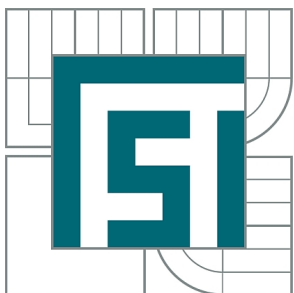


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

TVÁŘENÍ ZA SUPERPLASTICKÝCH PODMÍNEK

SUPERPLASTIC FORMING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

RADEK GRYZC

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. EVA ŠMEHLÍKOVÁ, Ph.D.

BRNO 2012

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Radek Grycz

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

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

Tváření za superplastických podmínek

v anglickém jazyce:

Superplastic forming

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Jedná se o vytvoření obecného náhledu na technologii tváření za superplastických podmínek. Popis principu dané technologie a využití v praxi. V práci by měly být uvedeny používané nástroje a stroje, výhody a nevýhody dané technologie a dle možností i příklady moderních výrobních postupů a vyráběných součástí

Cíle bakalářské práce:

Provedení průzkumu v oblasti tváření za superplastických podmínek a vytvoření obecného náhledu na tuto technologii. Princip dané metody a konfrontace s konvenčními technologiemi výroby. Uvedení základních metod a shrnutí jejich záporů a kladů. Dílčím cílem je vytvoření přehledu užívaných nástrojů a strojů a dle možností i uvedení příkladů moderních výrobních postupů a vyráběných součástí. Vše by mělo být doplněné obrázkovou dokumentací.

Seznam odborné literatury:

LIDMILA, Zdeněk. Superplastické výrobní metody. Kovárenství. 2008, č. 33, s. 41-44. ISSN 1213-9289.

PADMANABHAN, Anantha K. and J. George DAVIES. Superplasticity. 1st ed. Berlin: Springer-Verlag, 1980. 146 s. ISBN 3-540-10038-5

RUSZ, Stanislav. Problematika superplastického tváření ocelí. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita, 2004. 95 s. ISBN 80-248-0693-2.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Eva Šmehlíková, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/2012.

V Brně, dne 16.11.2011

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Práce se zabývá popisem chování superplastických materiálů a metodami plošného tváření těchto materiálů. Uvádí výhody i obtíže při použití této metody a příklady produktů vyrobených tímto postupem.

KLÍČOVÁ SLOVA

Superplasticita, strukturní superplasticita, konkávní nástroj, konvexní nástroj, difuzní spojování

ABSTRACT

This work is focused on description of behavior of superplastic materials and methods of sheet forming of these materials. Lists the advantages and difficulties in using this method and examples of products made by this procedure.

KEYWORDS

Superplasticity, structural superplasticity, female forming, male forming, diffusional bonding

GRYZ, Radek *Tváření za superplastických podmínek*: bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, 2012. 28 s. Vedoucí práce Ing. Šmehlíková Eva, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Tvářeni za superplastických podmínek“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

Brno

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucí mé práce Ing. Evě Šmehlíkové, Ph.D. za vedení mé práce a vítané rady. Rád bych také poděkoval mým rodičům a mým přátelům, kteří mě po celou dobu studia podporovali.

OBSAH

Úvod	7
1 Superplasticita	8
1.1 Definice	8
1.2 Vývoj superplastického tváření	8
1.3 Podmínky a základní rozdělení superplastického tváření	9
1.3.1 Základní rozdělení superplastické deformace	9
1.4 Strukturní superplasticita	10
1.4.1 Fenomenologie strukturální superplasticity	10
1.5 Fyzikální podstata	13
1.5.1 Jevy pozorované během superplastické deformace	13
1.6 Superplasticky tvářené materiály	14
1.6.1 Metody zjemnění zrna	15
2 Metody plošného superplastického tváření	18
2.1 Tváření s konkávním nástrojem	19
2.2 Tváření s konvexním nástrojem	20
2.3 Superplastické plošné tváření a difuzní spojování	22
2.4 Příklady výrobků	23
3 Závěr	25
Použité zdroje	26
Seznam symbolů, veličin a zkratk	28

ÚVOD

S rostoucí spotřebou materiálu a stále se zvyšujícími nároky na kvalitu a produktivitu v souladu s výrobními náklady je důležitým aspektem při výrobě strojírenských součástí volba výrobního procesu. Ze základních technologií objemového a plošného tváření za tepla a za studena je odvozena dlouhá řada variant tvářecích technologií, nové technologie se stále vyvíjí. Metoda tváření za superplastických podmínek umožňuje řešit velmi úsporně výrobu tvarově složitých součástí. Zavádění této metody v oblastech strojírenské výroby se neustále rozšiřuje. A to i přesto, že nákupní cena superplastické slitiny je v porovnání s konvenčním materiálem výrazně vyšší. Tato výrobní metoda tak nachází využití mimo jiné v oblastech automobilního, leteckého, zbrojního i kosmického průmyslu.



Obr. 1: Příklady produktů vyrobených superplastickým tvářením [14]

1 SUPERPLASTICITA

1.1 Definice [3],[5]

Superplastickým procesem je označován proces plastické deformace, při kterém je dosaženo vysokého stupně přetvoření, často mnohonásobně většího, než je dosažitelné při běžné plastické deformaci.

Superplastické materiály jsou polykrystalická tělesa, která při splnění určitých (superplastických) podmínek jsou schopna dosáhnout výrazného přetvoření do porušení soudržnosti materiálu. Jako hranice superplasticity je považována hodnota tažnosti (prodloužení) $A \geq 200\%$. Na obr.1.1 je fotografie dokumentující superplastické prodloužení hliníkové slitiny $A = 1990\%$. Je známo více než 300 slitin schopných vykazovat superplasticitu.



Obr. 1.1: Vzorek před a po superplastické deformaci [7]

1.2 Vývoj superplastického tváření [5],[6]

Roku 1945 ruský vědec Anatolij Bočvar zjistil velmi neobvyklé chování slitin zinku s hliníkem při dilatometrické analýze. Profesor Bočvar jako první uvedl že tyto vlastnosti ukazují existenci jevu, který nazval superplasticitou. Výzkum těchto vlastností však probíhal již několik desetiletí.

1912 - Zřejmě první zmínka o možnosti dosažení neobvyklé plastické deformace pochází z roku 1912. Benguogh publikuje výsledky tahových zkoušek na mosazi kdy za teploty 700°C dosáhl prodloužení $A = 200\%$.

1920 - Extrémně velké plastické deformace pozorovali v tomto roce Hargreaves a Jenkins. Na slitinách Cd-Zn s eutektickým složením za pokojové teploty 20°C a rychlosti deformace $\dot{\epsilon} = 10^{-8} \text{ s}^{-1}$ byla naměřena tažnost $A = 361\%$.

1962 - V USA uveřejněn rozsáhlý článek o výsledcích výzkumu a průmyslového využití superplasticity ve výrobě v tehdejší SSSR. Poté následuje intenzivní výzkum superplastického chování různých materiálů.

70, 80, léta - Počátek hromadné výroby dílů superplastickým tvářením. Nejčastěji v leteckém a kosmickém průmyslu. Byly používány převážně slitiny Ti a Al. V letectví se tento postup stává běžně používanou výrobní technologií.

1985 - První experimenty změřené na superplastické chování keramik, intermetalik a kovů s ultrajemným zrnem.

1985 - Pokračuje výzkum superplastického chování intermetalik, materiálů perspektivních pro vysokoteplotní aplikace- TiO_2 , CaF_3 , ZrO_2 , Rh – Nb, Rh – Ti, Re – Ta.

V České republice se teorií superplastických materiálů zabývala v 70. a 80. letech pracoviště Výzkumného ústavu tvářecích strojů a technologie tváření v Brně, Státního výzkumného ústavu materiálů v Praze, Ústředního výzkumného ústavu k. p. ŠKODA, Plzeň, Výzkumného ústavu kovů, Panenské Březany a Matematicko-fyzikální fakulty Univerzity Karlovy, katedry fyziky kovů, Praha.

1.3 Podmínky a základní rozdělení superplastického tváření [5],[6]

Superplasticita je podmíněna:

- velmi jemným rovnoosým zrnem výchozího materiálu s velikostí pod $10 \mu m$
- teplotou procesu v rozmezí $T = 0,6 - 0,7 T_M [^\circ C]$, $(0,35 - 0,4 T_M)$
 T_M - teplota tavení materiálu
- rychlost deformace v rozmezí $\dot{\epsilon} = 10^{-4} - 10^{-2} [s^{-1}]$
- termodynamickou stabilitou výchozí fáze v celém průběhu zatěžování

Tyto podmínky musí platit v celém časovém průběhu tváření.

Superplasticitu vykazují zejména dvou a vícefázové kovové materiály o eutektickém, popřípadě eutektoidním složení. Existují však i výjimky - například Fe_α nebo čistý Ti.

1.3.1 Základní rozdělení superplastické deformace [2],[3],[5]

Podle podmínek, které umožňují dosáhnouti superplastického chování materiálu se rozlišuje:

- **Fázová**, neboli **transformační superplasticita** - objevuje se v polymorfních slitinách deformovaných v průběhu fázových přeměn, případně cyklováním v oblasti fázových přeměn. Tento druh superplasticity je pozorován u ocelí a u některých dalších slitin, např. Sn-Sb, Zn-Al.

- **Strukturní**, neboli **izotermická superplasticita** - je podmíněna vhodnou strukturou slitiny, zejména malou velikostí zrna. Podmínky vzniku strukturní superplasticity jsou nízká deformační rychlost a výše tvářecí teploty $T > 0,4T_{TAV}$. Tento druh má z hlediska praktického využití největší význam.
- **Subkritická superplasticita** - zvýšení deformační schopnosti a zmenšení deformačního odporu za teplot v okolí počátku fázové přeměny v tuhém stavu. Tento druh byl prozatím nejméně prozkoumán.

Výzkum superplasticity stále probíhá. Oblast strukturní superplasticity se označuje pojmem **SUPERPLASTICITA I**, ale lze se setkat i s pojmem **SUPERPLASTICITA II**. Toto označení popisuje chování nejen některých kovových, ale i nekovových a kompozitních materiálů. U kovových materiálů se jedná o tzv. **vysokorychlostní**, respektive **nízkoteplotní superplasticitu**. Tato vlastnost se projevuje u kovů s ultrajemným zrnem velikosti řádově $\approx 0,1\mu\text{m}$, připravovaných práškovou metalurgií. Materiály, které mají ultrajemné zrno s malou modifikací chemického složení, umožňují až o několik řádů vyšší rychlost deformace, popřípadě nižší tvářecí teplotu.

Výzkum superplastického chování keramik a intermetalik je velmi perspektivní. U těchto materiálů je SUPERPLASTICITA II jediná známá forma plastického chování a tedy možnost tváření.

1.4 Strukturní superplasticita [6]

Superplasticita má většinou u všech slitin společné rysy, proto ji lze chápat jako speciální typ plastické deformace, který je charakterizován nejen svou fenomenologií, ale i silným vlivem struktury na mechanické vlastnosti kovových materiálů.

Nejvýznamnější rozdíl mezi klasickou a superplastickou deformací spočívá v tom, že při klasické deformaci je přetvárný odpor silně závislý na stupni přetvoření a méně na deformační rychlosti, kdežto u superplastické deformace je tomu naopak, přetvárný odpor závisí silně na deformační rychlosti a slabě na stupni přetvoření.

1.4.1 Fenomenologie strukturální superplasticity [6]

Stabilita procesu, neboli odpor tělesa k tvorbě krčku při tažení je jedna z nejcharakterističtějších vlastností superplastické deformace. Tuto stabilitu je možno vysvětlit ze vztahu popisujícího závislost přetvárného odporu σ_p na velikosti deformace ϵ a deformační rychlosti $\dot{\epsilon}$, který lze pro izotermický děj zapsat ve tvaru 1.1:

$$\sigma_p = C \cdot \epsilon^n \cdot \dot{\epsilon}^m \quad (1.1)$$

C - empirická materiálová konstanta

n - exponent deformačního zpevnění

m - koeficient rychlostní citlivosti přetvárného odporu

U materiálu se slabou závislostí přetvárného odporu na deformační rychlosti lze vztah upravit na tvar 1.2:

$$\sigma_p = C \cdot \epsilon^n \quad (1.2)$$

a exponent deformačního zpevnění vyjádřit jako 1.3:

$$n = \frac{\delta \ln \sigma_p}{\delta \ln \epsilon} \quad (1.3)$$

U materiálu se slabým deformačním zpevněním lze vztah upravit na 1.4:

$$\sigma_p = C \cdot \dot{\epsilon}^m \quad (1.4)$$

a koeficient rychlostní citlivosti přetvárného odporu 1.5:

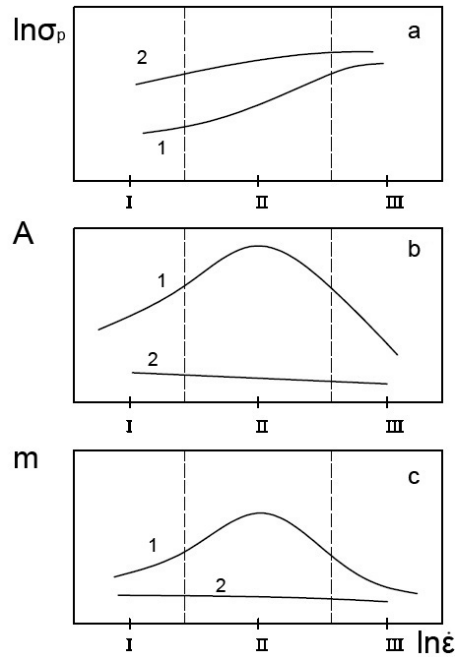
$$m = \frac{\delta \ln \sigma_p}{\delta \ln \dot{\epsilon}} \quad (1.5)$$

Stabilita plastické deformace je hodnocena pomocí těchto parametrů při tvorbě krčku. V místě vzniku deformace, roste rychlost a stupeň deformace ve srovnání s ostatními částmi vzorku. Tomu odpovídá zpevnění v této části určené parametry m a n. Vysoká stabilita plastické deformace se tedy realizuje v důsledku deformačního nebo rychlostního zpevnění materiálu nebo také vysokými hodnotami koeficientů m a n.

Rychlostní závislost mechanických vlastností superplastických materiálů se výrazně odlišuje od průběhu konvenční plastické deformace (viz. obr 1.2).

Pro hodnoty $m \geq 0,3$ bývá jev považován za superplastický. Jako optimální podmínky jsou považovány takové podmínky při nichž koeficient m dosahuje nejvyšších hodnot. Při nižších hodnotách přechází superplastická deformace na deformaci plastickou, při které je přetvárný odpor a tvařitelnost slabě závislá na rychlosti deformace.

Parametry superplastické deformace σ_p , A, m a poloha optimálního rychlostního intervalu jsou spoluurčovány teplotou deformace a strukturou slitiny. Dále je uveden vliv některých těchto faktorů na superplastickou deformaci.



Obr. 1.2: Schéma závislosti přetvárného odporu σ_p , tažnosti A a koeficientu m na deformační rychlosti $\dot{\epsilon}$ s rozdělením na tři intervaly I... $m < 0,3$; II... $m > 0,3$; III... $m < 0,3$ (1 - pro superplastickou deformaci, 2 - pro konvenční plastickou deformaci) [6]

Teplota [6]

U superplastické deformace je charakteristická výrazná závislost mechanických vlastností na teplotě při deformaci. Zvýšená teplota vede k posunu optimálního rychlostního intervalu superplasticity k vyšším $\dot{\epsilon}$ (oblast II na obr 1.2). Jestliže při zvýšení teploty dojde ke značnému vzrůstu zrn nebo struktura přestává být stabilní, superplastické vlastnosti se vytrácejí.

Závislost rychlosti superplastické deformace na teplotě je možno popsat vztahem:

$$\dot{\epsilon} = k_1 \cdot \exp\left(\frac{-Q}{R \cdot T}\right) \quad (1.6)$$

k_1 - konstanta

Q - aktivační energie

R - plynová konstanta

Vliv teploty na přetvárný odpor popisuje vztah:

$$\sigma_p = k_2 \cdot \exp\left(\frac{Q}{R \cdot T}\right) \quad (1.7)$$

k_2 - konstanta

Aktivační energie popisuje povahu termoaktivačních procesů, které určují rychlost deformace. Velikost Q se obvykle určuje zkouškami při konstantním napětí nebo deformační rychlosti v určitém intervalu teplot deformace.

Velikost zrna [6]

Velikost zrna je jedním z hlavních strukturních parametrů, které ovlivňují superplasticitu. Stabilní jemnozrnná struktura se středním rozměrem zrna $d < 10 \mu m$ je nezbytnou podmínkou superplasticity.

V ojedinělých případech se projevy superplastické deformace mohou objevit i u hrubozrnných materiálů. Bylo zjištěno že v procesu deformace některých titanových slitin se uvnitř zrn tvoří substruktura, která se chová podobně jako jemnozrnná struktura superplastických materiálů. U slitin Al-Ge byl pozorován projev superplasticity při $d = 100$ až $200 \mu m$.

1.5 Fyzikální podstata

1.5.1 Jevy pozorované během superplastické deformace [5]

Při teplotách pod $T < T_M$ (za tepla i za studena) je nejdůležitějším mechanismem plastické deformace dislokační skluz a generování nových dislokací, při kterém dojde ke zpevnění matrice materiálu. Je-li teplota vyšší, než T_M objevuje se jev dynamického zotavení, který do jisté míry omezuje deformační zpevnění.

Skluz po hranicích zrn je hlavní jev, který umožňuje dosažení extrémní prodloužení do lomu. Podíl pokluzu po hranicích zrn se odhaduje na 75-90%. Bylo experimentálně prokázáno, že pokluz po hranicích zrn probíhá zejména na rozhraní zrn dvou rozdílných fází.

Během superplastické deformace byly pozorovány následující charakteristické procesy:

- **Vznik rovnoosé struktury** - Původně nerovnoosá textura zrn se po několika desítkách procent prodloužení mění v téměř rovnoosou.
- **Stálá, rovnoosá struktura** - Po stech nebo tisících procentech prodloužení je textura stále rovnoosá a jemnozrnná.
- **Zaoblení zranic zrn** - Ostré hranice se stávají zaoblenými, nebo získávají „cibulový“ tvar.
- **Změna polohy zrn** - Zrna jednotlivě, či ve skupinách, mění svou polohu o větší vzdálenost, než je velikost zrna.
- **Růst zrn** - Při mírných rychlostech deformace mají rovnoosá zrna tendenci mírně růst, nejedná se však o velké a náhlé zhrubnutí zrna, které by snižovalo

vlastnosti materiálu.

- **Kavitace** - porušení materiálu, které probíhá na skluzových plochách, probíhá kavitací, nukleací, růstem a koalescencí mikro dutin.

1.6 Superplasticky tvářené materiály [3],[5]

Dnes je známo několik set slitin u kterých se objevuje jev superplasticity. Pro technickou praxi se ale používá maximálně několik desítek těchto materiálů. Slitiny na bázi Fe nemají takový ekonomický přínos jako slitiny Al, Ti, Zn a Ni, kde technologie superplastického tváření umožnila radikálně snížit náklady na výrobu součástí. Problémy při použití slitin železa (ocelí) souvisí také s tím, že tyto specifické podmínky nejsou dosažitelné na masově rozšířeném zařízení pro tváření ocelí. Tváření Al, Ti, Zn a Ni se vztahuje zpravidla ke zcela novým technologiím a aplikacím, pro které jsou stavěna nová zařízení. Vybrané vlastnosti superplastických některých slitin Hliníku, Titanu, Zinku a Niklu jsou uvedeny v tab. 1.1

Slitina	Teplota[°C]	Tažnost A [%]	Koeficient m
Al-7,6Ca	300 až 500	850	0,78
Al-6Cu-0,5Zr	400 až 500	2000	0,5
Ti-6Al-4V	840 až 870	750 až 1170	0,75
Ti-6Al-4V-2Fe	815	650	0,54
Zn-22Al	20 až 300	2900	0,7
Zn-22Al-4Cu	20 až 250	1000	0,5
Ni-39,9Cr-26,2Fe-0,58Ti	800 až 850	>1000	0,5
Ni-39Cr-10Fe-1,75Ti-1Al	800 až 980	1000	0,5

Tab. 1.1: Vybrané superplastické slitiny [3]

I přes velké množství hliníkových slitin umožňujících tváření za superplastických podmínek jsou používány pouze materiály s obchodním označením Supral (100,150,200), slitina Al-7475 a konstrukční slitiny Al-Li (např. Al-8900).

Nejvýznamnější superplastické materiály zpracovávají metodami plošného tváření jsou slitiny hliníku, hořčíku, a titanu. Pro objemové tváření pak ještě slitiny niklu.

Jemnozrnné struktury, která je předpokladem pro superplastické tváření, je dosahováno různými termomechanickými postupy v závislosti na použité slitině. Pokud potřebný materiál s jemnozrnnou strukturou není komerčně dostupný, je nutné provést přípravné operace, jejichž výsledkem je jemnozrnná rovnoosá homogenní

struktura materiálu.

Dva základní typy superplastických materiálů jsou:

- pseudojednofázové
- mikroduplexní (mikrodvoufázové)

U obou skupin se tvářením za tepla a za studena a tepelným zpracováním dosahuje struktury s velikostí zrna $< 5\mu\text{m}$.

Pseudojednofázové:

-precipitačně zpevňující Al-Cu, Al-Zn-Mg, Al-Li slitiny

-některé oceli

-keramika typu UO_2 s ultrajemným zrnem

-další materiály jako disperzně zpevňující Cu slitiny, ve kterých sloučeniny Si a Al vytvářejí částice bránící růstu zrn

Mikroduplexní:

-jsou termomechanicky zpracovávány pro dosažení jemného zrna. Růst zrna je omezen mikrostrukturou složenou ze dvou nebo více fází, které jsou chemicky a strukturálně rozdílné. Jsou to: α/β Ti slitiny, α/β Cu slitiny, $\alpha\tau$ nerez oceli, eutektika, některá keramika.

1.6.1 Metody zjemnění zrna [3],[5]

Jemné zrno je základní předpoklad superplastické deformace. Během celé operace musí být jemné zrno stabilní.

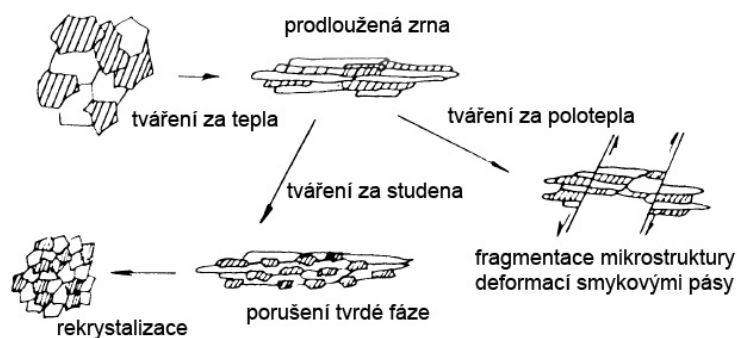
Použité metody:

- mechanické zpracování + rekrystalizace
- tepelné zpracování
- separace
- fázová transformace

Mechanické zpracování

Zjemnění zrna je docíleno tvářením za tepla, teploty blízké superplastické teplotě. Teplota je vysoká, aby objem obou fází byl podobný, jestliže mají různé deformační vlastnosti, tvrdé fáze se během tvářením lámou. Měkké infiltrují mezi ně a separují je. Během tvářením mohou obě fáze rekrystalizovat a sferoidizovat.

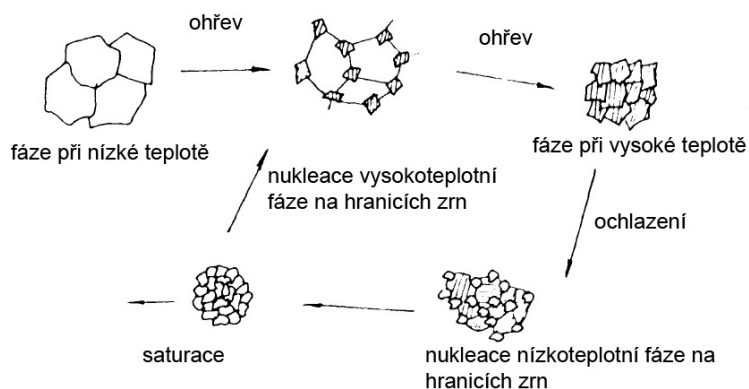
V některých případech rovnoosá jemná struktura vzniká po válcování za studena rekrystalizací během ohřevu před superplastickým tvářením. Růst zrn během tepelného zpracování a superplastického tvářením je omezen, protože obě fáze mají různé chemické složení.



Obr. 1.3: Strukturální změny během zjemnění mechanickým zpracováním [5]

Fázová transformace

Zjemnění zrn je způsobeno nukleací produktu reakce na několika místech hranice zrna základní fáze. S probíhající transformací potom nová fáze roste a nahradí původní strukturu množstvím menších zrn. Při opakování cyklu transformace dochází k dalšímu zjemňování struktury až je dosažena požadovaná velikost zrna (nebo je proces saturován).



Obr. 1.4: Zjemnění zrna fázovou transformací [5]

Řízeným válcováním nad teplotou přeměny lze dosáhnout podobného účinku, tak je dosaženo silně deformované, ale nerekrystalizované základní struktury. Základní struktura transformuje na jemnozrnnou přímo při ochlazení.

Fázová separace

Dvojfázové materiály je většinou možné žíhat za teploty, kdy je stabilní jen jedna fáze. Po zakalení vznikne jednofázová struktura martenzitickou transformací nebo

vznikne přesycený tuhý roztok. Žiháním se poté separují dvě rovnovážné fáze. Pokud vznikne dostatečný počet nukleačních zárodků, je výsledkem jemnozrnná struktura.



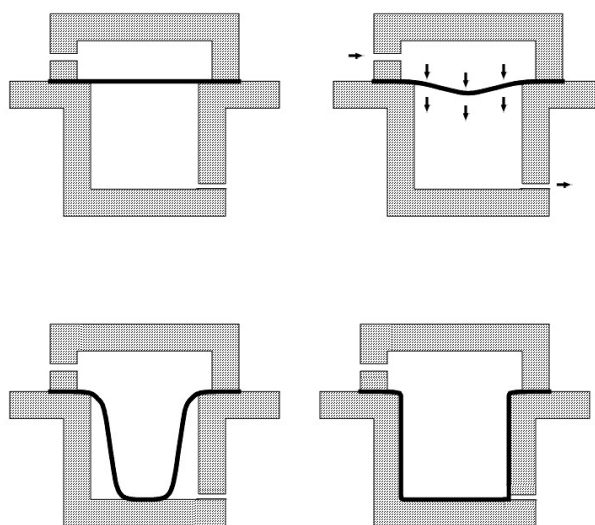
Obr. 1.5: Zjemnění zrna fázovou separací [5]

Jako příklad může být použita martenzitická struktura, která se vytvoří při kalení α/β Ti slitiny z β fáze. I přes rozsáhlou škálu metod zjemnění zrna bylo zatím vyrobeno pouze asi 100 slitin které jsou skutečně vhodné pro superplastické tváření. Jsou to zejména:

- středně a vysoce pevné Al slitiny
- některé duplexní Ti slitiny
- UHC oceli
- nerezavějící oceli

2 METODY PLOŠNÉHO SUPERPLASTICKÉHO TVÁŘENÍ [3],[4]

Pro technologii plošného tváření (tváření plechu, kdy stav napjatosti je převážně rovinný) v superplastických podmínkách se používá zkratka **SPF** (Superplastic forming). Tato metoda se využívá výhradně pro tváření tenkých plechů (zpravidla 1 až 3 mm), kdy je možno zhotovit tvarově složité dílce i velkých rozměrů. Díky nízkým deformačním odporům při tváření je možno k vyvození tvářecího tlaku použít plynné médium, jehož tlak se pohybuje obvykle v rozmezí 1 až 20 bar.



Obr. 2.1: Tlakové/podtlakové SPF schematicky [8]

Plech je v průběhu superplastické deformace pevně upnut na okrajích, tím nedochází k jeho posunu, jako je tomu při konvenčním tažení. V důsledku tahového napětí a pevného zakotvení okraje dochází ke ztenčování plechu, které je ale nerovnoměrné s největší intenzitou v ose výtažku. Znalost rozložení intenzity zeslabování tloušťky plechu je pro tento proces důležitá, umožňuje řídit parametry procesu na základě jevů jako je například vliv rychlostní citlivosti napětí na místní změnu tloušťky.

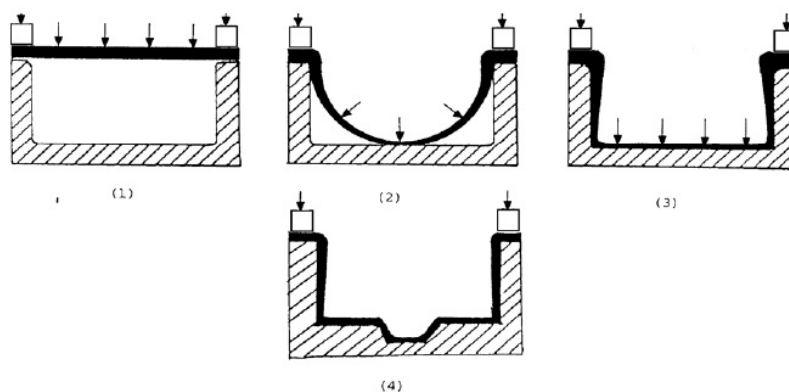
Technologie SPF je používána zejména v automobilovém, leteckém a kosmickém průmyslu.

Metody plošného superplastického tváření lze dle charakteru tvářecího nástroje rozdělit do dvou základních typů:

- Tváření s **konkávním nástrojem** tzv. „female forming“, kdy nástrojem je matrice s dutinou, jejíž tvar odpovídá negativu zhotovovaného produktu.
- Tváření s **konvexním nástrojem** tzv. „male forming“, kdy má nástroj charakter lisovníku s požadovaným tvarem.

2.1 Tváření s konkávním nástrojem [3],[4]

Při tváření s konkávním nástrojem se v tlakové komoře nachází dutina ve tvaru negativu vyráběného dílu. Plech, který je na okrajích upnut se ohřeje na teplotu vhodnou pro superplastické tváření a po několikaminutové výdrži na této teplotě následuje vlastní operace. Řízeným tlakem respektive podtlakem je plech tvarován. Po dosažení kontaktu vypínaného plechu s dutinou matrice vzniká kontaktní tření, v místě styku je v důsledku tření deformace minimální a deformační zóna se redukuje do volných částí plechu. V důsledku tohoto jevu dochází k největšímu zeslabení plechu v rozích výtažku.

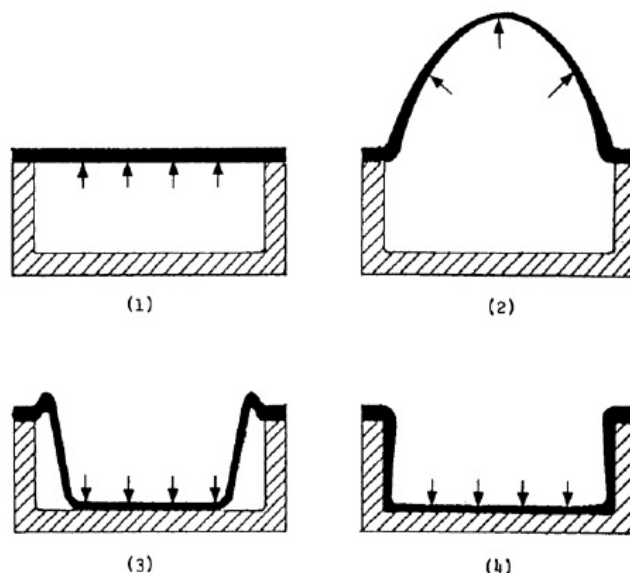


Obr. 2.2: Schéma jednoduchého SPF do zápustky [4]

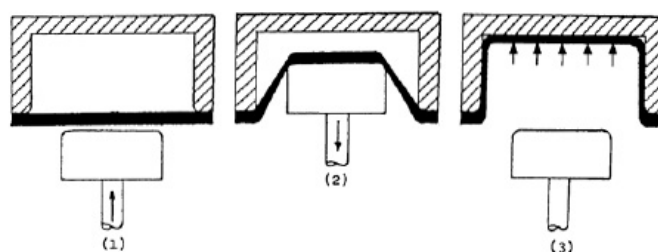


Obr. 2.3: Ukázka manipulace s vyhotoveným titanovým dílcem ve firmě Aeromet International, teplota 910°C, 5000 N zatížení [9]

Mezi další varianty tváření s konkávním nástrojem patří například **zpětné rozšiřování**, obr 2.4, kdy se prvotním vypínáním inertním médiem docílí rovnoměrnějšího rozdělení tloušťky stěny výrobku. U metody SPF s **pomocným tažníkem**, obr 2.5, je na čele tažníku deformace brzděna a zeslabení se soustředí do plochy mezi zápusťkou a tažníkem. Po doteku dna tažnice je materiál dotvarován tlakem inertního média. Výsledkem je výtažek se silnější vrstvou materiálu na dně a menší ve stěně.



Obr. 2.4: Schéma metody zpětného rozšiřování [4]

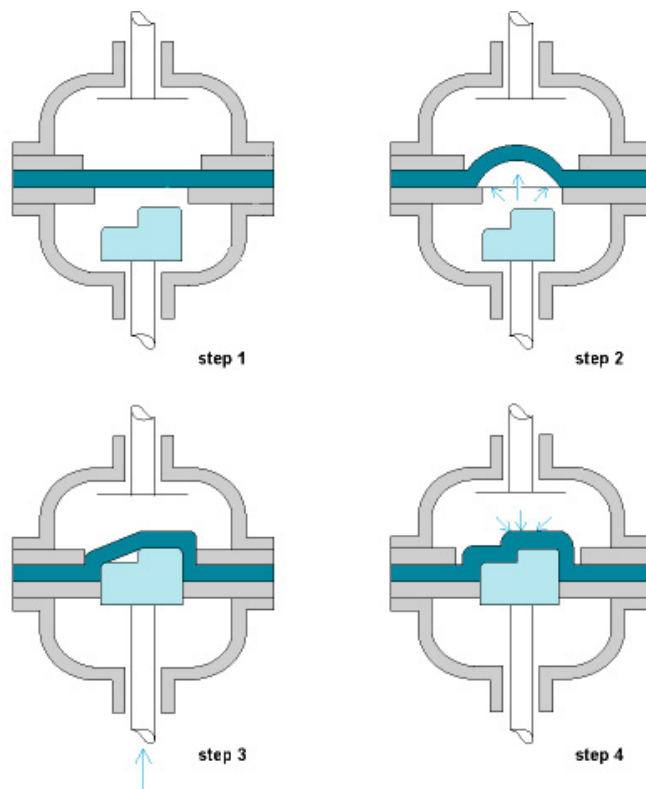


Obr. 2.5: SPF s konkávním nástrojem s využitím tažníku [4]

2.2 Tváření s konvexním nástrojem [3],[4]

Stejně jako u použití konkávního nástroje, je polotovar po celém obvodu pevně upnut mezi horní a spodní tlakové komory a ohřát na teplotu superplastické deformace. Deformace začíná v první fázi přetlakem ve spodní, respektive podtlakem v horní polovině tlakové komory. Po vyboulení plechu se do vydutí vsune lisovnik jehož tvar

odpovídá výslednému tvaru dílce. V další fázi po zvýšení tlaku v horní a snížení tlaku ve spodní polovině komory dochází k „nabalování“ plechu na lisovnick, přičemž polotovár dostává výsledný tvar.



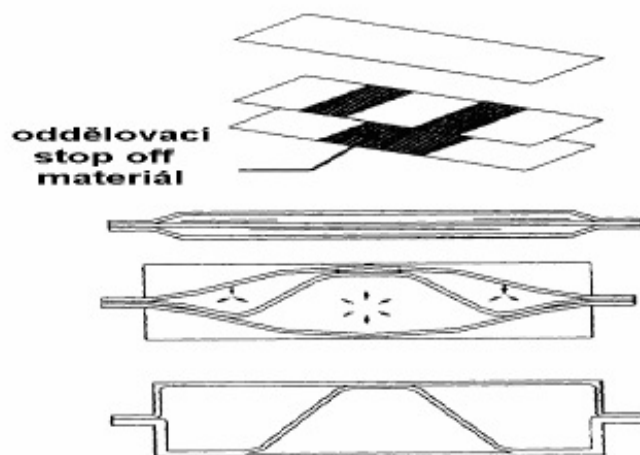
Obr. 2.6: Schéma postupu SPF s konvexním nástrojem [10]

Kontakt nástroje s plechem zde nastává v pozdější fázi deformačního procesu. U této metody je částečně eliminováno lokální ztenčování plechu způsobené zmenšováním zóny deformace v důsledku kontaktního tření.

U výlisků, které nemají příliš velké rozměry, je možné zlepšit produktivitu u obou metod superplastickým lisováním dvou, popřípadě i více výlisků současně. U SPF s konkávním nástrojem je do komory vloženo více matic, u SPF s konvexním nástrojem více lisovnicků. Tímto postupem je možno z jednoho polotovaru vyhotovit více součástí, které jsou posléze odděleny. V současnosti jsou komerčně nabízena zařízení umožňující superplasticky tvářet plechy o rozměrech až 5300 x 2300 mm (GEC Alsthom - Francie).

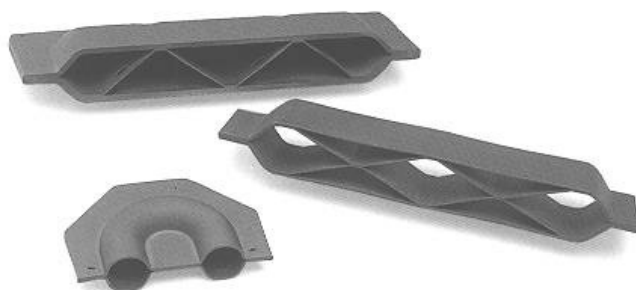
2.3 Superplastické plošné tváření a difuzní spojování [3],[4]

V současnosti hojně využívaná a efektivní technologie je kombinace superplastického tváření **SPF** a difuzního spojování **DB** (Diffusional Bonding). Tato metoda výroby se využívá zejména v leteckém průmyslu k výrobě lehkých, ale velmi tuhých buněčných panelů nebo i dutých kompresorových lopatek s výstuhou.



Obr. 2.7: Výroba buněčných struktur metodou SPF/DB [4]

Postup procesu SPF/DB popisuje obr 2.7. Potřebné množství plechů je naskládáno na sebe, místa která nemají být svařena se oddělí vhodnou mezivrstvou (stopp-off), poté se tento svazek ve vakuové peci difúzně svaří. Plochy, které jsou pokryty stopp-of vrstvou svařeny nebudou. Tento vytvořený svazek se vloží do formy a přivedením tlakového média mezi plechy se vytvaruje při superplastických podmínkách do konečného tvaru podle tvaru dutiny ve formě.



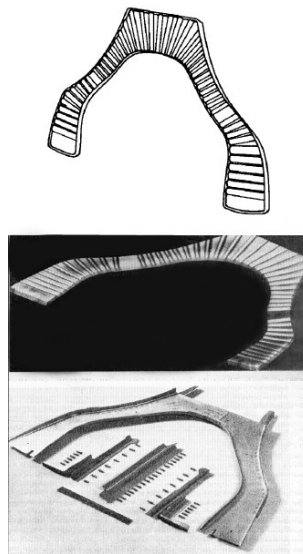
Obr. 2.8: Ukázka součásti vyrobené metodou SPF/DB [11]

2.4 Příklady výrobků [3],[4]

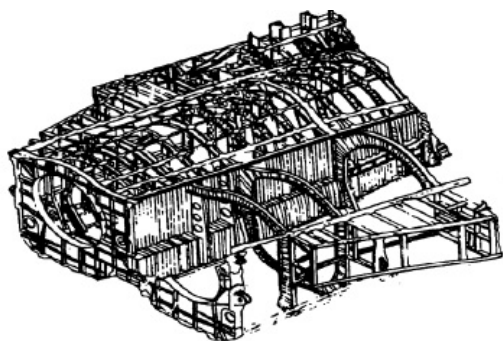
Na obr 2.9, 2.10, 2.11,2.12, jsou příklady výrobků zhotovených metodami plošného superplastického tváření.



Obr. 2.9: Tepelný štít vyrobený z Ti slitiny pro ochranu částí okolo proudových motorů letadel [12]



Obr. 2.10: Přepážka bombardéru Rockwell International B-1A Lancer z Ti slitiny Ti-6Al-4V. Nahoře- díl tvářený superplasticky při teplotě 920°C a difuzně spojovaný. Dole- díl vyráběný původní technologií z nýtovaných součástí. Cena přepážky tvářené superplasticky klesla o 30 % a hmotnost se nížila o 50 % oproti původní metodě nýtování [12]



Obr. 2.11: Ocasní sekce letounu McDonnell Douglas F-15A Eagle původně sestavená ze 1420 dílů. Zavedením superplastického tvářením klesl počet na 71 [4]



Obr. 2.12: Rám horského kola. Profilovaného tvaru trubky je dosaženo superplastickým tvářením. [13]

3 ZÁVĚR

Tato bakalářská práce definuje základní projevy superplastického chování materiálů a možné metody plošného tváření těchto materiálů. Blíže je v práci uvedeno rozdělení superplastické deformace a jevy které jsou pozorovatelné v materiálu při tomto typu namáhání, vybrané materiály vykazující superplastické vlastnosti, a technologické operace k dosažení jemnozrnné struktury, která je mimo jiné také podmínkou superplastické deformace.

V další části metod plošného tváření jsou uvedeny vybrané technologie plošného superplastického tváření, jejich přednosti i nedostatky a vlivy na průběh tváření i na výsledný výrobek.

Superplastické tváření je prakticky využito při zpracování řady obtížně tvařitelných materiálů, a to nejenom u superplastických slitin, ale i u keramik a intermetalik.

Při použití této výrobní metody lze docílit eliminací třískového obrábění lehčích a pevnějších tvarově složitých výrobků a současně i omezit počet technologických operací potřebných pro výrobu.

Využití této nekonvenční technologie tváření má i v budoucnu své jisté zastoupení. S největší pravděpodobností nalezne uplatnění v neustále se rozrůstajícím automobilovém průmyslu a v oblastech, kde konvenční metody nedostačují, jako jsou vesmírné projekty, vyžadující materiály se stále vyšším potenciálem, které si vynucují speciální metody při zpracování.

POUŽITÉ ZDROJE

- [1] FOREJT, M. *Teorie tváření*. 1. vyd. Brno: CERM, 2004. 167 s. ISBN 80-214-2764-7.
- [2] LIDMILA Z.: Superplastické výrobní metody. Superplastic Fabrication Methods. In. FORM 2008. M.Forejt. IX. *International Symposium*. Brno, Brno University of Technology 2008, volume 1, p.41-44 ISBN 1213-9289.
- [3] LIDMILA, Z. *Teorie a technologie tváření II*. 1. vyd. Brno: Univerzita obrany, 2008, 106 s. ISBN 978-80-7231-580-2.
- [4] PETRUŽELKA, J. *Nekonvenční metody tváření* [online] Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, 2007, 179 s. Dostupné na www: <<http://www.345.vsb.cz/jiripetruselka/Texty/Nekonvenční metody tváření 2007.pdf>>.
- [5] PETRUŽELKA, J. *Tvařitelnost kovových materiálů*. [online] Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, 2001, 143 s. Dostupné na www: <<http://www.345.vsb.cz/jiripetruselka/Texty/TVARITELNOST.pdf>>.
- [6] RUSZ, S. *Problematika superplastického tváření ocelí*. 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita, 2004, 95 s. ISBN 80-248-0693-2.
- [7] Kyoto University Faculty of Engineering *Microstructure*, [online]. 2011 [cit 2012-05-02]. Dostupný na www: <<http://www.mtl.kyoto-u.ac.jp/english/laboratory/microstructure/images/image5.gif>>.
- [8] Engineer on a disk *Superplastic forming*, [online]. 2010 [cit 2012-05-02]. Dostupný na www: <<http://engineeronadisk.com/notesmanufact/sheet13.html>>.
- [9] Superplasticity *One piece wings made from superplastically formed (SPF) aluminium*, [online]. 2008 [cit 2012-05-03]. Dostupný na www: <<http://superplasticity.blogspot.com/2008/03/one-piece-wings-made-from.html>>.
- [10] Access Science *Superplastic forming*, [online]. 2010 [cit 2012-05-03]. Dostupný na www: <<http://accessscience.com/search.aspx?rootID=797505>>.
- [11] Euro SPF *Applications fields of SPF Aeronautics*, [online]. 2008 [cit 2012-05-03]. Dostupný na www: <<http://www.eurospf.net/appli/index-aero.html>>.

- [12] Euro SPF *Applications fields of SPF Aeronautics*, [online]. 2010 [cit 2012-05-03]. Dostupný na www: <<http://www.sae.org/mags/aem/9080>>.
- [13] Singletrack *Hardtail frame*, [online]. 2010 [cit 2012-05-03]. Dostupný na www: <<http://singletrackworld.com/forum/topic/what-hardtail-frame-2>>.
- [14] AutoLaunch *Superplastic forming*, [online]. 2010 [cit 2012-05-22]. Dostupný na www: <<http://www.autolaunch.ie/super-plastic-forming/>>.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

SPF	Superplastic Forming
SPF/DB	Superplastic Forming / Diffusional Bonding
ϵ	deformace [%]
$\dot{\epsilon}$	rychlost deformace [s^{-1}]
σ_p	přetvárný odpor [MPa]
A	tažnost [%]
C	empirická materiálová konstanta [-]
d	střední rozměr zrna [μm]
k_1	konstanta [-]
k_2	konstanta [-]
m	koeficient rychlostní citlivosti přetvárného odporu [-]
n	exponent deformačního zpevnění [-]
Q	aktivační energie [$J.mol^{-1}$]
R	plynová konstanta [$J.mol^{-1}.K^{-1}$]
T	teplota [$^{\circ}C$]
T_M	teplota tavení [$^{\circ}C$]