

PROGRESÍVNE METÓDY TVÁRNENIA

Inkrementálne procesy tvárnenia

Procesy inkrementálneho tvárnenia

Procesy inkrementálneho tvárnenia (IT) delíme na:

- Inkrementálne plošné tvárnenie
- Inkrementálne objemové tvárnenie
- IT v oblasti povrchového inžinierstva

Procesy inkrementálneho tvárnenia

Inkrementálne plošné tvárnenie:

- **Inkrementálne kovanie (vyklepávanie)** (Hammering)
- **Viacbodové tvárnenie** (Multi-Point Forming)
- **Inkrementálne plošné tvárnenie** (Incremental Sheet Forming)
- **Tlačenie (kovotlačenie)** (Metal Spinning)
- **Tvárnenie laserovým zväzkom** (Laser Forming)
- **Tvárnenie kvapalinovým prúdom** (Water Jet Forming)
- **Elektromagnetické inkrementálne tvárnenie** (Electromagnetic Incremental Forming)
- **Elektrohydraulické inkrementálne tvárnenie** (Electrohydraulic Incremental Forming)

Procesy inkrementálneho tvárnenia

Inkrementálne objemové tvárnenie:

- **Kovanie (voľné)** (Incremental Forging)
- **Orbitálne tvárnenie kývavou zápustkou** (Orbital Forming)
- **Rotačné kovanie** (Rotational Swaging)
- **Radiálne tvárnenie** (Radial Forming)
- **Valcovanie** (Rolling)
- **Valcovanie závitov** (Rolling Threads)
- **Inkrementálne valcovanie krúžkov**
(Incremental Ring-Rolling)

Procesy inkrementálneho tvárnenia

IT v oblasti povrchového inžinierstva:

- **Valčekovanie** (Roller Peening)
- **Guličkovanie** (Shot Peen Forming)
- **Laserové spevňovanie** (Laser Peening)

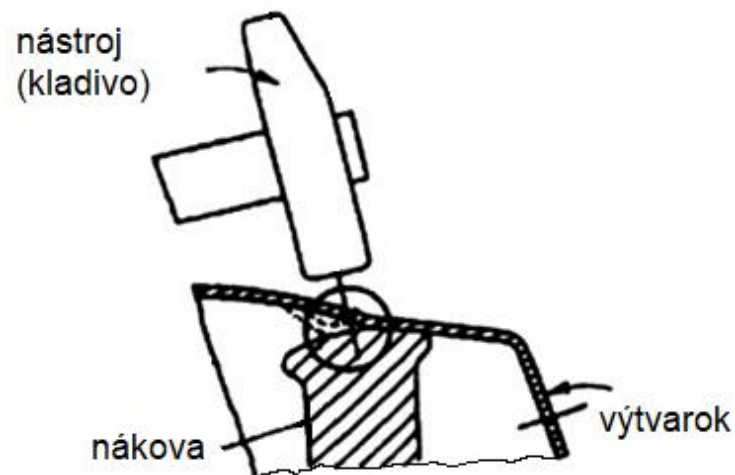
Inkrementálne plošné tvárnenie

Inkrementálne plošné tvárnenie:

- **Inkrementálne kovanie (vyklepávanie)** (Hammering)
- **Viacbodové tvárnenie** (Multi-Point Forming)
- **Inkrementálne plošné tvárnenie** (Incremental Sheet Forming)
- **Tlačenie (kovotlačenie)** (Metal Spinning)
- **Tvárnenie laserovým zväzkom** (Laser Forming)
- **Tvárnenie kvapalinovým prúdom** (Water Jet Forming)
- **Elektromagnetické inkrementálne tvárnenie**
(Electromagnetic Incremental Forming)
- **Elektrohydraulické inkrementálne tvárnenie**
(Electrohydraulic Incremental Forming)

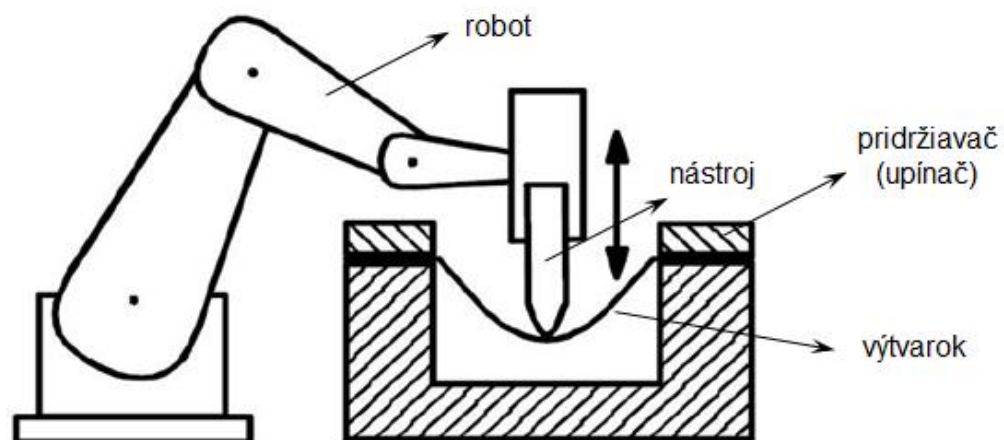
Inkrementálne plošné tvárnenie

Inkrementálne kovanie (vyklepávanie) (Hammering)



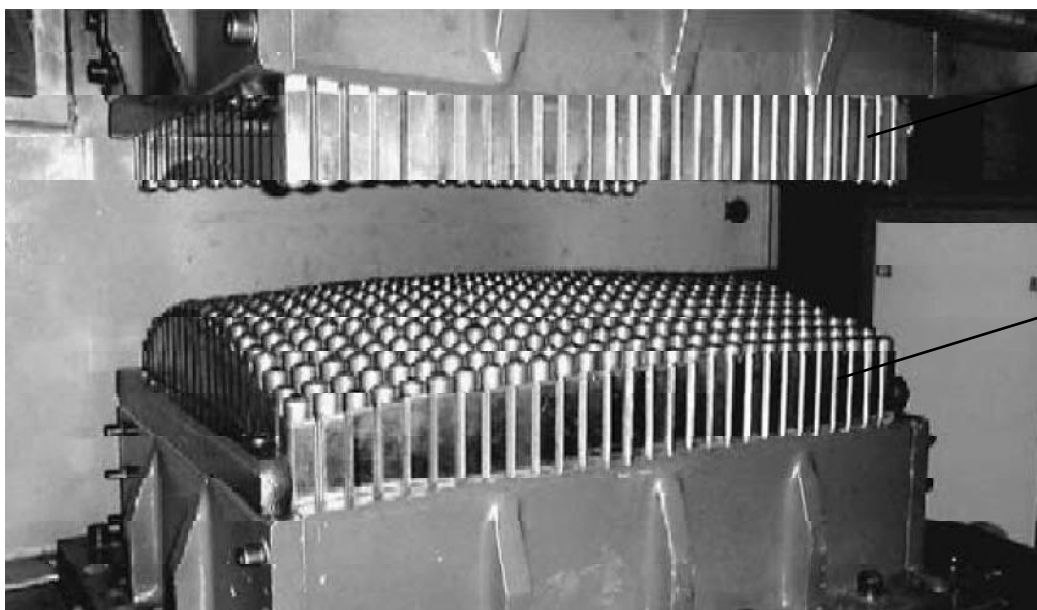
Inkrementálne plošné tvárnenie

Inkrementálne kovanie (vyklepávanie) (Hammering)



Inkrementálne plošné tvárnenie

Viacbodové tvárnenie (Multi-Point Forming)

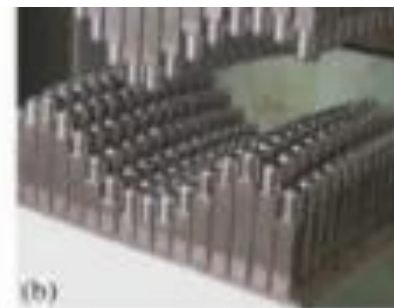


viacbodový
lisovník

viacbodová
lisovnica

Inkrementálne plošné tvárnenie

Viacbodové tvárnenie (Multi-Point Forming)



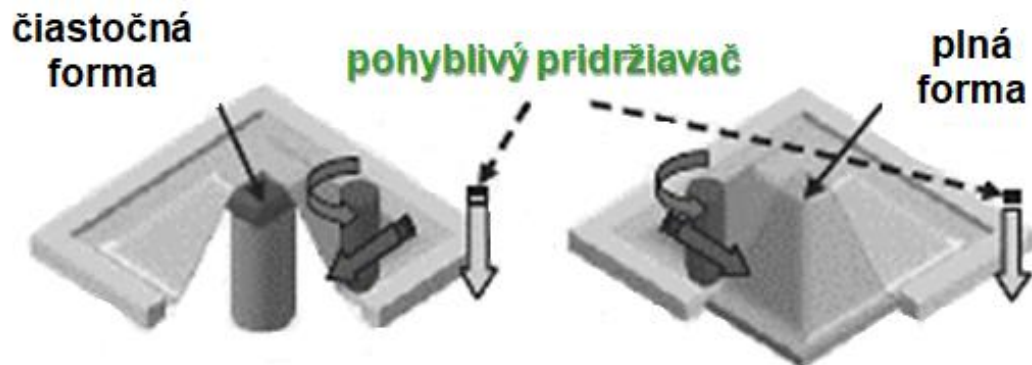
Inkrementálne plošné tvárnenie – klasifikácia

Inkrementálne plošné tvárnenie (Incremental Sheet Forming)



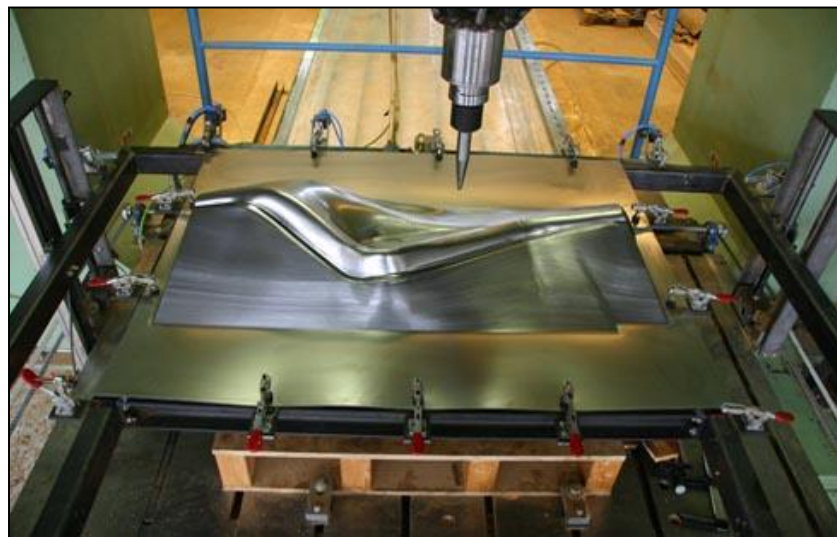
Single **P**oint **I**ncremental **F**orming (**SPIF**)

Two **P**oint **I**ncremental **F**orming (**TPIF**)



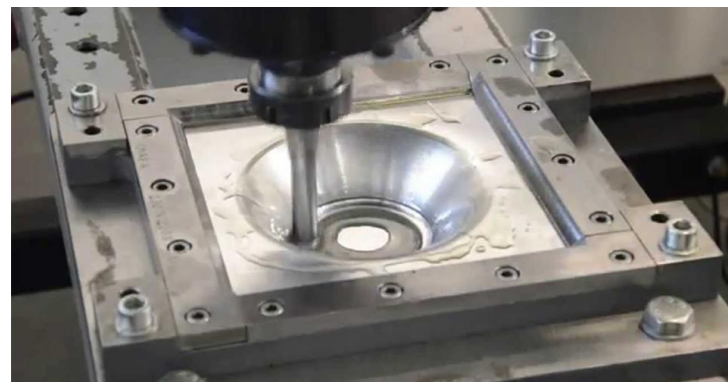
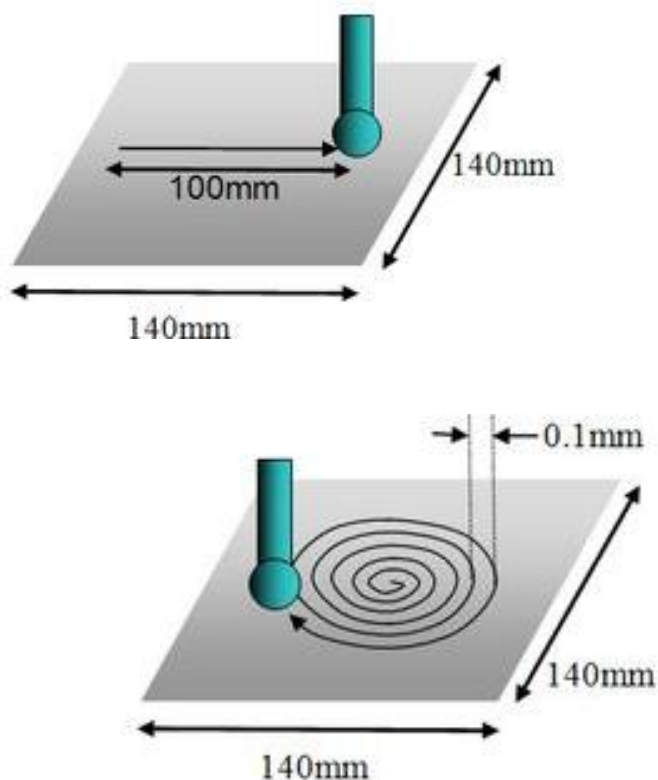
Inkrementálne plošné tvárnenie

Inkrementálne plošné tvárnenie (Incremental Sheet Forming)



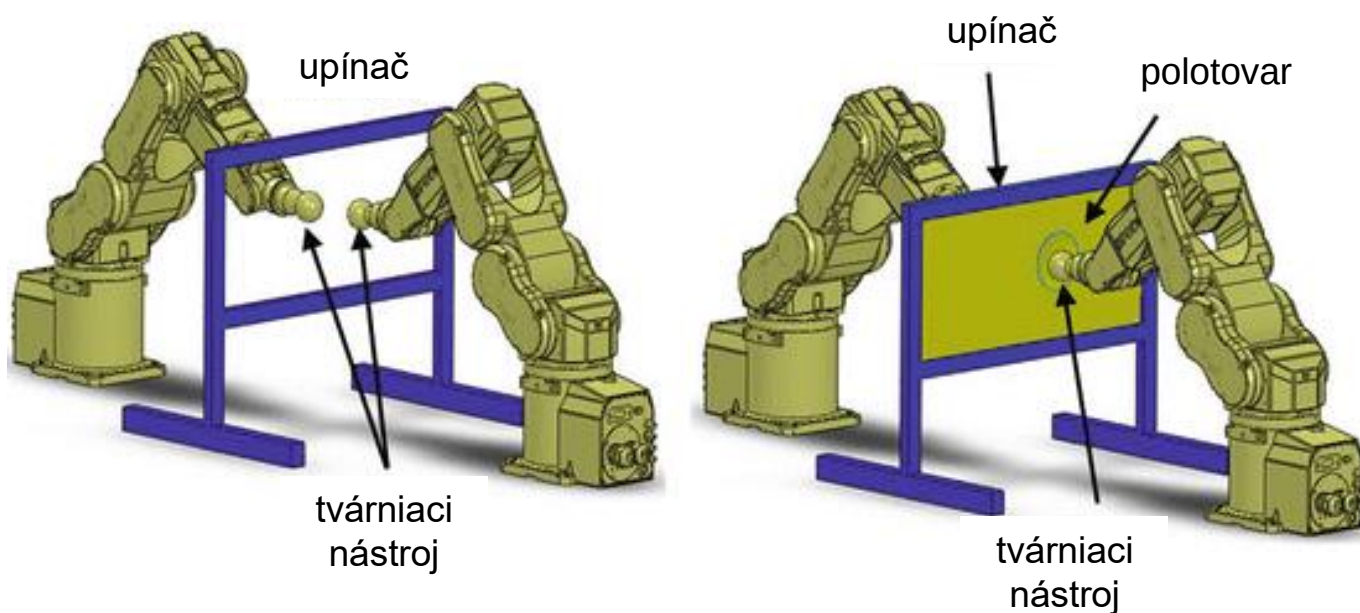
Inkrementálne plošné tvárnenie

Inkrementálne plošné tvárnenie (Incremental Sheet Forming)



Inkrementálne plošné tvárnenie

Inkrementálne plošné tvárnenie (Incremental Sheet Forming)



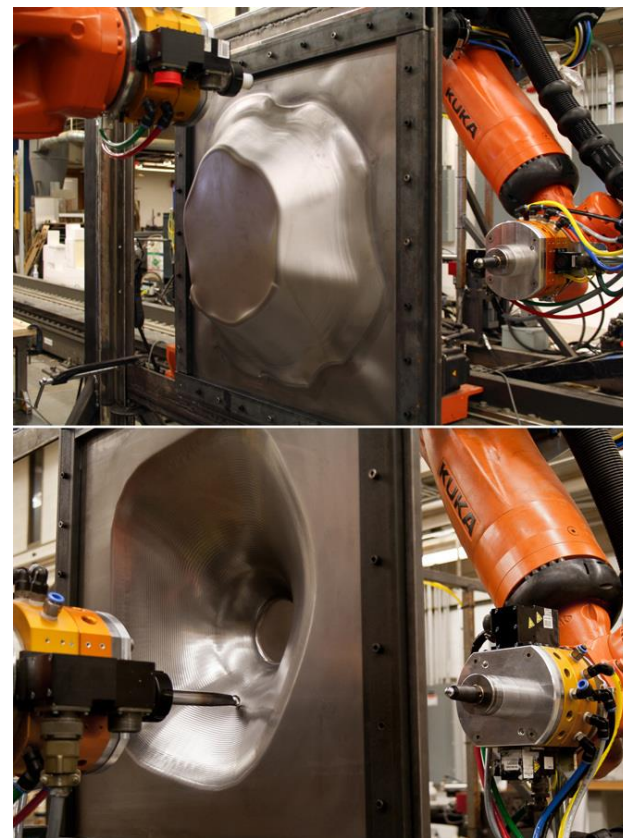
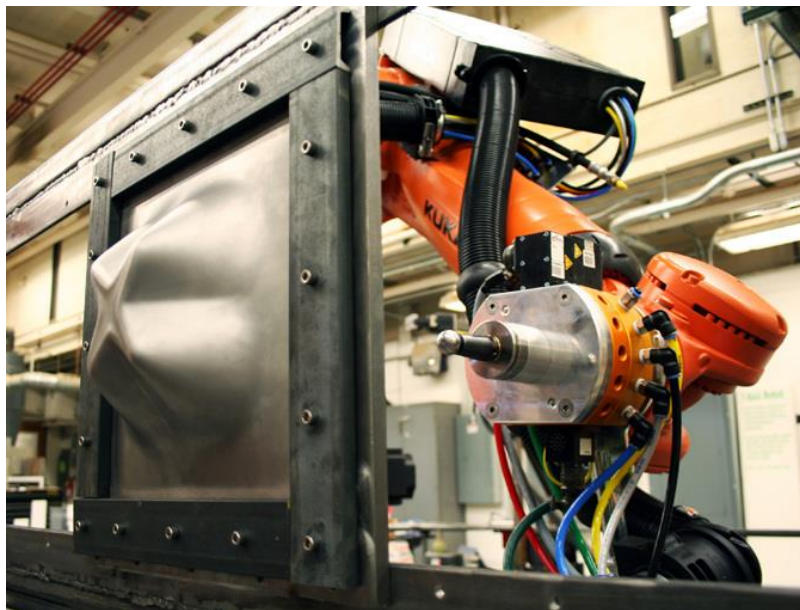
Inkrementálne plošné tvárnenie

Inkrementálne plošné tvárnenie (Incremental Sheet Forming)



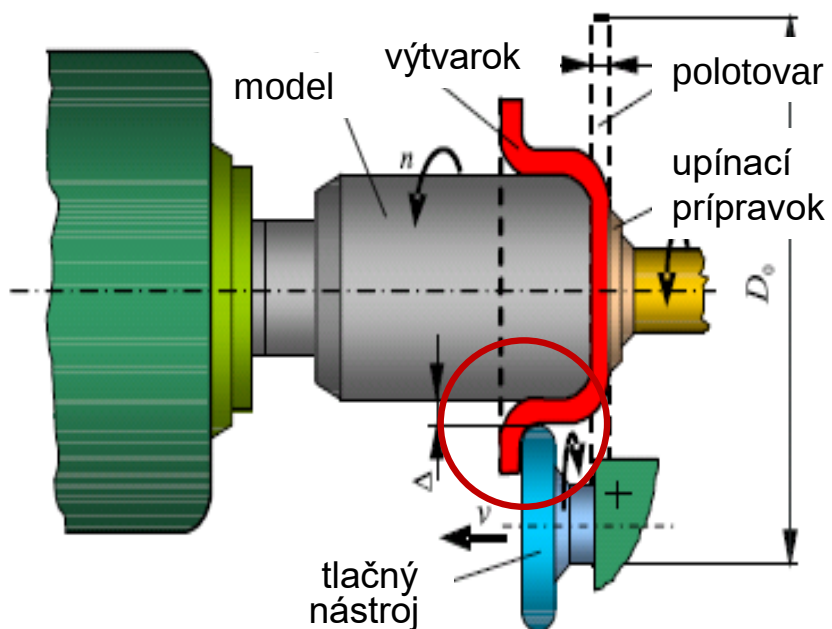
Inkrementálne plošné tvárnenie

Inkrementálne plošné tvárnenie (Incremental Sheet Forming)



Inkrementálne plošné tvárnenie

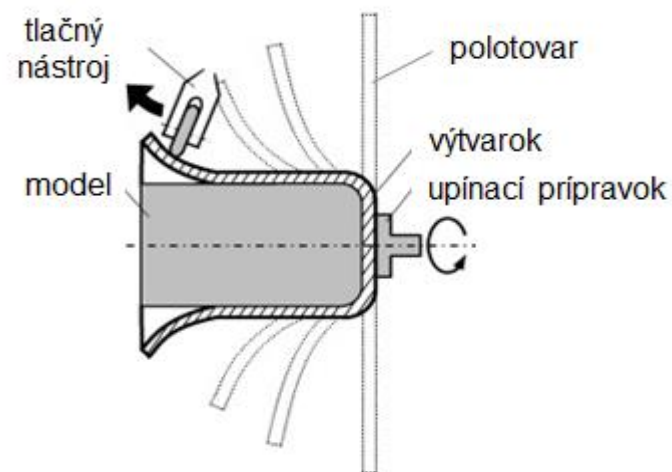
Tlačenie (Metal Spinning)



Inkrementálne plošné tvárnenie

Tlačenie (Metal Spinning) – klasifikácia

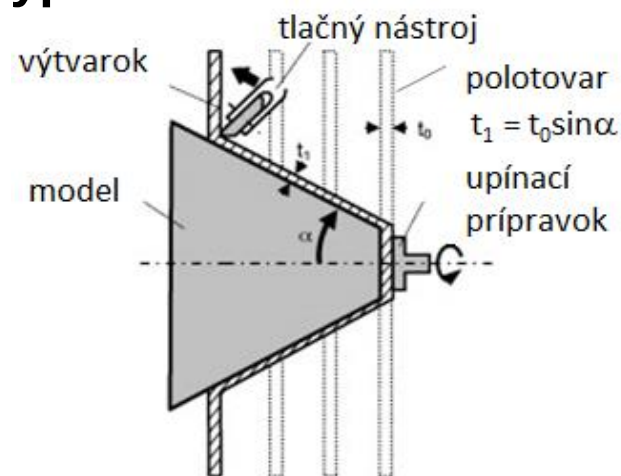
- **Konvenčné tlačenie**
(Conventional Spinning)
- **Tlačenie sklzom (šmykom) materiálu**
(Shear Spinning)
- **Tlačenie rotačných polotovarov valcového typu**
(Tube Spinning alebo Flow Spinning)



Inkrementálne plošné tvárnenie

Tlačenie (Metal Spinning) – klasifikácia

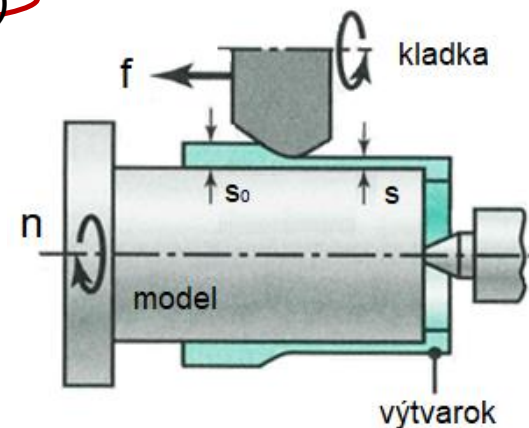
- **Konvenčné tlačenie**
(Conventional Spinning)
- **Tlačenie sklzom (šmykom) materiálu**
(Shear Spinning)
- **Tlačenie rotačných polotovarov valcového typu**
(Tube Spinning alebo Flow Spinning)



Inkrementálne plošné tvárnenie

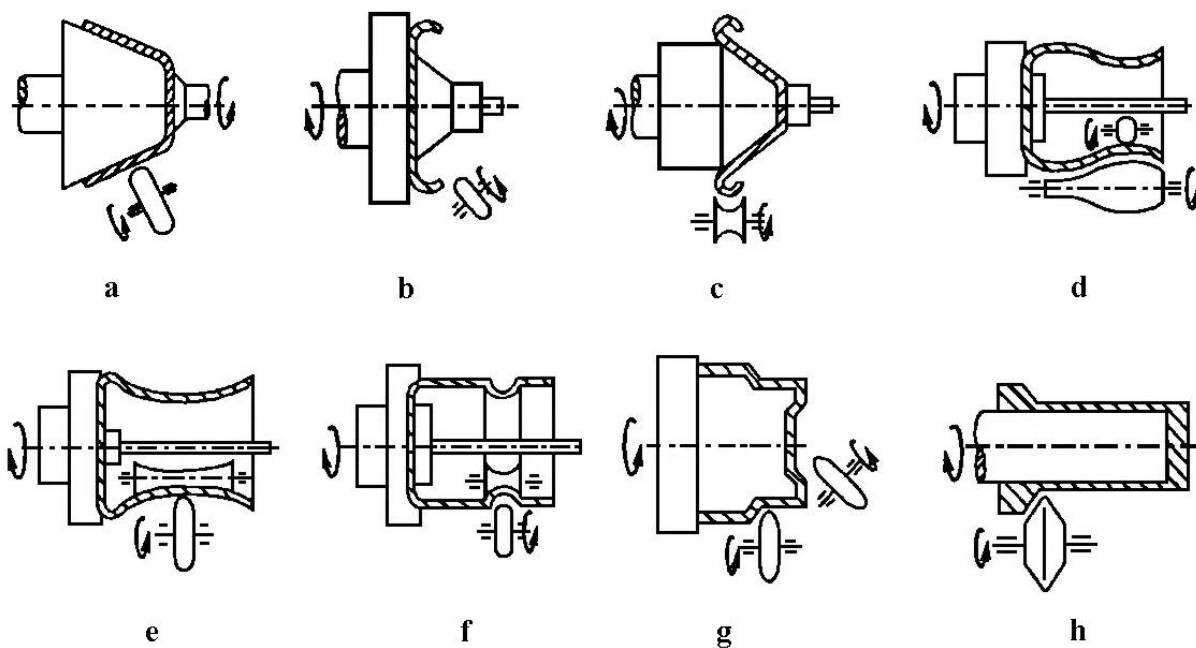
Tlačenie (Metal Spinning) – klasifikácia

- **Konvenčné tlačenie**
(Conventional Spinning)
- **Tlačenie sklzom (šmykom) materiálu**
(Shear Spinning)
- **Tlačenie rotačných polotovarov valcového typu**
(Tube Spinning alebo Flow Spinning, Power Spinning)



Inkrementálne plošné tvárnenie

Tlačenie (Metal Spinning) – operácie



Operácie tlačenia

a – tlačenie tvaru bez redukcie hrúbky steny, b – obrubovanie, c – lemovanie,
d – rozširovanie, e – zužovanie, f – žliabkovanie, g – osadzovanie a presadzovanie,
h – tlačenie s redukciou hrúbky steny

Inkrementálne plošné tvárnenie

Tlačenie (Metal Spinning)



CNC stroj DENN ZENN 80

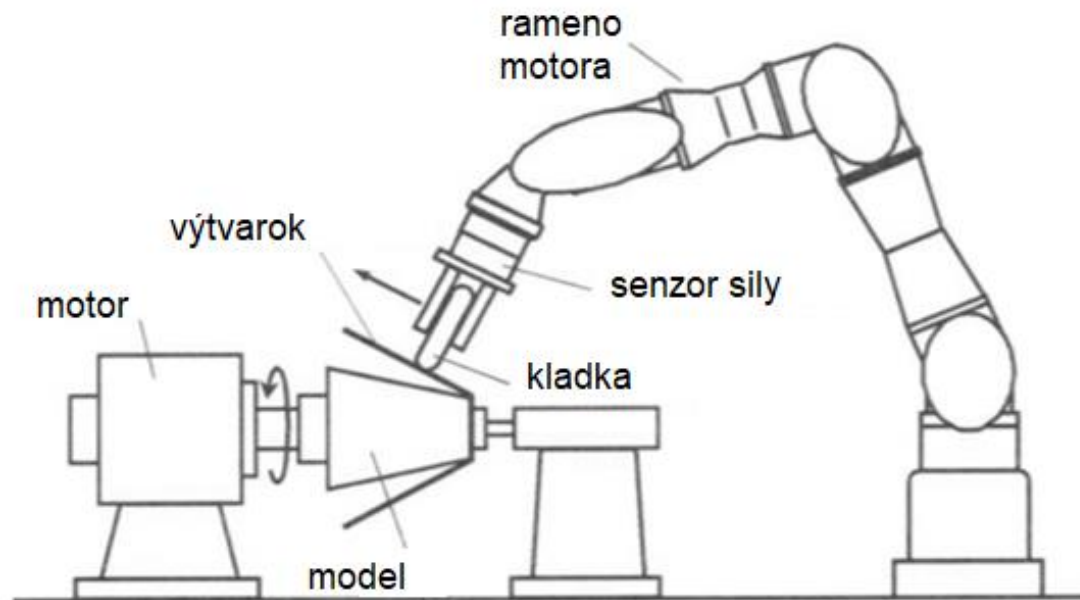


Proces tlačenia

1 – kladka, 2 – model, 3 – upínací prípravok,
4 – výtvarok

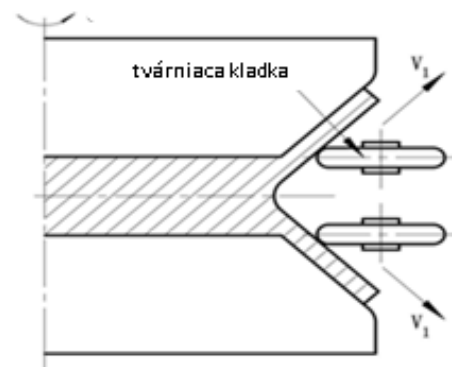
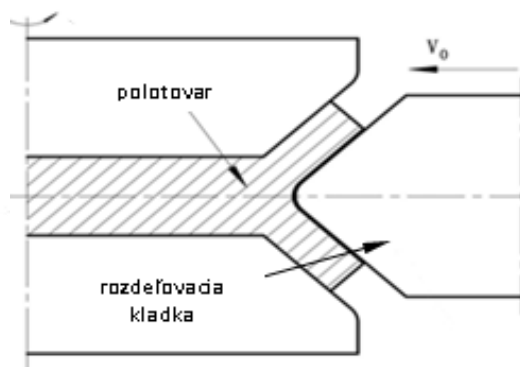
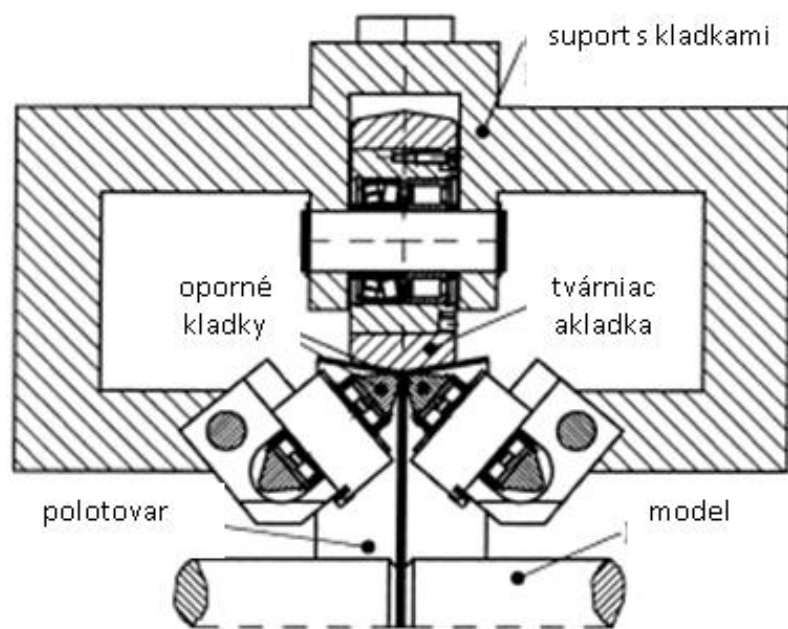
Inkrementálne plošné tvárnenie

Tlačenie (Metal Spinning) – aplikáciou robota



Inkrementálne plošné tvárnenie

Tlačenie (Splitting-Spinning)

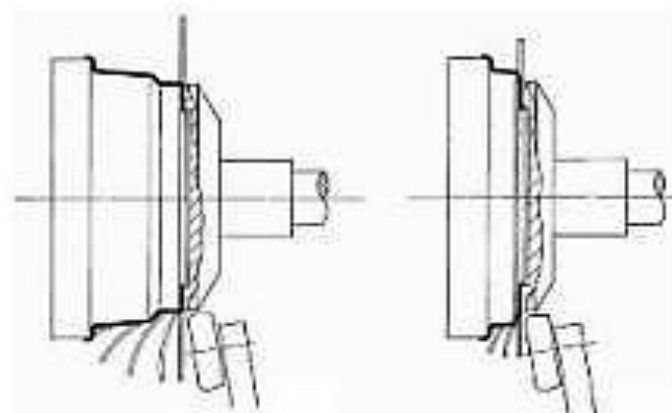


Inkrementálne plošné tvárnenie

Tlačenie (Splitting-Spinning)



polotovár – plech/prístrih



Inkrementálne plošné tvárnenie

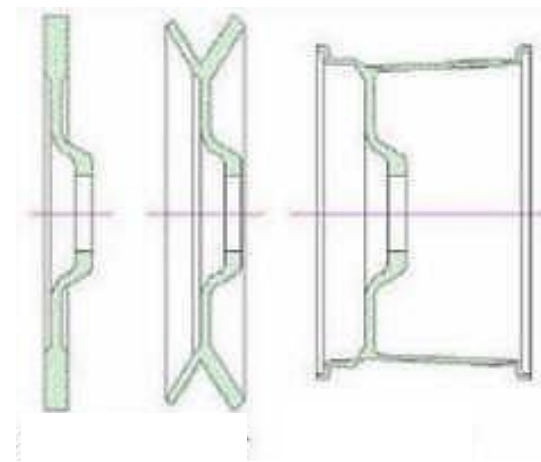
Tlačenie (Splitting-Spinning)



polotovar – výkovok

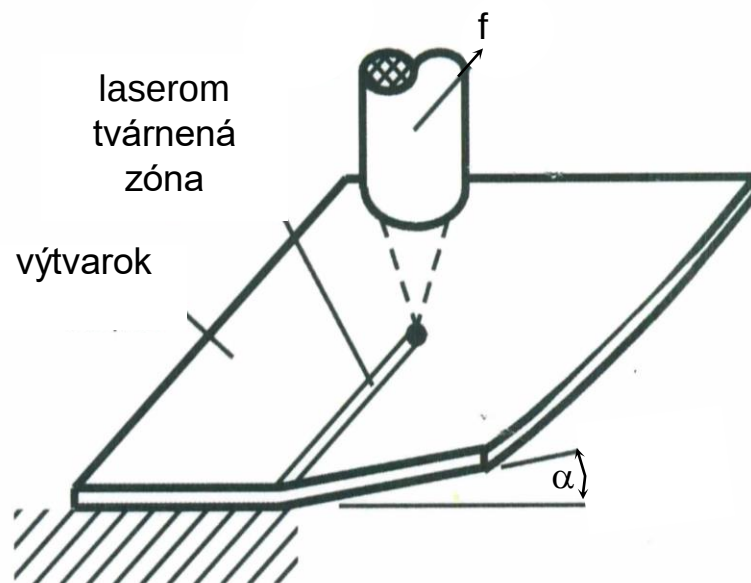


polotovar – odliatok



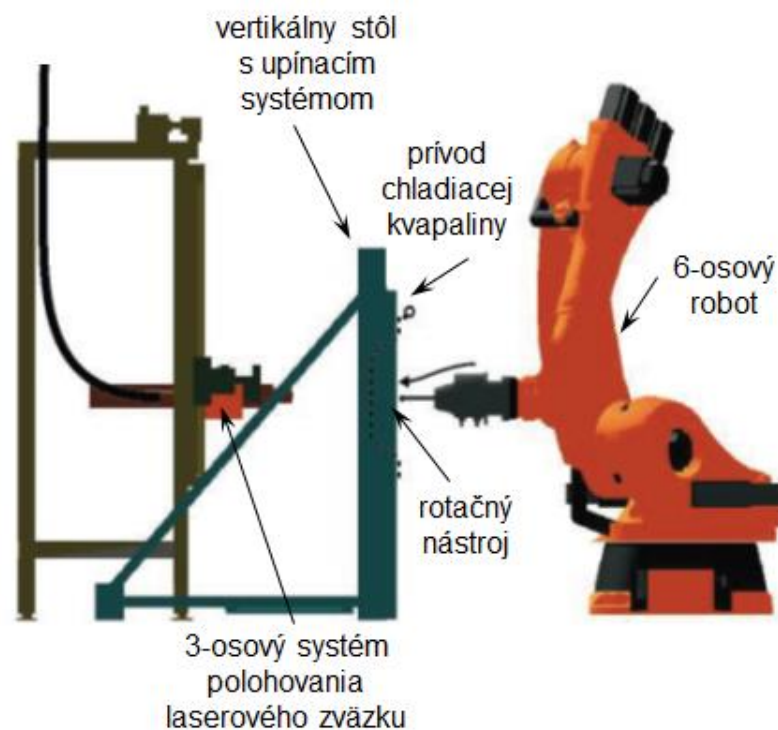
Inkrementálne plošné tvárnenie

Tvárnenie laserovým zväzkom (Laser Forming)



Inkrementálne plošné tvárnenie

Tvárnienie laserovým zväzkom (Laser Forming)

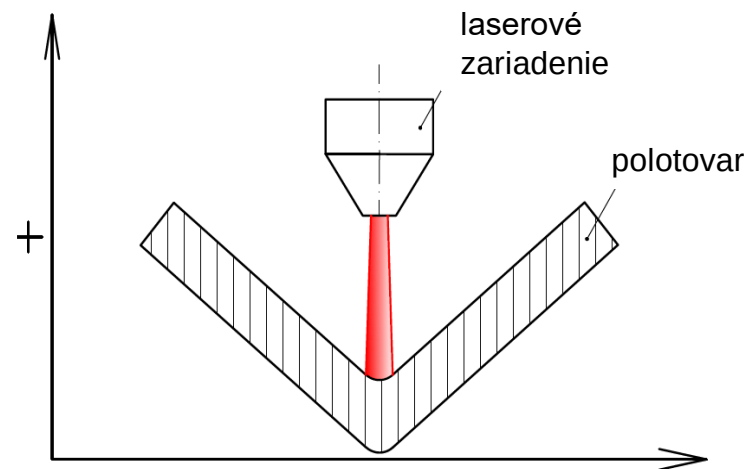


Inkrementálne plošné tvárnenie

Tvárnienie laserovým zväzkom (Laser Forming)

Mechanizmy tvárnenia laserom:

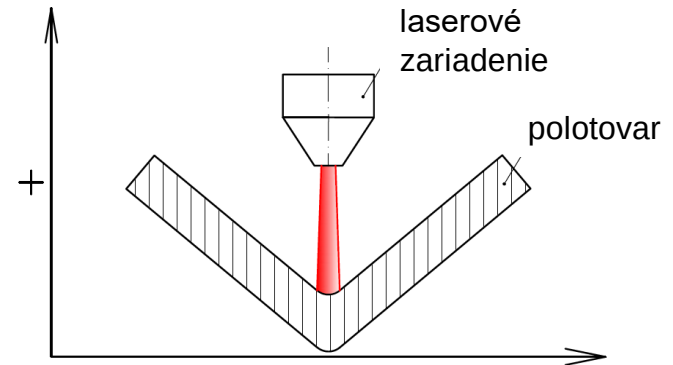
- Mechanizmus **teplotného gradientu**
- Mechanizmus **vzperu**
- Mechanizmus **stláčania**



Inkrementálne plošné tvárnenie

Tvárnienie laserovým zväzkom (Laser Forming)

Mechanizmus **teplotného gradientu**



Najčastejšie sa používa na ohýbanie polotovaru v kladnom smere. Parametre procesu sú nastavené tak aby viedli k vzniku prudkého teplotného gradientu v priereze materiálu. Výsledkom je rozdielna tepelná rozťažnosť v priereze.

Priemer lúča je rovnaký alebo o málo menší ako hrúbka materiálu. Rýchlosť posuvu musí byť primeraná aby bolo možné udržiavať teplotný gradient. Spočiatku sa plech ohýba v negatívnom smere – protiohyb, ale s následným ohrevom sa zvyšuje ohybový moment v materiáli, ktorý má opačný smer s protiohybom. Pri dosiahnutí napätia na medzi sklzu začína vznikať plastická deformácia a počas ochladzovania a zmrašťovania materiálu v povrchových vrstvách sa materiál začne ohýbať.

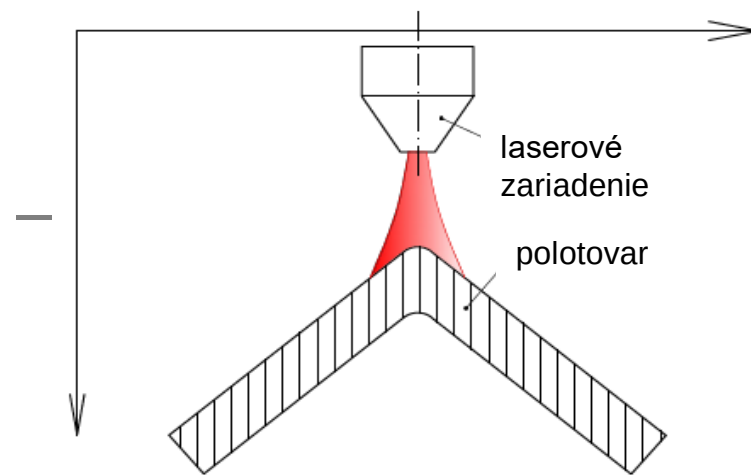
Ohyb dosahuje hodnoty približne **1° pri jednom prechode lasera.**

Inkrementálne plošné tvárnenie

Tvárnienie laserovým zväzkom (Laser Forming)

Mechanizmy tvárnenia laserom:

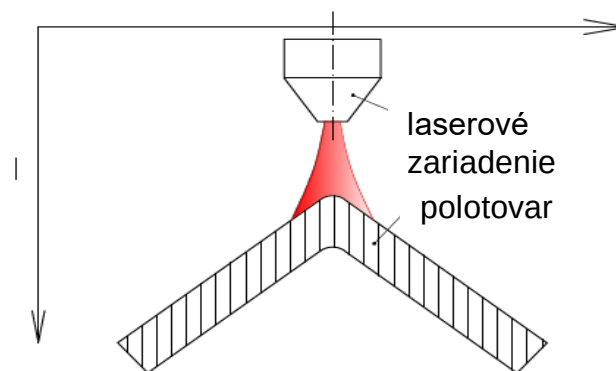
- Mechanizmus **teplotného gradientu**
- Mechanizmus **vzperu**
- Mechanizmus **stláčania**



Inkrementálne plošné tvárnenie

Tvárnienie laserovým zväzkom (Laser Forming)

Mechanizmus **vzperu**



Pri mechanizmoch vzperu je **priemer lúča omnoho väčší ako hrúbka materiálu a je použitá výrazne menšia rýchlosť posuvu**. Výsledkom je vznik veľkého množstva termoelastických napätí, ktoré sa prejavajú ako lokálny termoelastický vzper v priereze materiálu. Takto sa dosahuje ohyb materiálu prednostne v zápornom smere, ale v niektorých prípadoch aj v kladnom smere. Smer závisí na faktoroch ako sú veľkosť predohybu, zostatkové napätia v materiáli a smer, v ktorom vznikajú elastické deformácie. Toto sa dosahuje napr. riadeným chladením prúdom vzduchu z opačnej strany pôsobiska lasera.

Ohyb dosahuje hodnoty **od 1° do 15°**.

Inkrementálne plošné tvárnenie

Tvárnenie laserovým zväzkom (Laser Forming)

Mechanizmy tvárnenia laserom:

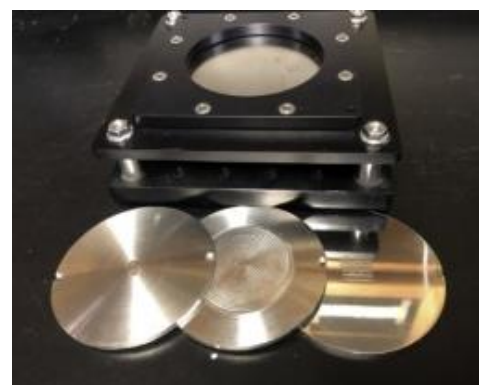
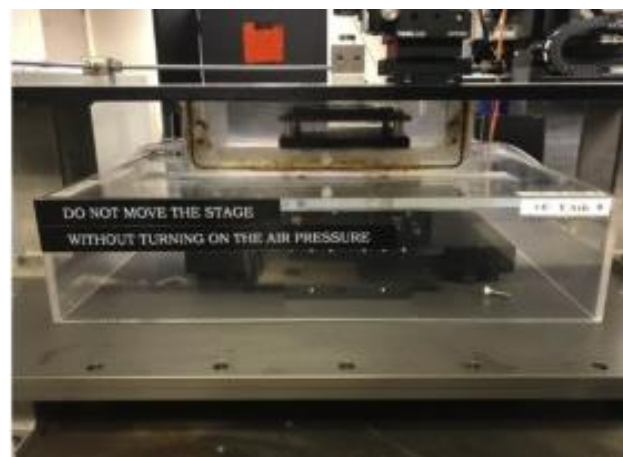
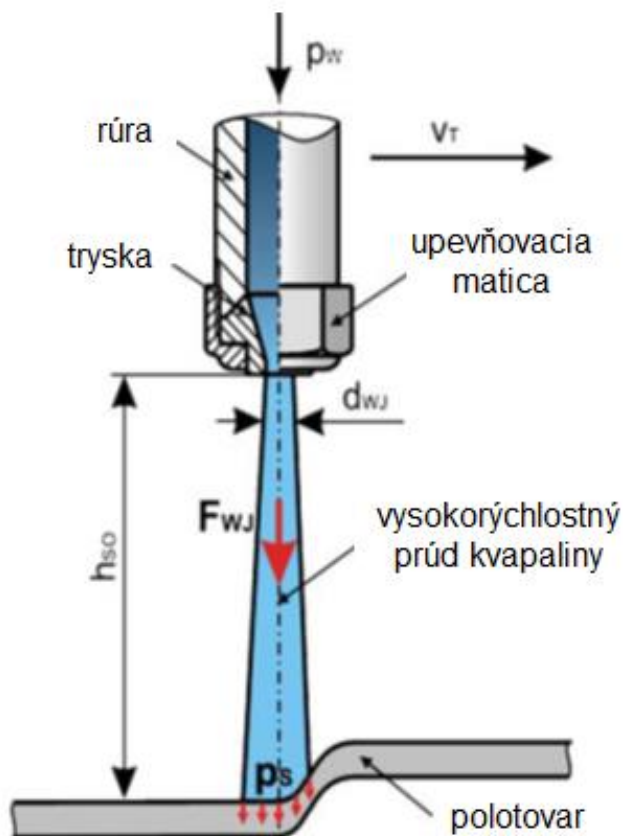
- Mechanizmus **teplotného gradientu**
- Mechanizmus **vzperu**
- Mechanizmus **stláčania**

Pre mechanizmus stláčania je dôležitý východiskový tvar polotovaru, ktorý zabraňuje vzniku vzperu kvôli väčšiemu momentu zotrvačnosti v porovnaní s rovinnými polotovarmi, tzv. prístrihmi. Tento mechanizmus môže byť potom použitý na skracovanie alebo predlžovanie polotovarov v rovine.

Tento mechanizmus sa dá použiť napríklad na **ohýbanie rúr** v rôznom smere v závislosti od miest ohrevu materiálu alebo pri výrobe **mikrosúčiastok**.

Inkrementálne plošné tvárnenie

Tvárnienie kvapalinovým prúdom (Water Jet Forming)



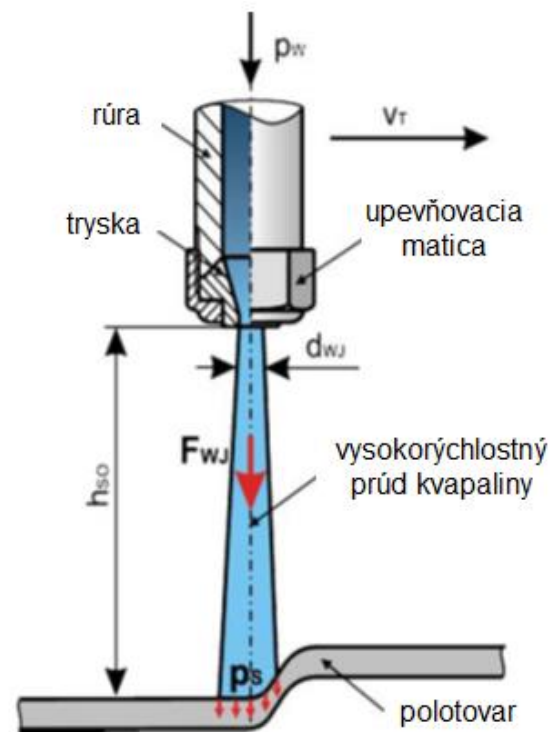
Inkrementálne plošné tvárnenie

Tvárnenie kvapalinovým prúdom (Water Jet Forming)

Princíp tvárnenia kvapalinovým prúdom je založený na technológii **vysokorýchlostného a vysokotlakového kvapalinového lúča**.

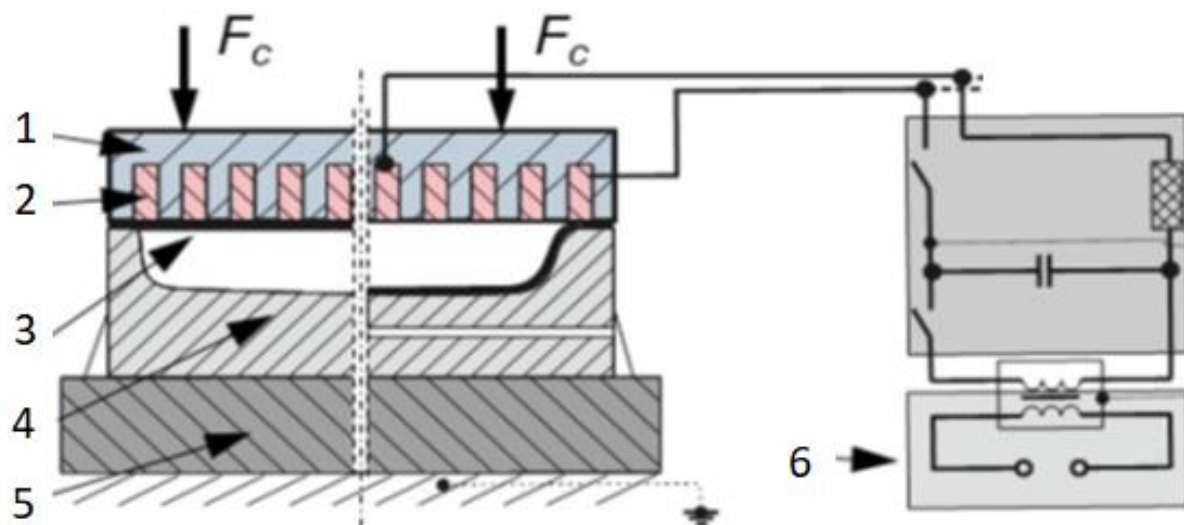
Polotovár – zvyčajne prístrih je upnutý na pracovnom stole pomocou upínacích prípravkov. Vysokorýchlostný a vysokotlakový kvapalinový prúd pôsobí na povrch polotovaru svojou kinetickou energiou dodanou kvapaline čerpadlom. Keď tlak prekročí hodnotu medze sklzu v materiáli vzniká čiastočná plastická deformácia. Pomocou CNC riadeného systému, s naprogramovanou trajektóriou, **kvapalinový prúd tvárni v jednej vrstve** požadovanú časť povrchu polotovaru.

Po prestavení technologických parametrov procesu nasleduje tvárnenie ďalšej vrstvy a tvárnením vrstvy za vrstvou dosiahneme požadovaný tvar výrobku.



Inkrementálne plošné tvárnenie – vysokorýchlostné

Tvárnenie elektromagnetické (Electromagnetic Forming) – princíp



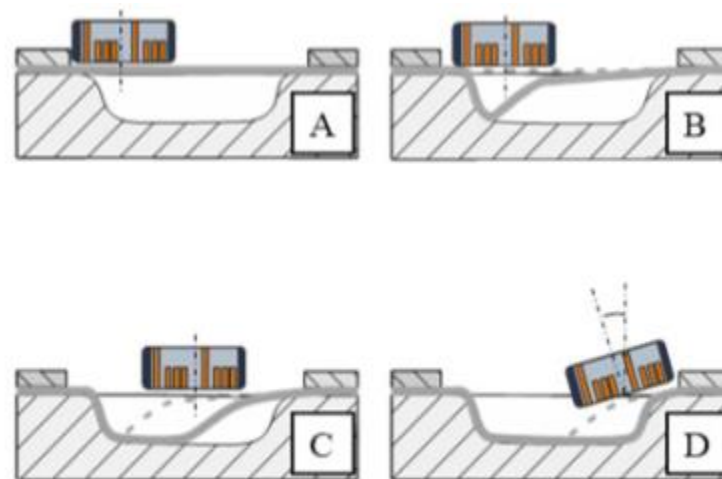
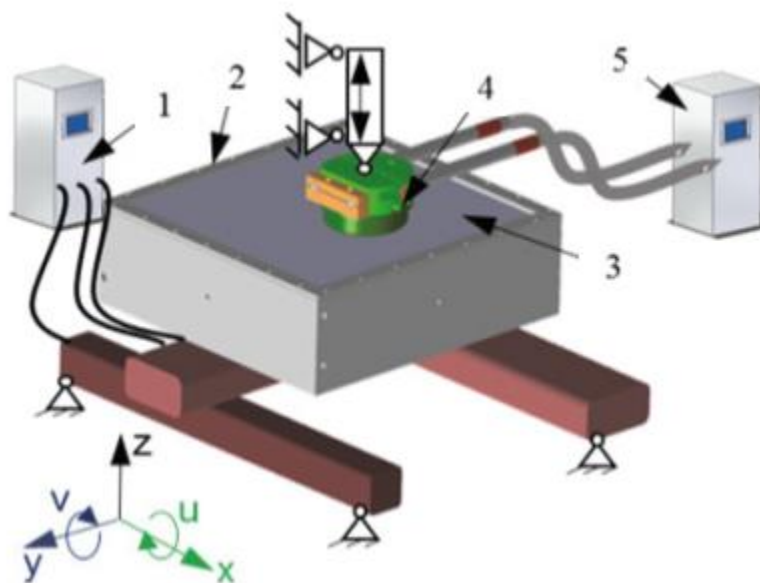
Princíp elektromagnetického vysokorýchlostného tvárnenia

F_C – upínacia sila

1 – elektromagnetický nástroj, 2 – vinutie, 3 – polotovar/výtvarok,
4 – lisovnica, 5 – držiak (upínacia doska), 6 – pulzný generátor,

Inkrementálne plošné tvárnenie – vysokorýchlostné

Elektromagnetické inkrementálne tvárnenie (Electromagnetic Incremental Forming)

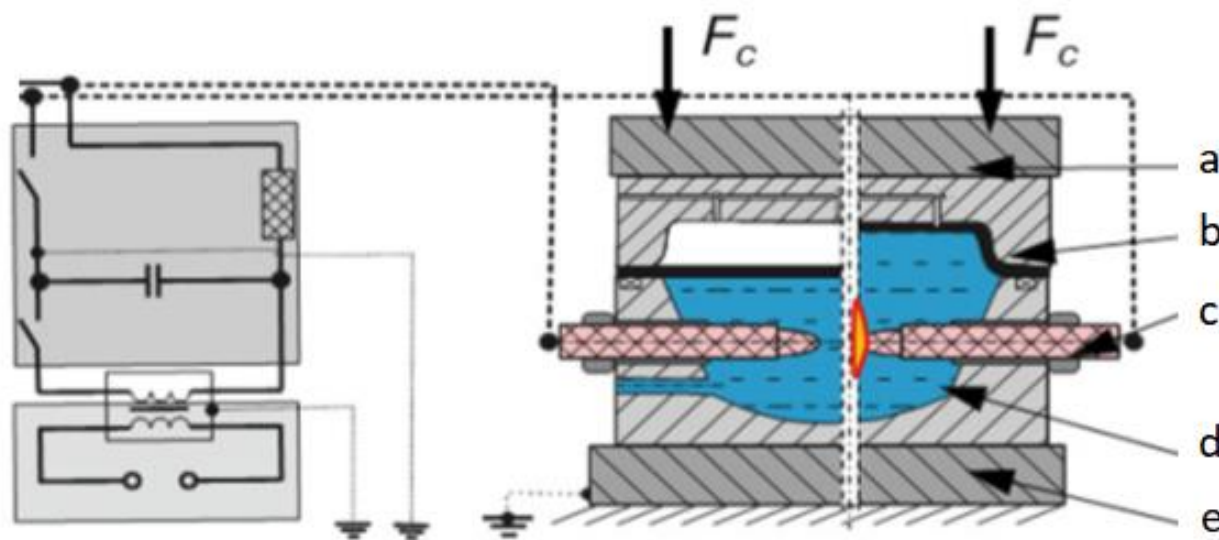


Princíp elektromagnetického vysokorýchlostného inkrementálneho tvárnenia

1 – riadiaca jednotka, 2 – upínací rám, 3 – polotovár,
4 – nástrojová cievka (nástroj), 5 – pulzný generátor,

Inkrementálne plošné tvárnenie – vysokorýchlostné

Tvárnenie elektrohydraulické (Electrohydraulic Forming) – princíp



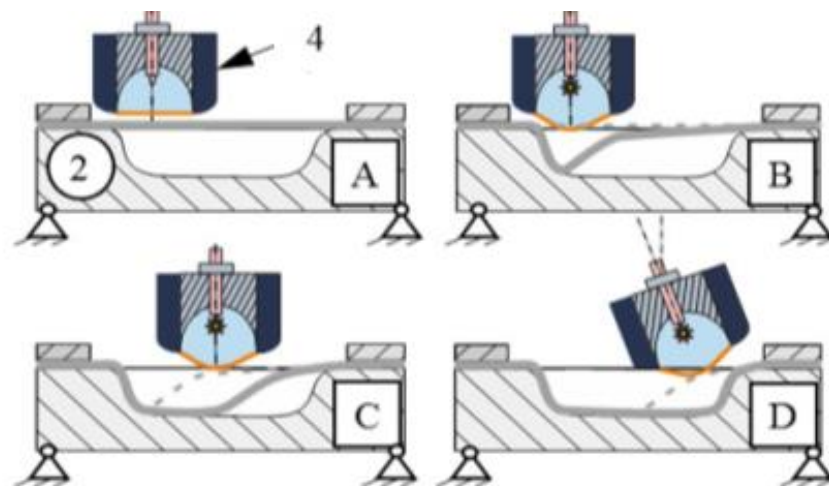
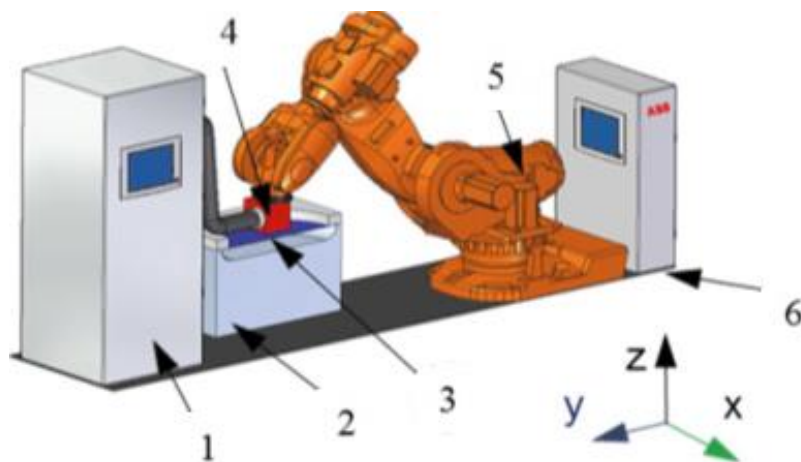
Princíp elektrohydraulického vysokorýchlostného tvarovania

F_c – upínacia sila

a – nástroj, b – polotovar/výtvarok, c – elektródy d – tlaková komora,
e – držiak nástroja

Inkrementálne plošné tvárnenie – vysokorýchlostné

Elektrohydraulické inkrementálne tvárnenie (Electrohydraulic Incremental Forming)

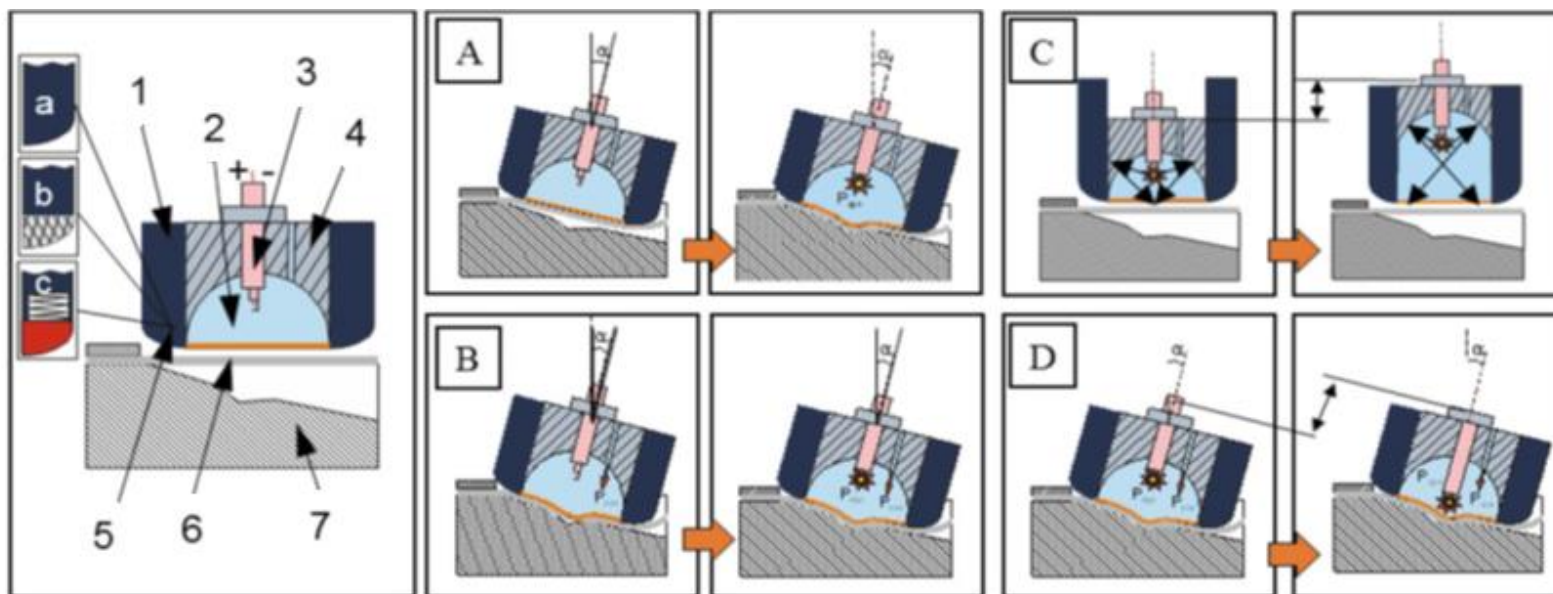


Princíp elektrohydraulického vysokorýchlostného inkrementálneho tvárnenia

1 – pulzný generátor, 2 – lisovnica, vinutie, 3 – polotovar,
4 – elektrohydraulický nástroj, 5 – robot, 6 – riadiaca jednotka

Inkrementálne plošné tvárnenie – vysokorýchlostné

Elektrohydraulické inkrementálne tvárnenie (Electrohydraulic Incremental Forming)



Nastavenie nástroja v procese elektrohydraulického inkrementálneho tvárnenia

- 1 – nástrojové puzdro, 2 – pracovné médium, 3 – elektródy, 4 – tlaková komora,
5 – kontaktná zóna (5a – pevný kontakt, 5b – elastický kontakt, 5c – pružná kontaktná zóna),
6 – polotovár, 7 – lisovnica

Inkrementálne objemové tvárnenie

Inkrementálne objemové tvárnenie:

- **Kovanie (voľné)** (Incremental Forging)
- **Orbitálne tvárnenie kývavou zápustkou** (Orbital Forming)
- **Rotačné kovanie** (Rotational Swaging)
- **Radiálne tvárnenie** (Radial Forming)
- **Valcovanie** (Rolling)
- **Valcovanie závitov** (Rolling Threads)
- **Inkrementálne valcovanie krúžkov**
(Incremental Ring-Rolling)

Inkrementálne objemové tvárnenie

Kovanie (voľné) (Incremental Forging)

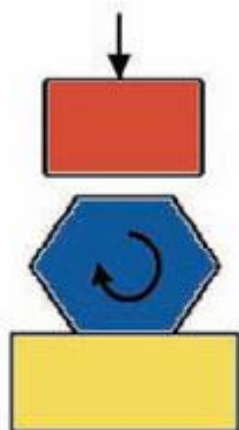
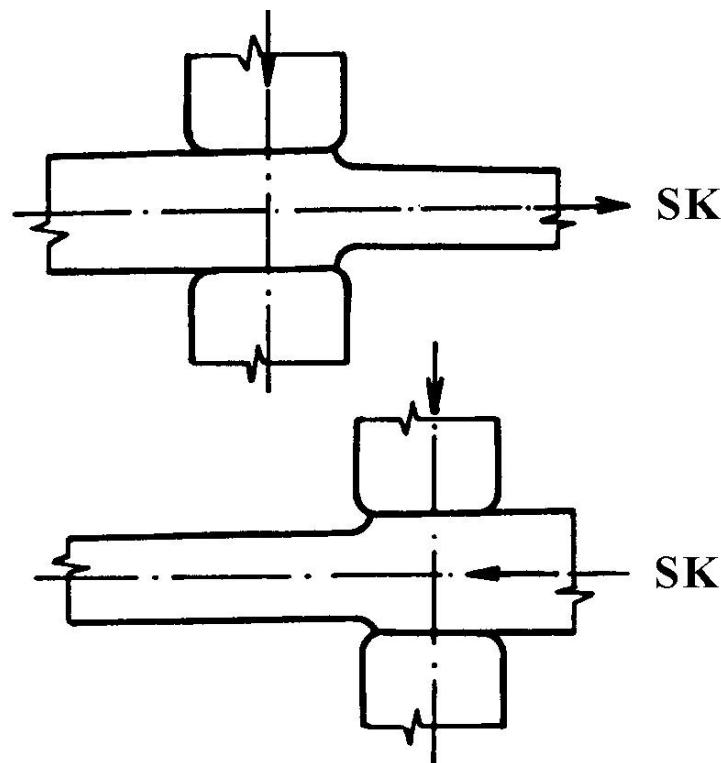


Schéma voľného kovania

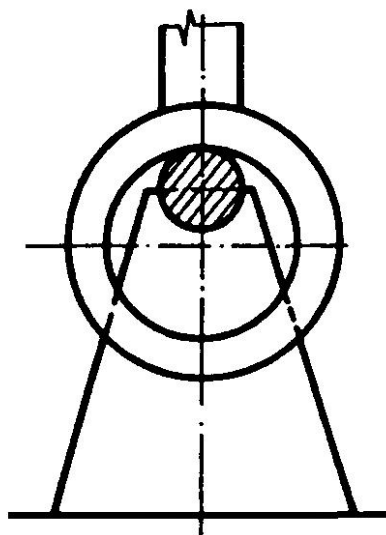
Schéma predlžovania

a – predlžovanie k sebe, b – predlžovanie od seba
SK – strana kováča

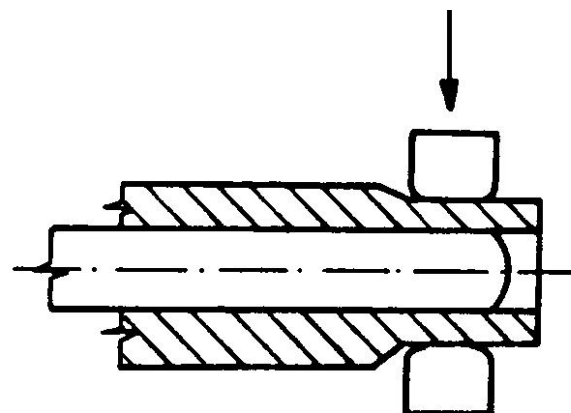


Inkrementálne objemové tvárnenie

Kovanie (Incremental Forging)



a



b

Schéma kovania na trní
a – rozširovanie, b – predlžovanie

Inkrementálne objemové tvárnenie

Kovanie (Incremental Forging)

Schéma osadzovania

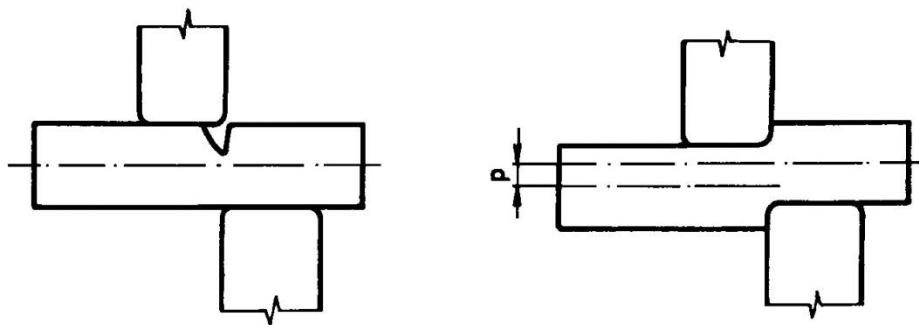
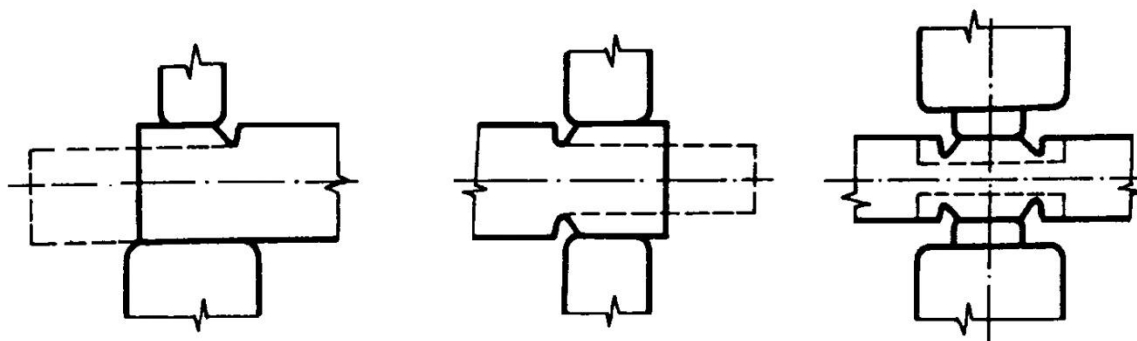
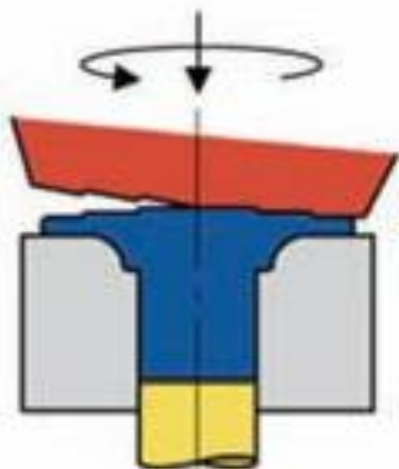


Schéma presadzovania

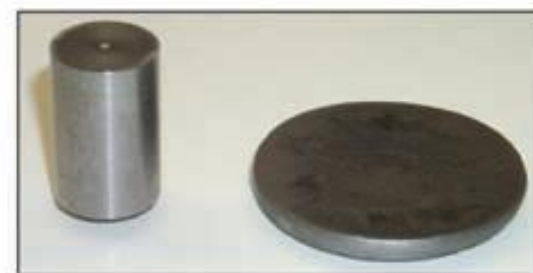
Inkrementálne objemové tvárnenie

Orbitálne tvárnenie (kovanie) kývavou zápustkou (Orbital Forming)



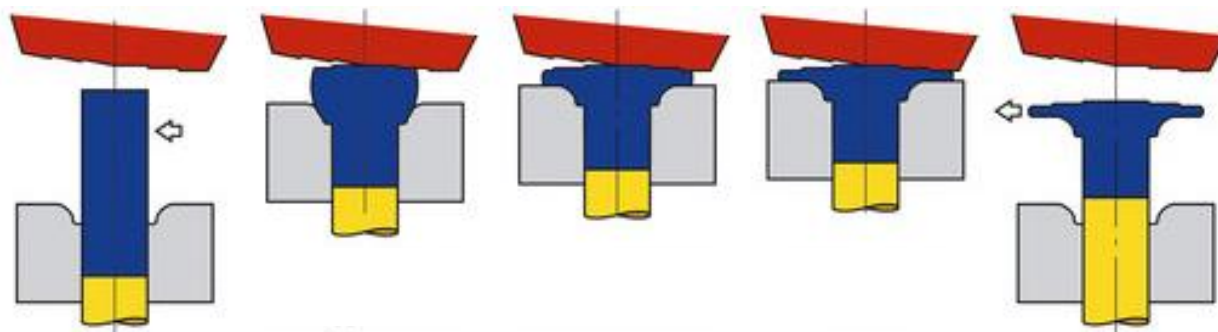
Konvenčné kovanie

67 % redukcia výšky bez
porušenia súdržnosti



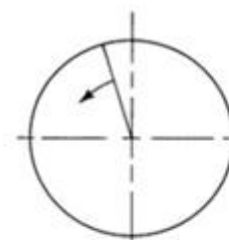
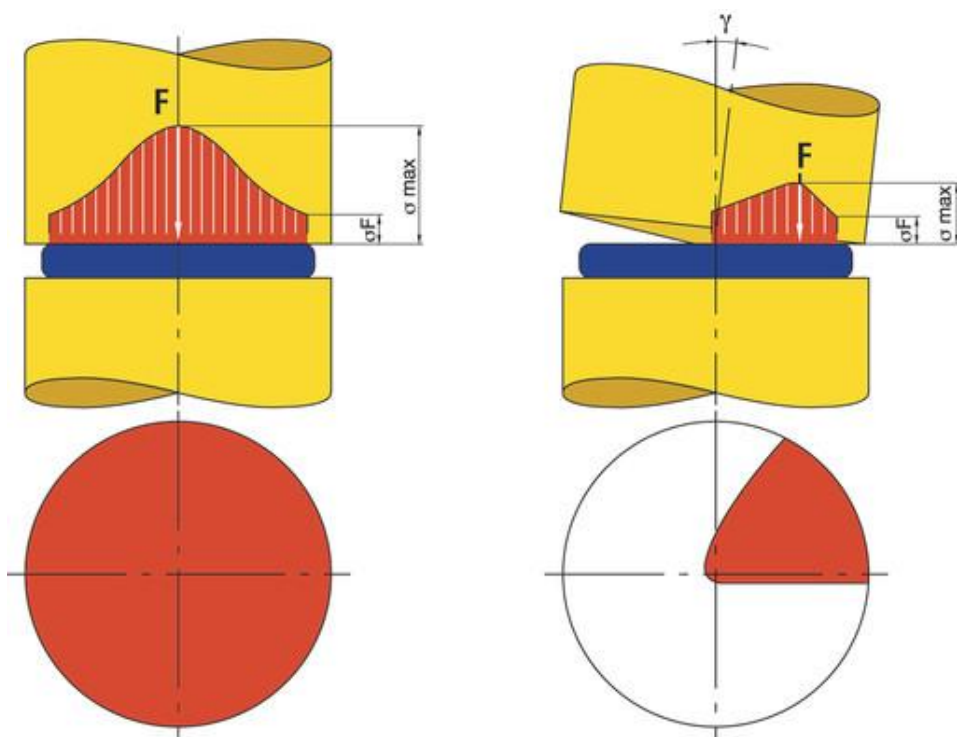
Orbitálne kovanie

83 % redukcia výšky bez
porušenia súdržnosti

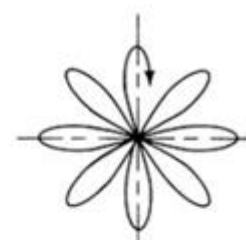


Inkrementálne objemové tvárnenie

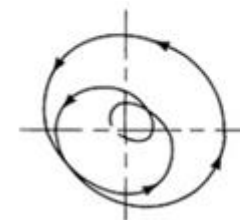
Orbitálne tvárnenie (kovanie) kývavou zápustkou (Orbital Forming)



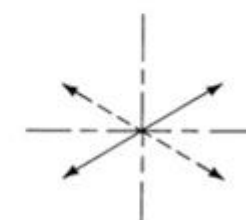
Orbitálne
trajektórie



Planetové
trajektórie



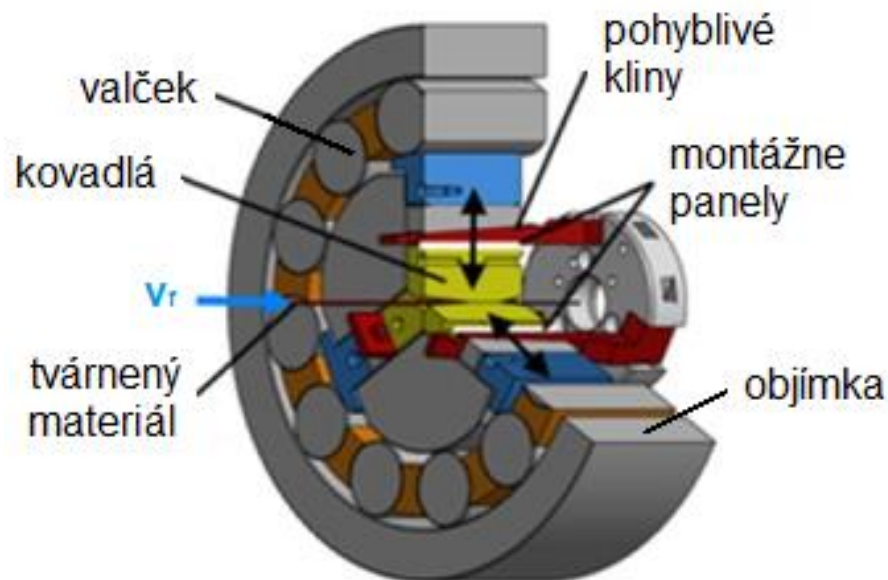
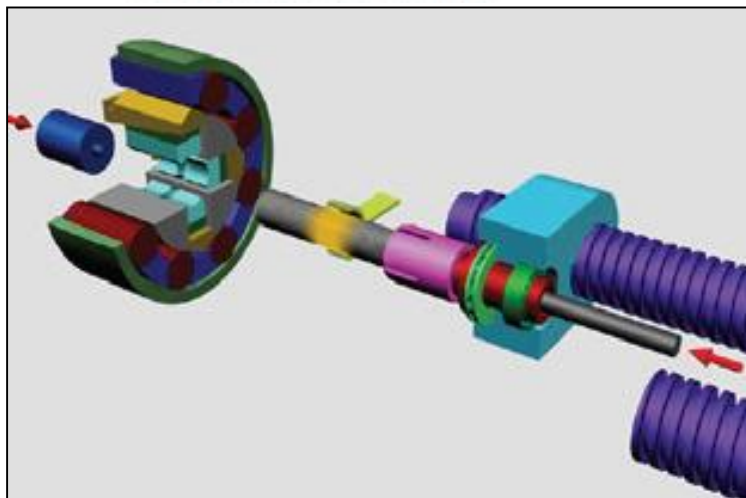
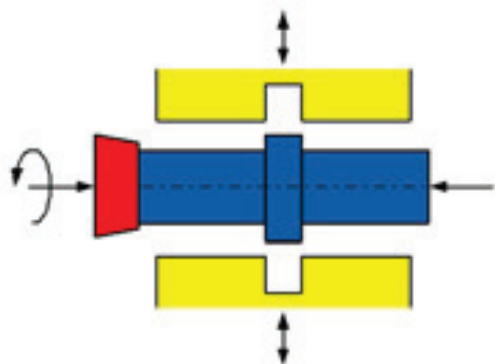
Špirálové
trajektórie



Lineárne
trajektórie

Inkrementálne objemové tvárnenie

Rotačné kovanie (Rotational Swaging)



Inkrementálne objemové tvárnenie

Radiálne tvárnenie (Radial Forming)

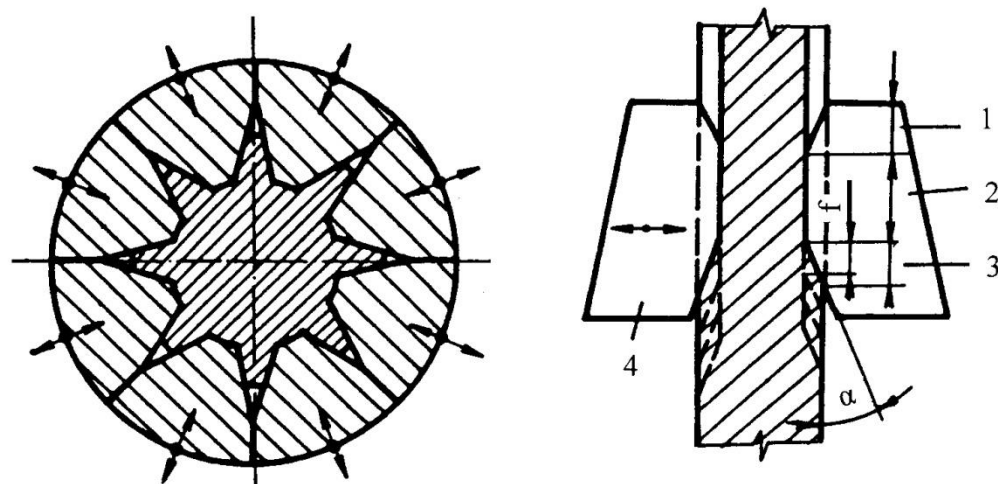
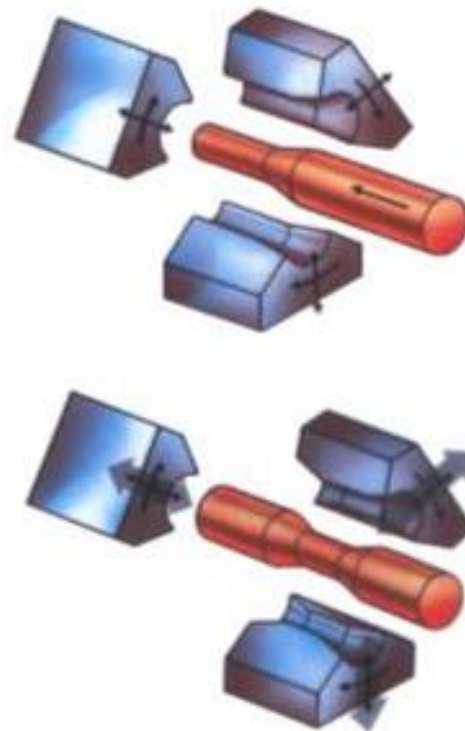


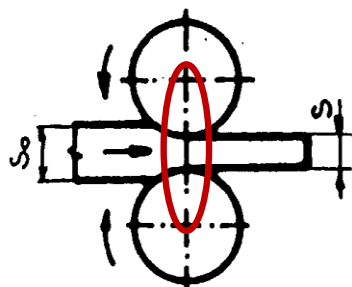
Schéma postupného radiálneho lisovania

- 1 – odľahčenie, 2 – kalibrujúca časť,
- 3 – pretvárna časť, 4 – čeľuste
- f – posuv, α – nábehový uhol

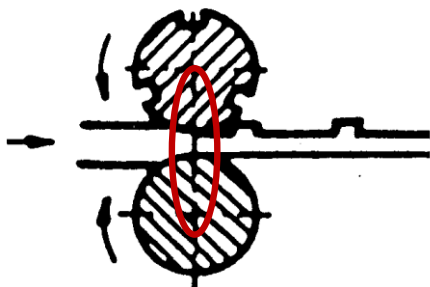


Inkrementálne objemové tvárnenie

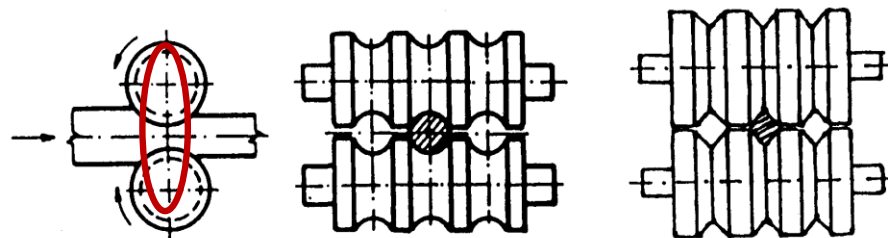
Valcovanie (Rolling)



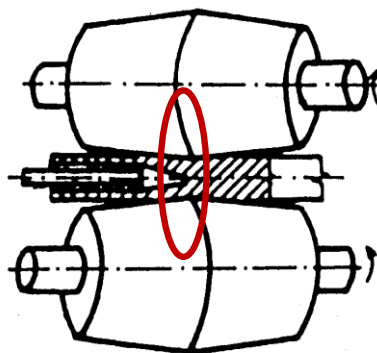
Pozdĺžne valcovanie



Periodické valcovanie



Valcovanie tyče kruhového, alebo štvorcového prierezu

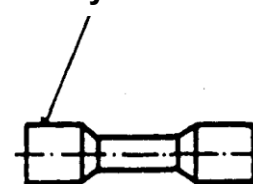
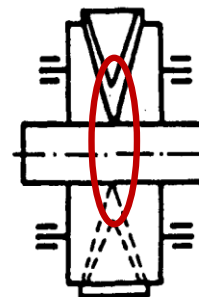
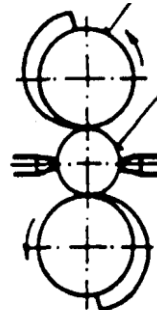


Kosé valcovanie

valce so
segmentmi

polotovár

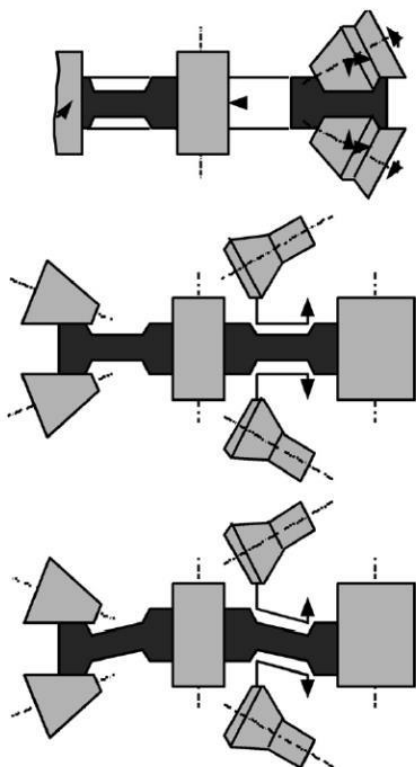
vývalok



Priečne klinové valcovanie

Inkrementálne objemové tvárnenie

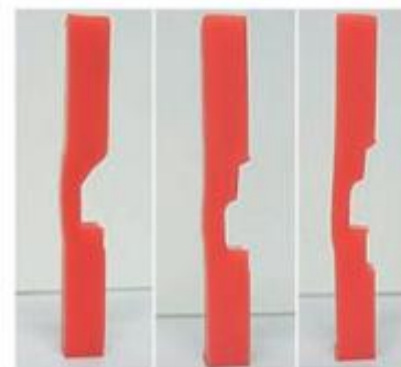
Valcovanie (Rolling) – špeciálne metódy



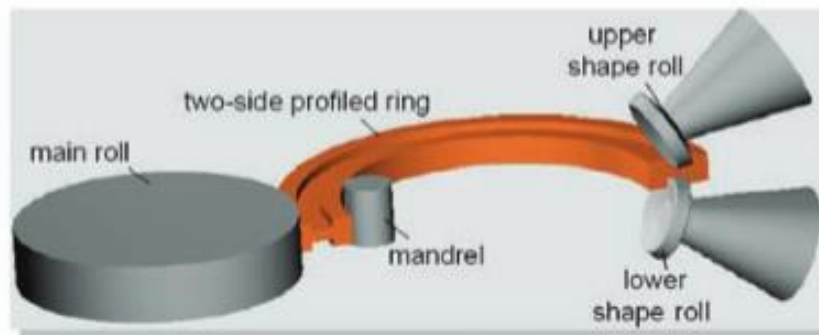
**Špeciálne valcovanie
osovo-symetrického výtvarku**



(b) Radial incremental ring rolling

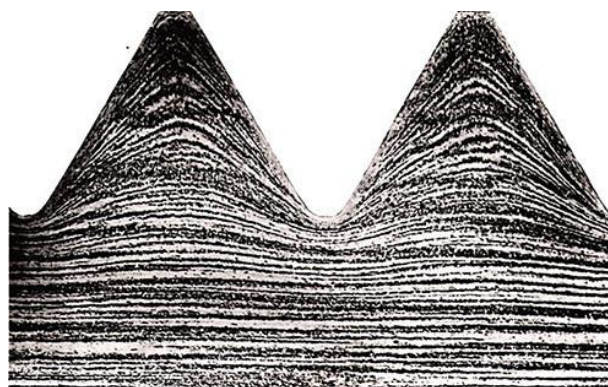
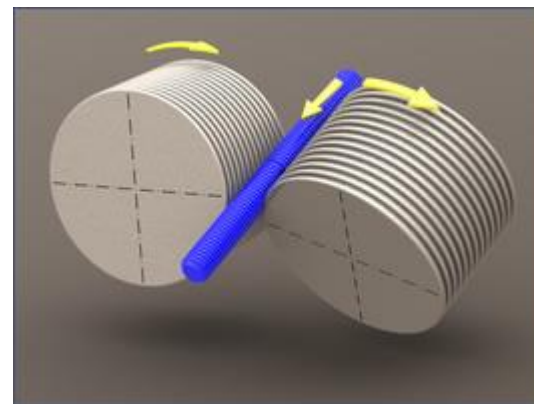
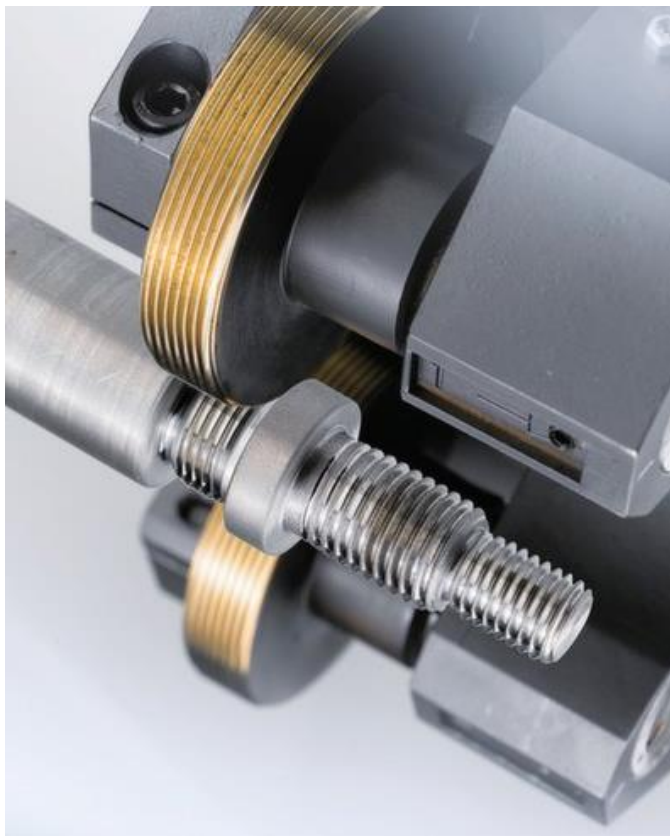


(c) Cross-sections of a simulated part in wax



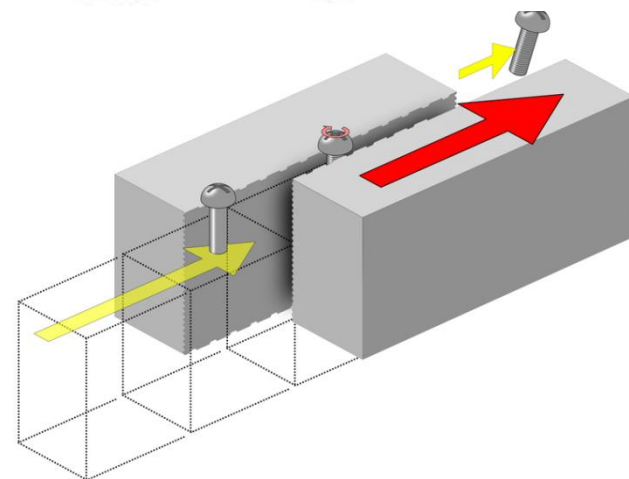
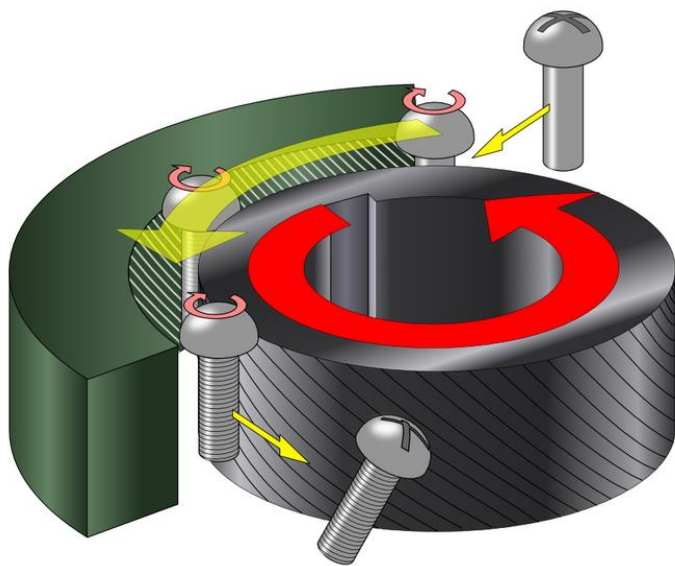
Inkrementálne objemové tvárnenie

Valcovanie závitov (Rolling Threads)



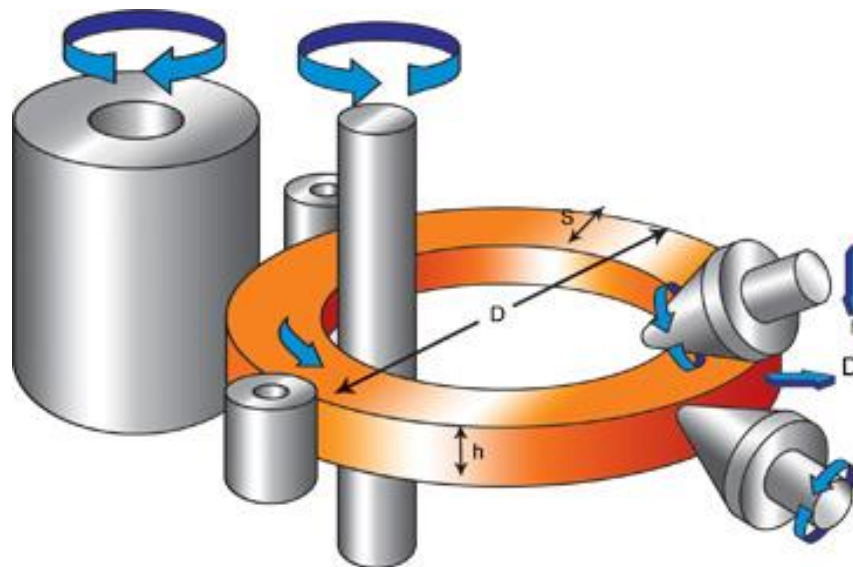
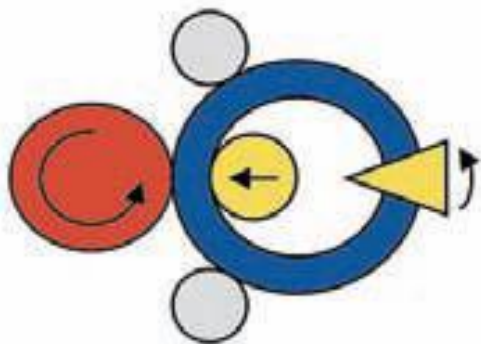
Inkrementálne objemové tvárnenie

Valcovanie závitov (Rolling Threads)



Inkrementálne objemové tvárnenie

Inkrementálne valcovanie krúžkov (Incremental Ring-Rolling)



IT v oblasti povrchového inžinierstva

IT v oblasti povrchového inžinierstva:

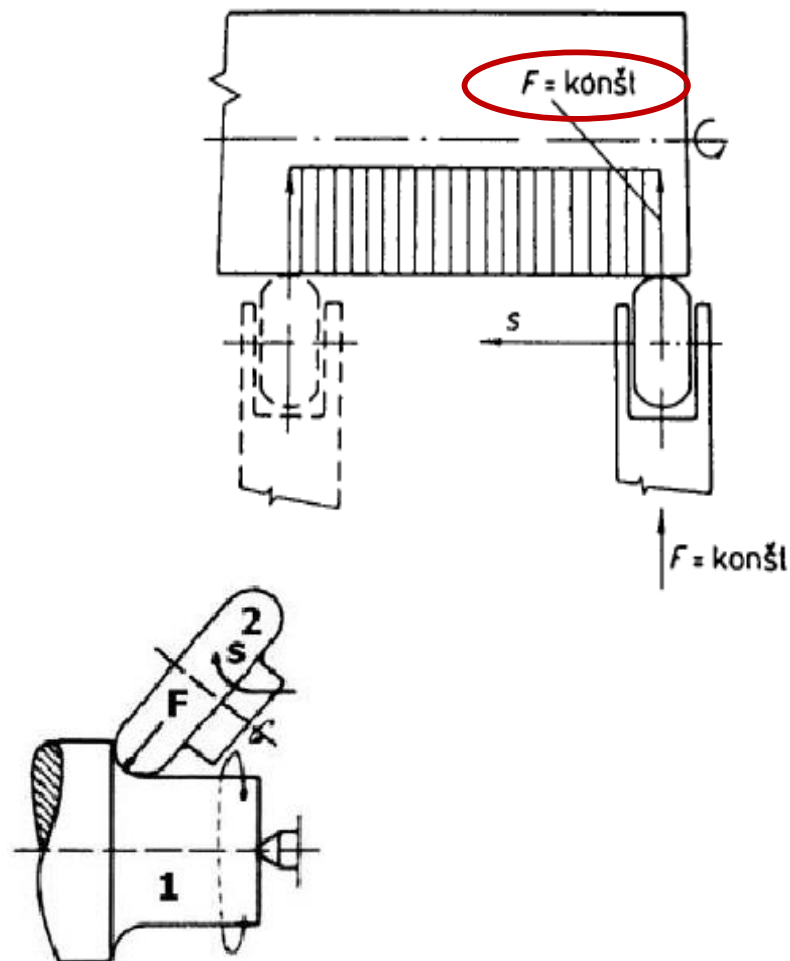
- **Valčekovanie** (Roller Peening)
- **Guličkovanie** (Shot Peen Forming)
- **Laserové spevňovanie** (Laser Peening)

IT v oblasti povrchového inžinierstva

Valčekovanie (Deep Rolling)

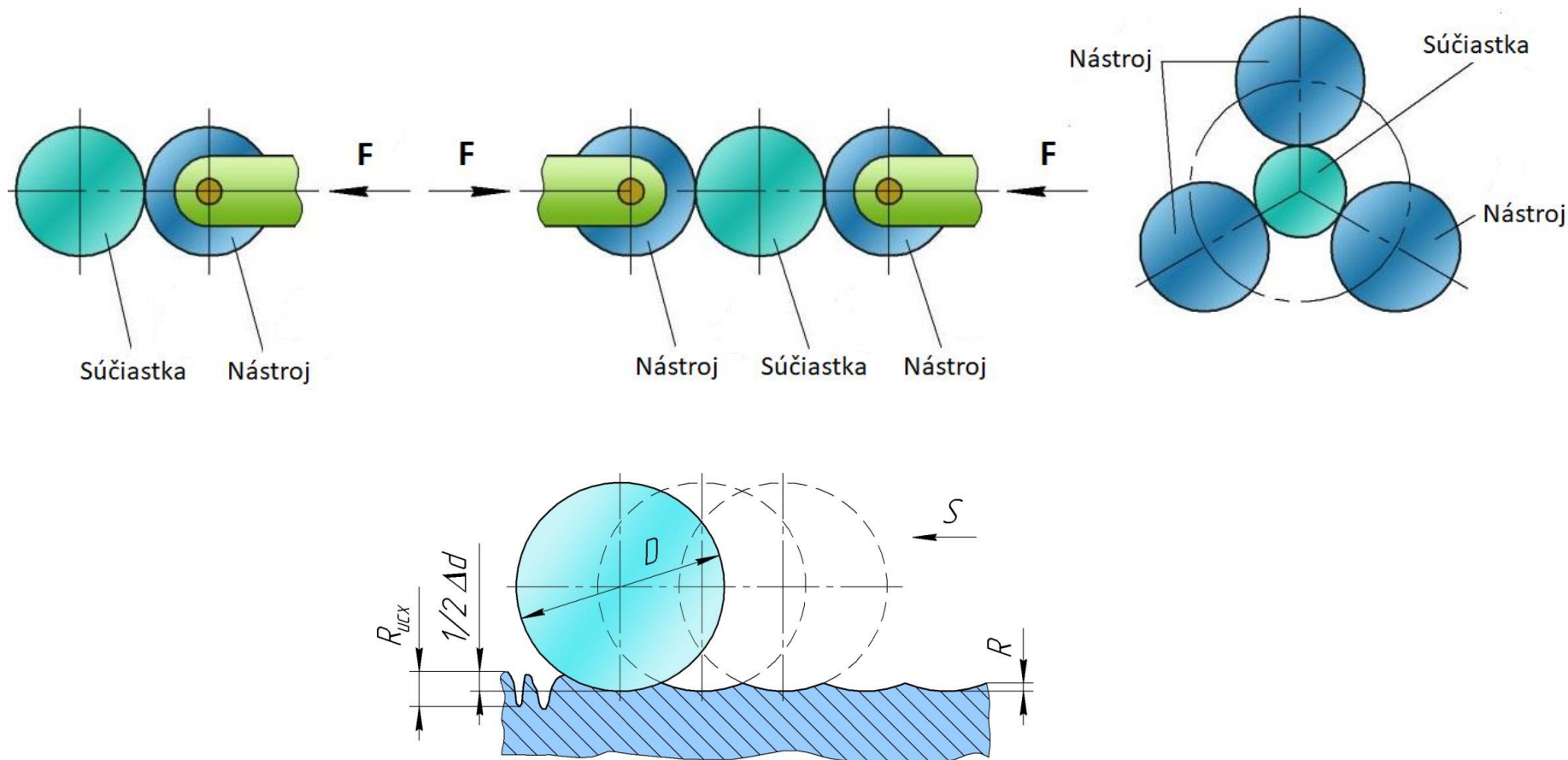
Valčekovanie je metóda spevňovania, resp. dokončovania povrchových vrstiev po klasických metódach obrábania, ktorého cieľom je dosiahnutie hladkého a tvrdého povrchu dobre odolávajúceho opotrebeniu.

Valčekovaním sa dokončujú rovinné plochy, rotačné plochy, guľové plochy, prechodové polomery hriadeľov, rotačné tvarové plochy a iné.



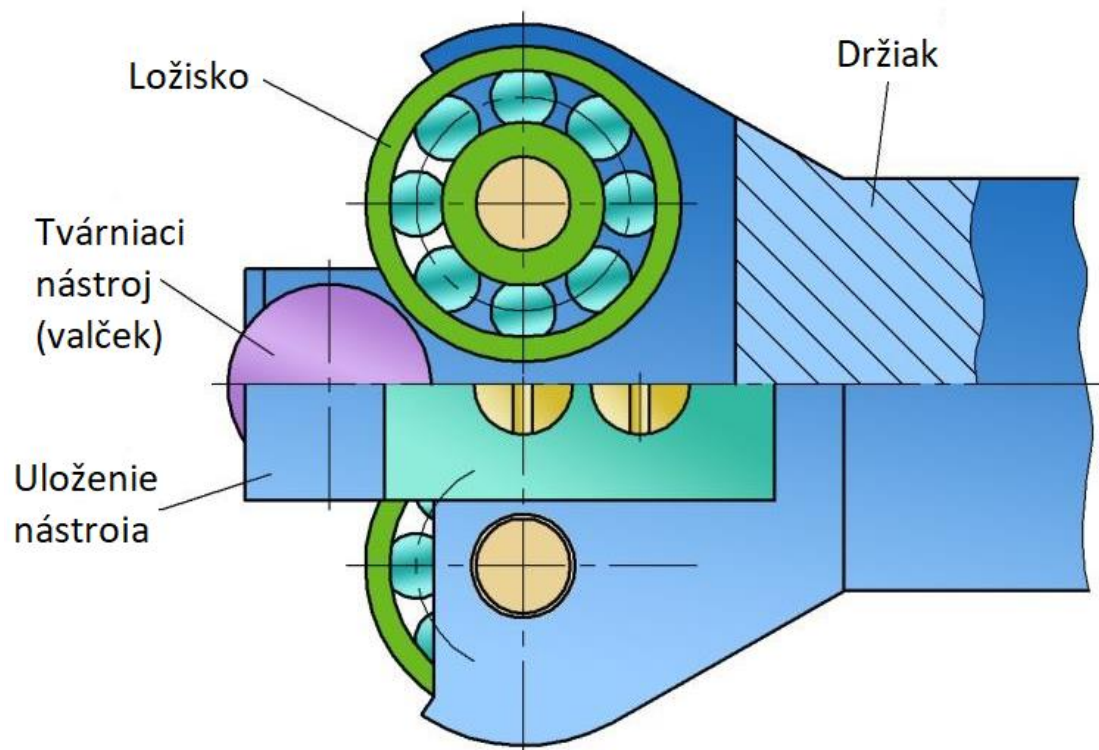
IT v oblasti povrchového inžinierstva

Valčekovanie (Deep Rolling)



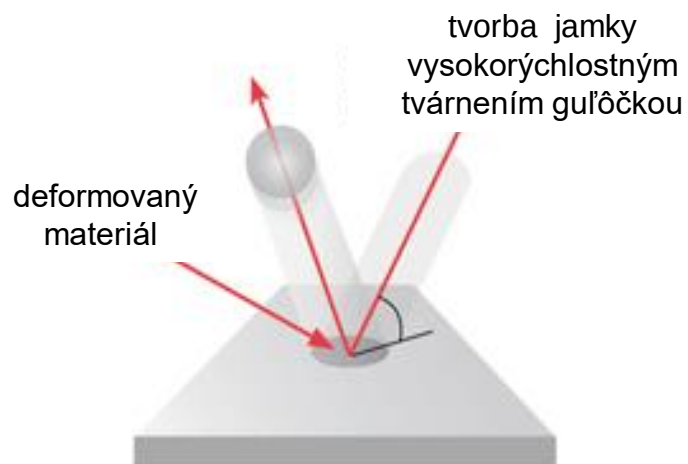
IT v oblasti povrchového inžinierstva

Valčekovanie (Deep Rolling)



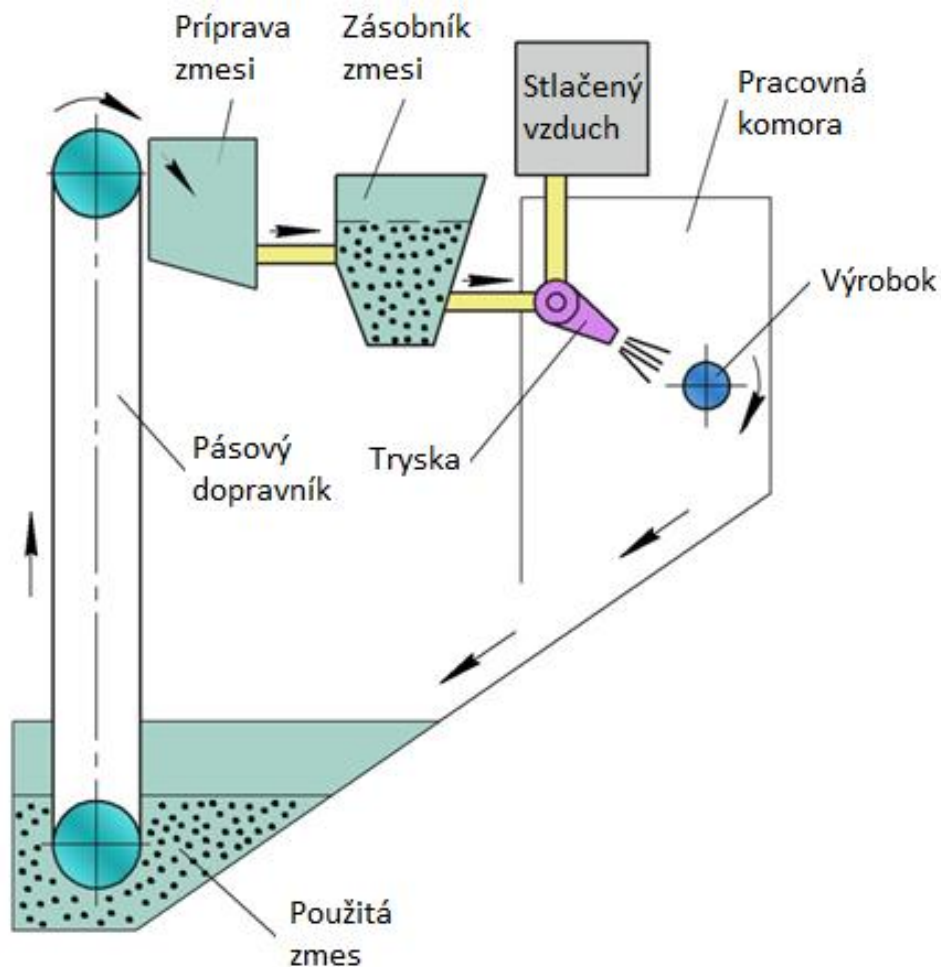
IT v oblasti povrchového inžinierstva

Guličkované (Shot Peen Forming)



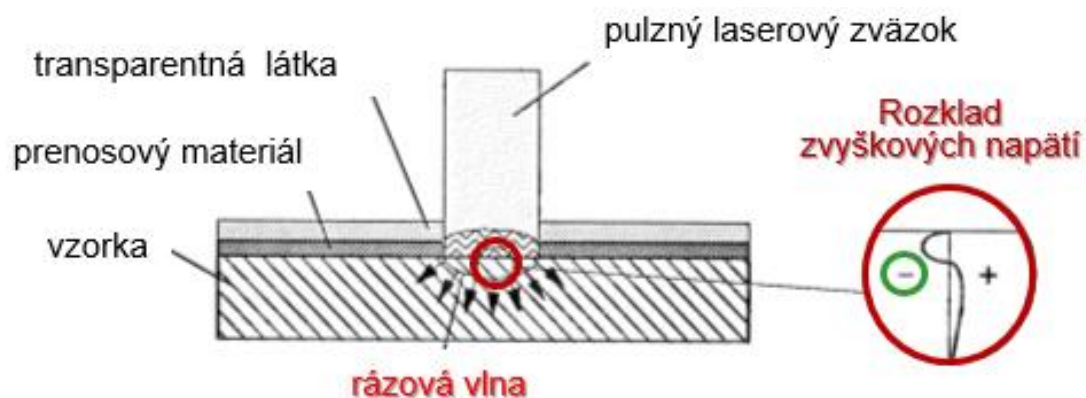
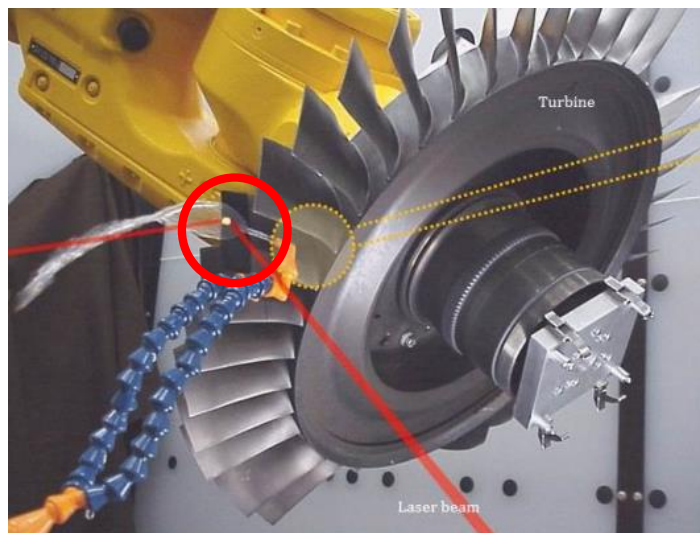
IT v oblasti povrchového inžinierstva

Guličkovanie (Shot Peen Forming)



IT v oblasti povrchového inžinierstva

Laserové spevňovanie (Laser Peening)



Odporučená literatúra

ALLWOOD, J. M., POLYBLANK, J. A. *Metal Spinning*. In *CIRP* 2016. Dostupné na: https://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007/978-3-642-35950-7_16696-3.

ALLWOOD, J. M., UTSUNOMIYA, H. A survey of flexible forming processes in Japan. In *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 2006. Dostupné na: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0890695506000241?token=B72AFAD06CF437847E7288CEC0F3B93291E836B696ACA1EAC5FE99823A0AFDBC3F75C4C97BE4B4E4ADC70FBECD74B875&originRegion=eu-west-1&originCreation=20210708073943>.

BAMBACH, M., BARTON, G., FRANZKE, M., HIRT, G. Modelling of Incremental Bulk and Sheet Metal Forming. In *Wiley Online Library*, 2016 Dostupné na: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/srin.200706281>.

DJAKOW, E., SPRINGER, R., HOMBERG, W., PIPER, M., TRAN, J., ZIBART, A., KENIG, E. Incremental Electrohydraulic Forming – A New Approach for the Manufacture of Structured Multifunctional Sheet Metal Blanks. In *AIP Conference Proceedings* 2017. Dostupné na: https://www.researchgate.net/publication/320445832_Incremental_electrohydraulic_forming_-_Anewapproachforthemanufactureofstructuredmultifunctionalsheetmetalblanks.

FENG, F. LI, J., HUANG, L., LIU, X., MA, H., LI, G. The Research of Electromagnetic Incremental Forming Process of Aluminum Alloy Sheet and the Interaction between the Die and the Sheet. In *Procedia Engineering* 207 2017. Dostupné na: https://www.researchgate.net/publication/321094632_The_research_of_electromagnetic_incremental_forming_process_of_Aluminum_alloy_sheet_and_the_interaction_between_thedieandthesheet.

Odporučená literatúra

GROCHE, P., FRITSCHÉ, D., TEKKAYA, E. A., ALLWOOD, J. M., HIRT, G., NEUGEBAUER, R. Incremental Bulk Metal Forming. In *Annals of the CIRP* 2007. Dostupné na: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0007850607001576?token=4A338CAF629AFA2D2A9666DD31D024C79F390831C210AF82709F6577890D139F3A5B5986C7B7FD622A9DD2E26D27FE72&originRegion=eu-west-1&originCreation=20210708073335>.

HASSAN, A. M. The Effects of Ball and Roller-Burnishing on the Surface Roughness and Hardness of some Non-ferrous Metals. In *Journal of Materials Processing Technology* 72 1996. Dostupné na: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013697001994>.

NOWAK, J., MADEJ, L., ZIOLKIEWICZ, S., PLEWINSKI, A., GROSMAN, F., PIETRZYK, M., Recent Development in Orbital Forging Technology. In *CIRP* 2008. Dostupné na: <https://link.springer.com/article/10.1007/sl2289-008-0076-2>.

PATHAK, J. K. A brief review of Incremental sheet metal forming. In *International Journal of Latest Engineering and Management Research*. 2017, ISSN: 2455-4847 Dostupné na: https://www.researchgate.net/publication/315665898_A_brief_review_of_Incremental_sheet_metal_forming.

SANCHEZ, A. G., YOU, C., LEERING, M., GLASER, D., FURFARI, D., FITZPATRICK, M. E., WHARTON, J., REED, P. A. S. Effects of Laser Shock Peening on the Mechanisms of Fatigue Short Crack Initiation and Propagation of AA7075-T651. In *International Journal of Fatigue* 143, 2021. Dostupné na: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0142112320305570>.

Odporučená literatúra

- SCHMID, S., KALPAKJIAN, S. Manufacturing, Engineering and Technology. New York: Prentice Hall, 2010.
- SCHREK, A., KOSTKA, P., ČINÁK, P. Progresívne technológie tvárnenia. Bratislava: STU Bratislava, 2014.
- TRZEPIECIŃSKI, T. Recent Developments and Trends in Sheet Metal Forming. In *Forming Processes of Modern Metallic Materials*. 2020. Dostupné na: <https://www.mdpi.com/2075-4701/10/6/779/htm>.
- WU, J., LIU, H., WEI, P., LIN, Q., ZHOU, S. Effect of Shot Peening Coverage on Residual Stress and Surface Roughness of 18CrNiMo7-6 Steel. In *International Journal of Mechanical Sciences* 183 2020. Dostupné na: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0020740320305397>.
- YAKIMETS, I., RICHARD, C., BÉRANGER, G., PEYRE, P. Laser Peening Processing Effect on Mechanical and Tribological Properties of Rolling Steel 100Cr6. In *Wear* 256 2004. Dostupné na: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0043164803004058>.