocou počítača (vypracovanie výkresovej dokumentácie). Ide o softvér pre geometrické a matematické modelovanie súčiastok a ich vlastností. Okrem grafických činností CAD systémy umožňujú realizovať aj rôzne inžinierske výpočty a analýzy. Najznámejšia z nich je metóda konečných prvkov (FEM). Medzi CAD systémy patrí napr.: AutoCAD, Pro/Engineer, CATIA a iné.

CAE (computer aided engineering) – simulačné počítačové metódy, ktoré umožňujú na obrazovke modelovať činnosť výrobného systému – počítačové inžinierstvo.

CAPP (computer aided process planning) – reprezentuje počítačovú podporu pri návrhu a tvorbe technologickej dokumentácie. CAPP systémy tvoria dôležité prepojenie medzi CAD a CAM systémami - t.j. medzi konštrukčným návrhom a samotnou výrobou.

CAM (computer aided manufacturing) – automatizovaný systém riadenia technologických procesov. Tieto systémy zahŕňujú počítačovú simuláciu procesov, počítačové číslicové

riadenie (CNC) výrobnéj techniky, robotov, medzioperačnej dopravy výrobkov, polotovarov, náradia a pod. Patrí sem počítačové operatívne riadenie výroby na dielenskej úrovni, číslicovo riadené výrobné systémy, automatizované dopravníky, automatizované sklady a pod.

CAD/CAM (computer aided design / computer aided manufacturing) – je počítačom podporovaný systém s integrovanou podporou návrhu a súčasne aj výroby súčiastky. Tieto systémy integrujú modelovanie súčiastky a jeho konštrukčný návrh, návrh technologickej dokumentácie vo forme NC programov a operatívne riadenie výroby do jedného počítačového systému.

CAQ (computer aided quality) – predstavuje počítačom podporovanú kvalitu, pričom CAQ lepšie vystihuje pojem počítačom riadená kvalita. Ide o zabezpečenie kontroly výrobku a riadenie kvality výrobku. Okrem sledovania parametrov vyrábaných súčiastok slúži aj na sledovanie parametrov výrobných strojov, zariadení a nástrojov.

CAT (computer aided testing) – automatizovaný merací systém, slúži na meranie a skúšanie vyrobených výrobkov. Je dôležitou etapou pre spätnú väzbu celého systému.

PPS (production planning system) – tieto systémy majú za úlohu plánovanie a riadenie výroby tak, aby bola výroba optimálna z kapacitného, ekonomického a časového hľadiska.

CIM (computer integrated manufacturing) – predstavuje komplex navzájom integrovaných CA systémov, ktoré sa zúčastňujú pri realizácii súčiastky. Ako základ pre širšiu integráciu CA systémov v podniku sa uvažujú predovšetkým: CAD, CAD/CAM, CAM, CAPP, CAQ a PPS systémy.

3.2 Modelovanie a simulácia technologických procesov (11, 23)

Modelovanie je experimentálny informačný proces, pri ktorom sa skúmanému systému (originálu, objektu) jednoznačne priraduje podľa určitých kritérií iný systém, fyzický alebo abstraktný, nazývaný model. Modelovanie dynamických systémov s priamym alebo nepriamym spätným pôsobením na skúmaný objekt sa nazýva simuláciou.

Zavedením pojmu simulácia sa vymedzili zo značne širokej množiny rôznych modelov modely, ktoré majú význam v rozvoji vedeckého poznania. Patria sem modely dynamických systémov a procesov, spolu s modelmi medzných ustálených stavov, v ktorých sa nachádza skúmaný systém. Nezáleží na tom či sa model realizuje na počítači alebo s využitím iných technických prostriedkov. Z definície vyplýva, že pojem simulácie možno vždy nahradiť všeobecnejším pojmom modelovanie, naopak však nikdy. Pre simuláciu je podstatný prenos poznatkov získaných na simulačnom modeli späť na skúmaný objekt. Treba pripomenúť, že

často sa chybne zamieňa pojem simulácie a pojem výpočet. Výpočet predstavuje iba mechanický sled výpočtových operácií bez toho, aby vyjadroval vzťah k riešenému procesu (35).

Modelovanie, resp. simulácia technologického procesu dovoľuje uskutočňovať experimenty mimo reálneho objektu, bez skutočných zásahov do prevádzky. Umožňuje tiež získať predstavu o fungovaní celého systému ešte skôr, ako je vyrobený nástroj (bez skutočnej existencie procesu).

Matematický popis technologického procesu, ktorého výsledok je jednoznačnou závislosťou od faktorov vstupujúcich do procesu, definujeme ako „matematický model procesu“.

V prípade, že výsledok procesu nevieme vyjadriť matematickou závislosťou od faktorov vstupujúcich do procesu, hovoríme o simulácii. Malindžák (1991) definuje simuláciu ako výskumnú metódu, ktorej podstata spočíva v tom, že skúmaný dynamický systém nahradíme jeho simulačným modelom a s ním realizujeme pokusy s cieľom získať informácie o pôvodnom skúmanom systéme.

Matematické modelovanie a simulácia technologického procesu pomocou výpočtovej techniky umožňuje optimalizovať proces výroby bez existencie skutočného výrobného zariadenia, resp. modelu. Jeho nevyhnutnou podmienkou je popísanie technologického procesu matematickým modelom, ktorý zahŕňa vplyvy všetkých faktorov. Zostaviť takéto modely je náročné a pri zložitých technologických procesoch pozostávajúcich z veľkého množstva operácií na väčšom počte výrobných strojov často nemožné. Pritom sa nevyžadujú ani také rozsiahle vedomosti z matematiky ako skôr dokonalé pochopenie skúmaného javu. V týchto prípadoch sa využíva simulačný prístup.

Model má dostatočne verne opisovať kvantitatívne i kvalitatívne vlastnosti skúmaného javu, t.j. má zodpovedať predpokladanému procesu. Skutočnosť, teda či matematický model zodpovedá realite, sa overuje porovnaním výsledkov získaných meraním v jeho priebehu s hodnotami predikovanými modelom pri rovnakých podmienkach (32).

Matematické modelovanie je v súčasnosti rozšírená a progresívna metóda, ktorou dokážeme simulovať matematický model jednotlivých fyzikálnych predmetov vrátane ich technických vlastností alebo sústav telies s ich nutnou vzájomnou geometrickou nadväznosťou (36).

Pri skúmaní technologických postupov ide v podstate o získanie nových poznatkov o jeho štruktúre, vplyve jednotlivých faktorov na výsledok a ich správaní sa pri zmenených

podmienkach. Vo všeobecnosti možno informácie o určitom reálnom objekte získať tromi spôsobmi (32):

1. **využitie experimentu na reálnom objekte** – je nákladné a málo efektívne. Tieto pokusy vo väčšine prípadov nie je možné uskutočňovať z nasledujúcich dôvodov:
 - ◆ sú nákladné a potrebujú dlhý čas,
 - ◆ nie je možné skúmať väčší počet variantov,
 - ◆ nie vždy je možné meniť všetky dôležité premenné,
 - ◆ experimentmi možno spôsobiť poruchy v zariadení,
 - ◆ experimenty nedovoľujú podmienky záručného a pozáručného servisu,
 - ◆ skutočný objekt skúmania mnohokrát ešte neexistuje (je v štádiu projektovania alebo výroby).
2. **vytvorenie matematického modelu** a jeho riešením analytickými a numerickými metódami – tento spôsob našiel uplatnenie v technickej praxi vtedy, keď bolo možné na riešenie matematických modelov využiť výpočtovú techniku.

Matematický model je zobrazenie (niekedy zjednodušené, resp. nezohľadňujúce náhodne javy) skúmanej skutočnosti (originálu), ktoré je vyjadrené matematickými vyjadrovacími prostriedkami. Takýto model je nezávislý od materiálnej podoby. Ak do matematického modelu je včlenený čas (explicitne alebo implicitne, napr. prostredníctvom údajov nameraných v rôznych časových okamihoch) nazýva sa takýto model dynamický. V opačnom prípade hovoríme o statickom modeli.

3. **získanie poznatkov o procesoch pomocou fyzikálnych modelov** – tento spôsob ustupuje v ostatných rokoch do pozadia práve pre veľké rozšírenie personálnej výpočtovej techniky, ktorá umožňuje riešiť jednoduchšie matematické modely postupov, ale aj rýchlym rozšírením tzv. “super počítačov“ schopných riešiť zložité matematické modely rôznymi analytickými a numerickými metódami.

Rozdelenie modelov podľa niekoľkých základných hľadísk (35)

1. podľa charakteru procesu na modely:
 - a) deterministické – deterministické modely sa vyznačujú jednoznačne určenými príčinami a ich následkami,
 - b) stochastické – pri stochastických modeloch buď sám skúmaný problém, alebo metóda riešenia majú náhodný charakter.
2. podľa podobnosti modelu - vyjadruje podobnosť medzi originálom a modelom:

- a) fyzikálne modely,
 - b) fyzikálno-matematické modely,
 - c) matematické modely.
3. podľa spôsobu spracovania modelovej informácie:
- a) analógové modely,
 - b) číslicové modely,
 - c) hybridné modely.
4. podľa účelu modelu – vyjadruje funkciu modulu ako prostriedku na získavanie poznatkov alebo na ich využívanie na riadenie procesov:
- a) poznávacie modely,
 - b) riadiace modely.
5. podľa riadenia modelového procesu – vyjadruje, či proces na modeli je z hľadiska vonkajšieho pôsobenia pasívny alebo sa aktívne mení podľa podmienok riadenia:
- a) neriadené modely,
 - b) riadené modely.

3.2.1 Simulačné modely (32, 37)

Simulačný model (simulátor) pracuje na princípe napodobňovania aktuálnej predstavy o systéme a jeho pohybe a prebieha na umelom objekte vytvorenom alebo prispôbenom k tomuto účelu „Hušek (1987)“.

Návrh simulačného modelu môže, ale nemusí vychádzať z matematického popisu (modelu) aktuálnej predstavy o predpokladanom systéme a jeho pohybe. Za simulačný považujeme iba taký model, ktorý pri napodobňovaní pohybu simulovaného systému zachováva rovnaké usporiadanie foriem v čase. Do tejto triedy zahrnujeme aj iné modely než schémy na počítačoch, s výnimkou variantov založených na geometrickej podobnosti.

Podstata tejto metódy spočíva v tom, že skúmaný dynamický systém nahradíme jeho simulátorom a s ním realizujeme experimenty s cieľom získať informácie o pôvodnom systéme.

Simulátor – simulačný model, je pojem širší než matematický model. Simulačný model sa môže vytvárať voľnejšie, často bez ohľadu na všetky vzťahy, ktoré sa musia brať do úvahy pri analytickom riešení.

Proces simulácie pozostáva z nasledovných fáz (32):

- ◆ vymedzenie objektu poznania (vydelením skúmaného predmetu z ostatného sveta, resp. stanovením požiadaviek na projekt a určením použiteľných čiastkových objektov),
- ◆ vymedzenie simulovaného systému na objekte poznávania (voľbou hľadiska a rozlišovacej úrovne, z ktorých na komplex pozeráme),
- ◆ vytvorenie aktuálnej predstavy o simulovanom systéme a jeho pohybe,
- ◆ vytvorenie simulačného modelu,
- ◆ overenie správnosti simulačného modelu,
- ◆ overenie pravdivosti simulačného modelu,
- ◆ ďalšie použitie overeného simulačného modelu v procese poznania namiesto simulovaného systému.

Základným princípom simulácie systémov je (32):

- ◆ nahradenie pôvodného reálneho systému (snímaného) iným – tzv. simulátorom (simulačným modelom),
- ◆ uskutočnenie pokusov na simulačnom modeli za účelom získania informácií o pôvodnom systéme,
- ◆ spätná aplikácia poznatkov zo simulačného modelu na pôvodný systém, na realizáciu slúži v prevažnej miere počítač,
- ◆ výsledky, resp. hľadané hodnoty sa definujú ako stredné ukazovatele, rozptyly alebo iné,
- ◆ pravdepodobnostná charakteristika veličín získaných z veľkého počtu realizácií simulovaného systému.

Výsledky získané simuláciou majú pravdepodobnostný charakter, môžu slúžiť na štatistický odhad hľadaných číselných charakteristík. Simulácia je teda približnou metódou.

3.3 Programy na simuláciu procesov kovania

Programy na simuláciu využívajú matematicko-analytické metódy aplikované na tuhoplastické a elastoplastické telesá. Na simuláciu procesov tvárnenia, najmä objemového tvárnenia boli vyvinuté programy ako Forge 2 (38), Forge 3 (38), Antares, Vulkanus,

MSC.SuperForge (39), MSC.SuperForm (40), QForm2D (41), QForm3D (42), Form 2D (43, 44), FormFEM (43), LS DYNA 3D (44), Simufact.forming (45, 46), DEFORM (47), NagForge (48) a iné, ktoré využívajú metódu konečných prvkov. Po zadaní vstupných údajov o materiáli, technologických parametroch, polotovare a konečnom tvare výtvarku nasleduje simulácia, z ktorej je možné získať prehľad o tečení kovu, rýchlosti a veľkosti pretvorení, rozložení teploty, priebehu tvárniacej sily, práci a energie potrebnej na pretvorenie a iné. Veľmi dôležité je predpovedanie vzniku chýb, ako sú preložky, vťahnutiny a nevyplnené miesta. Zmenou geometrie nástroja alebo technologických parametrov je možné tieto chyby eliminovať už v prípravnej etape výroby (49).

Simulácia tvárnenia umožňuje sledovať:

- ◆ celý priebeh plastického toku materiálu,
- ◆ deformačnú sieť v tvárnenom materiáli,
- ◆ priebehy síl a iných veličín,
- ◆ vektorové i farebné zobrazenie rýchlostí toku materiálu,
- ◆ veľkosti a rýchlosti pretvorení,
- ◆ teplotné polia,
- ◆ napäťové pomery v tvárnenom materiáli,
- ◆ kontaktné tlaky na stykovej ploche nástroja,
- ◆ napäťové pomery v materiáli nástroja,
- ◆ odpruženie nástroja pri zaťažení,
- ◆ tepelné deformácie výkoviek po vychladnutí,
- ◆ zmenu hrúbky plechu pri plošnom tvárnení.

Vo všeobecnosti môžeme povedať, že počítačová simulácia má tieto výhody:

- ◆ odhalenie príčin chýb na výliskoch,
- ◆ získanie dôležitých informácií o procesoch,
- ◆ optimalizácia technologického postupu,
- ◆ redukovanie nákladných experimentov,
- ◆ skrátenie prípravy výroby.

Metóda konečných prvkov (MKP - FEM) (11, 12, 14, 15, 23, 33, 50, 51)

S rozvojom výpočtovej techniky získala metóda konečných prvkov (MKP, finite element method – FEM) svoje pevné miesto pri matematickom modelovaní. Ručné riešenie veľkého počtu diferenciálnych rovníc nebolo prakticky realizovateľné. Metóda konečných prvkov je

ideálna na využitie súčasnej výpočtovej techniky, ktorá nie je schopná pracovať s kontinuum, ale vynikajúcim spôsobom (rýchlosť, presnosť) zvládne konečnú množinu čísel. Nástup počítačov umožnil výpočty zrýchliť a zautomatizovať.

Pomocou počítača môžeme modelovať aj jednotlivé fyzikálno-chemické pochody a ich vzájomné ovplyvňovanie. V dnešnej dobe existujú technické prostriedky na výpočet a následné modelovanie metódou konečných prvkov a ich vizualizáciu (36).

Ak chceme, aby riešenie úloh kontinua sa priblížilo ku skutočnému riešeniu, je potrebné použiť rôzne metódy diskretizácie kontinua. Riešenie môže byť získané rozdelením kontinua na malé časti, nazývané prvkami. Postup rozdelenia telesa alebo štruktúry na konečné prvky sa nazýva diskretizácia. Jeden zo spôsobov ako diskretizovať teleso alebo štruktúru je rozdeliť ho na ekvivalentný systém menších jednotiek. Súhrn týchto jednotiek potom reprezentuje pôvodné teleso. Uvažované prvky sú prepojené v miestach styku – uzlových bodoch. Riešenia sú formulované pre každú základnú jednotku a kombináciu, aby sa získalo riešenie pre pôvodné teleso alebo štruktúru. Tento prístup je známy ako prechod od časti k celku. Hoci táto analýza je jednoduchá, množstvo údajov, s ktorými sa tu narába, je závislé od počtu menších prvkov, do ktorých je pôvodné teleso rozdelené. Ak je teleso rozdelené na veľký počet prvkov, ich výpočet je náročný na čas a vyžaduje výkonnejší počítač. Ak je teleso vhodne rozdelené a sú zohľadnené aj všetky podmienky rovnováhy a kompatibility, potom by sa malo získať riešenie, blízke k presnému riešeniu a ďalšie zjemňovanie siete už nevedie k spresneniu výsledku (52).

4 SIMULAČNÉ PROGRAMY NA SIMULÁCIU PROCESU UBÍJANIA

V nasledujúcich kapitolách budú popísané simulačné programy Antares a MSC.SuperForge, na ktorých boli vykonané počítačové simulácie procesu ubíjania. Bude uvedený aj postup (ukážka) zadávania vstupných údajov, nastavenie parametrov simulácie potrebných na vykonanie konkrétnej počítačovej simulácie procesu ubíjania.

4.1 Simulácia na simulačnom programe Antares (49, 53, 54)

Antares je obsiahly programový systém, ktorý umožňuje modelovať a analyzovať 2D a 3D deformačné procesy. Na dosiahnutie vyššej kvality riešení úloh v 2D aj v 3D program využíva metódu konečných prvkov. Antares umožňuje vytvárať 2D geometriu vo vnútri programu alebo vniesť 3D modely, ktoré boli vytvorené v MeshCAST alebo s inými druhmi CAE programov. Poskytuje výkonné nástroje a výpočtové schopnosti, ktoré pomáhajú napredovať veľmi rýchlo a efektívne od počiatočného formulovania úlohy až k vysokokvalitnému riešeniu.

Postup spracovania od zadania vstupnej úlohy až po generovanie výsledkov je priamočiary. V rámci všeobecného postupu ponúka rôzne nástroje a metódy, ktoré pomáhajú zdokonaľiť model a vytvoriť vysoko kvalitnú analýzu a riešenie. Antares môže simulovať nasledujúce procesy, ako sú: predvalcovanie, radiálne kovanie, ťahanie, pretláčanie, združené pretláčanie, ubíjanie, kovanie v uzatvorenej zápustke, valcovanie profilov, radiálne valcovanie, prstencové valcovanie.

Program Antares má tieto znaky:

- ◆ 2D a 3D simulácia procesov tvárnenia za tepla a za studena metódou analýzy konečných prvkov,
- ◆ simulácia fyzikálnych procesov medzi nástrojom a polotovarom, materiálový tok, nárast napätia, tepelné zmeny, kontaktné efekty v zápustke,
- ◆ plné alebo porézne materiály,
- ◆ stabilné viskoplastické a elastoplastické analýzy,
- ◆ zabudovaná rozsiahla materiálová databáza a tabuľky spracovania materiálov,
- ◆ vhodné grafické užívateľské rozhranie zadávania úloh a prezentácií výsledkov,
- ◆ vstup geometrie vo formáte IGES, STL alebo PARASOLID, vstup siete metódy konečných prvkov z PATRAN-u, I-DEAS-u alebo iných CAE programov,

- ◆ výkonné možnosti automatického vytvárania siete pre metódu konečných prvkov s možnosťou presieťovania,
- ◆ automatické simulácie viacetapového tvárnenia zhrnujúce časový prenos dát a zadávanie okrajových podmienok,
- ◆ automatické vyhodnotenie úplného kontaktu nástroja, trecích efektov, zotavenia, chladnutia nástroja a tepelných strát do atmosféry,
- ◆ automatické výpočty pohybu nástroja v hydraulickom, mechanickom a vretenovom lise, ako aj pre valcovanie i pre prstencové valcovanie na valcovacej stolici,
- ◆ podpora pohybov aj veľmi komplikovaných delených nástrojov,
- ◆ stanovenie teplotných a deformačných kompenzácií geometrie nástroja získaním sieťového zobrazenia súčiastky,
- ◆ sledovanie dráhy častíc v materiáli pre zlepšenie tvaru predlisku,
- ◆ generovanie dát tváriteľnosti materiálu na stanovenie optimálnej rýchlosti šmýkadla a počiatočných teplôt lisovacieho nástroja a vstupného polotovaru,
- ◆ animované zobrazenie materiálového toku, vyhodnocovanie vývoja napätosti, teploty, atď.,

Pracovné kroky, ktoré sa použijú pri práci s programom budú závisieť od povahy projektu, budúceho využitia výsledkov, od typu a kvality modelu, ktorý bude použitý ako počiatočný vstup. Hlavná pracovná náplň pozostáva z niekoľkých hlavných krokov. Pracovný postup obsahuje tieto hlavné kroky:

Krok 1 – Definovanie atribútov a vlastností

Antares umožňuje definovať: zariadenie, materiály, mazivá, geometrie, okrajové podmienky a počiatočné podmienky. Táto definícia procesu zahrnuje pomenovanie a špecifikáciu atribútov alebo vlastností pre každú zložku úlohy.

Krok 2 – Priradenie atribútov a vlastností ku geometrickým objektom

Tento krok kompletizuje definovanie úlohy s vytvorením prepojenia medzi atribútmi a objektmi v úlohe. Napr. materiály definované v prvom kroku sú priradené k nástroju a polotovaru.

Krok 3 – Nastavenie parametrov simulácie

Antares dovoľuje ovládať simuláciu prostredníctvom rozsiahleho zoznamu spúšťacích parametrov. Tieto parametre je možné nastaviť ručne alebo akceptovať nastavené hodnoty.

Krok 4 – Simulácia deformačného procesu

V tomto kroku program rieši definované úlohy a generuje riešené údaje.

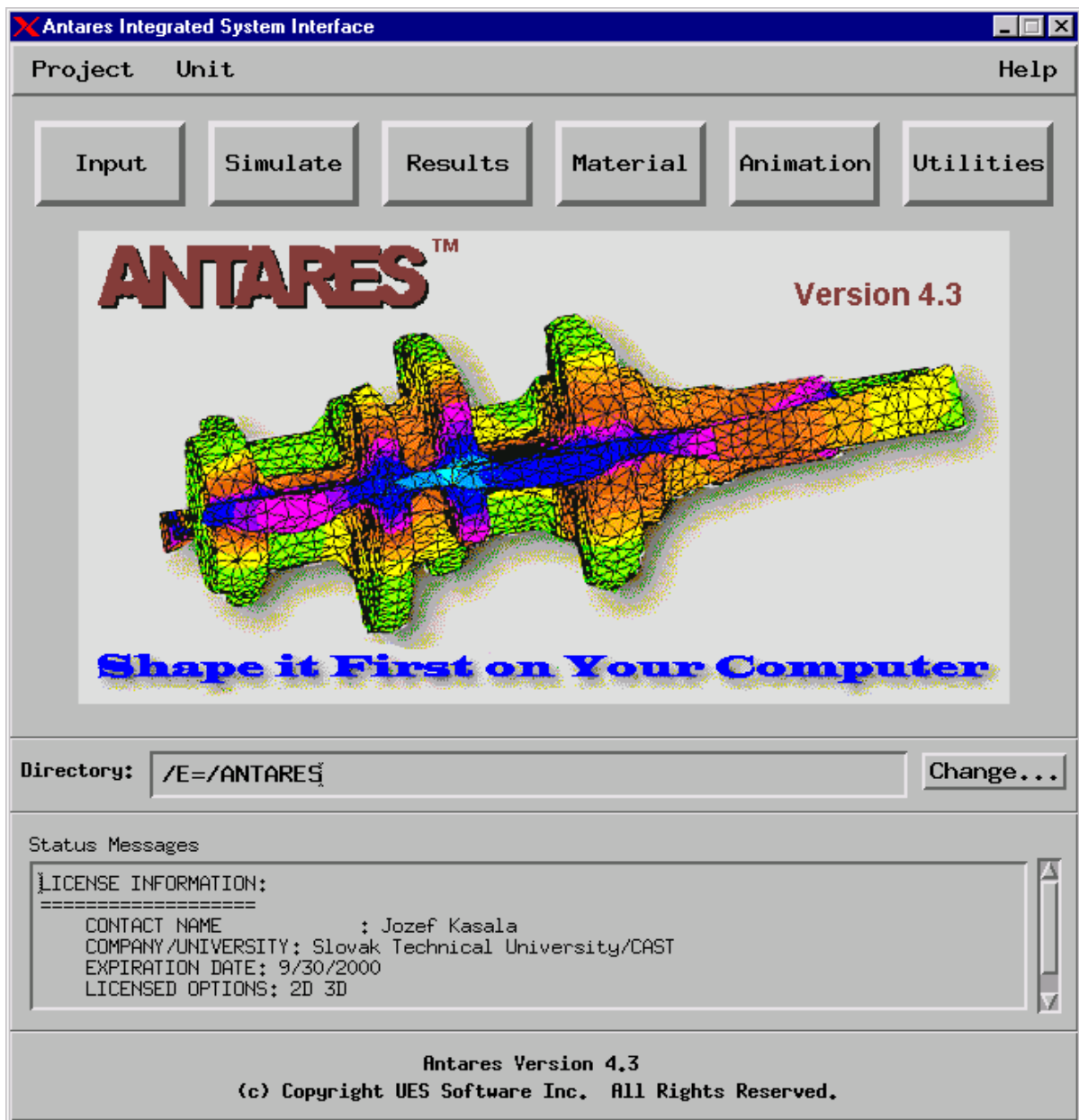
Krok 5 – Prehľad výsledkov

Antares obsahuje nástroje, ktoré umožňujú zobrazit' výsledky simulácie. Výsledky simulácie môžu byť zobrazené ako deformačné siete, priebehové krivky alebo zobrazenia trajektórií bodov. Je možné generovať animovanú prezentáciu procesu deformácie založenú na výsledkoch simulácie.

Návrh výkovku, spracovania a vývoj je výsledkom opakovacieho procesu. Antares poskytuje podporu v tomto procese tým, že umožňuje inžinierovi meniť alebo zlepšovať pôvodný návrh a vyhodnotiť dopad týchto zmien pred začatím vývoja drahého prototypu a výrobou nástroja.

4.1.1 Zadávanie vstupných údajov

Zadávanie vstupných údajov možno rozdeliť na niekoľko základných krokov, ktoré obsahujú údaje o geometrii objektov, tvárniacom stroji, o materiáli, mazive, okrajových podmienkach, počiatočných podmienkach, o priradení charakteristických znakov a vlastností geometrickým objektom o parametroch simulácie.



Obr. 17. Úvodné okno programu Antares

Po spustení programu Antares sa zobrazí úvodné okno (obr. 17), v ktorom je potrebné zadať názov projektu a zvoliť si sústavu jednotiek, v ktorej sa budú zadávať vstupné údaje. V tomto prípade to je sústava SI.

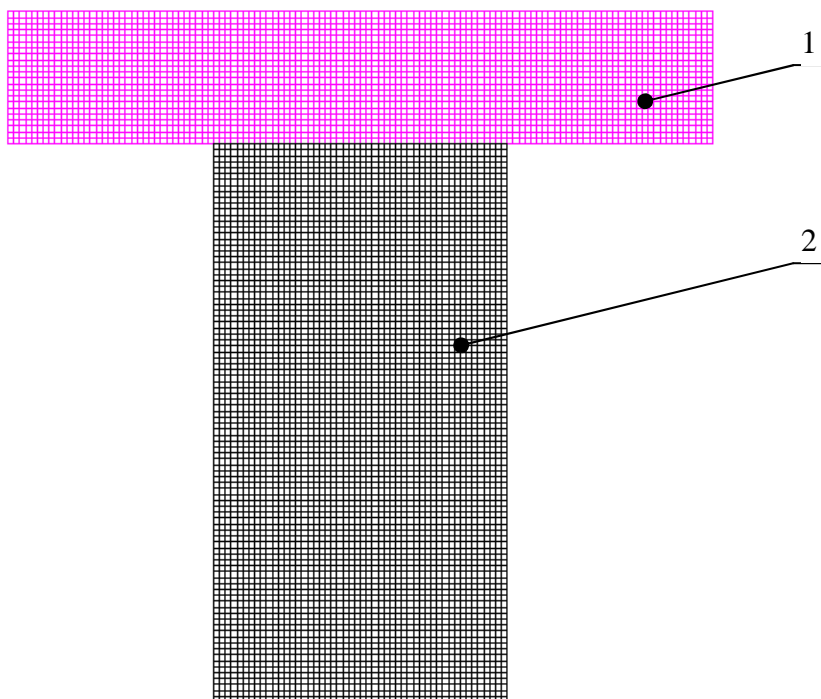
4.1.1.1 Geometria objektov

V tomto kroku sa zadá geometria nástroja a polotovaru. 2D a jednoduché 3D objekty je možné vytvoriť priamo v programe. Trojrozmerné objekty zložitejšieho tvaru je potrebné nakresliť v programoch typu CAE a následne objekty importovať.

Postup pri vytváraní 2D geometrie je nasledovný:

1. Pomenovanie objektov. Pre jednoznačné definovanie je potrebné jednotlivé objekty pomenovať, napr. polotovar, nástroj.
2. Definovanie veľkosti pracovného priestoru. Veľkosť pracovného priestoru závisí hlavne od rozmerov objektu. Definuje sa zadaním počiatočného a koncového bodu X-ovej a Y-ovej súradnice.
3. Kreslenie objektov zadávaním súradníc X a Y v jednotlivých uzlových bodoch.

Geometriu polotovaru (valčeka) a nástroja na ubíjanie valčeka, ktorým sú rovné ubíjacie dosky, znázorňuje obr. 18.



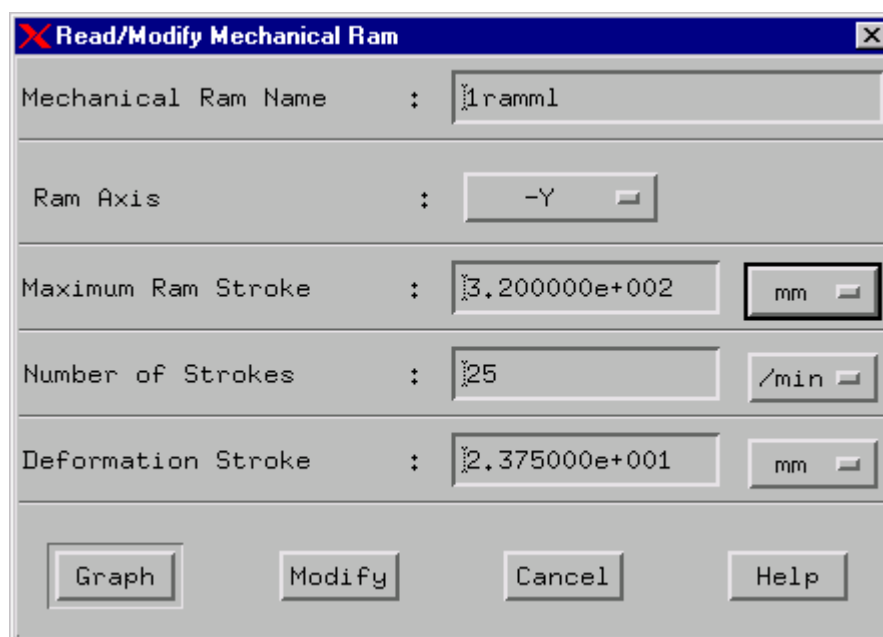
Obr. 18. Geometria objektov na ubíjanie rovnými ubíjacími doskami
1 – nástroj (rovné ubíjacie dosky), 2 – polotovar na ubíjanie (valček)

4.1.1.2 Tvárnici stroj

V tomto kroku je potrebné definovať druh stroja a jeho parametre. Je možné si zvoliť lis (mechanický, hydraulický, vretenový), buchar a valce.

Proces ubíjania v našom prípade prebiehal na mechanickom lise. Jeho parametre je možné vidieť na obr. 19. Pri všetkých simulovaných ubíjaniach bol použitý iba jeden typ

mechanického lisu. Preto sa pri simuláciách menila výška stlačenia (deformation stroke), ktorá sa mení v závislosti od výšky výkovku a ubíjacieho pomeru.



Obr. 19. Parametre mechanického lisu

4.1.1.3 Materiál

V tomto kroku je potrebné definovať vstupné termomechanické údaje o materiáli polotovaru a nástroja.

Materiál nástroja

Pri definovaní materiálu nástroja je potrebné uviesť:

1. Pomenovanie materiálu.
2. Typ materiálu. Pre materiál je možné zvoliť lineárnoelastický, termoelastický, tuhý viskoplastický a elastoplastický model.
3. Elastickomechanické vlastnosti materiálu. Tu je potrebné definovať Youngov modul pružnosti v ťahu a Poissonovu konštantu.
4. Tepelné vlastnosti. Pri tepelných vlastnostiach je potrebné definovať tepelnú rozťažnosť, tepelnú vodivosť a tepelnú kapacitu materiálov.

Materiál polotovaru

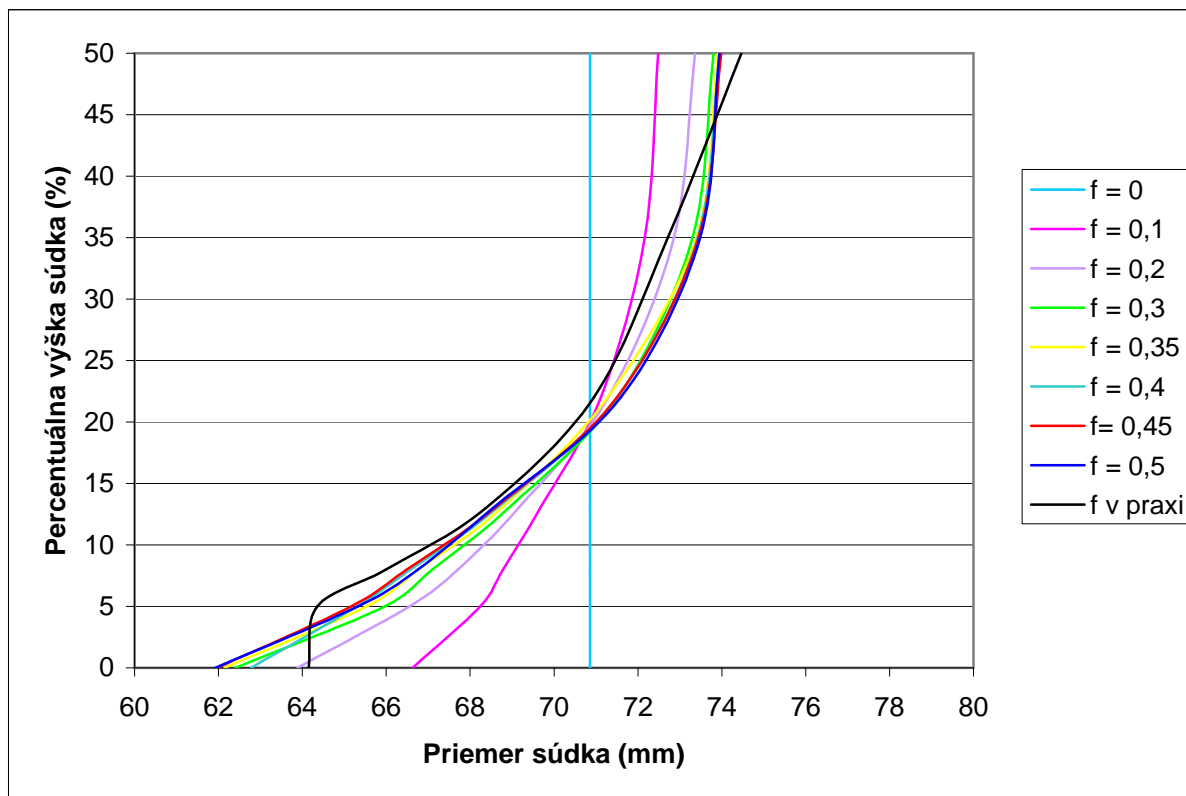
Materiál polotovaru je možné definovať prostredníctvom databázy, ktorá je súčasťou programu. Materiály sú označené podľa normy AISI (American Iron and Steel Institute). Materiál polotovaru je STN 41 4140. Ekvivalent tohto materiálu je oceľ AISI 5120. Z databázy sa potom načítajú všetky potrebné údaje o tomto materiáli.

4.1.1.4 Mazivo

V tomto kroku sa definujú parametre maziva. Sú to:

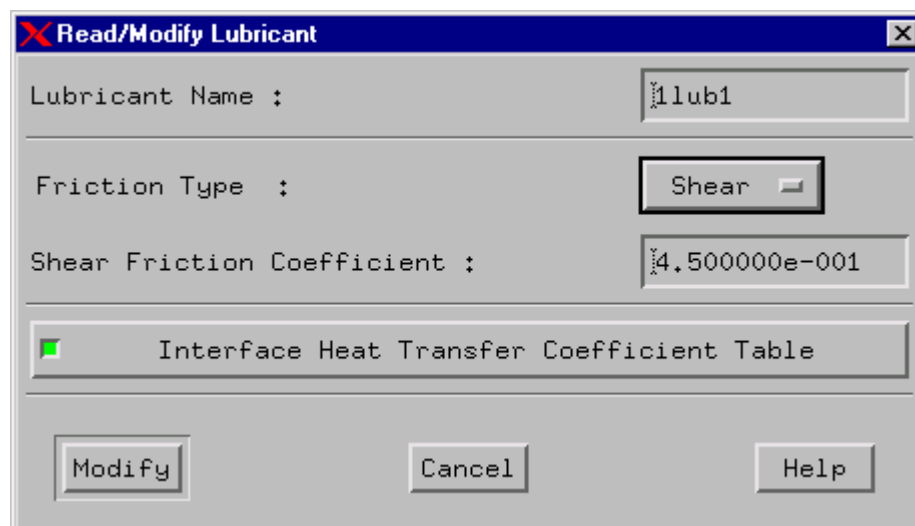
- ◆ označenie maziva,
- ◆ typ trenia a hodnota koeficientu trenia,
- ◆ koeficient prechodu tepla.

V tomto prípade je typ trenia šmykový. Hodnota koeficientu trenia sa zistila simulovaním ubíjania jedného valčeka so štíhlostným pomerom $\lambda = 2,2$ a ubíjajúcim pomerom $\kappa = h/h_0 = 0,5$. Pri simulovaní sa menil koeficient trenia v rozsahu od $f = 0$ až po $f = 0,5$. Potom sa zmerali priemery valčeka (súdka) po ubíjaní. Priemery sa merali po celej výške a nielen na čele a v strede. Z nameraných priemerov pri jednotlivých koeficientoch trenia bola zostrojená závislosť výšky od priemeru a porovnávala sa s hodnotami nameranými v praxi (obr. 20). Z grafu sa zistilo, že priemery sa v rozsahu koeficienta trenia $f = 0,3 \div 0,5$ menia veľmi málo. Ale po dôkladnom porovnaní kriviek zistených simuláciou a kriviek zistených v praxi bol vybraný koeficient trenia $f = 0,45$.



Obr. 20. Závislosť výšky súdka od jeho priemeru pri zmene koeficienta trenia

Tento koeficient trenia sa potom použil pri všetkých simuláciách. Koeficient trenia sa dosadil do okna v programe Antares na definovanie typu maziva (obr. 21).



Obr. 21. Okno na definovanie typu maziva

4.1.1.5 Okrajové podmienky

Určujú vlastnosti objektov, ich vzájomné pôsobenie, vplyv prostredia na objekty a pod. Je potrebné definovať nasledovné okrajové podmienky:

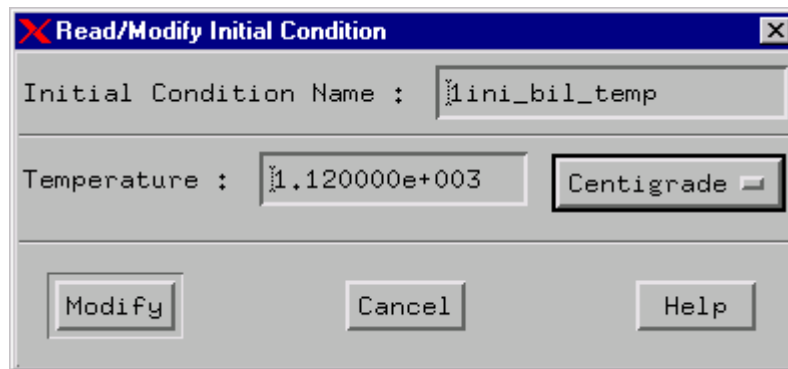
1. Okrajová podmienka dotyku. Prostredníctvom tejto okrajovej podmienky je potrebné definovať miesto dotyku nástroja s polotovarom, t. j. označiť tie hrany nástroja a polotovaru, ktoré prídu do vzájomného kontaktu.
2. Okrajová podmienka pôsobenia (vystavenia). Touto okrajovou podmienkou sa zohľadňuje vplyv prostredia na objekty. Preto je potrebné zadať hodnoty koeficientu prúdenia a žiarenia tepla, a tiež teplotu prostredia.
3. Okrajová podmienka upnutia. Táto okrajová podmienka sa vzťahuje na všetky uzlové body povrchu geometrického objektu. Tieto sú viazané proti pohybu pozdĺž definovanej osi upnutia (X, Y, Z, N).
4. Okrajová podmienka symetrie. Táto okrajová podmienka uľahčuje kreslenie objektov. Pri objektoch symetrických okolo jednej, prípadne obidvoch osí stačí nakresliť $\frac{1}{2}$, resp. $\frac{1}{4}$ geometrie. V tejto podmienke je potom potrebné definovať symetrie. V našom prípade sa použila $\frac{1}{4}$ geometrie polotovaru a $\frac{1}{2}$ geometrie nástroja.

4.1.1.6 Počiatočné podmienky

Počiatočnými podmienkami je definovaná:

- ◆ počiatočná teplota polotovaru,
- ◆ počiatočná teplota nástroja.

Počiatočná teplota polotovaru je vlastne teplota ubíjania, t.j. horná kovacia teplota (HKT). Teplota polotovaru sa volila taká, aká bola nameraná pri experimentoch optickým pyrometrom a tá je 1120 °C. Táto teplota bola zadaná pri simulácii za počiatočnú teplotu polotovaru (obr. 22).



Obr. 22. Definovanie počiatkovej teploty polotovaru

4.1.1.7 Priradenie charakteristických znakov a vlastností geometrickým objektom

V tomto kroku sa priradia zadefinované charakteristické znaky a vlastnosti ku geometrickým objektom. Priradí sa:

- ◆ tvárniaci stroj k nástroju,
- ◆ definované materiály k polotovaru a nástroju,
- ◆ mazivo k okrajovej podmienke dotyku,
- ◆ okrajová podmienka dotyku ku geometrickým objektom,
- ◆ okrajová podmienka pôsobenia ku geometrickým objektom,
- ◆ okrajová podmienka upnutia k nástroju,
- ◆ okrajová podmienka symetrie ku geometrickým objektom,
- ◆ veľkosť elementu deformačnej siete ku geometrickým objektom,
- ◆ typ analýzy ku geometrickým objektom (napr. tepelno-napäťová).

4.1.1.8 Nastavenie parametrov simulácie

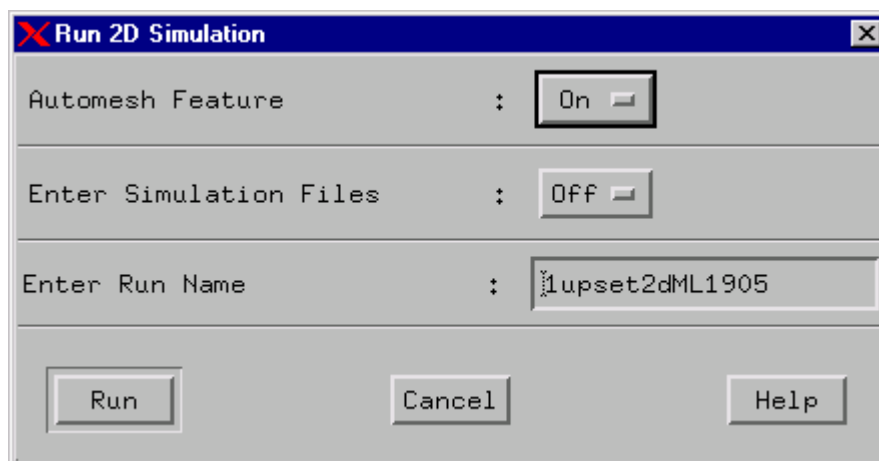
Parametre simulácie je možné nastaviť alebo akceptovať nastavené hodnoty. Pri nastavení treba definovať:

- ◆ označenie spúšťačieho procesu,
- ◆ časovú hodnotu krokov,
- ◆ interval ukladania údajov,
- ◆ odchýlky rýchlosti, práce, sily a teploty,
- ◆ počet opakovaní.

Všetky zadané vstupné údaje je potrebné uložiť. Potom sa vloží názov pre spúšťacie databázové súbory a nakoniec nasleduje vytvorenie spúšťacích súborov.

4.1.2 Simulácia tvárniaceho procesu

V tomto kroku je potrebné spustiť simuláciu. Pri jednooperačnom procese je možné simuláciu spustiť priamo príkazom Run (obr. 23). Pri viacoperačnom procese je potrebné najprv extrahovať vlastnosti geometrických objektov z predchádzajúcej operácie do nasledujúcej. Po spustení simulácie program automaticky vygeneruje deformačnú sieť a umiestní geometrické objekty do kontaktnej polohy.



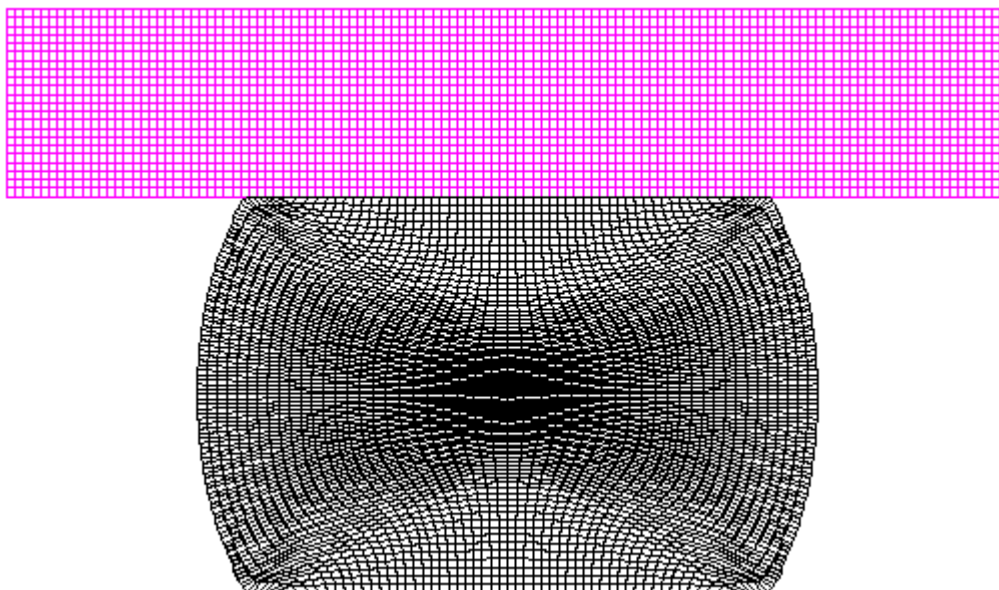
Obr. 23. Spustenie simulácie

4.1.3 Výsledky simulácie

Výsledkom simulácie je rozdelenie deformačného procesu na niekoľko krokov. V jednotlivých krokoch je možné analyzovať proces z viacerých hľadísk. Je možné pozorovať deformačnú sieť, rozloženie napätia, pretvorenia, rýchlosť pretvorenia, maximálne a minimálne hlavné napätia, von Misesovo napätie, šmykové napätie, atď. Tieto hľadiská je možné aplikovať ako na polotovar, tak aj na nástroj.

Prehľad o výsledkoch simulácie je možné získať aj vo forme grafov. Tieto grafy znázorňujú rôzne závislosti. Je to napr. závislosť zaťaženia nástroja od veľkosti zdvihu, závislosť veľkosti zdvihu od času, závislosť rýchlosti pohybu nástroja od zdvihu, atď. Program umožňuje vytvoriť aj animovanú ukážku tvárniaceho procesu.

V tomto prípade je výsledkom simulácie ubíjania valček (obr. 24), ktorý sa po ubíjaní zmení na súdok vplyvom faktorov, ktoré boli spomenuté v kapitole 2.



Obr. 24. Tvar súdka po simulácii pri ubíjaní

4.2 Simulácia na simulačnom programe MSC.SuperForge

MSC.SuperForge je priemyselne osvedčený softvérový balík pre počítačovú simuláciu tvárniacich operácií v priemysle. Je to prvý bezsieťový simulačný nástroj dostupný na trhu a je používaný hlavnými spoločnosťami zaoberajúcimi sa tvárnením a dodávateľmi po celom svete. V súčasnosti ho MSC.SuperForm a MSC.SuperForge dodávajú spoločne pod jedným obchodným menom MSC.Manufacturing (39).

MSC.SuperForge je softvér pre počítačovú simuláciu tvárniacich operácií v priemysle. Používa sa napr. na simuláciu kovania širokej palety priemyselných dielov. MSC.SuperForge je založený na metóde konečných objemov, ale umožňuje využívať aj metódu konečných prvkov. Je to nový smer vedúci k skráteniu simulačných časov. Softvér pracuje v režime 2D aj v 3D. Umožňuje simuláciu procesov, a to v oblasti objemového a plošného tvárnenia – za tepla aj za studena. Systém pracuje s tuhoplastickým materiálovým modelom (39).

Cieľom tohto simulačného programu je (55):

1. Chrániť konkurenčnú schopnosť podniku redukovaním:
 - ◆ dezajnových verzií foriem pre prototypy,
 - ◆ množstva defektov,

- ◆ šrotu a materiálových odpadov,
- ◆ množstva fyzických prototypov,
- ◆ počtu skúšok vo výrobe,
- ◆ času na vývoj produktu,
- ◆ nezhodných dielov vo výrobe.

2. Zvyšovať:

- ◆ životnosť formy,
- ◆ kvalitu produktu,
- ◆ čas na vývoj,
- ◆ spoľahlivosť v dodávkach na čas,
- ◆ flexibilitu pri komunikácii so zákazníkom,
- ◆ proces know-how,
- ◆ konkurenčné výhody.

Softvéový program umožňuje (55):

1. simuláciu týchto tvárniacich operácií:
 - ◆ kovanie – zápustkové, predkovanie,
 - ◆ valcovanie, kalibrovanie, ubíjanie,
 - ◆ pretlačovanie,
 - ◆ ťahanie – hlboké, viacoperačné,
 - ◆ ohýbanie,
 - ◆ zakružovanie, lemovanie, rovnanie plechov,
 - ◆ delenie materiálu – strihanie, obrábanie,
 - ◆ hydroforming.
2. definovanie viacoperačného tvárnenia s automatickou výmenou nástrojov,
3. definíciu tvárniacich strojov: kľukového, excentrického, hydraulického buchara a možnosť definície vlastných databáz tvárniacich strojov,
4. zadanie rozdielnych trení na plochy nástrojov,
5. určenie tvárniacich síl,
6. časovo premenný pohyb nástrojov,
7. možnosť definovať deformovateľné nástroje, zistiť veľkosť trecích a normálových síl majúcich vplyv na opotrebenie nástroja,
8. možnosť definovať premenné pridržiavacie sily,
9. odstrihnutie výronku na výkovku,

10. automatické presieťovanie 2D, 3D v priebehu simulácie tvárnenia s možnosťou lokálneho zahustenia siete,
11. vytvoriť elasto-plastický a ideálne plastický materiálový model,
12. obsahuje databázu materiálov, ktorú je možné stále rozširovať,
13. elastické odpruženie polotovaru (výtvarku) po vyňatí z nástroja,
14. počítat' úlohy teplotne-mechanické, ale aj čisto mechanické,
15. možnosť definovať medzioperačné žihanie na odstránenie vnútorných pnutí v polotovare,
16. možnosť importovať geometriu vo formáte: IGES, ACIS, DXF, DWG, STL, VDAFS, SDRC I-DEAS, UNV,
17. možnosť definície sofistikovaných nástrojov (plávajúcich, odpružených),
18. možnosť prechodu analýzy z rotačne symetrickej do 3D v priebehu simulácie,
19. definíciu počiatočných okrajových podmienok (teplota, posunutie, plastická deformácia),
20. obsahuje postprocessing so širokou možnosťou grafických, tabuľkových a video výstupov.

Hlavná pracovná náplň pozostáva z niekoľkých hlavných krokov, ktoré sú podobné ako pri predchádzajúcom simulačnom programe:

Krok 1 - Definovanie atribútov a vlastností

Zariadenie – tvárniaci stroj: mechanický lis; materiál polotovaru vybraný z databázy; mazivo – zadané podľa typu trenia; geometria; okrajové podmienky dotyku, pôsobenia, upnutia a symetrie; počiatočné podmienky – počiatočná teplota polotovaru (teplota ubíjania) a počiatočná teplota nástroja.

Krok 2 - Priradenie atribútov a vlastností k objektom

Ide o priradenie objektov do procesu, priradenie materiálu k pracovnému kusu, priradenie teploty, priradenie nástroja, definovanie spôsobu tvárnenia, definovanie želanej simulácie v 2D, 3D, rez.

Krok 3 - Nastavenie parametrov simulácie

MSC.SuperForge podobne ako ANTARES dovoľuje ovládať (ručne alebo akceptovať nastavené hodnoty) simuláciu prostredníctvom rozsiahleho zoznamu spúšťacích parametrov.

Krok 4 - Simulácia deformačného procesu

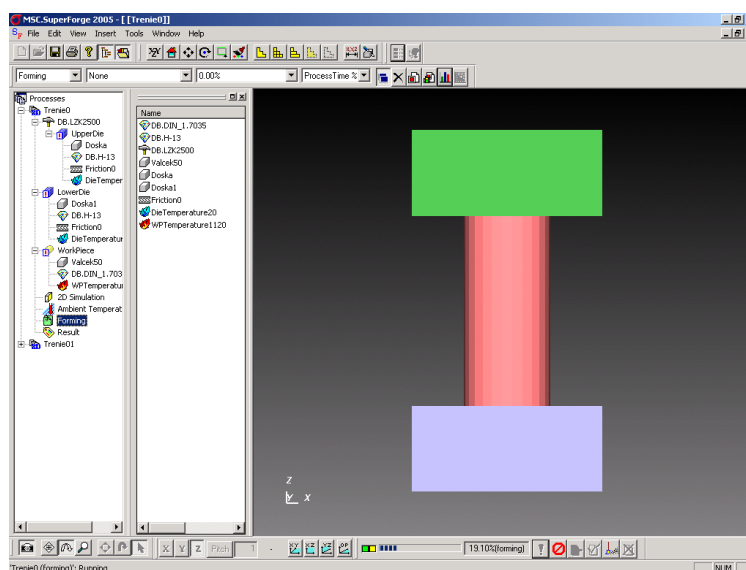
V tomto kroku sa riešia definované úlohy a generujú sa riešené údaje. V pracovnom okne je informácia o stave prebiehajúcej simulácie, táto informácie je udaná v %.

Krok 5 - Prehľad výsledkov

MSC.SuperForge umožňuje zobrazit' výsledky simulácie so širokou možnosťou grafických, tabuľkových a video výstupov.

4.2.1 Zadávanie vstupných údajov

Podobne ako v simulačnom programe Antares aj v simulačnom programe MSC.SuperForge treba zadať a nastaviť vstupné údaje a parametre celej simulácie procesu ubíjania. Postup zadávania je podobný ako v programe Antares, len s tým rozdielom, že MSC.SuperForge je graficky prístupnejší k užívateľovi (obr. 25).



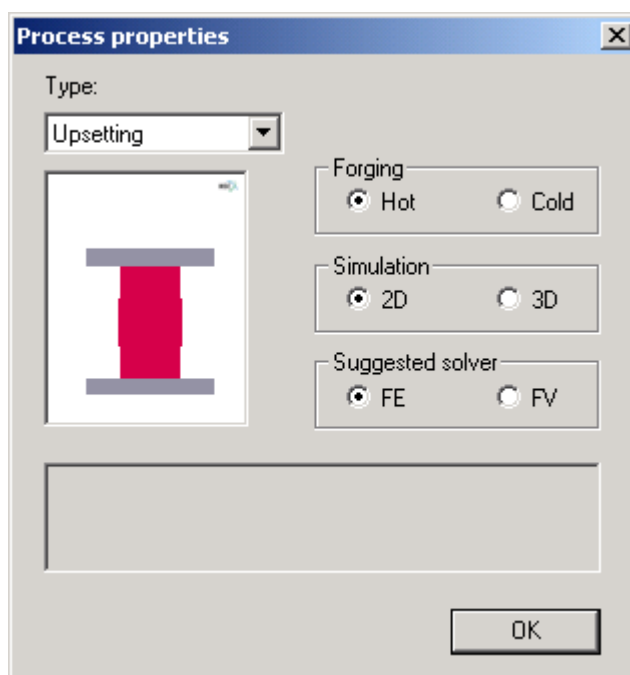
Obr. 25. Pohľad na otvorené pracovné okno programu MSC.SuperForge

4.2.1.1 Nastavenie vlastností procesu

Pri otvorení nového procesu sa hneď na začiatku zobrazí okno, v ktorom je treba nastaviť vlastnosti procesu (obr. 26). Vybrať treba typ procesu (napr. ubíjanie, pretlačovanie dopredné alebo spätné, otvorenú alebo uzatvorenú zápusťku a pod.). Ďalej sa musí zvoliť, či o simuláciu

za tepla alebo za studena, či bude simulácia 2D alebo 3D a zvoliť typ riešiča FE (metóda konečných prvkov) alebo FV (metóda konečných objemov).

V našom prípade ide o ubíjanie za tepla, 2D a FE.



Obr. 26. Okno na definovanie vlastností procesu

4.2.1.2 Geometria polotovaru a nástroja

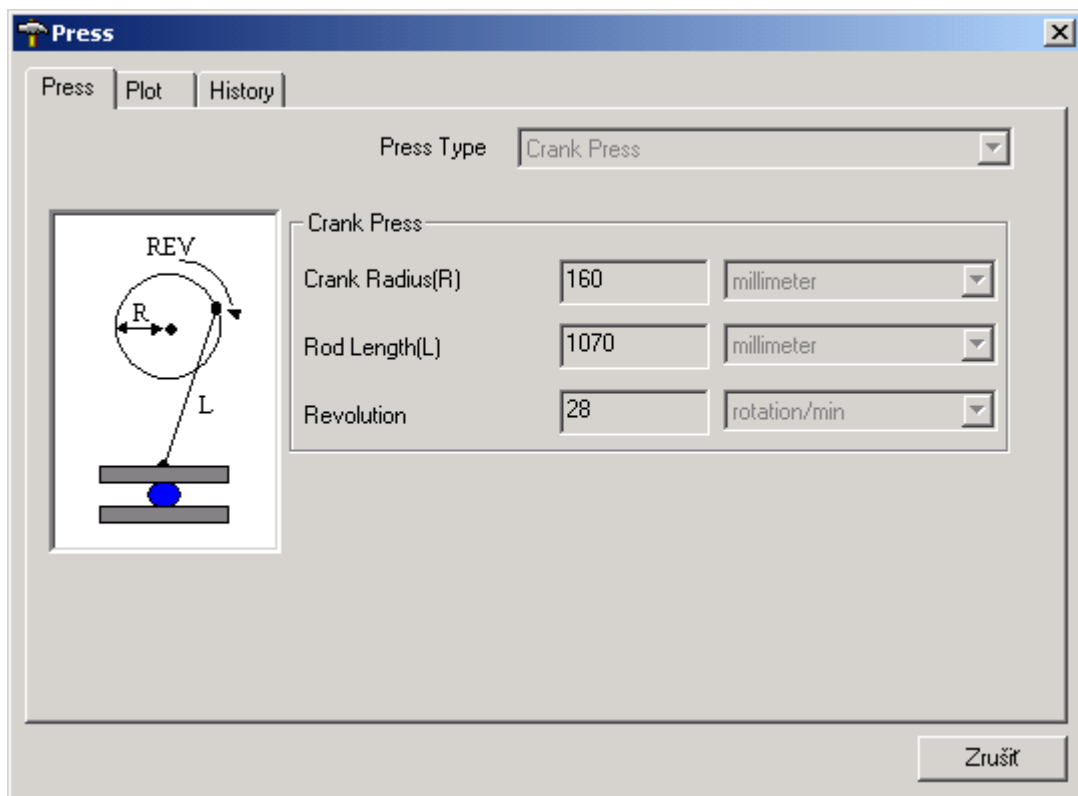
Geometriu polotovaru alebo nástroja možno vytvoriť zo súboru alebo z výsledkov predchádzajúceho procesu, alebo niektoré jednoduché tvary umožňujú definovať (vytvoriť) program MSC.SuperForge. Definovanie geometrie polotovaru (valčeka) a nástroja (rovné dosky) sa vykonávali priamo v programe, keďže ide o jednoduché tvary.

4.2.1.3 Definovanie materiálu

Materiál treba definovať pre polotovar (valček), ale aj pre nástroj. Definovať materiál je možné manuálne, pokiaľ zadáme parametre (vlastnosti) materiálu alebo z knižnice materiálov, ktorá je v programe, alebo môžeme materiál definovať aj z externej databázy. Materiál polotovaru sa vybral z databázy DIN 1.7035, lebo je to najvhodnejší ekvivalent k materiálu použitému v simulačnom programe Antares a k materiálu použitému v experimente. Ako materiál nástroja sa zvolil odporúčaný materiál pre tuhé nástroje, ktorý sa tu nachádza pod označením H13.

4.2.1.4 Definovanie parametrov stroja

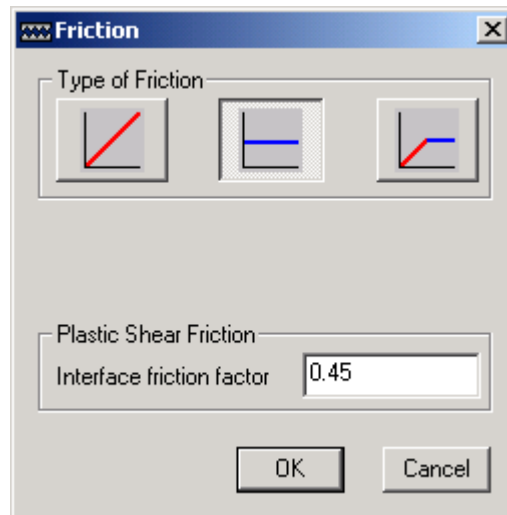
Pri definovaní parametrov stroja si môžeme vybrať z viacerých typov strojov, a to: mechanický lis, hydraulický lis, vretenový lis, buchar a pod. V našom prípade definujeme parametre mechanického lisu, ktoré zodpovedajú parametrom kovacieho lisu LZK 2500 (obr. 27).



Obr. 27. Okno na definovanie parametrov mechanického lisu

4.2.1.5 Definovanie trenia

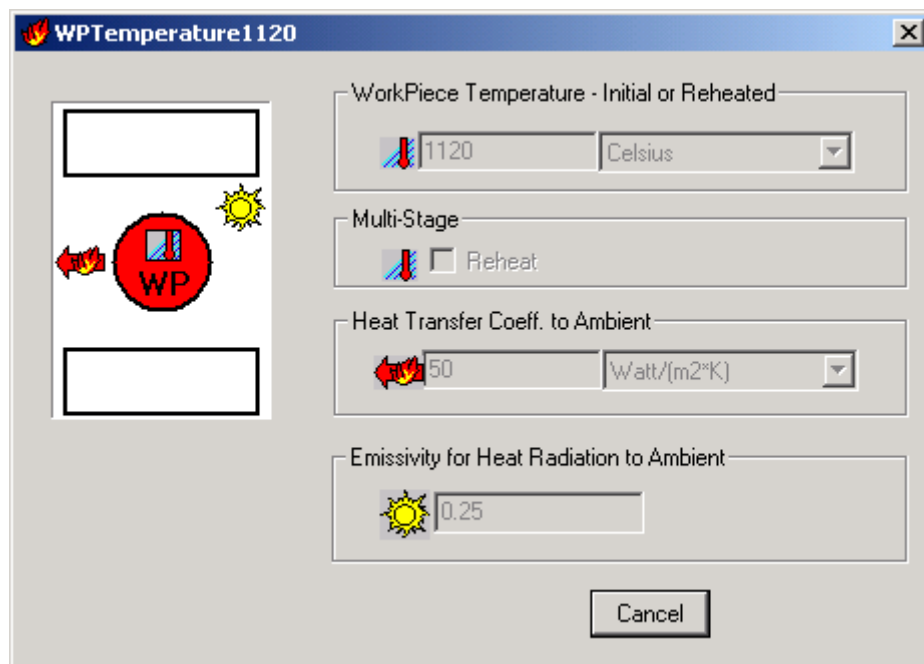
Pri definovaní trenia musíme najskôr vybrať typ trenia a potom zvoliť koeficient trenia (obr. 28).



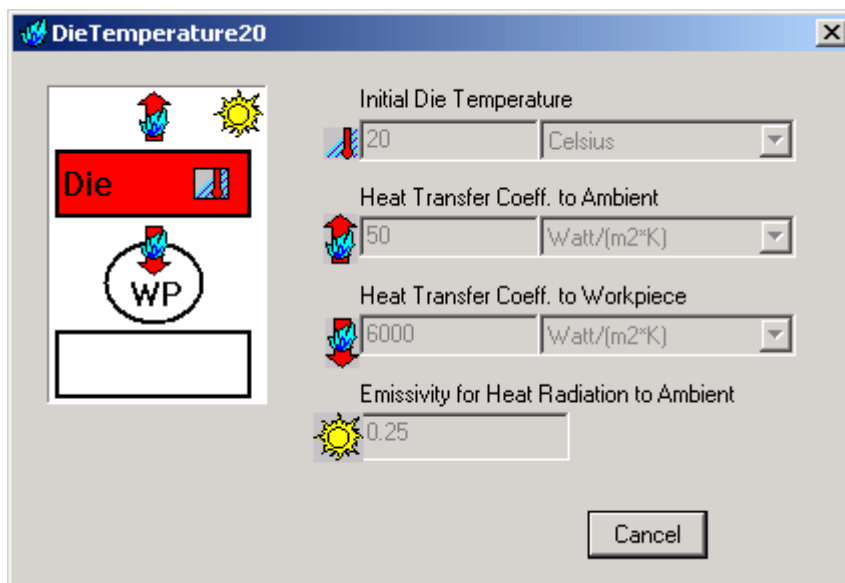
Obr. 28. Okno na definovanie typu a koeficientu trenia

4.2.1.6 Definovanie teploty

Teplotu definujeme pre materiál (polotovár), ale aj pre nástroj, tu môžeme nastaviť aj parametre prechodu tepla medzi nástrojom, polotovárom a okolím (obr. 29 a obr. 30). Ešte je možné definovať aj teplotu okolia.



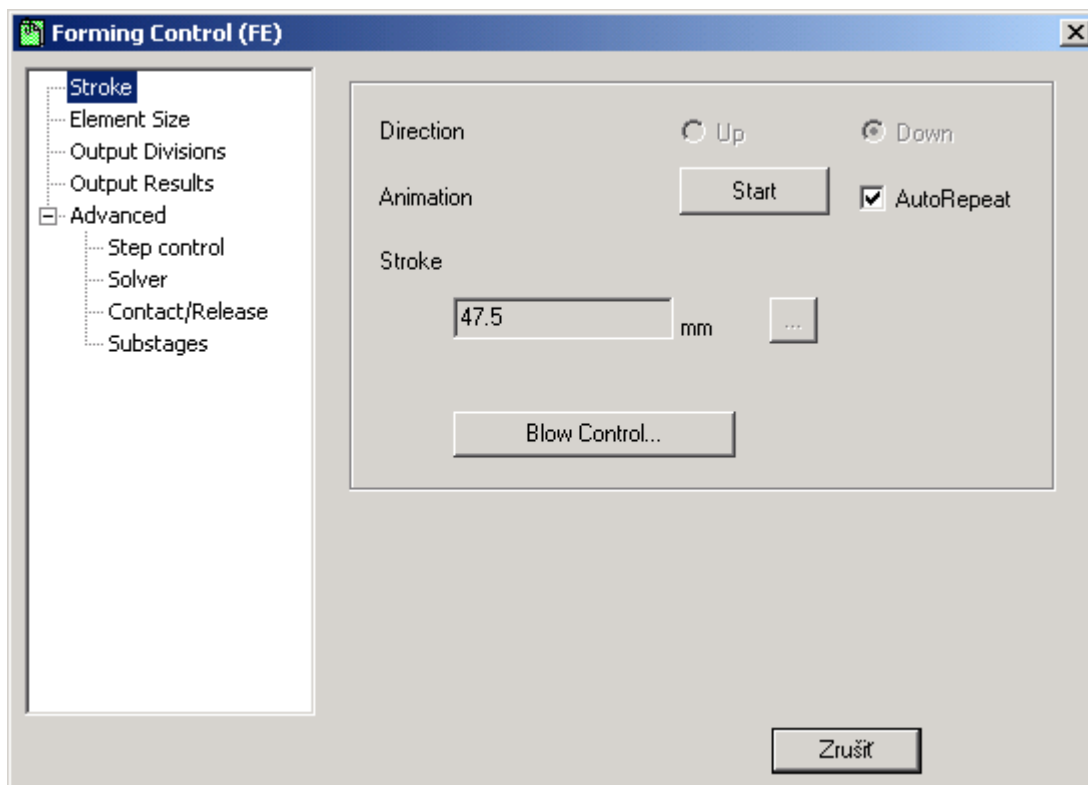
Obr. 29. Okno na definovanie teploty polotovaru



Obr. 30. Okno na definovanie teploty nástroja

4.2.1.7 Nastavenie parametrov simulácie

Pri tomto nastavení ide hlavne o nastavenie pracovnej dráhy nástroja (obr. 31) a veľkosti elementu. Okrem nich je tu aj veľa iných možných nastavení, ktoré je možné meniť a nastavovať. Veľkosť elementu bola vždy nastavená 1 mm.



Obr. 31. Okno na nastavenie parametrov simulácie

4.2.2 Spustenie simulácie

Pri spustení simulácie program skontroluje správnosť nastavení celého procesu a v prípade, že nie je niečo správne vložené, vypíše hlásenie, v ktorom popisuje problémy. Alebo je možné si dať správnosť vložených údajov skontrolovať pred samotným spustením simulácie .

4.2.3 Výsledky simulácie

Po skončení samotnej simulácie je možné si výsledky pozrieť vo forme obrázkov alebo videí, alebo niektoré výsledky aj vo forme grafov. Videá alebo obrázky je možné pootáčať alebo pokiaľ bola simulácia 3D, je možné urobiť rez v ľubovoľnom mieste, a tak pozrieť, ako to v danom mieste prebieha. Je možné určité miesto aj zväčšiť (priblížiť) pre lepšiu názornosť. Program umožňuje sledovať: teploty, pretvorenia, rýchlosti, napätia, priebehy síl a rôzne iné.

5 DOSIAHNUTÉ VÝSLEDKY

V tejto kapitole budú popísané získané výsledky, ktoré budú navzájom porovnané a následne budú matematicky pomocou polynómov popísané. Tieto moje výsledky boli publikované v rôznych časopisoch, na konferenciách a v dizertačnej práci (56 – 68).

5.1 Vplyv štíhlostného pomeru na tvar súdka

V experimente ide o skúmanie vplyvu štíhlostného pomeru na tvorbu súdka po ubíjaní za tepla a následnej matematizácie získaných výsledkov. Výsledky získané zo simulačných programov MSC.SuperForge a Antares boli porovnané s výsledkami pri praktickom experimente (3). Pre objektívne výsledky boli použité všetky dostupné informácie o priebehu experimentu v praxi, ako sú: materiál ubíjaného valčeka, rozmery ubíjaného valčeka, ubíjací pomer, parametre tvárniaceho stroja, počiatočné teploty valčeka, nástroja a okolia. Tieto boli zadané ako vstupné údaje do simulačných programov pri simulácii (tab. 1). Pri simulácii boli použité parametre tvárniaceho stroja LZK 2500, ktorý bol použitý aj pri experimente v praxi.

ZÁKLADNÉ VSTUPNÉ ÚDAJE

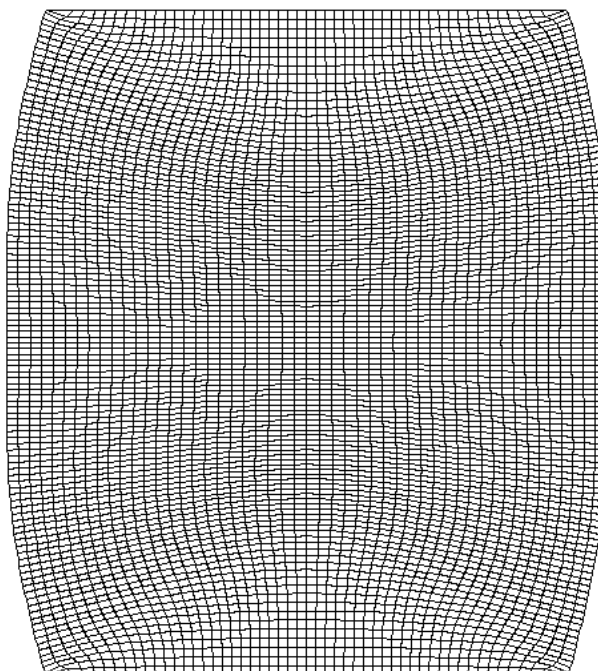
Tabuľka 1

Vstupné údaje	MSC.SuperForge	Antares	Praktický experiment
počiatočná teplota polotovaru [°C]	1120	1120	1120
počiatočná teplota nástroja [°C]	20	20	20
teplota okolia [°C]	20	20	20
koeficient trenia	0,45	0,45	0,45
materiál ubíjaného valčeka	DIN 1.7035	AISI 5120	STN 41 4140

Tvar súdka po ubíjaní pri meniacom sa štíhlostnom pomere $\lambda = \frac{h_0}{d_0}$ bol získaný pri ubíjanom pomere $\kappa = \frac{h}{h_0}$. Štíhlostný pomer je v rozmedzí $1 \leq \lambda \leq 2,5$ s odstupňovaním po 0,3 a ubíjacie pomery: $\kappa_1 = 0,8$; $\kappa_2 = 0,65$; $\kappa_3 = 0,5$; $\kappa_4 = 0,35$; $\kappa_5 = 0,2$. Pri simulácii v simulačnom programe MSC.SuperForge bol ubíjací pomer konštantný $\kappa = 0,5$. Priemer valčeka je konštantný $d_0 = 50$ mm. Východiskové rozmery pre valčekové skúšobné vzorky s ohľadom na štíhlostný pomer sú v tab. 2.

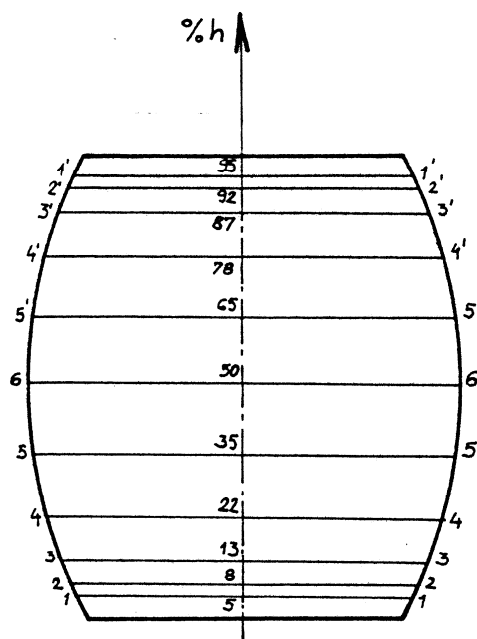
	Štíhlostný pomer	Výška valčeka	Priemer valčeka
1.	$\lambda = 1,0$	$h_0 = 50 \text{ mm}$	$d_0 = 50 \text{ mm}$
2.	$\lambda = 1,3$	$h_0 = 65 \text{ mm}$	$d_0 = 50 \text{ mm}$
3.	$\lambda = 1,6$	$h_0 = 80 \text{ mm}$	$d_0 = 50 \text{ mm}$
4.	$\lambda = 1,9$	$h_0 = 95 \text{ mm}$	$d_0 = 50 \text{ mm}$
5.	$\lambda = 2,2$	$h_0 = 110 \text{ mm}$	$d_0 = 50 \text{ mm}$
6.	$\lambda = 2,5$	$h_0 = 125 \text{ mm}$	$d_0 = 50 \text{ mm}$

Valčeková skúšobná vzorka sa zmenila vplyvom faktorov obsiahnutých v kapitole 2 na tvar súdka (obr. 32).



Obr. 32. Tvar skúšobného valčeka po simulácii

Každý tvar súdka sa po skončení simulácie zmeral. Merala sa výšku súdka a priemery súdka. Priemery súdka sa merali v priečných rezoch v určitých percentuálnych výškach tak, ako to bolo merané v experimente a zmerali sa aj priemery čela súdka. Percentuálna výška bola v (5, 8, 13, 22, 35, 50, 65, 78, 87, 92, 95 % h) (obr. 33). V experimente sa priemery čela súdka merali, ale neboli zmerané s dostačujúcou presnosťou. Táto presnosť nebola preto, lebo bolo ťažké určiť na vzorke, kde je prechod čela do bočnej steny. Preto aj v grafoch je krivka z hodnôt meraných v experimente od 0 do 5 % h so strmým stúpaním.



Obr. 33. Meranie priemerov v 11-tich priečných rezoch (3)

V experimente sa vychádzalo z predpokladu, že v ideálnom stave sú prierezy 1-1 a 1'-1' totožné tak, ako 2-2 a 2'-2', 3-3 a 3'-3', 4-4 a 4'-4', 5-5 a 5'-5'. Pri simulácii sa tento predpoklad potvrdil, preto sa merala len výška v rozsahu od 0 do 50 % h .

V experimente sa neuvažovalo so vzorkami po ubíjaní nižšími ako 20 mm z nasledujúcich dôvodov:

1. možné praskanie vzorky – súdka po obvode,
2. možné utvorenie nepravidelnej krivky povrchu súdka,
3. možné pokrivenie vzorky pri rýchlom chladnutí.

5.1.1 Počítačová simulácia v simulačných programoch Antares a MSC.SuperForge

V simulačných programoch bola riešená simulácia ubíjania za tepla pri meniacom sa štíhlostnom pomere v rozsahu $\lambda = 1,0 \div 2,5$, pri konštantnom koeficiente trenia $f = 0,45$ a pri ubíjacom pomere $\kappa = 0,5$.

Z nameraných výsledkov v experimente a v simuláciách sa zostrojili grafické závislosti percentuálnej výšky súdka od priemeru súdka. Pri závislostiach získaných simuláciou sú krivky blízko seba. Z toho vyplýva, že pri meniacom sa štíhlostnom pomere (v rozsahu $\lambda = 1,0 \div 2,5$), ak ubíjame na ten istý ubíjací pomer, krivka súdkovitosti je približne vždy rovnaká.

Z grafických závislostí vplyvom toho, že krivky súdkovitosti, ak ubíjame na ten istý ubíjací pomer, sú blízko seba, sa z hodnôt získaných simuláciou vypočítala stredná aritmetická hodnota priemeru súdka. Pri simulačnom programe Antares a MSC.SuperForge sa táto hodnota počítala pre každý program zvlášť. Stredná aritmetická hodnota priemeru súdka sa počítala aj pre výsledky získané experimentom. Priemerné priemery súdkov pri ubíjacom pomere $\kappa = 0,5$ v jednotlivých percentuálnych výškach súdka sú v tab. 3.

PRIEMERNÉ PRIEMERY SÚDKOV PRE UBÍJACÍ POMER $\kappa = 0,5$ Tabuľka 3

Miesto merania	Priemer súdka [mm]		
	MSC.SuperForge	Antares	Praktický experiment
d_{ξ}	61,29	63,10	64,48
d_1	65,10	66,02	64,69
d_2	66,61	67,05	66,33
d_3	68,23	68,94	68,47
d_4	70,59	71,32	70,77
d_5	72,46	73,24	73,37
d_6	73,16	73,84	74,39

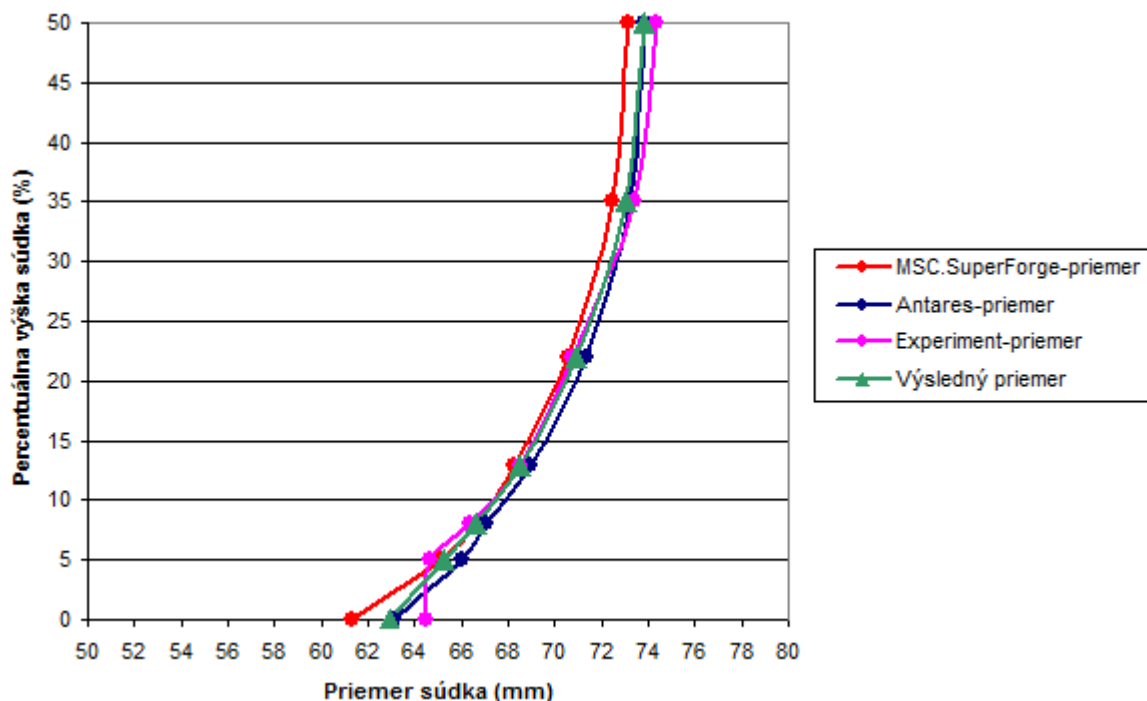
Pri ubíjacom pomere $\kappa = 0,5$ sa spočítali priemery súdka zo všetkých štíhlostných pomerov (1,0; 1,3; 1,6; 1,9; 2,2; 2,5) pri konkrétnej percentuálnej výške súdka a vydělili počtom spočítaných priemerov. Potom sa získala pre ubíjací $\kappa = 0,5$ len jedna hodnota pri konkrétnej percentuálnej výške súdka (tab. 4).

PRÍKLAD VÝPOČTU PRIEMERNEJ HODNOTY PRIEMERU PRI $\kappa = 0,5$
A PERCENTUÁLNEJ VÝŠKE SÚDKA 22 % Tabuľka 4

h [%]	d [mm] $\lambda = 1,0$ $\kappa = 0,50$	d [mm] $\lambda = 1,3$ $\kappa = 0,50$	d [mm] $\lambda = 1,6$ $\kappa = 0,50$	d [mm] $\lambda = 1,9$ $\kappa = 0,50$	d [mm] $\lambda = 2,2$ $\kappa = 0,50$	d [mm] $\lambda = 2,5$ $\kappa = 0,50$	d_{priem} [mm] $\lambda = 1 \div 2,5$ $\kappa = 0,5$
22	71,21	70,99	71,03	71,24	71,50	71,92	71,32

Porovnaním priemerných hodnôt priemerov súdkov pri simuláciách s nameranými priemermi súdkov pri experimente sa zistilo, že priemerné hodnoty priemerov súdkov pri simulácii nemožno považovať za priemerné hodnoty priemerov súdkov pri experimente. Je to dané tým, že krivky namerané experimentom majú veľký rozptyl, a ten je daný nedodržaním

predpokladaného ubíjacieho pomeru. Z toho dôvodu sa krivky v grafe posúvajú doľava alebo doprava. Z toho vyplýva, že ak by sa dodržal približný predpokladaný ubíjací pomer v experimente aj po ubíjaní, vtedy by sa priemerné hodnoty priemerov pri simulácii mohli považovať aj za priemerné hodnoty priemerov pri experimente. V práci sa preto považovali priemerné hodnoty priemerov súdkov pri simulácii aj za priemerné hodnoty priemerov súdkov pri experimente (obr. 34).



Obr. 34. Grafická závislosť priemerných povrchových kriviek súdka pre ubíjací pomer $\kappa = 0,5$

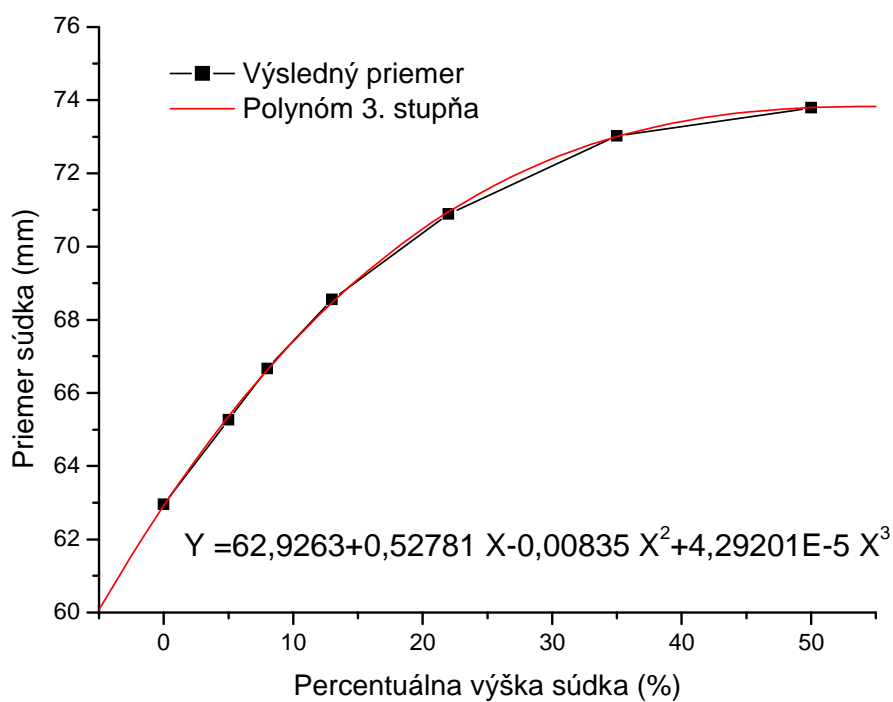
Z dosiahnutých výsledkov bolo snahou získať aj matematické vyjadrenie pre tvar súdka. Matematické vyjadrenie sa robilo pomocou numerických regresných metód (69, 70). V programe Origin sa aproximoval polynómom krivky získaný výsledný priemerný tvar súdka (obr. 34). Pre použitie metódy najmenších štvorcov je dôležitý výber vhodného polynómu optimálnej dĺžky, a preto sa hľadal taký stupeň polynómu, ktorý by opísal krivku čo najlepšie po celej dĺžke. Kritériom výberu je dosiahnutá regresná tesnosť krivky preloženej cez namerané body metódou najmenších štvorcov. Po odskúšaní rôznych polynómov bol ako optimálny polynóm zvolený polynóm 3. stupňa, ktorého všeobecný tvar je:

$$Y = a + b_1 \cdot X + b_2 \cdot X^2 + b_3 \cdot X^3, \quad [13]$$

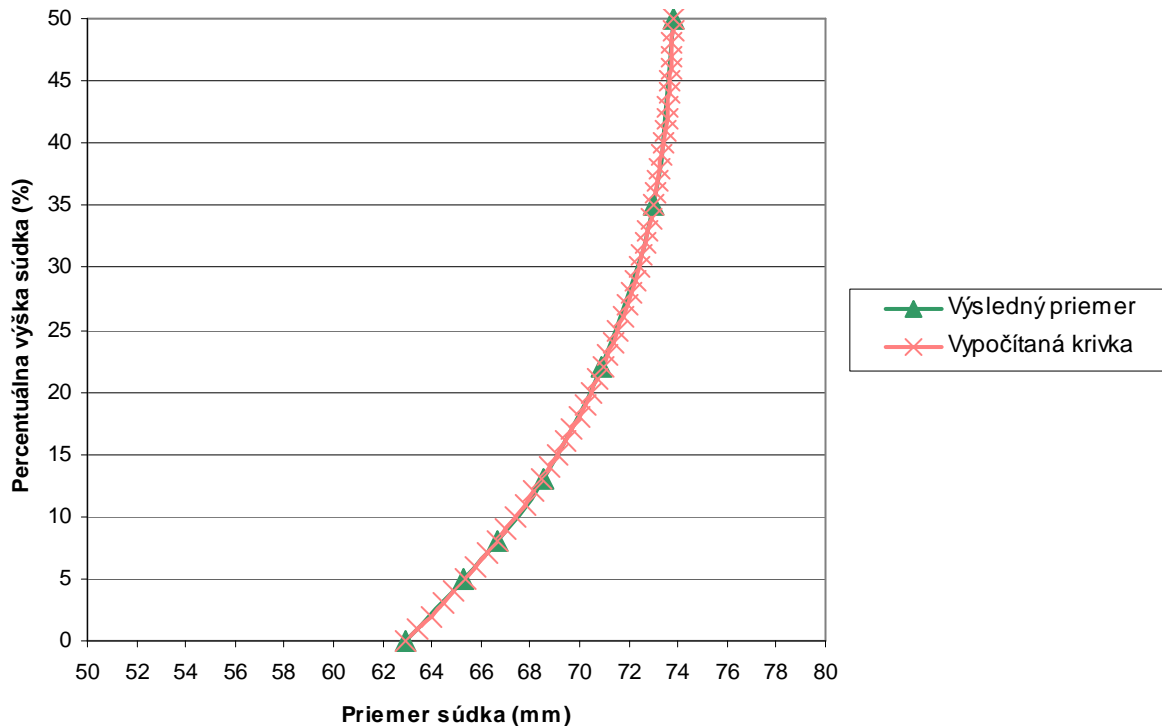
kde a, b_1, b_2, b_3 sú konštanty (nazývané aj regresné) a Y, X sú premenné.

Preložením krivky vzniklo matematické vyjadrenie krivky v tvare polynómu 3. stupňa (obr. 35).

Z výsledného polynómu 3. stupňa sa dosadzovaním hodnôt percentuálnej výšky získali priemery súdka vo výške od 0 do 50 % h . Získané hodnoty sa zakreslili do grafickej závislosti a porovnali sa s príslušnou grafickou závislosťou (obr. 36).



Obr. 35. Výsledný priemerný tvar súdka preložený polynómom 3. stupňa



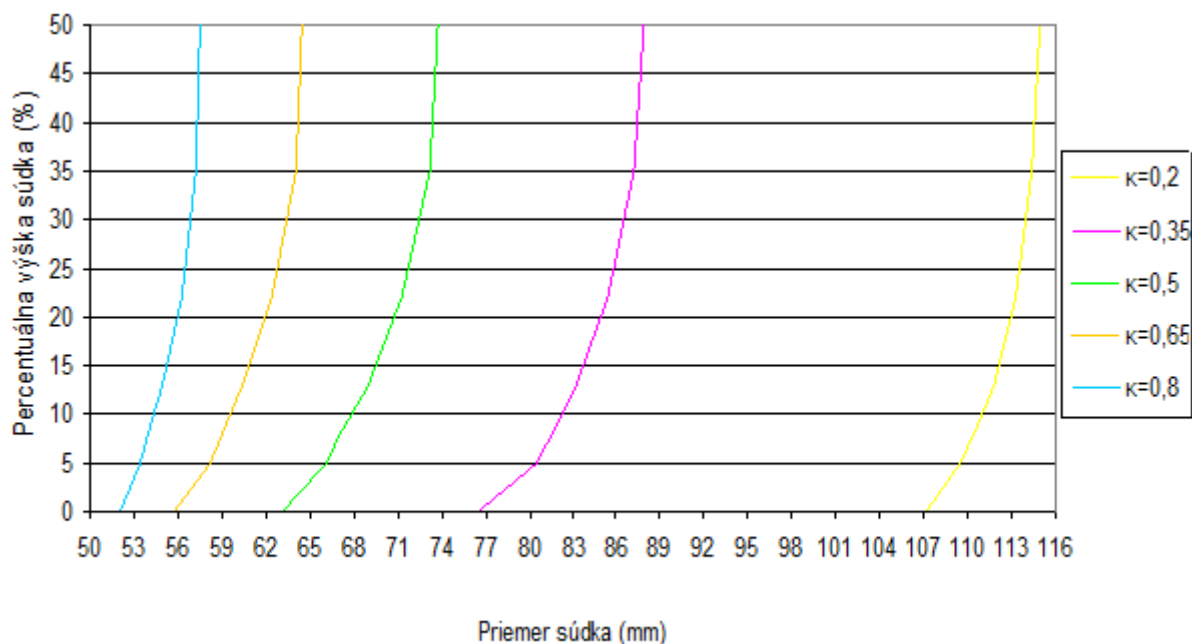
Obr. 36. Porovnanie priemerného tvaru súdka s tvarom súdka vypočítaným z polynómu

Porovnaním získaných výsledkov zo simulácií a experimentu pri ubíjaní valcového polotovaru pre ubíjací pomer $\kappa = 0,5$ sa získalo matematické vyjadrenie tvaru súdka. Tvar súdka sa stanovil rovnicou (obr. 35) a grafickou závislosťou (obr. 36). Túto grafickú závislosť možno nazývať aj nomogramom, ktorý platí pre dané vstupné podmienky, z ktorých sa vychádzalo pri praktickom experimente aj pri simuláciách, a preto je snahou tieto podmienky, ktoré obmedzujú použitie nomogramu, odstrániť na minimum.

5.1.2 Počítačová simulácia v simulačnom programe Antares

Pri simulácií v simulačnom programe Antares boli vykonané simulácie aj pri rôznych ubíjaciach pomeroch ($\kappa_1 = 0,8$; $\kappa_2 = 0,65$; $\kappa_3 = 0,5$; $\kappa_4 = 0,35$; $\kappa_5 = 0,2$).

Postup získavania priemerných priemerov súdkov je rovnaký, ako už bolo popísané v predchádzajúcej časti. Priemerné priemery súdkov v simulačnom programe Antares pri jednotlivých ubíjaciach pomeroch v jednotlivých percentuálnych výškach súdka sú na obr. 37.



Obr. 37. Grafická závislosť povrchových kriviek z priemerných hodnôt priemeru súdka pri simulácii v programe Antares

Z grafickej závislosti povrchových kriviek priemerných priemerov (obr. 37) bolo snahou získať aj matematické vyjadrenie povrchových kriviek súdka pre jednotlivé ubíjacie pomery κ . V programe Origin sa aproximovali polynómami 3. stupňa krivky z obr. 37 pre jednotlivé ubíjacie pomery.

Preloženým kriviek vzniklo matematické vyjadrenie krivky v tvare polynómu 3. stupňa pre každú krivku odlišné. Regresné konštanty z týchto polynómov 3. stupňa pre jednotlivé ubíjacie pomery sú v tab. 5.

HODNOTY REGRESNÝCH KONŠTÁNT PRE POLYNÓMY 3. STUPŇA
PRI JEDNOTLIVÝCH UBÍJACÍCH POMEROCH

Tabuľka 5

$\kappa = h/h_0$ [-]	a	b₁	b₂	b₃
0,20	107,15541	0,48476	-0,0112	9,16676E-5
0,35	76,87514	0,68875	-0,01632	1,39001E-4
0,50	63,29356	0,55976	-0,01014	6,34386E-5
0,65	55,83363	0,45846	-0,00814	4,84811E-5
0,80	52,14976	0,26401	-0,00398	1,65117E-5

Ďalej bolo snahou dosiahnuť, aby pre všetky ubíjacie pomery (0,2; 0,35; 0,5; 0,65; 0,8) bolo len jedno matematické vyjadrenie. Dosiahlo sa to tým, že sa zostrojili grafické závislosti

jednotlivých regresných konštánt (a, b_1, b_2, b_3), kde na osi x bol ubíjací pomer κ a na osi y bola hodnota príslušnej konštanty. Hodnoty pre tieto závislosti sú z tab. 5.

Pri výbere optimálneho polynómu pre grafické závislosti jednotlivých regresných konštánt (a, b_1, b_2, b_3) sa postupovalo presne tak isto ako pri polynómoch na zistenie matematického vyjadrenia jednotlivých ubíjajúcich pomerov. Zistilo sa, že optimálny polynóm je polynóm 3. stupňa. Týmto polynómom sa potom preložili závislosti jednotlivých konštánt na ubíjacom pomere.

Hodnoty regresných konštánt pri polynómoch 3. stupňa preložených závislosťami príslušnej konštanty a ubíjacieho pomeru sú v tab. 6.

HODNOTY REGRESNÝCH KONŠTÁNT PRI PRELOŽENÝCH POLYNÓMOCH 3. STUPŇA ZÁVISLOSŤAMI JEDNOTLIVÝCH KONŠTÁNT NA UBÍJACOM POMERE Tabuľka 6

	A	B₁	B₂	B₃
Y_a	181,02719	-490,56693	666,91577	-319,07728
Y_{b1}	-0,29922	5,9823	-11,32447	5,92173
Y_{b2}	0,01144	-0,18257	0,38417	-0,22568
Y_{b3}	-1,38482E-4	0,00191	-0,00423	0,00261

Polynómy 3. stupňa pre príslušnú regresnú konštantu majú tvar:

$$Y_a = A + B_1 \cdot \kappa + B_2 \cdot \kappa^2 + B_3 \cdot \kappa^3, \quad [14]$$

$$Y_{b1} = A + B_1 \cdot \kappa + B_2 \cdot \kappa^2 + B_3 \cdot \kappa^3, \quad [15]$$

$$Y_{b2} = A + B_1 \cdot \kappa + B_2 \cdot \kappa^2 + B_3 \cdot \kappa^3, \quad [16]$$

$$Y_{b3} = A + B_1 \cdot \kappa + B_2 \cdot \kappa^2 + B_3 \cdot \kappa^3. \quad [17]$$

Hodnoty konštánt pre rovnice [14, 15, 16, 17] sú v tab. 6. Potom sa dosadili polynómy 3. stupňa ($Y_a, Y_{b1}, Y_{b2}, Y_{b3}$) do všeobecnej rovnice polynómu 3. stupňa [18] namiesto konštánt a, b_1, b_2, b_3 . Výsledkom je rovnica [19] pre výpočet priemeru súdka pre ubíjací pomer $\kappa = (0,2 \div 0,8)$. Táto rovnica sa tiež nazýva aj empirickou funkciou.

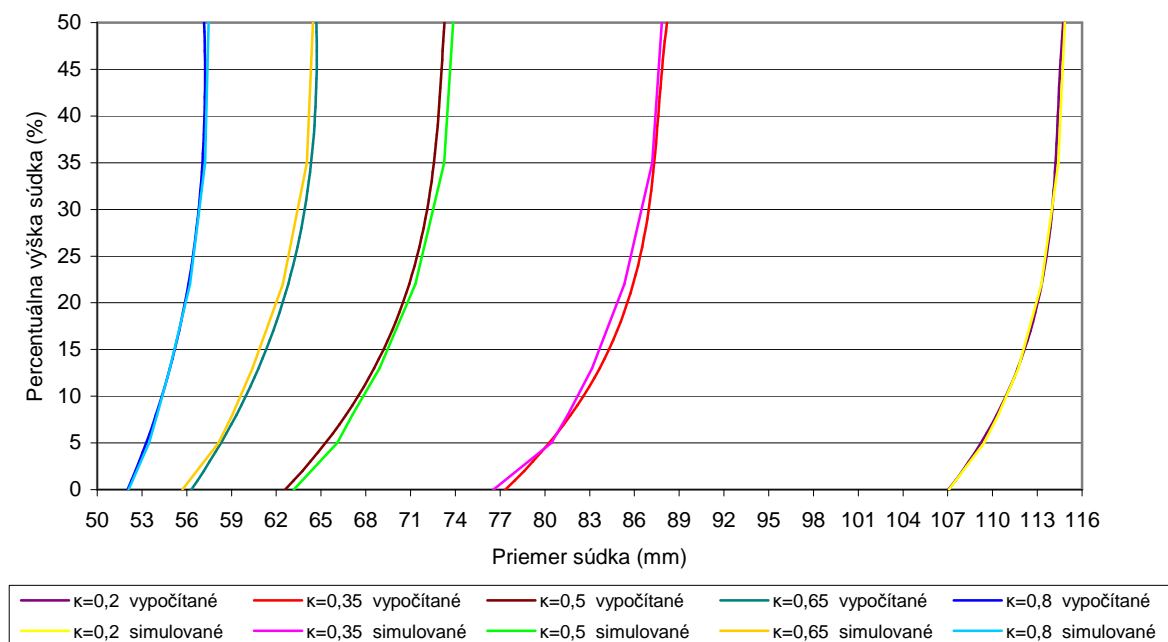
$$Y = a + b_1 \cdot X + b_2 \cdot X^2 + b_3 \cdot X^3, \quad [18]$$

$$Y = Y_a + Y_{b1} \cdot X + Y_{b2} \cdot X^2 + Y_{b3} \cdot X^3, \quad [19]$$

kde za X sa dosádza percentuálna výška (v rozsahu $0 \div 50\%$ h) a výsledná hodnota Y bude priemer súdka v určitej percentuálnej výške a pri určitom ubíjacom pomere κ .

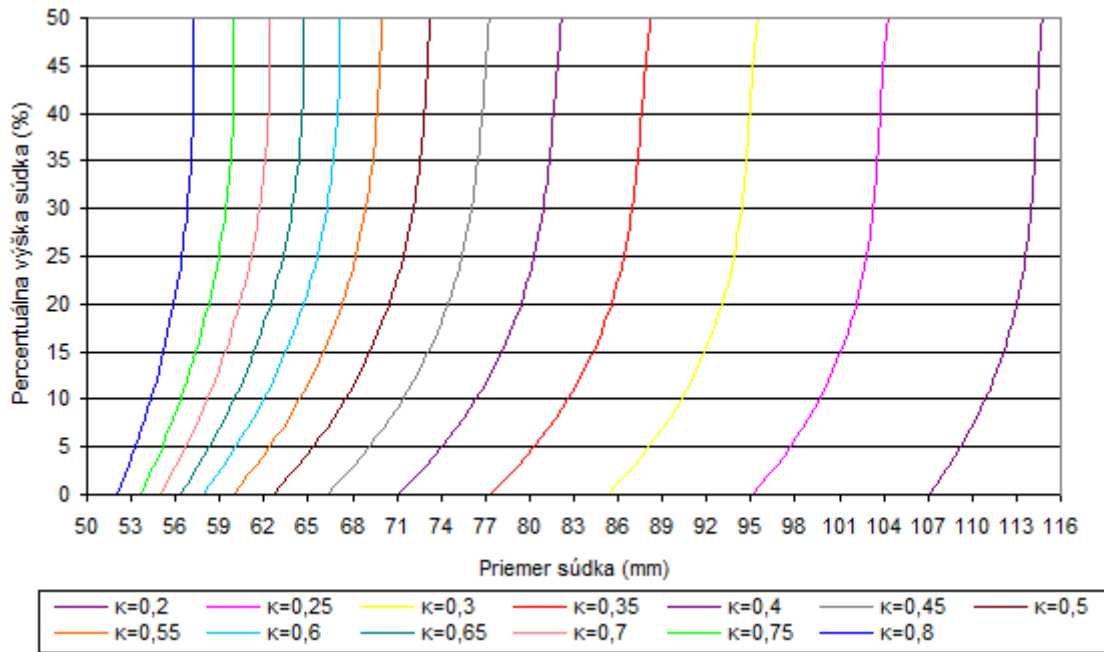
Nomogram povrchových kriviek súdka po ubíjaní

Z výsledného polynómu 3. stupňa [19] pre ubíjacie pomery $\kappa = (0,2 \div 0,8)$ sa dosadzovaním hodnôt κ a percentuálnej výšky získali priemery súdka vo výške od 0 do 50 % h . Získané hodnoty sa zakreslili do grafickej závislosti a porovnali sa s ich príslušnými grafickými závislosťami, ktoré sa simulovali (obr. 38).



Obr. 38. Grafická závislosť na porovnanie vypočítaných a simulovaných povrchových kriviek súdka

Potom sa zistilo, že krivky vypočítané a simulované sa zhodujú dosť presne. Po tomto zistení sa vypočítali v ubíjacom rozsahu $\kappa = (0,2 \div 0,8)$ aj ďalšie hodnoty na zostrojenie nomogramu. Potom bol zostrojený nomogram pre ubíjací rozsah $\kappa = (0,2 \div 0,8)$, ktorý je na obr. 39.



Obr. 39. Nomogram na určenie tvaru súdka pre oceľ STN 41 4140 s priemerom polotovaru 50 mm

V práci pri simuláciách sa vychádzalo z údajov použitých pri experimente, aby výsledný nomogram mal uplatnenie v praxi. Jeho využitie je obmedzené na vstupné hodnoty použité v experimente a potom aj v simulácii. Nomogram je platný pri dodržaní týchto základných vstupných hodnôt:

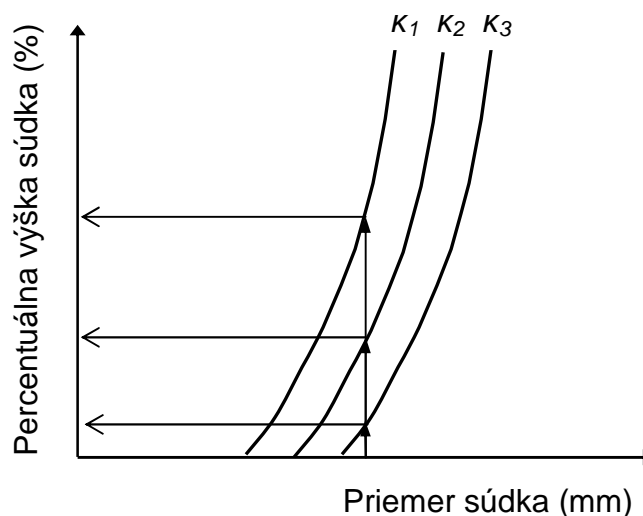
- ◆ priemer východzieho polotovaru $d_0 = 50 \text{ mm}$
- ◆ štíhlostný pomer $\lambda = (1 \div 2,5)$
- ◆ ubíjací pomer $\kappa = (0,2 \div 0,8)$
- ◆ materiál STN 41 4140.

Ďalej treba dodržať ostatné parametre, ktoré boli spomenuté na začiatku kapitoly 5.1. Po dodržaní všetkých týchto parametrov je nomogram využiteľný v praxi.

Vytvorený nomogram (obr. 39) má slúžiť, ako už bolo povedané, ako pomôcka pri navrhovaní predkovacej (prvej) operácie pri zápustkovom kovaní, ak sa uvažuje, že do zápustkovej dutiny sa použije ubíjaný valcový polotovar.

Pri použití si používateľ (technolog, konštruktér) zistí, aký je priemer zápustkovej dutiny, do ktorej pôjde ubitý predkovok. Tento priemer nanesie do nomogramu na os x a po vynesení kolmice do nomogramu sa kolmica pretne buď s jednou krivkou, alebo s viacerými krivkami. Potom si zistí v legende grafu, aký ubíjací pomer κ predstavujú tie pretínajúce sa krivky, a na

osi y si zistí v akej percentuálnej výške súdka bude daný priemer, ktorý hľadá. Ďalej si používateľ sám vyberie, ktorú krivku chce použiť (obr. 40).



Obr. 40. Postup odčítavania z nomogramu

Keď vie, ktorú krivku použije, sám si zvolí šťahlostný pomer λ v rozsahu 1 až 2,5, ale priemer polotovaru musí byť 50 mm a materiál STN 41 4140. Polotovar so zvoleným šťahlostným pomerom sa potom bude ubíjať na ubíjací pomer daný zvolenou krivkou. Po ubíjaní bude mať valcový polotovar tvar súdka taký, ako je v nomograme.

5.2 Vplyv koeficientu trenia na tvar súdka

V experimente ide o skúmanie vplyvu trenia na tvorbu súdka po ubíjaní za tepla a následnej matematizácii získaných výsledkov. Porovnávali sa výsledky získané zo simulačných programov MSC.SuperForge a Antares. Pre objektívne výsledky boli použité rovnaké vstupné údaje v obidvoch simulačných programoch, ktoré zodpovedajú reálnym hodnotám používaným v praxi, ako sú: materiál ubíjaného valčeka, rozmery ubíjaného valčeka, ubíjací pomer, parametre tvárniaceho stroja, počiatočné teploty valčeka, nástroja a okolia. Tieto boli zadané ako vstupné údaje do simulačných programov pri simulácii (tab. 7). Pri simulácii boli použité parametre tvárniaceho stroja LZK 2500, ktorý sa používa aj v praxi.

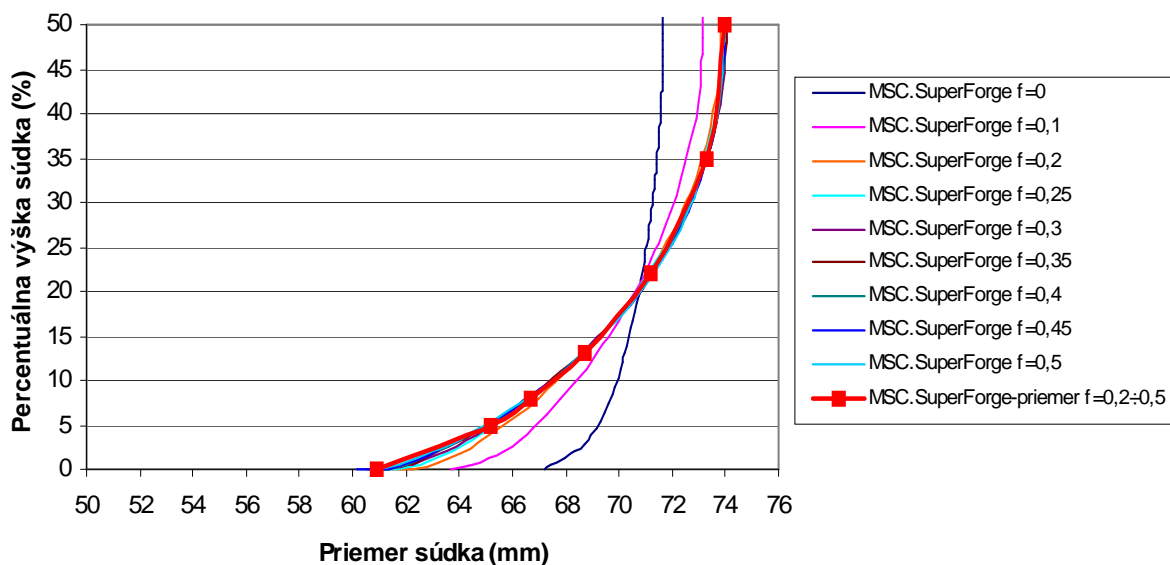
Vstupné údaje	MSC.SuperForge	Antares
počiatočná teplota polotovaru [°C]	1120	1120
počiatočná teplota nástroja [°C]	20	20
teplota okolia [°C]	20	20
priemer ubíjaného valčeka [mm]	50	50
výška ubíjaného valčeka [mm]	110	110
materiál ubíjaného valčeka	DIN 1.7035	AISI 5120

Tvar súdka po ubíjaní bol získaný pri meniacom sa koeficiente trenia f , konštantnom štvorholstnom pomere $\lambda = \frac{h_0}{d_0}$ a konštantnom ubíjacom pomere $\kappa = \frac{h}{h_0}$. Koeficient trenia bol v rozmedzí $0 \leq f \leq 0,5$, štvorholstný pomer $\lambda = 2,2$ a ubíjací pomer $\kappa = 0,5$.

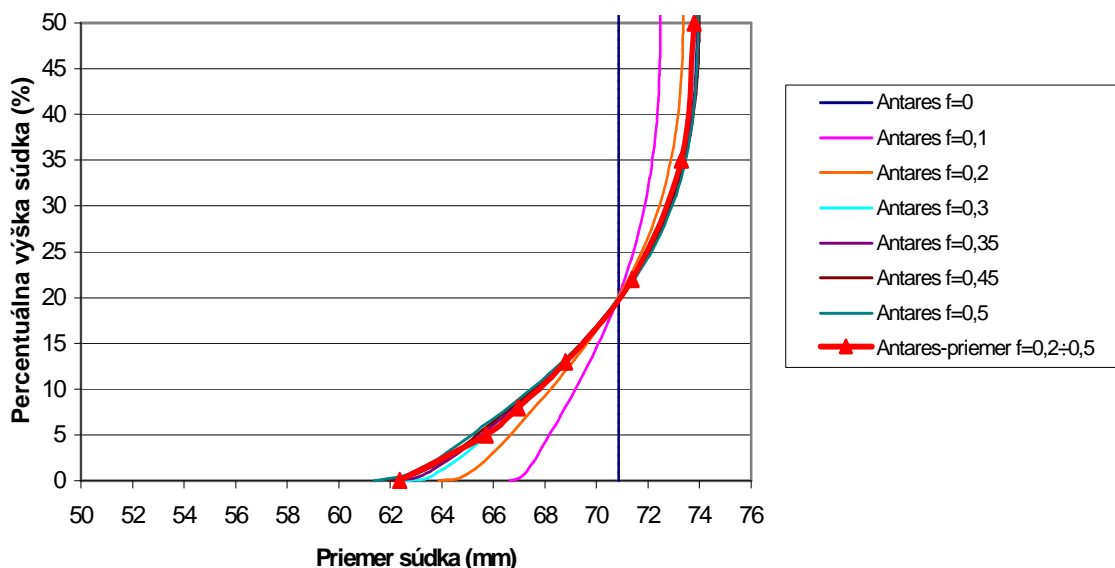
Stláčaním sa skúšobný valček zmenil na tvar súdka. Zmerali sa jednotlivé priemery súdka v príslušných percentuálnych výškach tak isto, ako to bolo popísané v predchádzajúcej kapitole.

Z nameraných výsledkov v simuláciách sa zostrojili grafické závislosti percentuálnej výšky súdka od priemeru súdka (obr. 41, obr. 42). Pri závislostiach získaných simuláciou sa zistilo, že krivky získané pri koeficiente trenia $f = 0,2 \div 0,5$ sú blízko seba s minimálnymi rozdielmi (aj keď v programe Antares hodnota $f = 0,2$ nie je až tak tesne vedľa). Z toho vyplýva, že pri meniacom sa koeficiente trenia v tomto rozsahu, ak ubíjame na ten istý ubíjací pomer a s tým istým štvorholstným pomerom vstupného valčeka, krivka súdkovitosti je približne vždy rovnaká. Iba pri koeficientoch trenia v rozsahu $f = 0 \div 0,2$ je vidieť, že krivky súdkovitosti sa veľmi líšia.

Z grafických závislostí vplyvom toho, že krivky súdkovitosti sú v danom rozsahu ($f = 0,2 \div 0,5$) blízko seba, sa z hodnôt v tomto rozsahu získaných simuláciou vypočítala stredná aritmetická hodnota priemeru súdka, ktorá je zakreslená v grafoch (obr. 41, obr. 42).

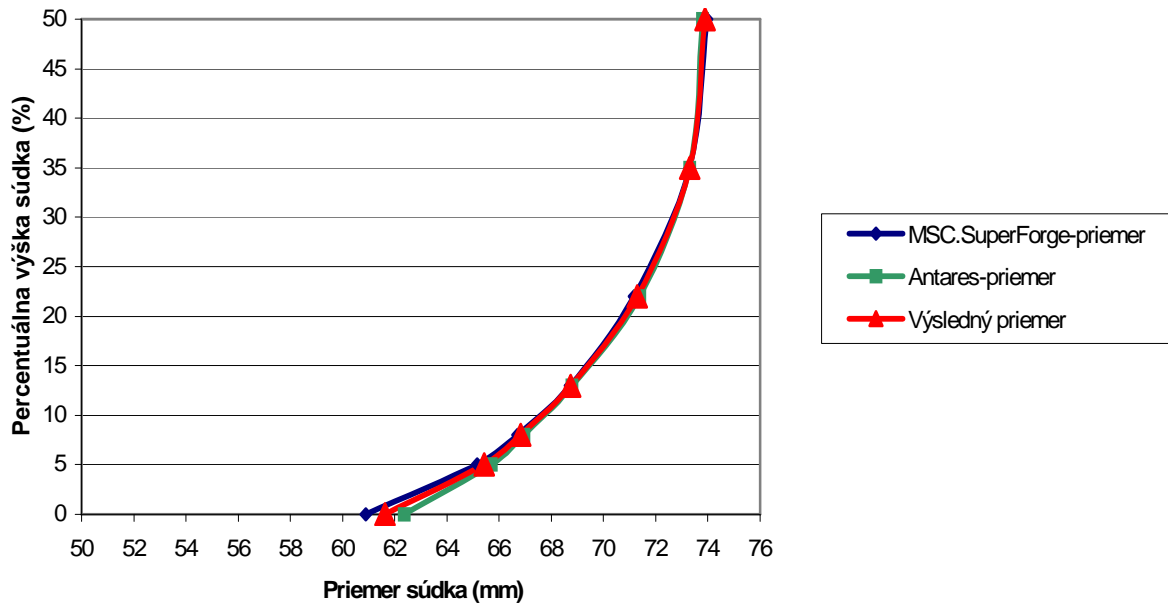


Obr. 41. Grafická závislosť povrchových kriviek súdka simulovaných v programe MSC.SuperForge



Obr. 42. Grafická závislosť povrchových kriviek súdka simulovaných v programe Antares

Porovnaním priemerných hodnôt priemerov súdkov pri simuláciách vykonaných v simulačných programoch MSC.SuperForge a Antares sa zistilo, že aj tieto dve krivky súdkovitosti sú blízko seba a pre zjednodušenie a následnú matematizáciu možno aj z týchto kriviek vytvoriť výsledný aritmetický priemer (obr. 43). Tento výsledný aritmetický priemer už bude zahŕňať výsledky z oboch simulačných programov.



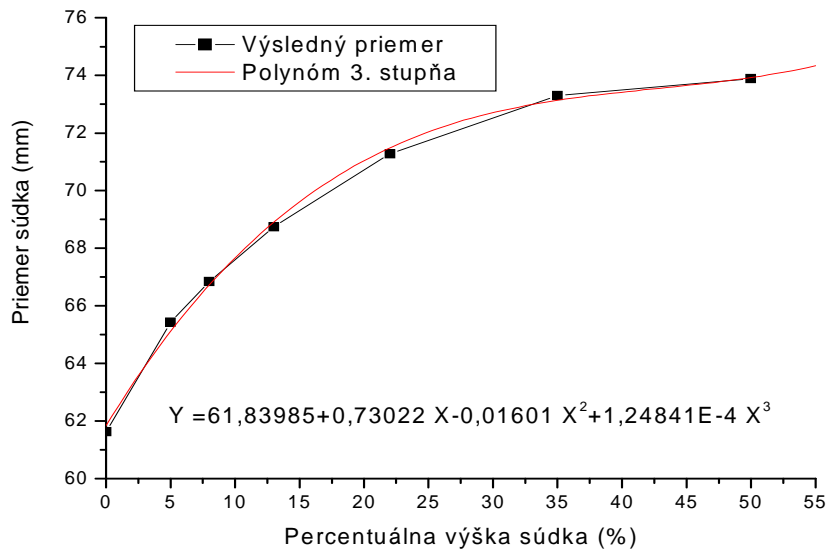
Obr. 43. Grafická závislosť priemerných povrchových kriviek súdka pre koeficient trenia $f = 0,2 \div 0,5$

Z dosiahnutých výsledkov bolo snahou znovu získať aj matematické vyjadrenie pre tvar súdka. Matematické vyjadrenie sa robilo rovnakým spôsobom ako v predchádzajúcej kapitole, a to pomocou numerických regresných metód. V programe Origin sa aproximoval polynómom 3. stupňa získaný výsledný priemerný tvar súdka. Všeobecný tvar polynómu 3. stupňa je:

$$Y = a + b_1 \cdot X + b_2 \cdot X^2 + b_3 \cdot X^3, \quad [20]$$

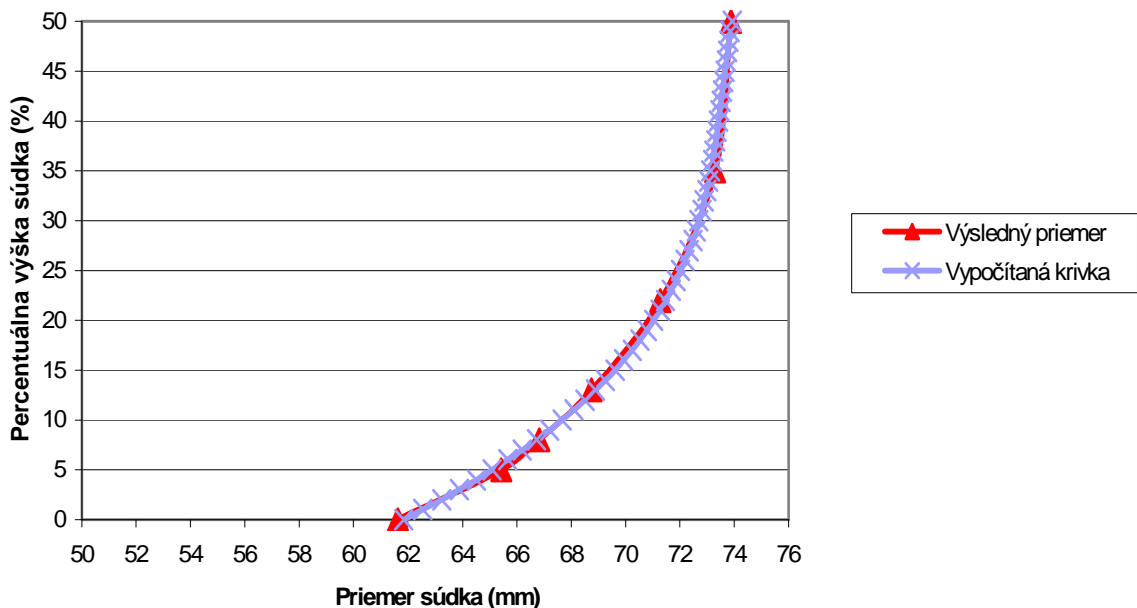
kde a , b_1 , b_2 , b_3 sú konštanty (nazývané aj regresné) a Y , X sú premenné.

Preložením krivky vzniklo matematické vyjadrenie krivky v tvare polynómu 3. stupňa (obr. 44).



Obr. 44. Výsledný priemerný tvar súdka preložený polynómom 3. stupňa

Z výsledného polynómu 3. stupňa sa dosadzovaním hodnôt percentuálnej výšky za „X“ získali priemery súdka vo výške od 0 do 50 % h . Získané hodnoty sa zakreslili do grafickej závislosti a porovnali sa s príslušnou grafickou závislosťou (obr. 45).



Obr. 45. Porovnanie priemerného tvaru súdka s tvarom súdka vypočítaným z polynómu pre koeficient trenia $f = 0,2 \div 0,5$

Porovnaním získaných výsledkov zo simulácií ubíjania valcového polotovaru sa získalo matematické vyjadrenie tvaru súdka pre daný rozsah koeficientu trenia $f = 0,2 \div 0,5$. Tvar súdka sa stanovil rovnicou (obr. 44) a grafickou závislosťou (obr. 45). Túto grafickú závislosť možno nazývať aj nomogramom, ktorý platí pre dané vstupné podmienky, z ktorých sa

vychádzalo pri simuláciách, a preto je tiež snahou tieto podmienky, ktoré obmedzujú použitie nomogramu, odstrániť na minimum.

Ďalej je vidieť aj vplyv trenia (koeficientu trenia) na výsledný tvar súdka. Z grafických závislostí (obr. 41, obr. 42) je aj vidieť, že zvyšovaním koeficientu trenia pri ubíjaní je zabrzdenie deformácie materiálu v oblasti kontaktných plôch s nástrojom tak, ako to popisuje aj teória tvárnenia. Priemer na čele súdka sa stále znižuje so zvyšujúcim sa koeficientom trenia.

Z grafických závislostí (obr. 41, obr. 42) možno ešte pozorovať, že krivky pri jednotlivých koeficientoch trenia sa pretínajú v určitej úzkej oblasti. Preto možno povedať, že táto úzka oblasť nezávisí od koeficientu trenia, lebo stále pri rôznych koeficientoch trenia sú priemery súdkov v tejto oblasti skoro rovnaké. Táto oblasť je približne vo výške 20 % a priemer súdka v tejto výške je približne 70,8 mm.

ZÁVER

Táto monografia sa zaoberá ubíjaním za tepla. Pri ubíjaní za tepla, ako jednej zo základných technologických operácii zápusťkového kovania, je dôležitý tvar súdka, ktorý musíme poznať predtým ako predkovok vložíme do zápusťky, najmä pri sériovej výrobe a mechanizácii. Predkovok, ktorý má súdkovitý tvar, musí byť presne vycentrovaný v dutine zápusťky.

V práci sú ďalej popísané a vysvetlené teoretické poznatky majúce vplyv na súdkovitosť, ktoré nesmieme prehliadnuť. V závislosti od veľkosti jednotlivých vplyvov sa bude súdkovitý tvar po ubíjaní meniť.

Simulačné programy vhodné na operáciu ubíjania za tepla sú uvedené v práci. Všetky programy sa zaoberajú objemovým tvárnením. Pre operáciu ubíjania za tepla boli použité simulačné programy ANTARES a MSC.SuperForge, ktoré sú k dispozícii na katedre tvárnenia.

V práci sa týmito simulačnými programami simuloval proces ubíjania za tepla pri zmene šťíhlostného pomeru a koeficientu trenia a následne sa vyhodnocoval tvar súdka. Tento tvar súdka bol ďalej vyjadrený pomocou polynómov 3. stupňa. Matematické vyjadrenie s dostatočnou presnosťou popisuje dosiahnuté výsledky získané simuláciou procesu a experimentmi v praxi.

Ďalej zo získaných matematických vyjadrení tvaru súdka sa zostrojili grafické závislosti, ktoré možno nazývať aj nomogramami pre daný druh materiálu s konkrétnou oblasťou pôsobnosti. V grafických závislostiach sú zohľadnené vplyvy, ktoré pôsobia na súdkovitosť pri ubíjaní a boli riešené v práci.

Takto je možné hocikedy si z nomogramu alebo priamo z matematického vyjadrenia v ľubovoľnej výške odčítať priemer súdka a netreba to získavať časovo aj finančne náročnými experimentmi priamo v praxi. Tým, že poznáme tvar súdka, vieme už pri navrhovaní zápusťkovej dutiny, ako a kde bude súdok (predkovok) vycentrovaný po vložení do dutiny.

Po odskúšaní a zapracovaní v praktických podmienkach v kováčňach je možné takýmto spôsobom zistiť matematické vyjadrenie a následne zostrojiť nomogram pre ľubovoľný druh materiálu používaný v konkrétnej kováčni.

ZOZNAM BIBLIOGRAFICKÝCH ODKAZOV

1. BAČA, J., BÍLIK, J. *Technológia tvárnenia*. Bratislava: Vydavateľstvo STU, 2000, 235 s. ISBN 80-227-1339-2
2. MAÁR, K. *Teória tvárnenia*. Košice: Vydavateľstvo VŠT, 1988, 247 s.
3. MALOVCOVÁ, I. *Stanovenie súdkovitosti ubíjaného klátika za tepla*. Diplomová práca. MTF STU Trnava, 1993, 63 s.
4. HAŠEK, V. a kol. *Kování*. Praha: Vydavateľstvo SNTL, 1965, 732 s.
5. BLAŠČÍK, F. *Technológia objemového tvárnenia*. Bratislava: Vydavateľstvo ALFA, 1984, 256 s.
6. HAŠEK, V. *Základy tváření kovů*. Praha: SNTL, 1969, 216 s.
7. SOMMER, B. *Technologie kování*. Ostrava: VŠB, 1978, 200 s.
8. ŽÍDEK, M., DĚDEK, V., SOMMER, B. *Tváření oceli*. Praha: Vydavateľstvo ALFA, 1988, 520 s.
9. POČTA, B. *Základy teorie tváření kovů*. Praha: Vydavateľstvo SNTL, 1966, 512 s.
10. HRIVŇÁK, A., PODOLSKÝ, M., DOMAZETOVÍČ, V. *Teória tvárnenia a nástroje*. Bratislava: Vydavateľstvo ALFA, 1992, 338 s. ISBN 80-05-01032-X
11. BLAŠČÍK, F., POLÁK, K. *Teória tvárnenia*. Bratislava: Vydavateľstvo ALFA, 1985, 376 s.
12. FOREJT, M., PÍŠKA, M. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006, 225 s. ISBN 80-214-2374-9
13. BÉKÉS, J. a kol. *Strojárska ročenka 1985*. Bratislava: Vydavateľstvo Alfa, 1984, 304 s.
14. FOREJT, M. *Teorie tváření*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004, 168 s. ISBN 80-214-2764-7
15. FOREJT, M. *Teorie tváření a nástroje*. Brno: VUT, 1991, 187 s. ISBN 80-214-0294-6
16. VAJO, P. a kol. *Tvárnenie a tvárniace stroje. Návod k cvičeniam*. Bratislava: Vydavateľstvo SVŠT, 1966, 161 s.
17. KREMER, R., OBROUČKA, K. *Ohěv kovů*. Praha: Vydavateľstvo SNTL, 1974, 424 s.
18. JÍLEK, L., ČERMÁK, J. Základní zákony tváření při kování. In: *Kovárenství*. č. 35 (2009), s. 33-43. ISSN 1213-9829
19. STOROŽEV, M. V., POPOV, J. A. *Teória tvárnenia kovov*. Bratislava: Vydavateľstvo ALFA, 1978, 488 s.

20. HRIVŇÁK, A., POLÁK, K. *Teória tvárnenia a nástroje*. Bratislava: Vydavateľstvo ALFA, 1989, 342 s.
21. SOMMER, B. Zvláštnosti pëchování různorodých modelových materiálů. In: *Hutnické listy*, 1972, č. 11, s. 797–800.
22. ELFMARK, J. *Tváření kovů*. Praha: Vydavateľstvo SNTL, 1992, 528 s. ISBN 80-03-00651-1
23. BAČA, J. Objemové tvárnenie. *Zápusťkové kovanie*. Bratislava : STU, 2005, 141 s. ISBN 80-227-2176-X
24. BLAŠČÍK, F. *Teória a metodika tvárnenia - Teória tvárnenia*. Bratislava: Vydavateľstvo ALFA, 1972, 224 s.
25. TOLNAY, M.. *Vyšetovanie súčiniteľa trenia v tvárniacich procesov*. Bratislava: SĵF SVŠT, 1972, 24 s.
26. LIDMILA, Z. Vyhodnocování součinitele tření při objemovém tváření. In: *FORM 2002*. Brno : VUT, 2002, s. 47 – 50.
27. POLÁK, K. *Teória a metodika tvárnenia*. Bratislava: SVŠT, 1974, 228 s.
28. KOVÁČ, A., JENKUT, M. *Tvárniace stroje*. Bratislava: Vydavateľstvo ALFA, 1978. 816 s.
29. RUDOLF, B., KOPECKÝ M. *Tvářecí stroje. Základy výpočtů a konstrukce*. Praha: SNTL, 1979, 408 s.
30. DRASTÍK, F., ELFMARK, J. a kol. *Plastometry a tvaritelnost kovů*. Praha: SNTL, 1977, 392 s.
31. BAČA, J., BÍLIK, J. *Nekonvenčné metody tvárnenia. Laboratórny zošit: Tvárnenie výbuchom*. Trnava: Vydavateľstvo STU, 1991, 25 s.
32. SPIŠÁK, E. *Matematické modelovanie a simulácia technologických procesov - ťahanie*. Košice: TYPO Press, 2000, 156 s. ISBN 80-7099-530-0
33. MÁDLE, L. Počítačová podpora tváření. In: *Technik č.2*. Praha : ČVUT, 1994, s. 28 - 29.
34. KURIC, I. a kol. *Počítačom podporované systémy v strojárstve*. Žilina: Vydavateľstvo EDIS, 2002, 351 s. ISBN 80-7100-948-2
35. KUNEŠ, J., VAVROCH, O., FRANTA, V. *Základy modelování*. Praha: STNL, 1989, 264 s.
36. MOLNÁR, V. a kol. *Ocelové laná*. (Vysokoškolská učebnica). Košice: Technická univerzita v Košiciach, 2006, 213 s. ISBN 80-8073-629-4
37. EVIN, E. Modelling of friction conditions at deep-drawing process. In: *Hutnické listy*. Vol. 63, no. 4 (2010), s. 57-60. - ISSN 0018-8069

38. Forge 2, 3 - www.transvalor.com/index.php?rub=79&mo=3&so=79 23.3.2002
39. MSC.SuperForge - www.mscsoftware.com/products/products_detail.cfm?PI=28
28.3.2002
40. MSC.SuperForm - www.mscsoftware.com/products/products_detail.cfm?PI=9 28.3.2002
41. QForm2D - www.qform3d.com/en/90.html 25.3.2002
42. QForm3D - www.qform3d.com/en/91.html 25.3.2002
43. BÍLIK, J. KAPUSTOVÁ, M. Využitie výpočtovej techniky v oblasti tvárnenia. In: *Trendy technického vzdelávania 2000*, Sborník. Olomouc : Univerzita Palackého v Olomouci, 2000, s .161-164. ISBN 80-244-0107-X
44. ČINÁK, P. Porovnanie programov LS DYNA 3D a FORM 2D pri simulácii ubíjania. In: *FORM 2000*, 5. medzinárodná konferencia. Brno: VUT Brno, 2000, s. 171-174.
45. Simufact.forming - http://www.simufact.de/en/solutions/sol_form.html 23.9.2009
46. Simufact.forming - <http://www.ec-e.cz/cz/simufact/> 24.11.2009
47. DEFORM - <http://www.deform.com/> 27.8.2012
48. NagForge - <http://www.nagform.com/Sites/NagForgeOverview.htm> 25.9.2012
49. ULÍK, A. Skúmanie technologických parametrov pretvorenia simulačným programom. In: *CO-MAT-TECH 2000*, 8. medzinárodná vedecká konferencia. Časť: Strojárske výrobné technológie a zariadenia. Trnava: STU Bratislava, 2000, s. 321–326. ISBN 80-227-1413-5
50. KUNEŠ, J. *Modelování tepelných procesů*. Praha: SNTL, 1989, 424 s. ISBN 80-03-00134-X
51. EVIN, E. Evaluation of friction coefficient for simulation of stamping. In: *Zeszyty naukowe*. No. 13 (2009), s. 126-133. - ISSN 1897-2683
52. HRIVŇÁK, A., EVIN, E. *Lisovateľnosť plechov. Predikcia lisovateľnosti oceľových plechov s vyššími pevnostnými vlastnosťami*. Košice: ELFA, 2004, 223 s. ISBN 80-89066-93-3
53. UES Software Inc. Dayton, USA: ANTARES – Tutorial & Exercise Manual. Based on Version 4.3. 1998.
54. LACIKA, R. *Simulácia kovania výkovku ozubeného kolesa*. Diplomová práca. MTF STU Trnava, 2000. 59 s.
55. BELICOVÁ, M. *Porovnanie technologických vplyvov pri ubíjaní pomocou počítačovej simulácie*. Diplomová práca. Trnava: MTF STU, 2006, 82 s.
56. SOBOTA, R., BAČA, J., TITTEL, V. Der Vorschlag der Tonnenform des Vorschmiedestückes für das Gesenkschmieden. In: *Mašinstrojienije i technosfera XXI*

- veka* : Sbornik trudov / konf.(heslo) Meždunarodnaja naučno-techničeskaja konferencija. XIII. Sevastopol, 11-16 sent. 2006. - Doneck : DonNTU, 2006. - ISBN 966-7907-20-1. – s. 171-176, Tom 5
57. SOBOTA, R., BAČA, J. Barrel`s shape numerical justification after upsetting by computer simulation. In: *IV.elektronnaja zaočnaja konferencija "Molodež, studenčestvo, nauka XXI.veka"*. - Iževsk : IŽGTU, 2004. - ISBN 5-7526-0185-1. - s. 83-88
58. SOBOTA, R., BAČA, J. Numerické zdôvodnenie tvaru súdka po ubíjaní pomocou počítačovej simulácie. Barrel`s shape numerical justification after upsetting by computer simulation. In: *METAL 2004 : Sborník prednášok. Proceedings / konf.(heslo) Mezinárodní konference metalurgie a materiálů. 13. Hradec nad Moravicí, Česká republika, 18.-20.5.2004.* - Ostrava : Tanger, 2004. - ISBN 80-85988-95-X
59. SOBOTA, R., TITTEL, V. Skúmanie vplyvu štíhlostného pomeru na tvar súdka po ubíjaní. Investigation of the effect of slenderness ratio on the shape of barrel after setting. In: *METAL 2007, / konf.(heslo) Mezinárodní konference metalurgie a materiálů. 16. Hradec nad Moravicí, 22.-24.5.2007.* - Ostrava : Tanger, 2007. - ISBN 978-80-86840-33-8. – CD
60. SOBOTA, R. Skúmanie vplyvu trenia na tvar súdka po ubíjaní. In: *Nové technologie kování : 6. kovárenská konference. Sborník přednášek. Nové Město na Moravě, 15.-16.5.2007.* - Brno : Svaz kováren České republiky, 2007. - ISBN 978-80-239-8938-0
61. SOBOTA, R., TITTEL, V. Skúmanie vplyvu trenia na tvar súdka po ubíjaní. In: *Forming 2008, Plasticita materiálů. Sborník zkrácených verzí referátů z 15. mezinárodní konference. Brno, 10.-13.9.2008.* - Ostrava : VŠB - TU Ostrava, 2008. - ISBN 978-80-248-1795-8. - s. 53
62. BAČA, J., SOBOTA, R., ULÍK, A. Matematické vyjadrenie tvaru súdka po ubíjaní za tepla. In: *Akademická Dubnica, 2003 : Zborník prednášok / konf.(heslo) Medzinárodná vedecká konferencia. 9. Dubnica nad Váhom, 18.-19.6.2003 (2003).* - Bratislava : STU v Bratislave. - ISBN 80-227-1915-3. - s. 9-12
63. SOBOTA, R., BAČA, J. Matematické vyjadrenie tvaru súdka po ubíjaní. In: *Forming, 2004 : Plasticita materiálů / konf.(heslo) Medzinárodná konferencia. 11. Štrbské Pleso, 9.-11.9.2004.* - Bratislava : STU v Bratislave, 2004. - ISBN 80-227-2091-7. - s. 244-249
64. SOBOTA, R., BAČA, J., ULÍK, A. Mathematical expression of shape of cask after hot upsetting. In: *CO-MAT-TECH 2003 : 11. medzinárodná vedecká konferencia.* - Bratislava : STU v Bratislave, 2003. - ISBN 80-227-1949-8. - s. 936-941

65. SOBOTA, R., BAČA, J. Numerické zdôvodnenie tvaru súdka po ubíjaní pomocou počítačovej simulácie. Cask`s Shape Numerical Justification after Upsetting by Help of Computer Simulation. In: *DOKSEM 2003*, / konf.(heslo) Medzinárodný seminár doktorandov. Rajecké Teplice, 11.-12.11.2003. - Žilina : Žilinská univerzita, 2003. - ISBN 80-8070-153-9. - s. 60-63
66. SOBOTA, R., TITTEL, V., BAČA, J. Skúmanie vplyvu štíhlostného pomeru na tvar súdka po ubíjaní. In: *Forming 2007*, Plasticita materiálov. 14. medzinárodná vedecká konferencia. Podbanské - Vysoké Tatry, 12.-15.9.2007. - Bratislava : STU v Bratislave, 2007. - ISBN 978-80-227-2702-0. - s. 259-264
67. BAČA, J., SOBOTA, R., ULÍK, A. Matematické vyjadrenie tvaru súdka po ubíjaní za tepla. In: *4. kovárska konferencia*. - Brno : SKČR, 2003. - s. 144-147
68. SOBOTA, R. *Numerická simulácia ubíjania a jej experimentálna verifikácia* : Dizertačná práca. - Trnava : STU v Bratislave MTF UVTE KT, 2009. - 96 s., príl. s. + 1 CD-ROM, autoreferát. - Odbor: Strojárske technológie a materiály 23-07-9
69. BAČA, J., BÍLIK, J., ŽATKOVIČ, J. *Experimentálne metódy v tvárnení*. Bratislava : Vydavateľstvo STU, 2000, 228 s. ISBN 80-227-1303-1
70. ŽATKOVIČ, J., BAČA, J., BAČA, M. Vyrovnávanie nameraných závislostí regresnými metódami a dôsledky extrapolácie. In: *Vedecké práce Materiálovotechnologickej Fakulty STU so sídlom v Trnave*. Bratislava : STU, 1999, zväzok 7, s. 103 – 110.

OBSAH

Zoznam skratiek a symbolov	5
Úvod	6
1 Prehľad poznatkov o ubíjaní za tepla.....	7
2 Analýza podmienok tvorenia súdkovitosti pri ubíjaní.....	9
2.1 Analýza napäťovo-deformačných stavov a energosilové charakteristiky	9
2.2 Analýza procesu ubíjania z hľadiska veľkosti pretvorenia	13
2.3 Analýza procesu ubíjania pri premiestňovaní častíc	16
2.4 Príčiny nerovnomernosti pretvorení	17
2.5 Vplyv faktorov na súdkovitosť telesa.....	18
2.5.1 Vplyv štíhlostného pomeru λ na súdkovitosť	18
2.5.2 Vplyv súčiniteľa trenia na súdkovitosť	21
2.5.3 Vplyv rýchlosti tvárnenia a rýchlosti pretvorenia na súdkovitosť	23
2.5.4 Vplyv teploty tvárnenia na súdkovitosť	26
3 Modelovanie a simulácia v tvárnení	28
3.1 Počítačová podpora v strojárstve.....	28
3.2 Modelovanie a simulácia technologických procesov	30
3.2.1 Simulačné modely	33
3.3 Programy pre simuláciu procesov kovania	34
4 Simulačné programy na simuláciu procesu ubíjania	37
4.1 Simulácia na simulačnom programe Antares	37
4.1.1 Zadávanie vstupných údajov	39
4.1.1.1 Geometria objektov	40
4.1.1.2 Tvárniaci stroj.....	41
4.1.1.3 Materiál	42
4.1.1.4 Mazivo.....	43
4.1.1.5 Okrajové podmienky	45
4.1.1.6 Počiatočné podmienky	45
4.1.1.7 Priradenie charakteristických znakov a vlastností geometrickým objektom	46
4.1.1.8 Nastavenie parametrov simulácie.....	46
4.1.2 Simulácia tvárniaceho procesu	47
4.1.3 Výsledky simulácie	47

4.2 Simulácia na simulačnom programe MSC.SuperForge	48
4.2.1 Zadávanie vstupných údajov	51
4.2.1.1 Nastavenie vlastností procesu	51
4.2.1.2 Geometria polotovaru a nástroja	52
4.2.1.3 Definovanie materiálu	52
4.2.1.4 Definovanie parametrov stroja	53
4.2.1.5 Definovanie trenia	53
4.2.1.6 Definovanie teploty	54
4.2.1.7 Nastavenie parametrov simulácie.....	55
4.2.2 Spustenie simulácie	56
4.2.3 Výsledky simulácie	56
5 Dosiahnuté výsledky	57
5.1 Vplyv štíhlostného pomeru na tvar súdka	57
5.1.1 Počítačová simulácia v simulačných programoch Antares a MSC.SuperForge	59
5.1.2 Počítačová simulácia v simulačnom programe Antares	63
5.2 Vplyv koeficientu trenia na tvar súdka.....	68
Záver	74
Zoznam bibliografických odkazov	75

Autor: Ing. Róbert Sobota, PhD.
Názov: ZISŤOVANIE VPLYVU FAKTOROV
NA SÚDKOVITOSŤ PRI UBÍJANÍ ZA TEPLA
POMOCOU NUMERICKEJ SIMULACIE
DETERMINATION OF INFLUENCE OF VARIOUS
FACTORS ON BARRELLING AT HOT
UPSETTING USING NUMERICAL SIMULATION

Miesto vydania: Trnava
Vydavateľ: AlumniPress
Rok vydania: 2012
Vydanie: prvé
Rozsah : 81 strán
Edícia: Vedecké monografie
Edičné číslo: 4/AP-VM/2012

Publikácie vydávané v tejto edícii prešli jazykovou korektúrou.

ISBN 978-80-8096-178-7
EAN 9788080961787

zverejnené na <http://www.mtf.stuba.sk>