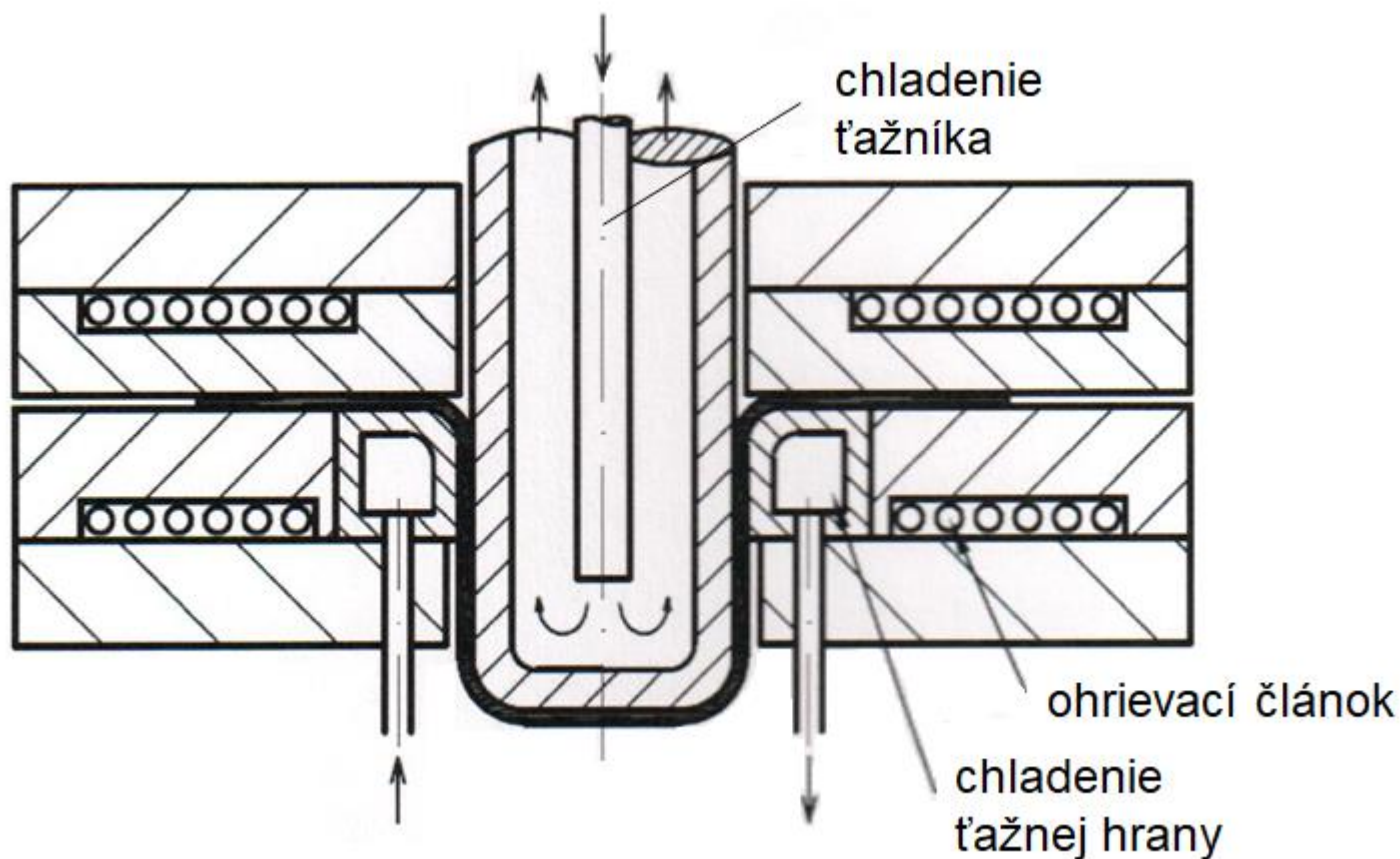


PROGRESÍVNE METÓDY TVÁRNENIA
Termálne tvárnenie a tvárnenie aplikáciou
lokálneho ohrevu
Tvárnenie vysokými rýchlosťami
Vysokoparametrické tvárnenie

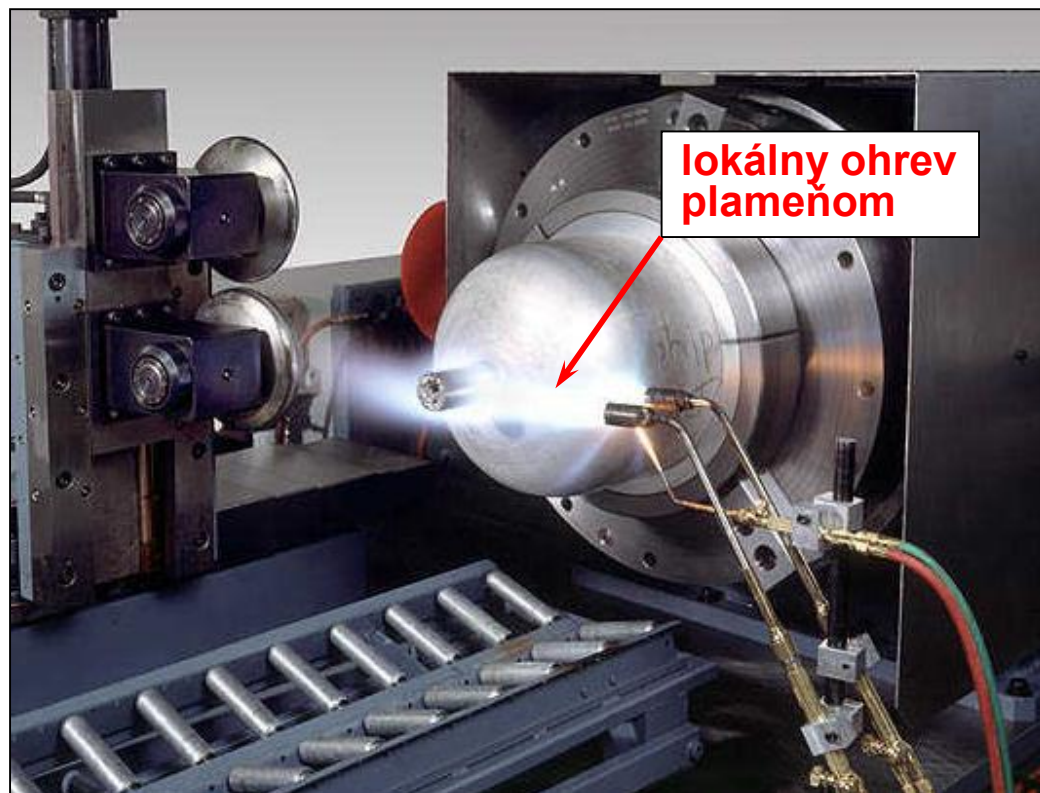
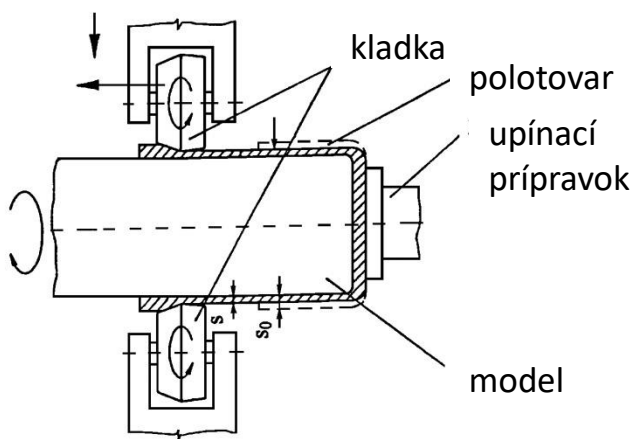
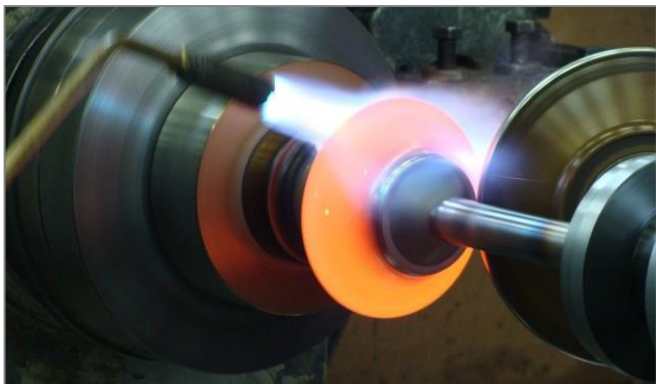
Tvárnienie s lokálnym ohrevom

Ťahanie s lokálnym ohrevom a chladením



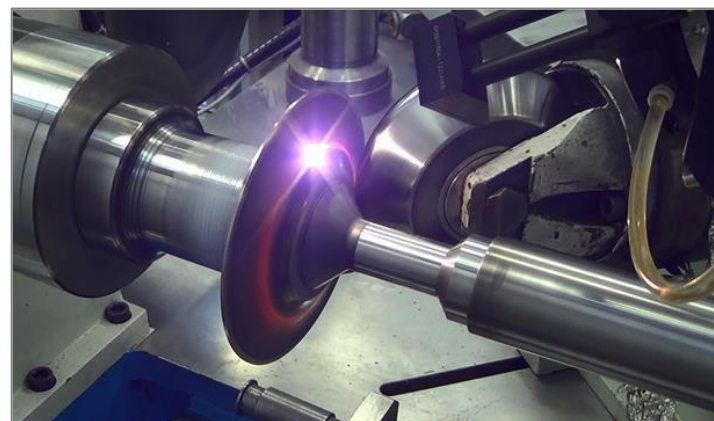
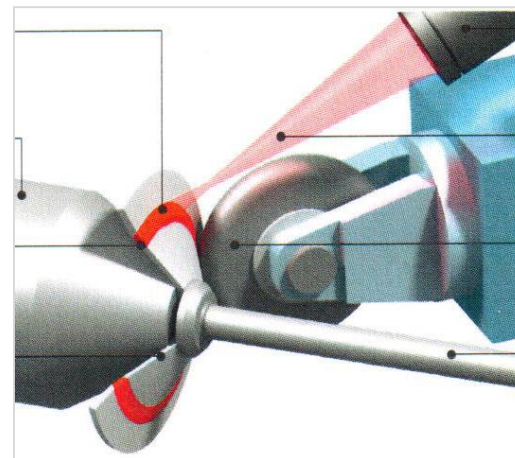
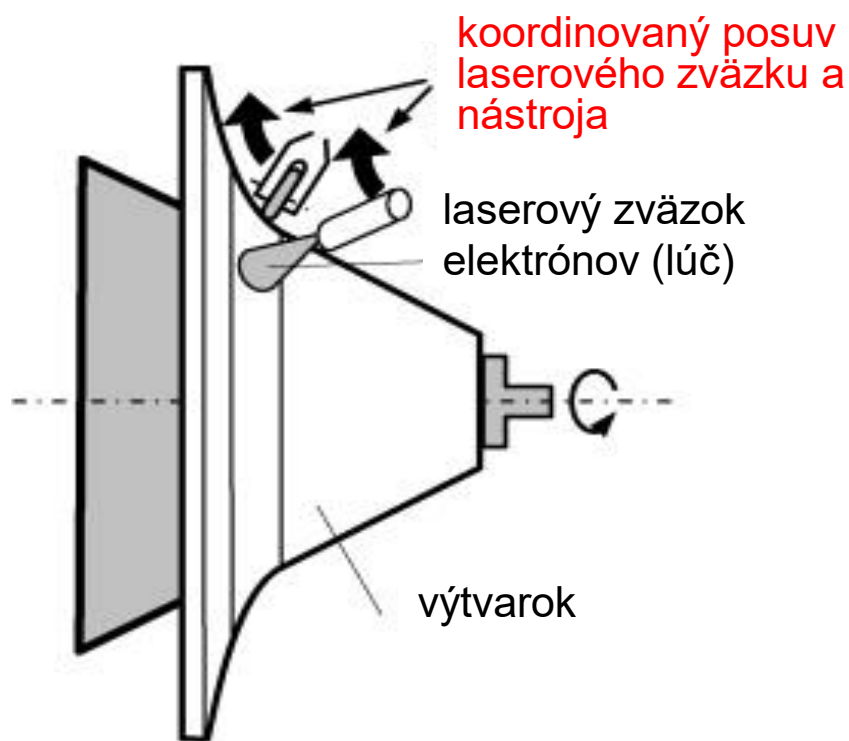
Tvárnenie s lokálnym ohrevom

Tlačenie (kovotlačenie) s lokálnym ohrevom



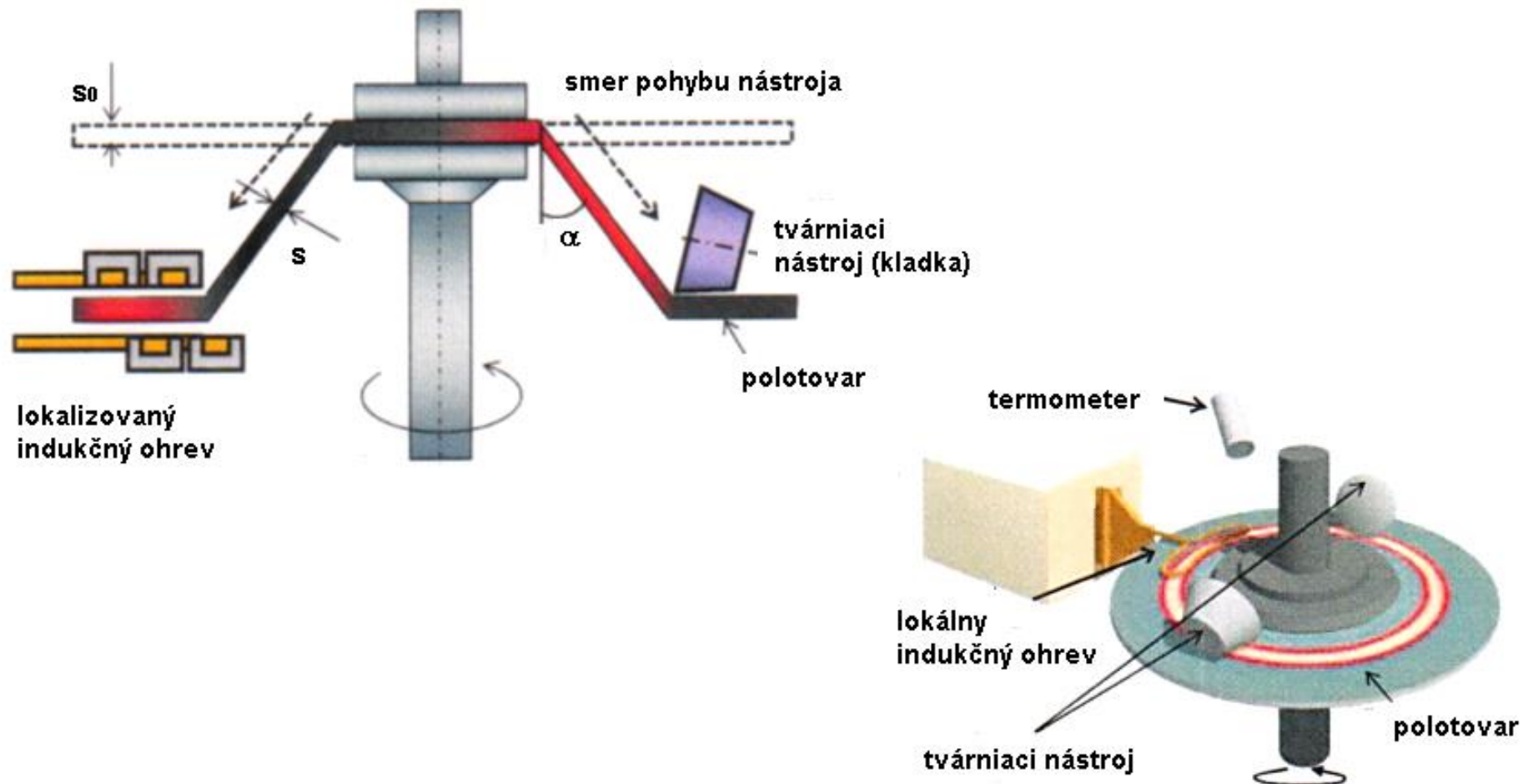
Tvárnenie s lokálnym ohrevom

Tlačenie (kovotlačenie) s lokálnym ohrevom



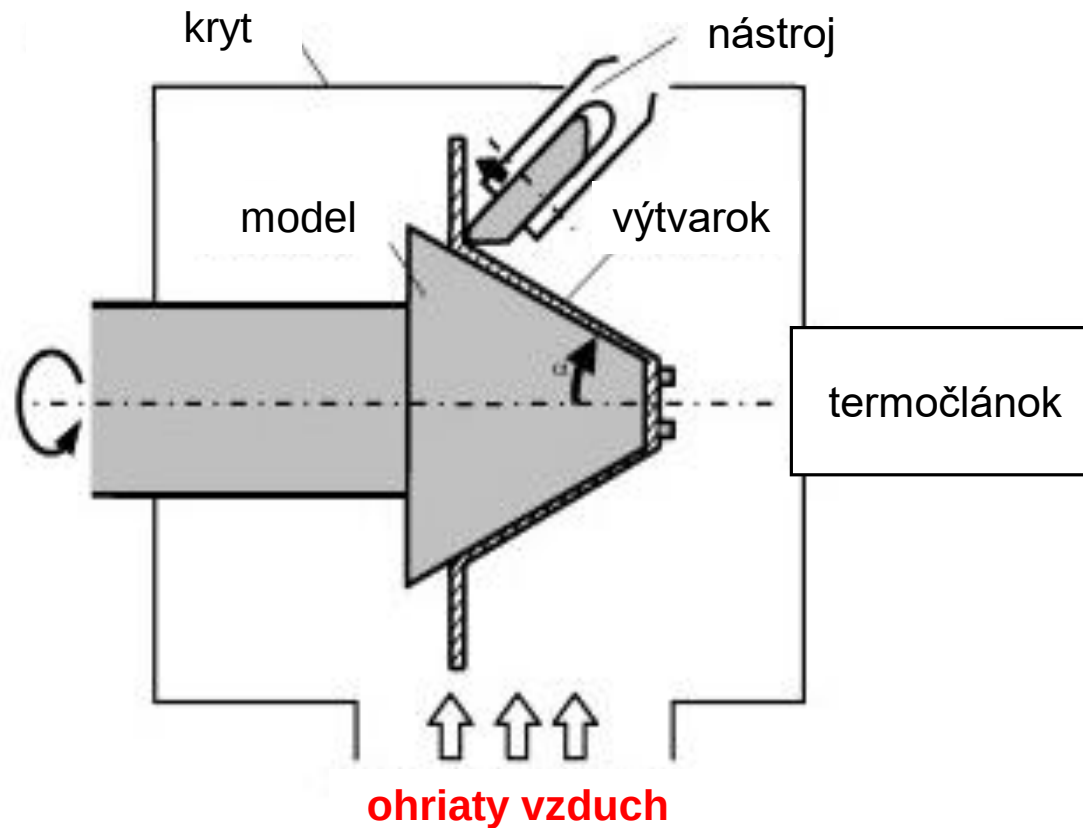
Tvárnenie s lokálnym ohrevom

Tlačenie (kovotlačenie) s lokálnym ohrevom **bez modelu (tvárnice)**



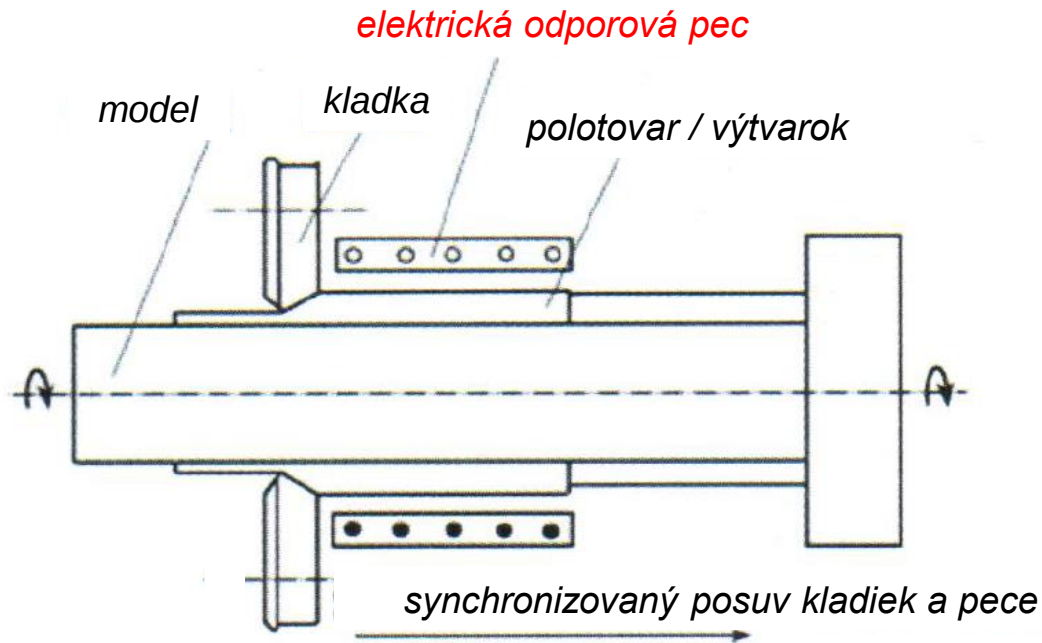
Termálne tvárnenie

Tlačenie (kovotlačenie) s ohrevom polotovaru



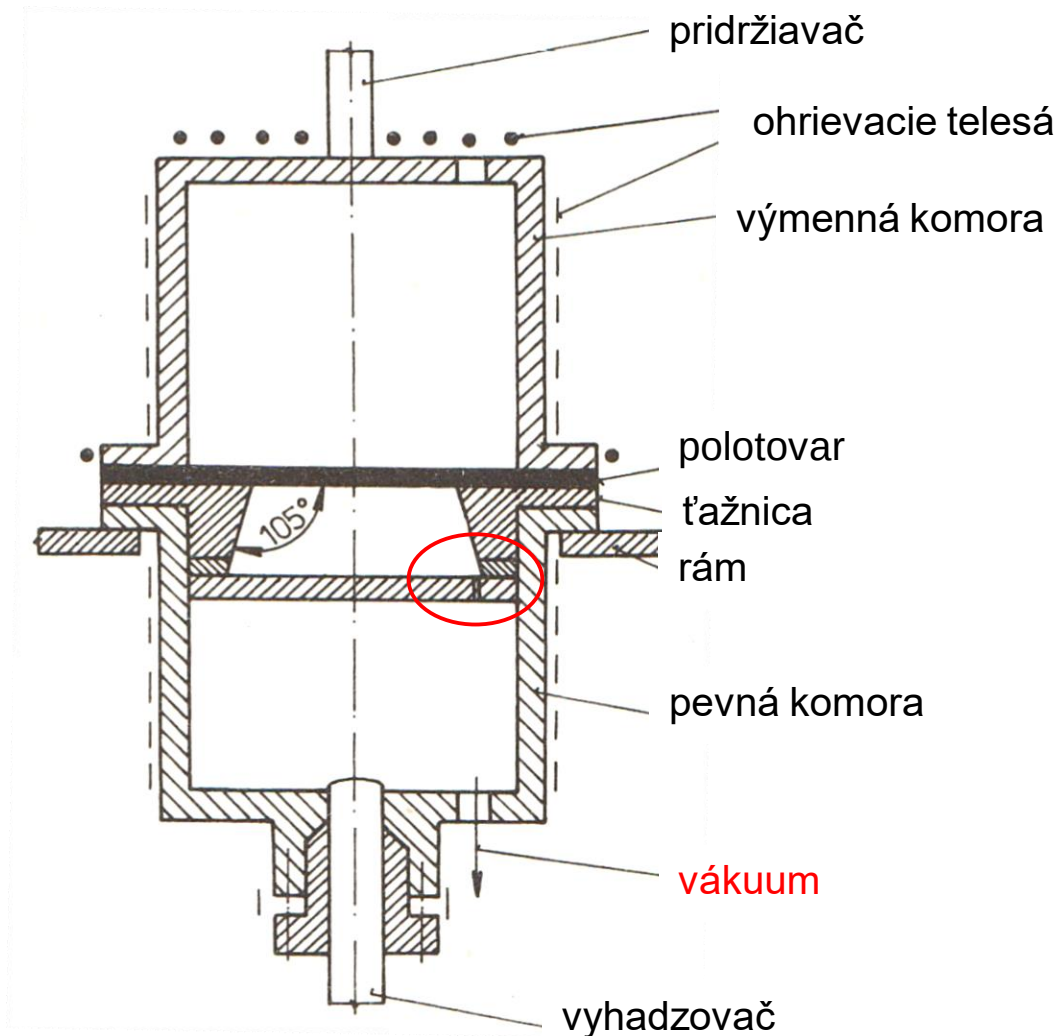
Termálne tvárnenie

Tlačenie (kovotlačenie) s odporovým ohrevom polotovaru



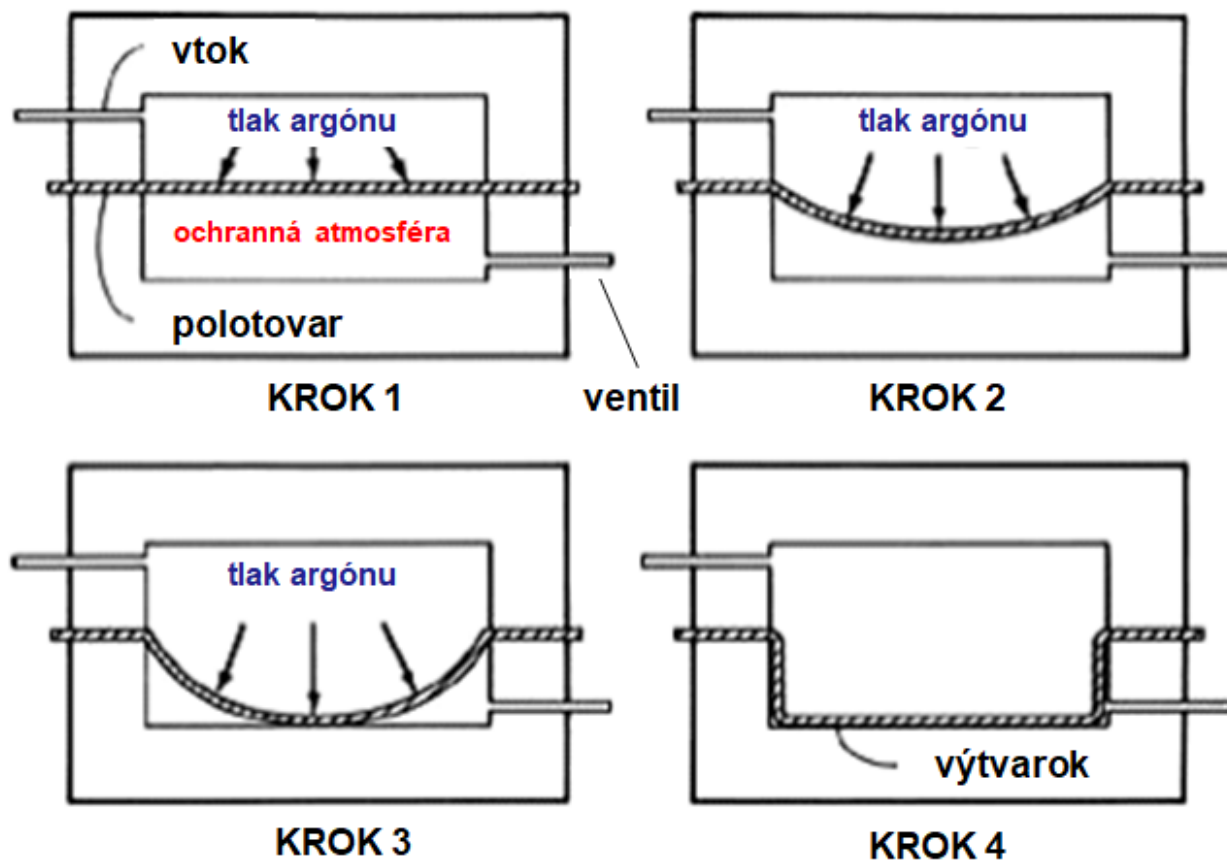
Termálne tvárnenie

Termálne ťahanie



Termálne tvárnenie

Superplastické tvárnenie



Termálne tvárnenie

Superplastické tvárnenie

Je metóda, ktorá sa aplikuje na tvárnenie veľmi zložitých a veľkorozmerných výtvarkov s vysokou presnosťou a kvalitou povrchu, kde dochádza k zvýšeniu únavovej pevnosti. Najväčšou nevýhodou je dlhý čas tvárnenia. Čas na výrobu jedného výtvarku býva až niekoľko hodín.

Podstata tejto metódy spočíva v tvárnení materiálu s jemnozrnnou štruktúrou pri veľmi malej rýchlosti tvárnenia. Na aktivovanie superplastických vlastností materiálu sa používajú ohrievané nástroje, kde **teplota tvárnenia sa blíži k teplotám žihania**. Na tvárnenie sa využíva tlak, alebo podtlak, ktorý je vyvolaný kvapalinou, alebo inertným plynom.

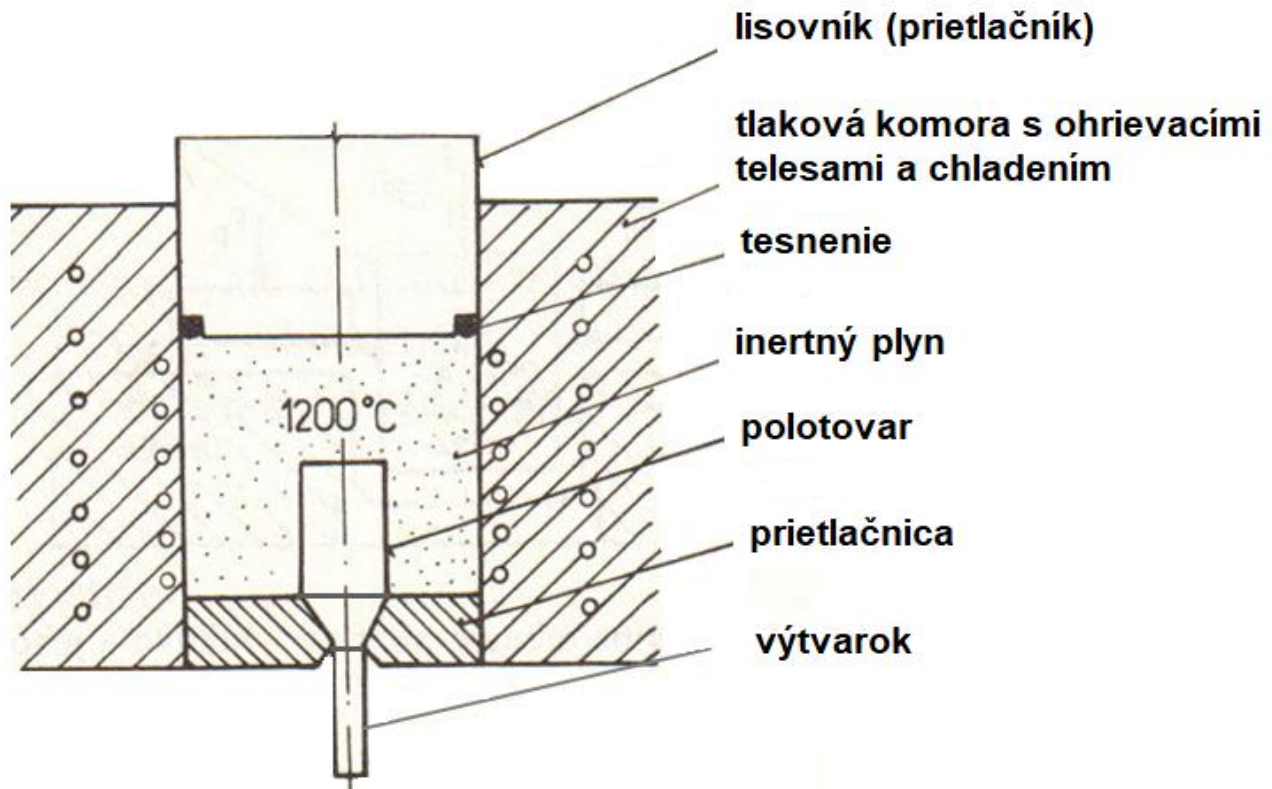
Hlavná aplikácia tejto metódy je v leteckom, automobilovom a kozmickom priemysle.

Superplasticita sa dosahuje:

- veľmi **jemným zrnom** (menším ako 10 μm , ale často aj pod 1 μm),
- pri **zvýšených teplotách** (zvyčajne nad $0,4 \cdot T_{\text{TAV}}$),
- deformáciou **nízkymi rýchlosťami deformácie** ($\dot{\epsilon} = 10^{-4}$ až 10^{-2} s^{-1}).

Termálne tvárnenie

Izotermálne pretláčanie



Tvárnenie vysokými rýchlosťami

Rýchlosť

→ **absolútna rýchlosť tvárnenia** (v)

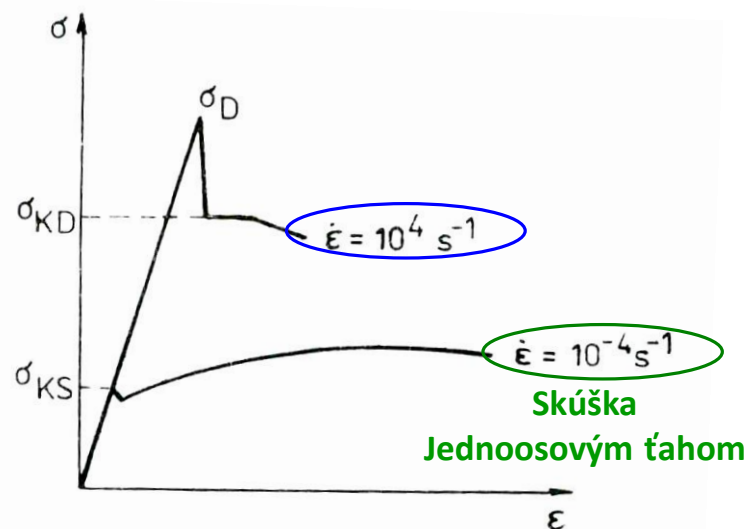
→ **pomerná rýchlosť pretvorenia** ($\dot{\varepsilon}$)

→ **skutočná r. pretvorenia** ($\dot{\phi}$)

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{v}{l_0} \quad [s^{-1}]$$

Rýchlosť tvárnenia

- **mechanické lisy** – $v_L = 0,3$ až $0,6 \text{ (ms}^{-1}\text{)}$
- **hydraulické lisy** – $v_{HL} = 0,025$ až $0,25 \text{ (ms}^{-1}\text{)}$
- **buchary** – $v_B = 5$ až $8 \text{ (ms}^{-1}\text{)}$
- **vysokorýchlostné buchary** – $v_{VB} = 20$ až $60 \text{ (ms}^{-1}\text{)}$
- **výbuchom** – $v_V = 250$ až $300 \text{ (ms}^{-1}\text{)}$



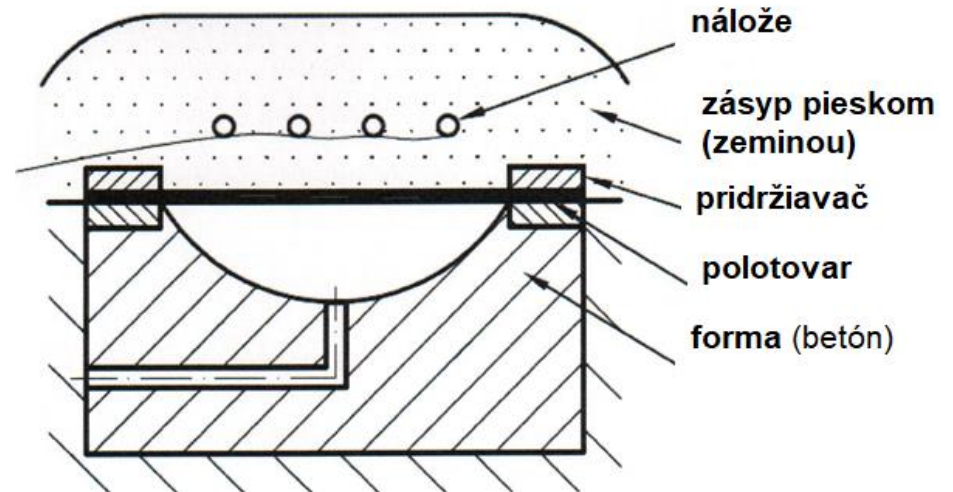
Tvárnenie vysokými rýchlosťami

Metódy ***tvárnenia vysokými rýchlosťami*** sú:

1. tvárnenie **explóziou**,
2. **elektro-hydraulické** tvárnenie,
3. **elektro-magnetické** tvárnenie,
4. **frekvenčné** tvárnenie,
5. **dynamické** tvárnenie: a) **priame nastreľovanie**,
b) **nepriame nastreľovanie**.

Tvárnenie vysokými rýchlosťami

Tvárnenie explóziou

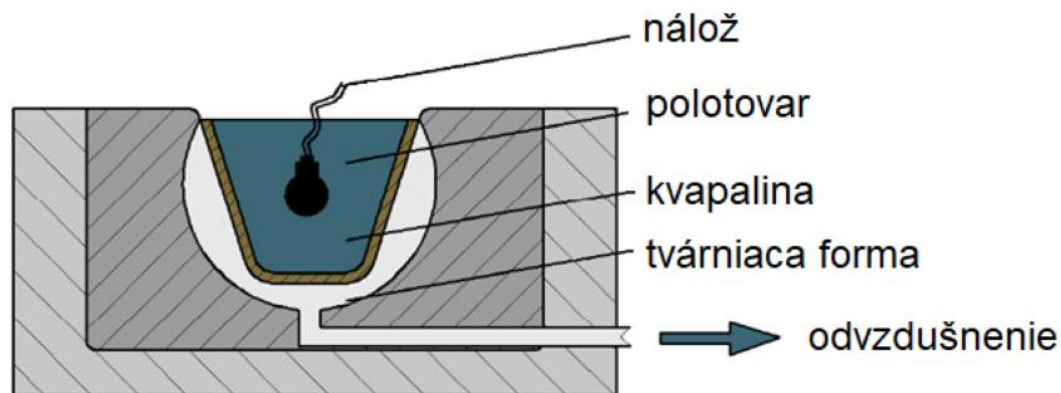


*Prototypová časť kabíny lietadla Airbus,
vytvorená tvárnením explóziou*

Tvárnenie vysokými rýchlosťami

Tvárnenie explóziou

*Tvárnenie explóziou
s detonačnou komorou
s vodným prostredím*



Z rastúcou rýchlosťou deformácie klesá tvárnosť a zväčšuje sa odpor proti deformácii. Pokiaľ rýchlosť deformácie vzrastie mnohonásobne, rádovo až na stovky metrov za sekundu, zvýši sa teplota počas adiabatického procesu tvárnenia. **Zvýšená teplota spôsobuje odpevnenie materiálu.**

Hlavnou deformačnou zložkou v plastickej deformácii pri technológii vysokorýchlostného tvárnenia explóziou **nie je jednoduchý sklz** ale **dvojčatenie**.

Tvárnenie vysokými rýchlosťami

Tvárnenie explóziou

Rozvoj leteckej a raketovej techniky v 50-tych rokoch minulého storočia viedol k vývoju vysoko pevných ľahkých zliatin. Pri tvárnení týchto zliatin, konvenčnými metódami dochádza k praskaniu materiálu, alebo veľkému odpruženiu. Na odstránenie týchto nedostatkov sa aplikuje vysoká rýchlosť tvárnenia, dosahovaná výbuchom.

Princíp tejto metódy je vznik tlakovej vlny, ktorá svojou veľkou rýchlosťou a silou tvárni materiál. Používa sa nálož umiestnená v piesku, íle alebo v kvapalinovom „vaku“. Ako nálož sa používajú **výbušniny**, ktoré majú extrémne krátku dobu horenia. Používajú sa aj **horľaviny**, ktoré majú dlhšiu dobu horenia ako výbušniny, napr. strelný prach. Tiež je možné aplikovať **zmes kyslíka s acetylénom**.

Rýchlosť tvárnenia je nad 250 m.s^{-1} (pri špeciálnych aplikáciách až $8\,000 \text{ m.s}^{-1}$).

Ak je nálož horľavina alebo zmes plynov, rýchlosť je do **150 m.s^{-1}** .

Tvárnacie tlaky sú rádovo 10^4 MPa .

Teploty tvárnenia rádovo 10^3 K .

Tvárnenie vysokými rýchlosťami – príklady

Tvárnenie explóziou



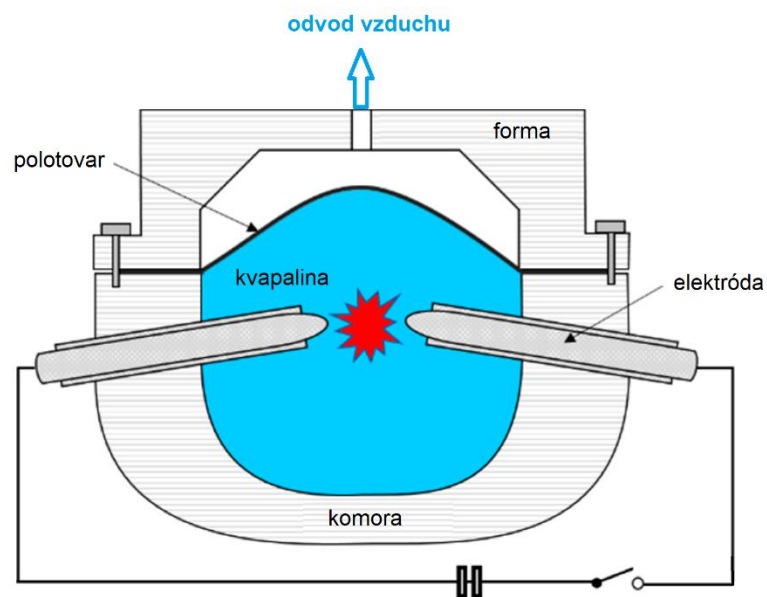
***Tvárnenie explóziou –
aplikácia v architektúre***
(ING Banka, Amsterdam)



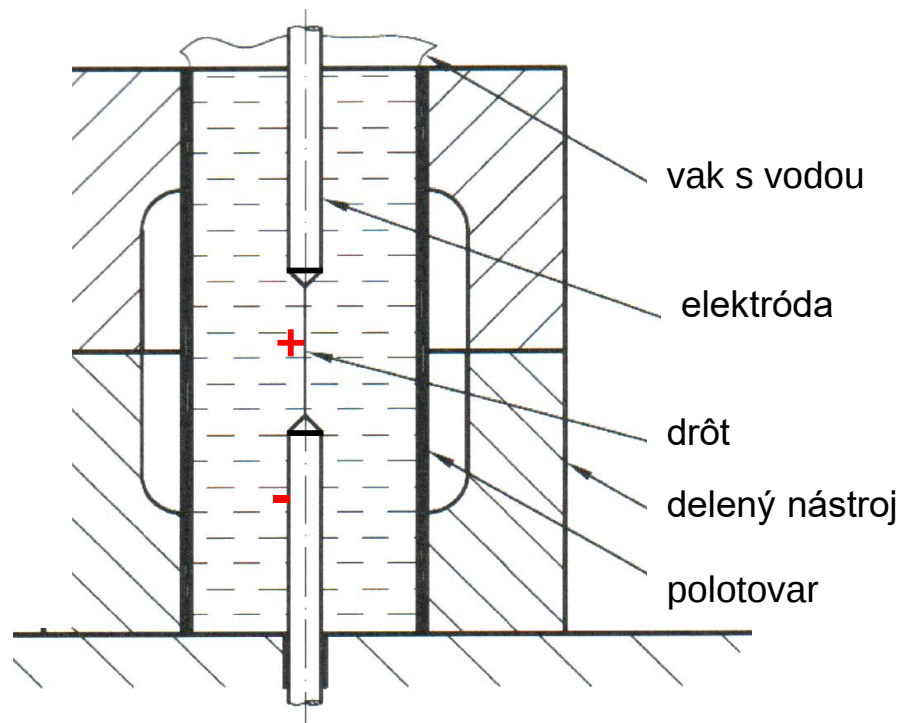
***Tvárnenie explóziou –
aplikácia v priemysle***
(turbína firmy Exploform)

Tvárnenie vysokými rýchlosťami

Elektro-hydraulické tvárnenie



Princíp elektrohydraulického tvárnenia



Princíp elektrohydraulického rozširovania

Tvárnenie vysokými rýchlosťami

Elektro-hydraulické tvárnenie

Zdrojom tlakových vln v kvapaline je elektrický výboj medzi elektródami. Zdroj elektrického výboja sú kondenzátorové batérie s veľkou kapacitou, ktoré sú rázovo vybité cez elektródy.

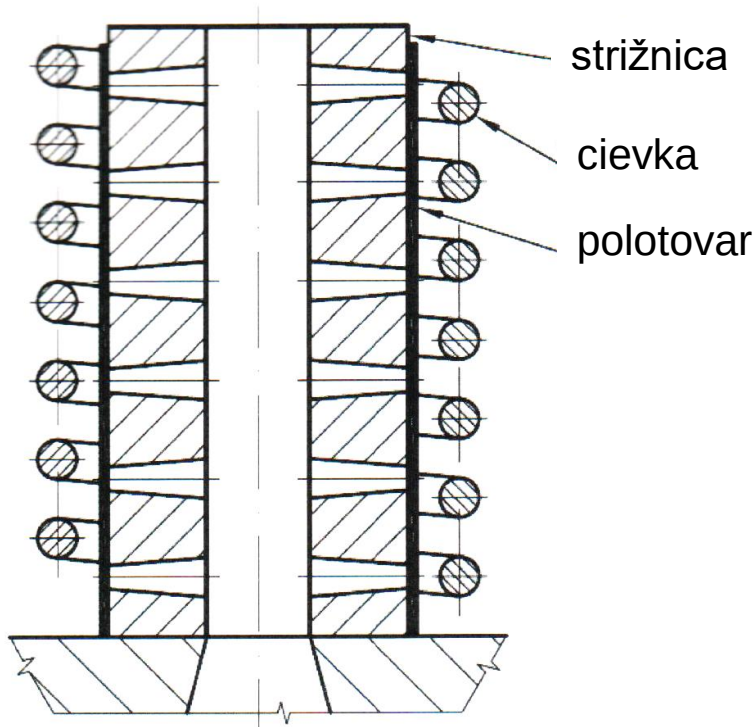
Elektro-hydraulické tvárnenie sa používa najmä pri radiálnom tvárnení (rozširovaní) rúr, alebo plytkom ťahaní. Využíva sa aj pri vystrihovaní otvorov s malým priemerom s vyšším počtom, napr. pri výrobe filtrov.

Výhodou tejto metódy je možnosť tvárnenia **viacerými výbojmi za sebou**. Jednotlivé **výboje môžu mať rôznu intenzitu**, pričom posledný výboj sa volí kalibračný.

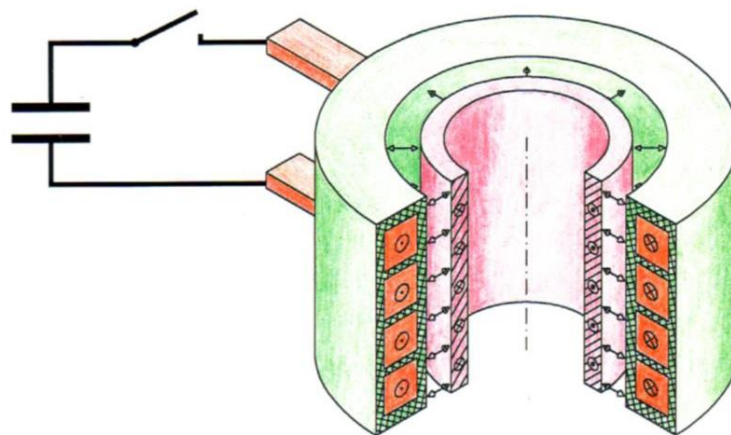
Nevýhodou je použitie spojovacieho drôtu pri tvárnení viac výbojmi za sebou, čo má za následok, že **pri výboji dochádza k jeho prepáleniu**.

Tvárnenie vysokými rýchlosťami

Elektromagnetické tvárnenie (magneticko-impulzné tvárnenie)

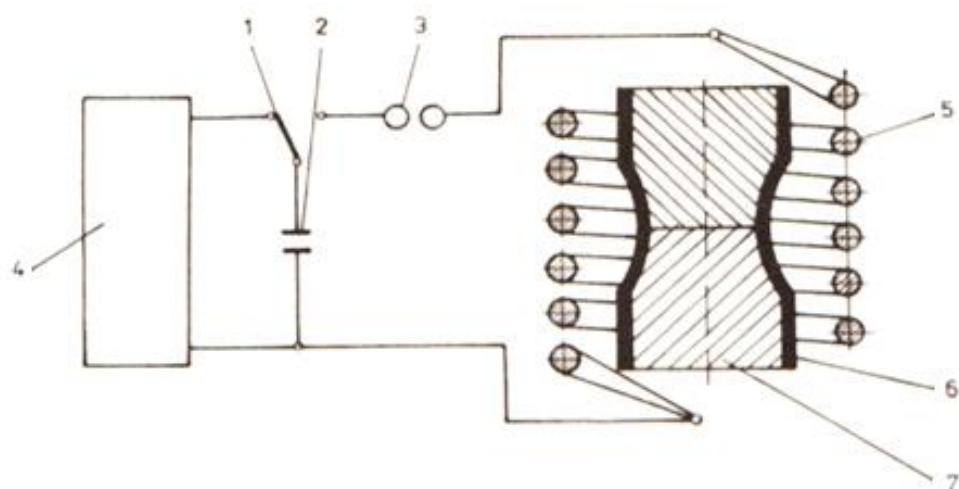


Princíp elektromagnetického dierovania



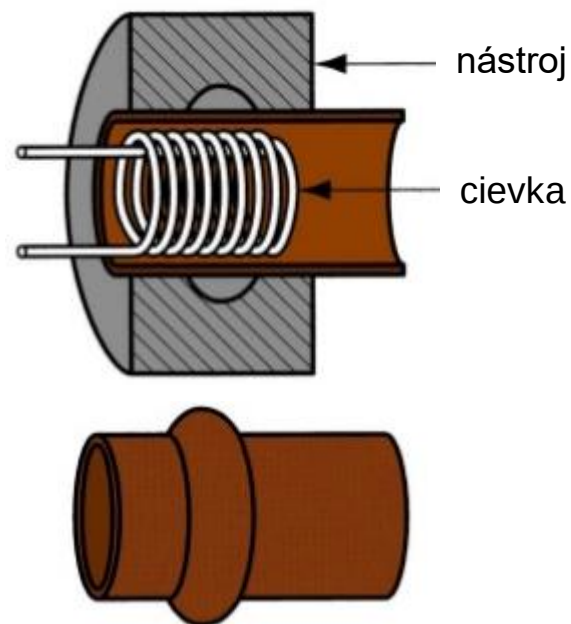
Tvárnenie vysokými rýchlosťami

Elektromagnetické tvárnenie (magneticko-impulzné tvárnenie)



Princíp elektromagnetického zužovania

1 – spínač, 2 – kondenzátory, 3 – iskrište, 4 – napájanie,
5 – induktor, 6 – polotovar/výtvarok, 7 – kaliber



Princíp elektromagnetického rozširovania

Tvárnenie vysokými rýchlosťami

Elektromagnetické tvárnenie (magneticko-impulzné tvárnenie)

Princípom tvárnenia je veľký prúdový impulz, ktorý prechádza z kondenzátorových batérií do cievky. V dôsledku toho vzniká v cievke oscilujúce magnetické pole. V blízkosti cievky je polotovar, v ktorom je indukované oscilujúce magnetické pole opačnej polarity, čo spôsobí vzájomné odpudzovanie cievky a polotovaru, a tým dochádza k tvárneniu do tvaru formy.

Pri tomto procese sú generované **tvárniace tlaky do 1000 MPa** a **rýchlosť tvárnenia je do 300 m.s⁻¹**.

Výhodou je **vysoká produktivita** elektromagnetického tvárnenia, kde sa vyprodukuje niekoľko súčiastok za sekundu.

Nevýhodou je to, že použitie je limitované len na materiály s dobrou vodivosťou a je nutné aplikovať optimálny tvar cievok, aby vznikajúce bludné prúdy neeliminovali prúdy, potrebné na tvárnenie.

Tvárnenie vysokými rýchlosťami

Frekvenčné (pulzačné) tvárnenie

Frekvenčné tvárnenie delíme na dva typy, a to:

- 1) Tvárnenie s využitím kmitov s frekvenciou **od 25 do 500 Hz**,
- 2) Tvárnenie s využitím ultrazvukových kmitov, **vyšších ako 16 kHz**.

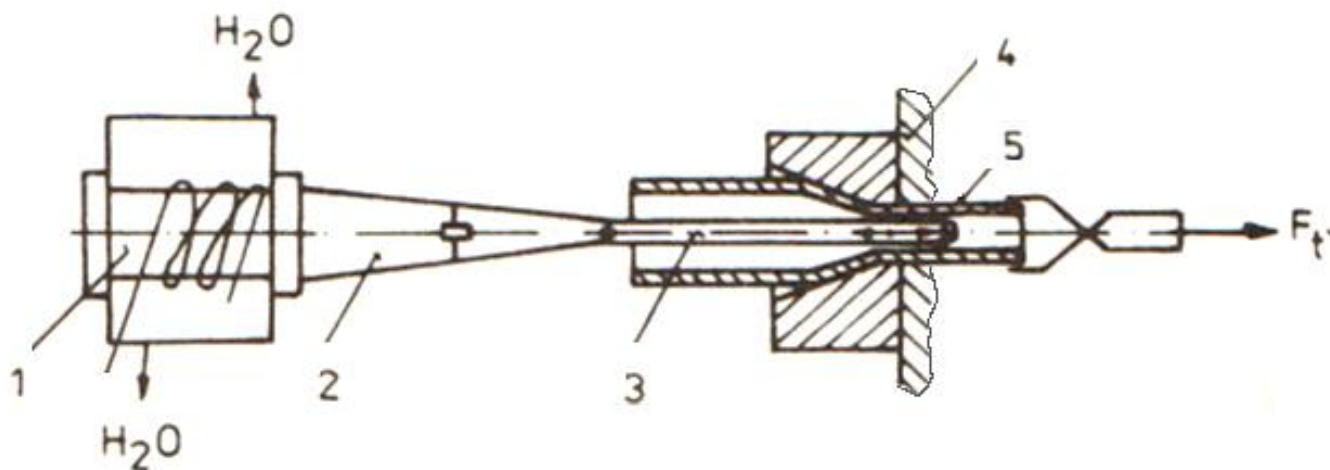
Nízke kmity (od 25 do 500 Hz) využívame pri superpozícii kmitov a pri mechanickom pohybe stroja v smere jeho budenia.

Využitie ultrazvukových kmitov s určitou frekvenciou pri tvárnení má funkciu **zníženia trenia** v kontaktnej dvojici N-V, **zvýšenia tváriteľnosti materiálu** a **zvýšenia čistiaceho účinku**. Nástroj a súčiastka pri vzájomnom kmitaní nemajú trvalý kontakt, čo sa prejaví nižšou hodnotou koeficientu trenia. **Zvýšenie tváriteľnosti materiálu** je spôsobené tým, že pri kmitaní dochádza v štruktúre **uvoľnenie dislokácií a tvorbe nových dislokácií**.

Najväčšou **nevýhodou** je nutnosť vyrobiť ultrazvukovú energiu, k čomu je potrebná finančne náročná rezonančná sústava. Ďalšia nevýhoda je náročné stanovenie ideálnej (optimálnej) frekvencie kmitania.

Tvárnenie vysokými rýchlosťami

Frekvenčné (pulzačné) tvárnenie

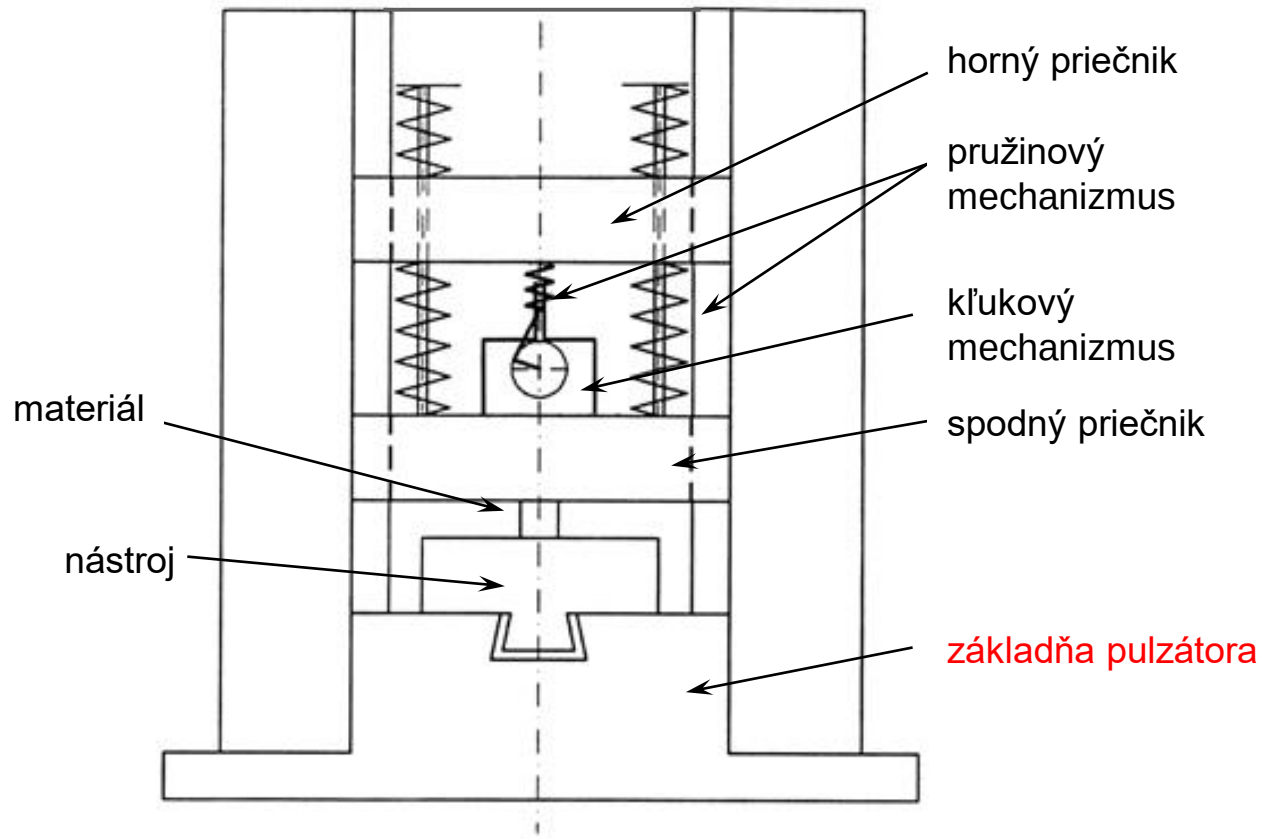


Princíp ťahania rúr na trní s podporou ultrazvuku

- 1 – magnetostrikčný menič, 2 – kužeľový koncentrátor ultrazvukovej energie,
3 – vlnovod a trň, 4 – prievlak, 5 – výtvarok

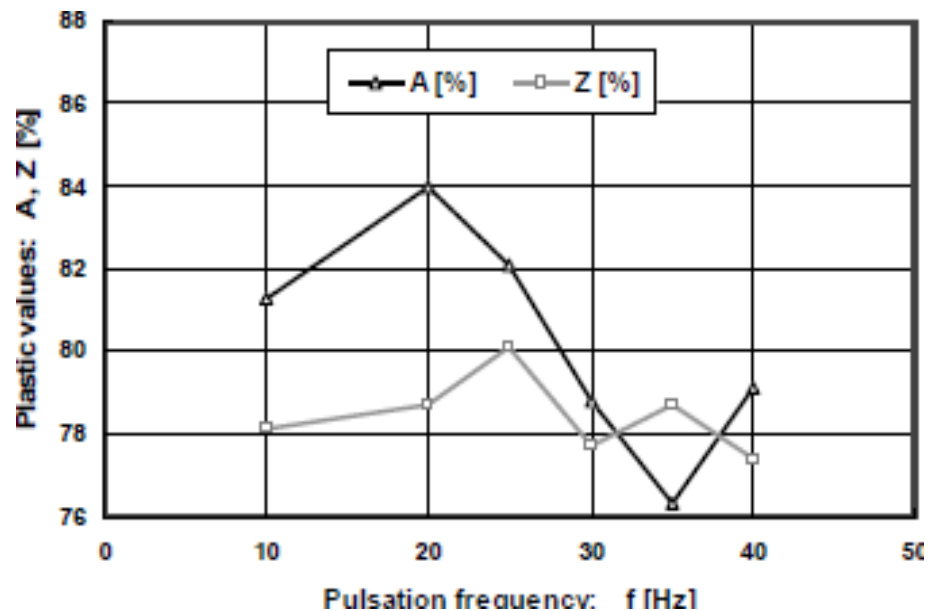
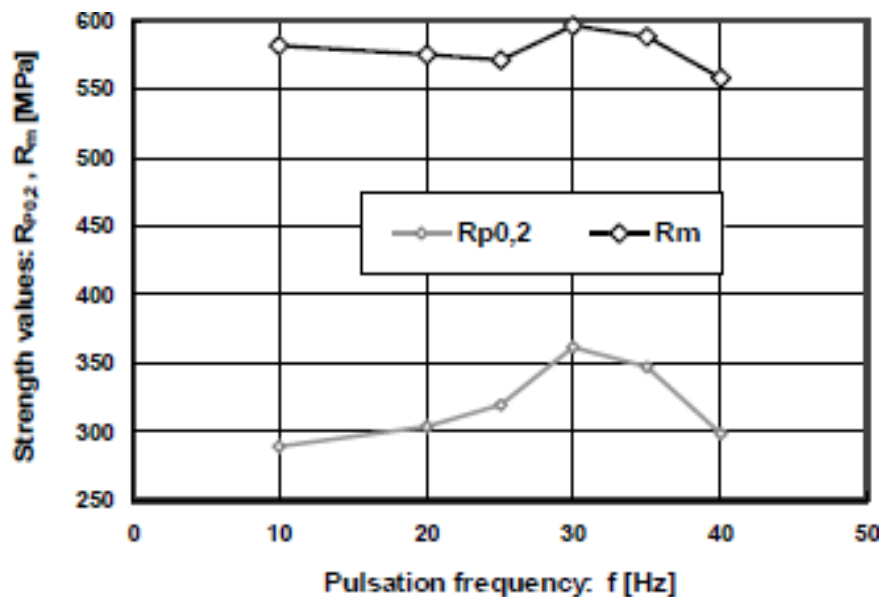
Tvárnienie vysokými rýchlosťami

Frekvenčné (pulzačné) tvárnienie – ubíjanie



Tvárnenie vysokými rýchlosťami

Frekvenčné (pulzačné) tvárnenie

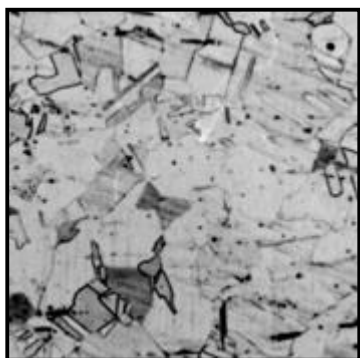


Najlepší kompromis pevnostných vlastností (medza sklzu, pevnosť v ťahu) a plastických vlastností (ťažnosť, kontrakcia) bol dosiahnutý pri pulzačnej frekvencii **od 20 do 35 Hz**.

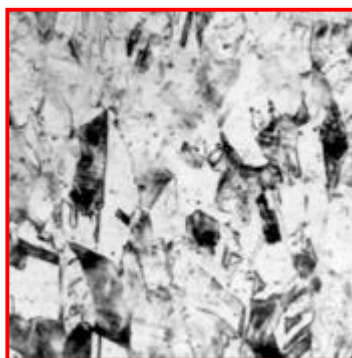
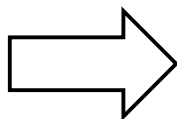
Najlepšie hodnoty plastické deformácie za tepla boli pozorované pri frekvencii pulzov **od 30 do 35 Hz**.

Tvárnenie vysokými rýchlosťami

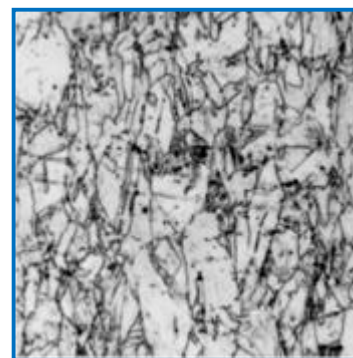
Frekvenčné (pulzačné) tvárnenie



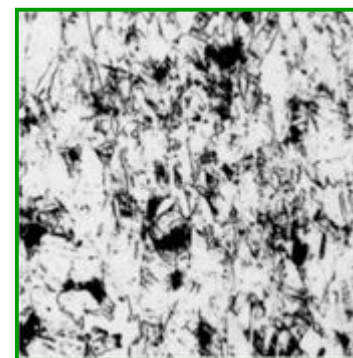
priemer zrna:
 $d\gamma=59\text{ }\mu\text{m}$



frekvencia
pulzu: 20 Hz,
priemer zrna:
 $d\gamma=53\text{ }\mu\text{m}$



frekvencia
pulzu: 30 Hz,
priemer zrna:
 $d\gamma=41\text{ }\mu\text{m}$



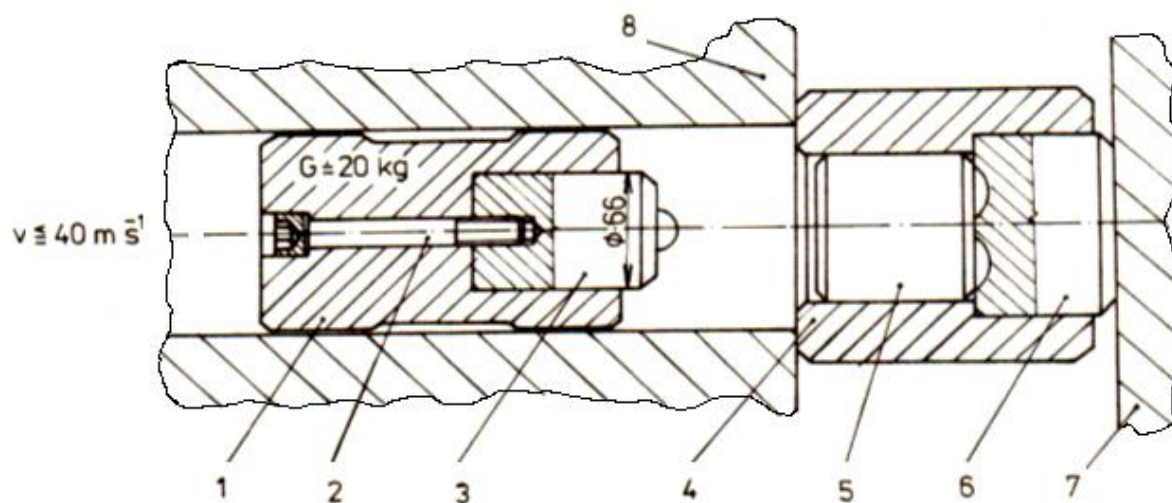
frekvencia
pulzu: **35 Hz**,
priemer zrna:
 $d\gamma=39\text{ }\mu\text{m}$

Najmenšie priemerné rozmery austenitického zrna boli dosahované pri pulzačnej frekvencii od 25 do 35 Hz.

Najjemnejšie austenitické zrno sa získalo pri pulzačnej frekvencii **35 Hz**.

Tvárnienie vysokými rýchlosťami

Dynamické vtláčanie – priame nastreľovanie

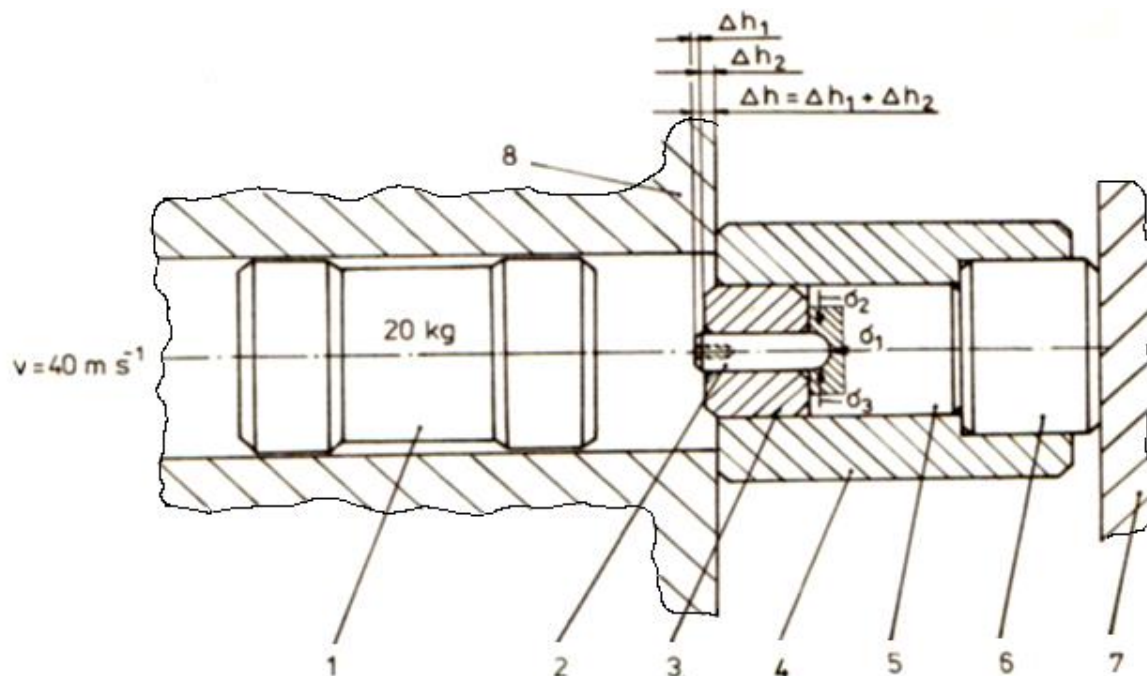


Princíp priameho nastreľovania

- 1 – baran, 2 – skrutka, 3 – razník, 4 – objímka, 5 – polotovar,
6 – podperný trň, 7 – uzamykací klin, 8 – vedenie

Tvárnenie vysokými rýchlosťami

Dynamické vtlačanie – **nepriame** nastrel'ovanie (natláčanie, kalibrovanie)



Princíp nepriameho nastrel'ovania

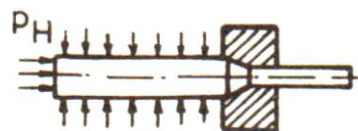
1 – baran, 2 – kalibračný razník, 3 – nátláčnik, 4 – objímka,
5 – polotovar, 6 – podperný trň, 7 – uzamykací klin, 8 – vedenie

Vysokoparametrické tvárnenie

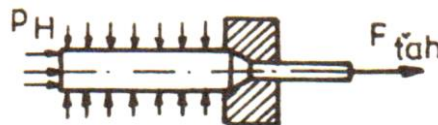
Hydrostatické tvárnenie

*Rozdelenie hydrostatického tvárnenia
podľa zaťažovania:*

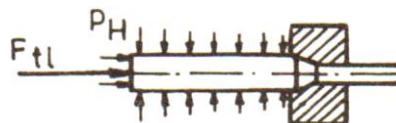
1) jednoduché



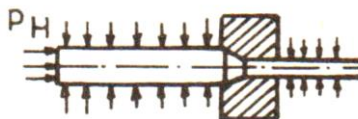
2) s ťahom



3) hydromechanické

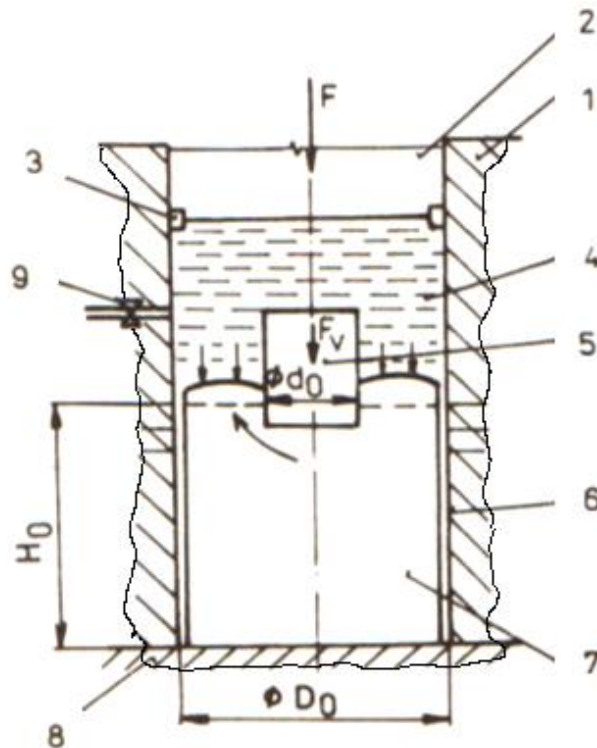


4) s protitlakom



Vysokoparametrické tvárnenie

Hydrostatické tvárnenie – vtláčanie

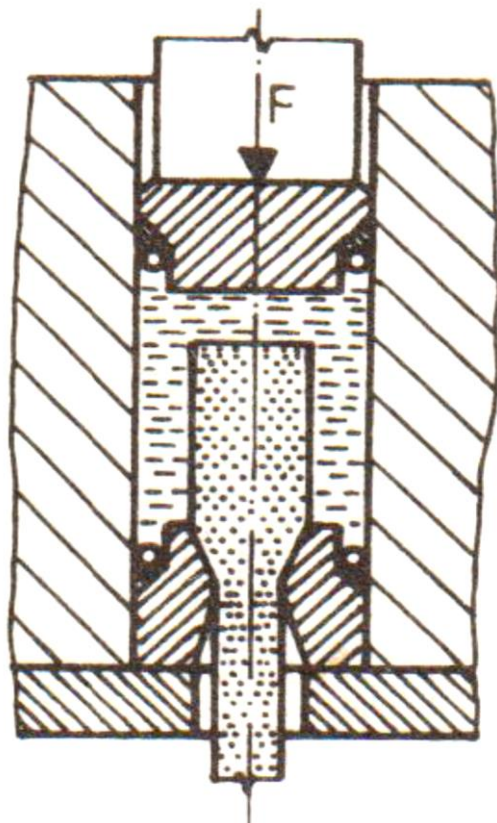


Princíp hydrostatického vtláčania

- 1 – tlaková komora, 2 – lisovník,
- 3 – tesnenie, 4 – médium,
- 5 – razník, 6 – žliabok, 7 – výtvarok,
- 8 – stôl, 9 – ventil

Vysokoparametrické tvárnenie

Hydrostatické tvárnenie – pretláčanie



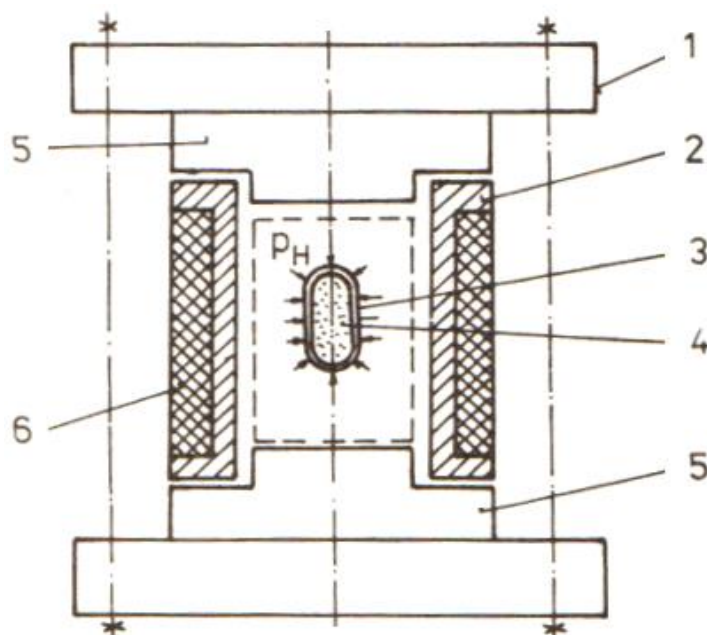
Princíp hydrostatického tvárnenia je v pôsobení hydrostatického **všestranného tlaku kvapalín** až do **3000 MPa**.

Okrem kvapalín sa aplikujú aj taveniny nízkotaviteľných kovov a zliatin, ale aj plyny.

Aplikácie: - pretláčanie,
- vtláčanie,
- objemové ťahanie,
- lisovanie práškov a granúl.

Vysokoparametrické tvárnenie

Izostatické tvárnenie – lisovanie



Princíp izostatického lisovania

- 1 – rám, 2 – tlaková nádoba, 3 – puzdro (technická guma),
4 – kovový prášok, 5 – priečniky, 6 – predpäté vinutie

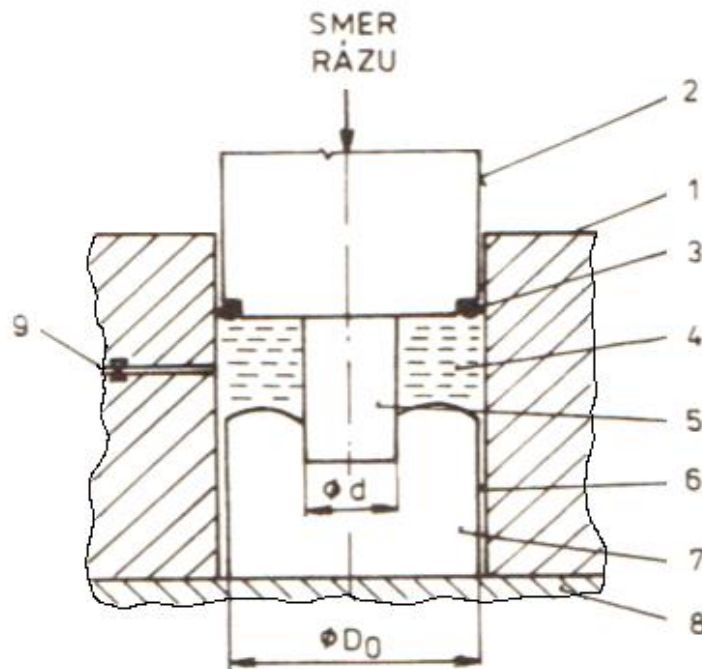
Princíp izostatického tvárnenia (IT) je v pôsobení **všestranného (3-osového) tlaku** na polotovary z práškov a granúl.

Rozdelenie IT **podľa teploty** na:

- 1) lisovanie **v studenej komore** (médium – olej),
- 2) lisovanie **v teplej komore** (médium – plyn (argón))

Vysokoparametrické tvárnenie

Hydrodynamické tvárnenie – vtláčanie



Princíp hydrodynamického vtláčania

- 1 – tlaková komora, 2 – lisovník,
3 – tesnenie, 4 – médium,
5 – razník, 6 – žliabok, 7 – výtvarok,
8 – stôl, 9 – ventil

Odporučená literatúra

BANABIC, D. 2007. Advanced methods in material forming. New York : Springer, 2007. ISBN 978-3-540-69844-9.

BLAŠČÍK, F. et al. *Technológia tvárnenia, zlievarenstva a zvarania*. Bratislava: Alfa Bratislava, 1988.

ČUPKA, V. Nekonvenčné metódy v tvárnení. 1990.

JANOVEC, J., DOMÁNKOVÁ, M., GRGAČ, P. Progresívne materiály a technológie. E-skriptum, AlumniPress, AIS MTF STU Trnava, 2008, 216 s., ISBN 978-80-8096-076-6.

KALPAKJIAN, S., SCHMID, S. Manufacturing Engineering and Technology. Massachusetts : PE-USR, 2010. pp. 1141 ISBN 9780136081685.

KLOCKE, F., BRUMMER, Ch. M. Laser-assisted metal spinning of challenging materials. In ICTP. 2014. Dostupné na:

https://www.researchgate.net/publication/275540192_Laser-assisted_Metal_Spinning_of_Challenging_Materials

LENFELD, P.: Technologie II. Tváření kovů a spracování plastů. TU Liberec. Dostupné na: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/obsah.htm.

MIELNIK, E. M. Metalworking Science and Engineering. College: McGraw-Hill, 1991.

MORAVEC, J. Nekonvenčné technológie tvárnenia kovov. Žilina: EDIS, 2003.

Odporučená literatúra

MUSIC, O., ALLWOOD, J. M., KAWAI, K. 2010. A review of the mechanics of metal spinning. *Journal of Materials Processing Technology*. 2010, vol. 210.

NOVOTNÝ, K., MACHÁČEK Z. Speciální technologie I. – plošné a objemové tváření. Brno. VUT Brno, 1986.

NEUGEBAUER, R., ALTAN, T., GEIGER, M., KLEINER, M., STERZING, A. Sheet Metal Forming at Elevated Temperatures. *In Annals of the CIRP* Vol. 55. 2006. Dostupné na: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S1660277306000090?token=FD704A22D54530533FC72606BE1AA4309358C8A7BD16669D7C92D673240E31E068CA4B;A56ADA1CEF2EDCF484AC510958&originRegion=eu-west-1&originCreation=20210610131854>.

SCHREK, A., KOSTKA, P., ČINÁK, P. Progresívne technológie tvárnenia. Bratislava: STU Bratislava, 2014.

TRZEPIECIŃSKI, T. Recent Developments and Trends in Sheet Metal Forming. *In Metals*. 2020. Dostupné na: <https://www.mdpi.com/2075-4701/10/6/779/htm>.