

NÁSTROJE PRO EXTRÉMNÍ DEFORMACE KOVŮ

Zbyšek Nový¹, Tomáš Jíra², Jozef Zrník³, Dušan Kešner⁴,
Bohuslav Mašek⁵, Tomáš Kovařík⁶

¹ COMTES FHT s.r.o., Lobežská E981, 326 00 Plzeň, ČR, znovy@comtesfht.cz

² COMTES FHT s.r.o., Lobežská E981, 326 00 Plzeň, ČR, tjira@comtesfht.cz

³ COMTES FHT s.r.o., Lobežská E981, 326 00 Plzeň, ČR, jzrnik@comtesfht.cz

⁴ COMTES FHT s.r.o., Lobežská E981, 326 00 Plzeň, ČR, dkesner@comtesfht.cz

⁵ ZČU v Plzni, Univerzitní 22, 306 14 Plzeň, ČR, masekb@kmm.zcu.cz

⁶ ZČU v Plzni, Univerzitní 22, 306 14 Plzeň, ČR, kovarik@kmm.zcu.cz

Abstrakt

Zjemňování zrna u objemových součástí z kovových materiálů je významným tématem výzkumu kovových materiálů v posledním desetiletí. Vedle tradičního zjemňování transformačním a rekrytalizačním mechanismem lze využít mechanismus deformační. Řada prací ukazuje, že při aplikaci extrémně velkého stupně deformace lze u zrn kovových materiálů dosáhnout velikosti pod jeden mikron, někdy i v řádu desítek nanometrů.

Pro techniku ECAP (Equal Channel Angular Processing) byla k tomuto účelu navržena a vyrobena skládaná a bandážovaná sestava.

Pro tvářecí techniku CGP (Constrained Groove Pressing) byly navrženy a vyrobeny dvě varianty. V první variantě tvoří rám celého nástroje speciálně upravený třmen, do kterého se upíná spodní kovádko, a který zároveň slouží jako vedení horního kovádkla. Druhá varianta s mírně odlišnou konstrukcí umožňuje tváření větších vzorků a slitin s vyšším přetvárným odporem.

Nástroje pro tvářecí techniku RET (Reversing Expansion of Tubes) se skládají z matrice, dvou čel, trnu, horní a spodní podložky. Tato technologie bude v nejbližší době testována.

Abstracts

Grain refinement of bulk parts made from metallic materials is an important subject of research of metallic materials in last 10 years. Apart from traditional grain refinement approaches basing on phase transformation and recrystallization, also deformation-based approaches can be used for grain refinement. Many research works show that through application of extremely high amounts of deformation, grains sizes below 1 micron (in some cases several tens nanometers) can be achieved.

For the ECAP technique (Equal Channel Angular Processing), a sectional armed tool has been developed.

For the CGP technique (Constrained Groove Pressing) two variants of tools have been developed. In the first variant, the frame of the tool has a form of special clamp, in which the lower forming die is fixed. This clamp also guides the upper forming die. The second variant is designed in order to enable processing of bigger specimens and alloys with higher toughness.

Tools for the RET deformation technique (Reversing Expansion of Tubes) consist from matrix, two flanges, mandrel and a back-plate. This technology will be tested shortly.

1. ÚVOD

Zjemňování zrna u objemových součástí kovových materiálů je významné téma výzkumu kovových materiálů v posledním desetiletí.

Vedle tradičního zjemňování transformačním a rekrystalizačním mechanismem lze využít mechanismus deformační. Celá řada prací ukazuje, že při aplikaci extrémně velkého stupně deformace lze zrna kovových materiálů zjemnit významně pod jeden mikron, až do oblasti desítek nanometrů.

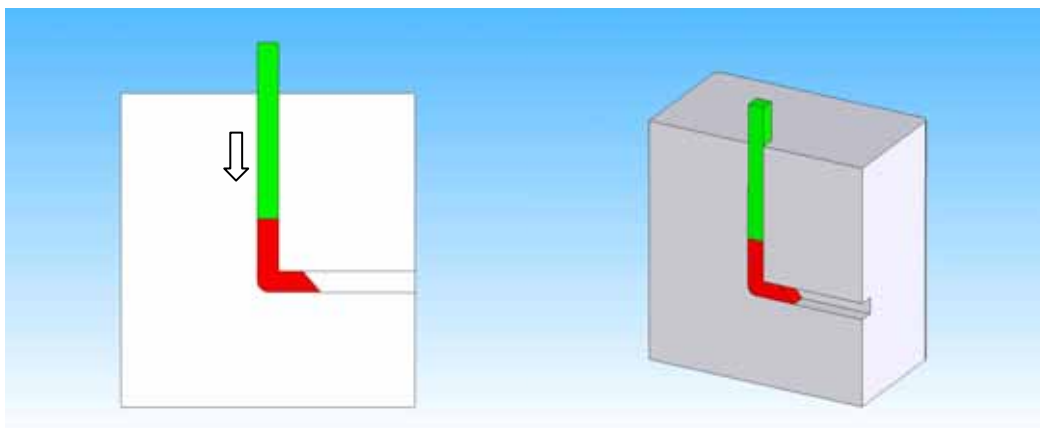
Techniky extrémní deformace ve většině případů využívají postupu, který vede sice k deformaci zkušební tělesa, toto si však po provedení deformačního kroku zachovává svůj tvar. Takto je možné deformační krok opakovat tak dlouho, pokud to dovolí plasticita tvářeného materiálu. Vzhledem k tomu, že techniky jsou obvykle voleny s převažujícími tlakovými složkami deformace a vzhledem k tomu, že extrémní deformace může vést při zjemňování zrna k odpevňovacím a rekrystalizačním procesům, lze u řady materiálů při specifických podmínkách dosáhnout efektu superplasticity a deformační krok opakovat mnohokrát. Mikrostruktura je pak zjemňována např. tvorbou subzrn ve stávajících zrnech a postupným nahrazováním malouhlových hranic subzrn velkouhlovými hranicemi.

Nástroje pro dosahování extrémní deformace jsou obvykle vysoce namáhány jak z hlediska pevnostního, tak z hlediska otěru. Je proto velmi důležité správně volit konstrukci a materiál nástroje, jeho upnutí na lisu a podmínky lisování, za kterých dochází k extrémním plastickým deformacím. Předkládaná práce řeší problematiku konstrukce nástrojů pro techniku ECAP (Equal Channel Angular Processing, CGP (Constrain Groove Pressing) a RET (Reversing Expansion of Tubes).

2. NÁSTROJE PRO ECAP

2.1 Popis principu metody

Princip tvářecí technologie ECAP spočívá ve vícenásobném protlačování materiálu zalomeným otvorem konstantního průřezu. Materiál protlačený lomeným otvorem jen velmi málo změní své rozměry. Po vložení nového vzorku a jeho protlačení, dojde k vytlačení předchozího kusu a ten je připraven pro opětovný průchod. Do materiálu je tedy vnášena vícenásobná deformace a tím materiál získává novou strukturu a mechanické vlastnosti. Úhel zalomení otvoru se obvykle volí 90° nebo 120° . Pro experimentální nástroje ve firmě COMTES byl zvolen úhel 90° pro dosažení při něm maximální efektivní deformace při každém průchodu vzorku.

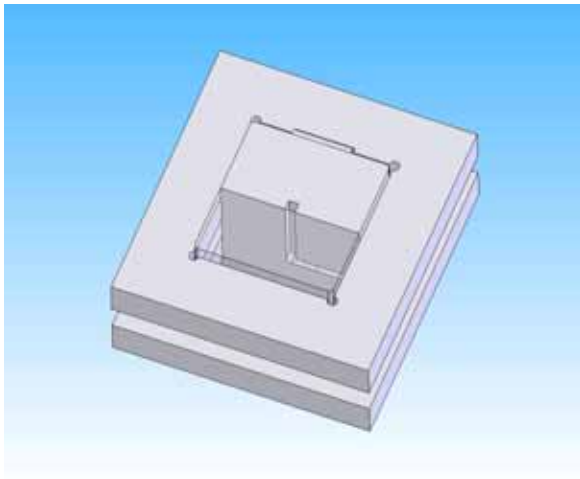


Obr. 1 Princip protlačování

2.2 I. Varianta konstrukce nástroje pro ECAP

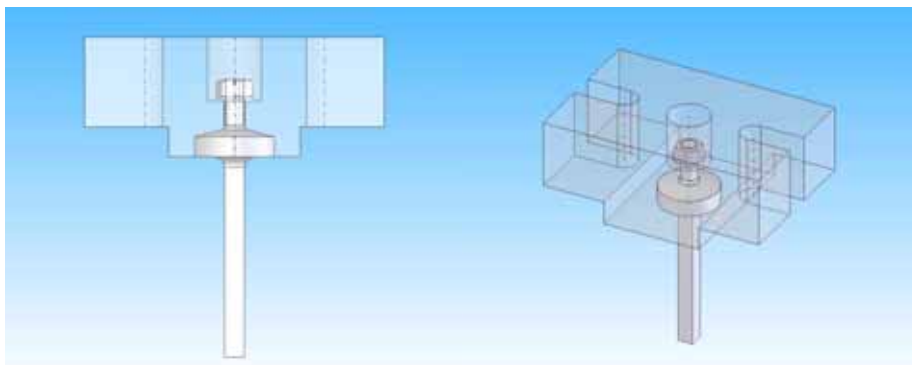
Pro vlastní realizaci jsme zvolili průřez protlačovaného materiálu 10x10mm a délku 50mm. Sestava průtlačnice byla navržena jako skládaná, aby byla umožněna kontrola stavu povrchu zalomeného otvoru, popř. aby bylo možné vyjmout tvářený materiál. Průtlačnice samotná má šířku 140mm, hloubku 80mm a výšku 150mm. Je vyrobena z oceli ČSN 19552 zušlechťeného na tvrdost 64 HRC. Drážka, která tvoří lomenou díru, má profil 10x10mm. V hloubce 85mm se lomí o 90°. Ve vzdálenosti 20mm je na profilu drážky provedeno odlehčení 0,2mm.

Na průtlačnici je dále přiložen hranol o šířce 140mm, hloubce 70mm a výšce 140mm, vyrobený také z oceli jakosti ČSN19552 zušlechťeného na tvrdost 64 HRC. Celou sestavu drží pohromadě dva rámy (jakost 12060) o šířce 60mm a tloušťce 40mm a dva klíny kterými se hranol s průtlačnicí stáhne a vytvoří se potřebné předepnutí. Provedení sestavy je zřejmé z následujícího obrázku.



Obr.2 Pohled shora na sestavu průtlačnice (hranol je zprůhledněn)

Trn je vyroben z materiálu jakosti 19830 zušlechťeného na tvrdost 58,6HRC a je dlouhý 130mm. Pracovní část má čtvercový průřez 10x10mm a délku 90mm. V místě uchycení je trn rozšířen. Pomocí matice M10 a kuželové plochy je trn centrován a upnut k držáku. Držák je vyroben z materiálu jakosti 12060 zušlechťeného na tvrdost 49,3HRC. Provedení je zřejmé z následujícího obrázku.



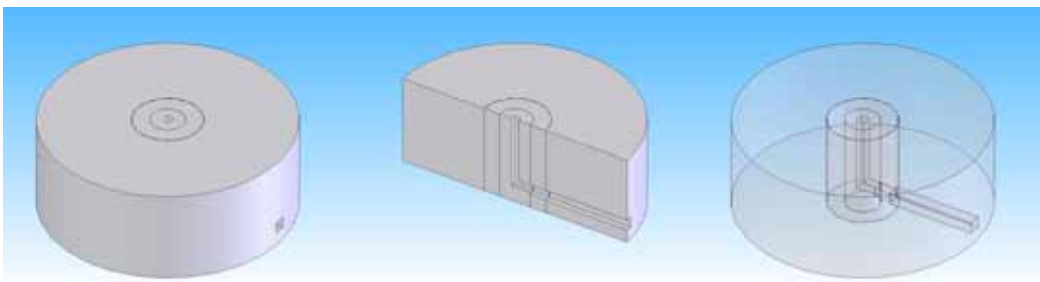
Obr.3 Trn upnutý v držáku (držák zprůhledněn)

Tato sestava ECAP je určena pro použití na lisu ŽDAS 100t. Upnutí je realizováno pomocí šroubů a T matic. Sestava průtlačnice je upnuta navíc pomocí svařeného rámu (ocel tř.11). Na následujících obrázcích je zřejmé celkové provedení.

2.3 II. Varianta konstrukce nástroje pro ECAP

Při testech I. varianty ECAP nástroje jsme narazili na řadu problémů, které vyžadovaly konstrukční změny. Proto vznikla II. varianta nástroje, která řadu zjištěných problémů eliminovala.

Klínování průtlačnice se neosvědčilo. Klíny nedokázaly vyvolat v materiálu matrice patřičné předepnutí, které je nutné kvůli eliminaci pružné deformace průtlačnice při samotném lisování. Proto jsme se rozhodli pro zděřovanou průtlačnici, skládající se ze tří částí. Prostřední část – nejvíce namáhaná - je vyrobena z oceli jakosti 19573 zušlechtěné na tvrdost 50 HRC. První bandáž je rovněž vyrobena z oceli jakosti 19573 zušlechtěné na tvrdost 50 HRC. Druhá (vnější) bandáž je pak vyrobena z oceli jakosti 15142. Jednotlivé části jsou do sebe nalisované v toleranci H7/s6 – přesah (0,018-0,061mm). Geometrie drážky je jinak shodná s předchozí variantou (profil 10x10mm). Odlehčení výstupní díry je v každé bandáži zvětšeno na 2mm.



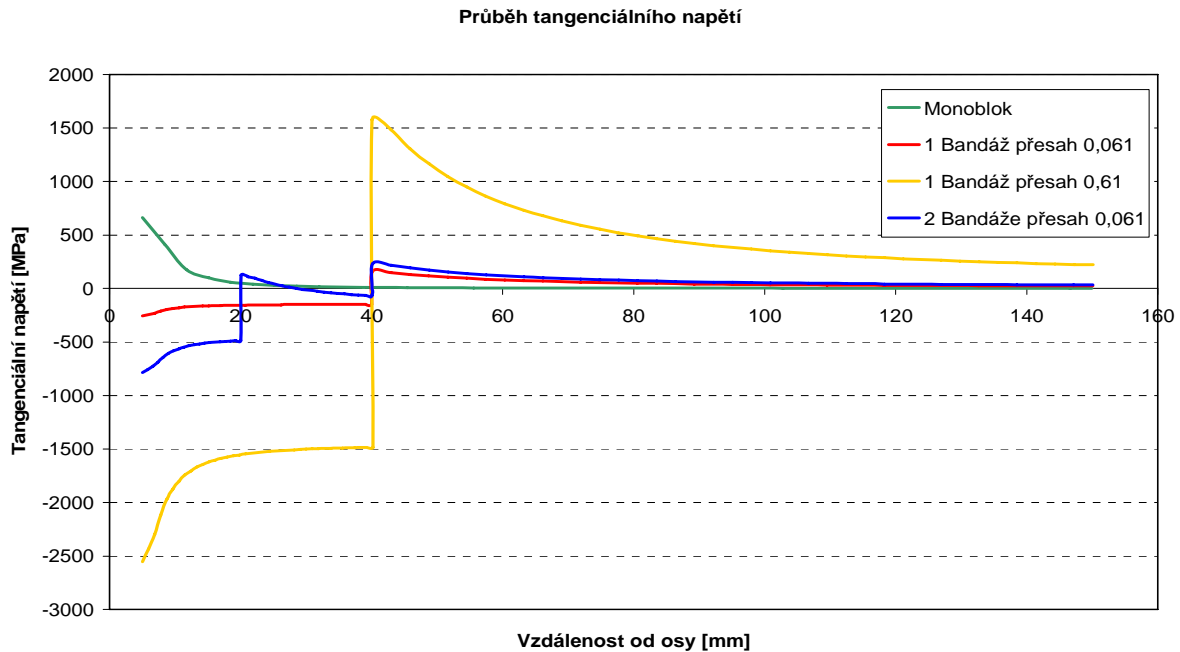
Obr.4 Zděřovaná průtlačnice (celkový pohled, řez, zprůhledněný pohled)

Předepnutí zděří bylo kontrolováno výpočtem. Výsledek je zřejmý na následujícím grafu, kde je započítáno i namáhání od protlačovaného materiálu. Zelenou křivkou je v grafu znázorněno namáhání průtlačnice, která by byla pouze z jednoho kusu (nezděřovaná). Červenou křivkou - namáhání průtlačnice 1x zděřované (1 bandáž). Modrou pak namáhání průtlačnice 2x zděřované (2 bandáže). Žlutou barvu má křivka namáhání průtlačnice 1x zděřované, ale o 10x větším přesahu (0,61mm). Tato křivka slouží pouze k ilustraci vlivu velikosti přesahu na namáhání průtlačnice. Z grafu je zřejmé, že dvojnásobným zděřováním se dosáhlo předpětí okolo 700 MPa (se započtením napětí od protlačovaného vzorku).

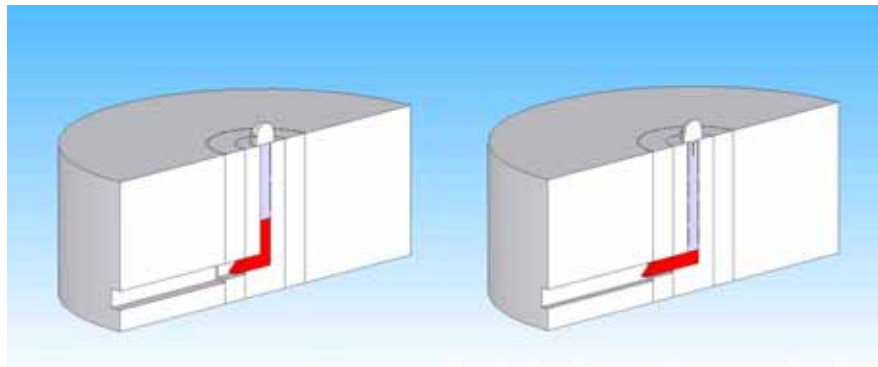
Konstrukce trnu používaná v první variantě se rovněž neosvědčila. Vlivem jeho přílišné štíhlosti došlo k nedovolenému namáhání na vzpěr. Proto byly hledány způsoby, jak délku trnu zkrátit. Nakonec byla zvolena varianta dvou krátkých trnů místo původního jednoho dlouhého. V tomto případě je nutné protlačování rozdělit na dvě operace. Zvolili jsme minimální možnou výšku trnů – tzn. že se trn zcela zasune do průtlačnice. Další změnou oproti původnímu návrhu je to, že trny jsou zcela volné. Je to z důvodu minimalizace vlivu působení boční síly od příčnicku lisu. Z téhož důvodu je také na horní část trnu nasazena hlavice s půlkulovou plochou. Vytažení trnu se provádí tak, že se hlavice sejme, do trnu se zašroubuje šroub M3, za který se pak trn vytáhne ven.

Povrch trnu je odlehčen. Je to z důvodu minimalizace tření trnu o průtlačnici. Velikost odlehčení je malá (0,1mm na plochu), abychom příliš nezeslabili nosný průřez. Kratší trn (trn A) má délku 55mm. Delší trn (trn B) pak má 80mm. Průřez trnu (10x10mm) je lícován s dírou v průtlačnici v toleranci H5/g4. Odlehčení pak má průřez 9,8x9,8mm.

Tato sestava ECAP je určena pro použití na lisu 1000t. Upnutí je realizováno pomocí šroubů a T matic. Sestava průtlačnice je upnuta navíc pomocí rámu (ocel tř.11).



Obr. 5 Vliv bandážování a velikosti přesahu na předpětí v zápustce při průchodu vzorku zápustkou.

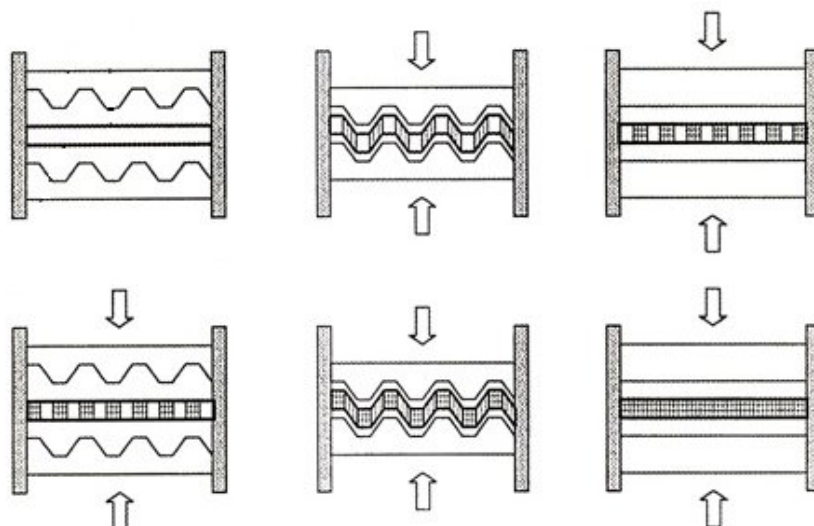


Obr.6 Řez sestavou – použití trnu A (krátký) vlevo, trnu B (dlouhý) vpravo

3. NÁSTROJE PRO CGP

3.1 Popis principu metody

CGP je technologie, u které se jedná o opakované tváření materiálu mezi tvarovými – zubovými - kovádky a jeho zpětné srovnání do původního tvaru. Tvar kovádek a technologie tváření je zřejmá z následujícího obrázku. Z obrázku je vidět, že materiál je po deformaci a následném rovnání protvářen jen v určitých oblastech – segmentech. Abychom dosáhli celkového protváření, materiál se otočí o 180° tak, aby segmenty, které v minulé deformaci zůstávaly nezměněné, se v následném kroku deformovaly. Účelem této metody je tedy vnést co největší a přitom pokud možno rovnoměrnou deformaci do vzorku při zachování jeho tvaru.



Obr.7 Princip technologie CGP

3.2 I. Varianta konstrukce nástroje pro CGP

V první variantě tvoří rám konstrukce celého nástroje speciálně upravený třmen, do kterého se upíná spodní kovádlo a ve kterém je vedeno horní kovádlo. Třmen má rozměry 260x89x70mm a je vyroben z materiálu jakosti ČSN 16343 zušlechtěného na tvrdost 48,3HRC . Kovadla (horní a spodní) jsou vyrobena z oceli jakosti ČSN 19573 zušlechtěné na tvrdost 58,3HRC. Rozměry horního kovádla jsou 75x70x69,9mm , spodního pak 84x70x19,5mm. Pracovní plochy mají úkosy 7x45°. Tvářený materiál má pak rozměry 70x70x7mm. Rovnání je realizováno vložením desek (rovnadel) mezi kovádla (mají negativní tvar kovádel). Rovnadla jsou vyrobena z materiálu jakosti DIN 1.2379 zušlechtěného na tvrdost 58 HRC. Na následujících obrázcích jsou pohledy na sestavu kovádel a rovnadel.

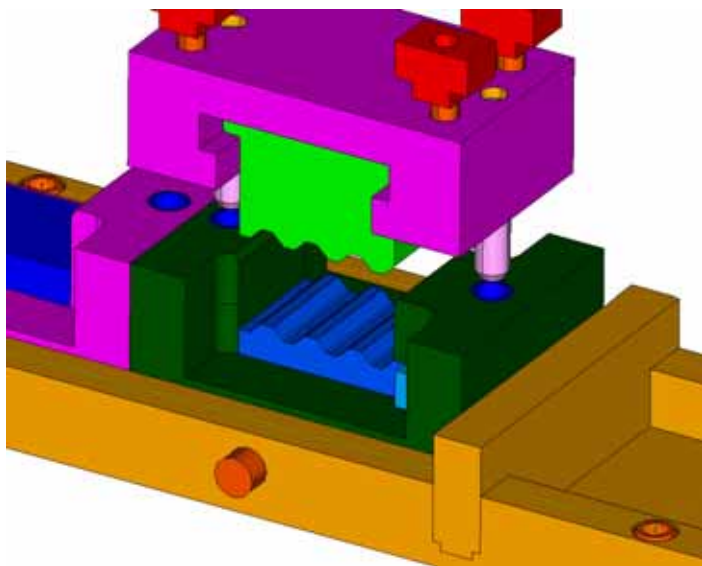
Při testování technologie se vkládání rovnadel na kovádla příliš neosvědčilo. Dvě tvrdá tělesa (rovnadlo a kovádlo) na sebe dosedala přes zkosené plochy a pod zatížením lisovací silou spodní kovádlo prasklo. Proto jsme vyrobili kovádla a rovnadla nová. Geometrie nových kovádel je stejná jako u původních, jen kořen úkosu jsme opatřili rádiusem R2 – pro zmenšení vrubové citlivosti. Také jsme kovádla vyrobili z jiného materiálu – BOHLER K340 ISODUR zušlechtěného na tvrdost 60,5HRC. Geometrie rovnadel je upravená. Rovnala jsou rozměrově shodná s kovádly, pouze bez zkosených probrání. Materiál rovnadel je jakosti ČSN 19 573 zušlechtěného na tvrdost 58HRC Na následujícím obrázku je vidět nový tvar rovnadel.

Souosost kovádel (rovnadel) je zajištěna dvojicí vodicích tyčí Ø20mm. Nástroje jsou upnuty na lis pomocí držáků (ocel tř.11), šroubů a T matic. Provedení je zřejmé z následujících obrázků.

3.3 II. Varianta konstrukce nástroje pro CGP

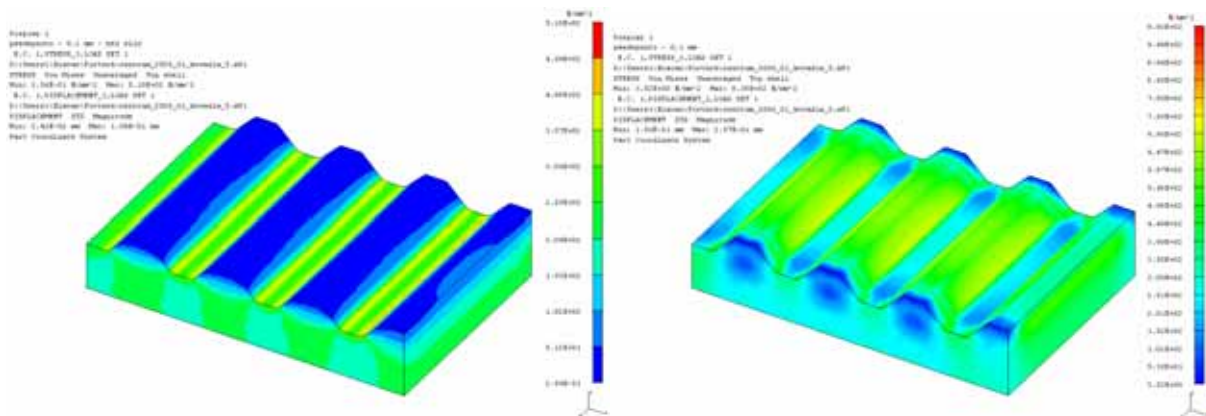
Důvodem k realizaci nové varianty technologie CGP byla potřeba tváření většího vzorku 98x70x7mm (větší o jedno prosazení) na výkonnějším lisu 1000t. Dále pak bylo požadováno zrychlení zdlouhavé výměny nástrojů. Sestava nástroje je navržena tak, že spodní kovádlo je uloženo v samostatném držáku, který se přesouvá do pracovní polohy po vedení . Potřebné předepnutí spodního kovádla je vytvořeno pomocí klínů (jakost 12060, úkos 1°). Rovněž tak spodní rovnadlo je uloženo v samostatném držáku, jen bez zaklínování. V pracovní poloze jsou tyto držáky aretovány středícím kolíkem(Ø21mm). Pro horní kovádlo a rovnadlo je jeden

společný držák, ve kterém jsou nástroje aretovány také pomocí středícího kolíku ($\varnothing 10\text{mm}$). Vzájemná poloha nástrojů (horního a spodního) je zajištěna pomocí vodicích tyčí ($\varnothing 18\text{mm}$) které centrují horní a spodní držák. Spodní kovadlo je vyrobeno z materiálu jakosti BOEHLER K 340 a má rozměry 102x70x22mm. Prosazení mají úkos 7x45° na kořenu je pak zvětšen rádius na R3. Horní kovadlo je vyrobeno z materiálu jakosti BOEHLER K 340 a má rozměry 120x82x70mm. Geometrie prosazení je shodná jako na spodním kovadle. Spodní rovnadlo je z materiálu jakosti BOEHLER K 110 a má rozměry 98x70x22. Horní rovnadlo je také z materiálu jakosti BOEHLER K 110 a má rozměry 120x75x70. Držáky kovadla (rovnadla) jsou vyrobeny z oceli jakosti ČSN 12050 a mají rozměry 200x150x100mm. Držák horního kovadla(rovnala) je také vyroben z materiálu jakosti 12050 a má rozměry 210x150x70. Vedení držáků spodního kovadla (rovnadla) je vyrobeno z oceli jakosti ČSN 11523 o rozměrech 600x210x50 a je opatřeno příčnou zarážkou k eliminaci případných horizontálních sil vyvozených kovadly. Zarážka je opět vyrobena z materiálu jakosti 11523 a její rozměry jsou 210x70x30. Celková sestava nástroje je zřejmá z následujících obrázků.



Geometrie nástrojů byla přepočteno následujícím způsobem. Zatížení realizováno na boční stěny zubů, jejich horní čela a rádius spojující tyto plochy. Spodní rádius a spodní plochy byly ponechány nezatíženy. Celková síla 3,08 MN byla rovnoměrně rozdělena na půdorysnou plochu uvažovaných ploch a přepočtena na tlakové zatížení.

Obr.8 Celkový pohled na kovací nástroje (lis 1000t)



Obr.9 Nástroj předepnutý posunutím 0,1 mm (odpovídá předepínací síle 225 kN) v nezatíženém stavu (obr. vlevo). Předepnuto posunutím 0,1 mm, v zatíženém stavu(obr. vpravo)

4. NÁSTROJE PRO RET

4.1 Popis principu metody

Jedná se o opakované tváření trnem, který je v kontaktu s vnitřním povrchem trubky. Tváření se děje pomocí válcového trnu, který má v polovině své délky rozšíření. Trubka sama je pevně uložena v matrici a tudíž nedochází ke změně vnějších rozměrů. Po projetí trnu celou délkou trubky se trn vrací zpět a znovu tváří již jednou tvářený materiál. Proto mluvíme o reverzním tváření (rozhánění). Na následujících obrázcích je znázorněn princip technologie a pohled na tvářecí trn.



Obr.11 Tvářecí trn

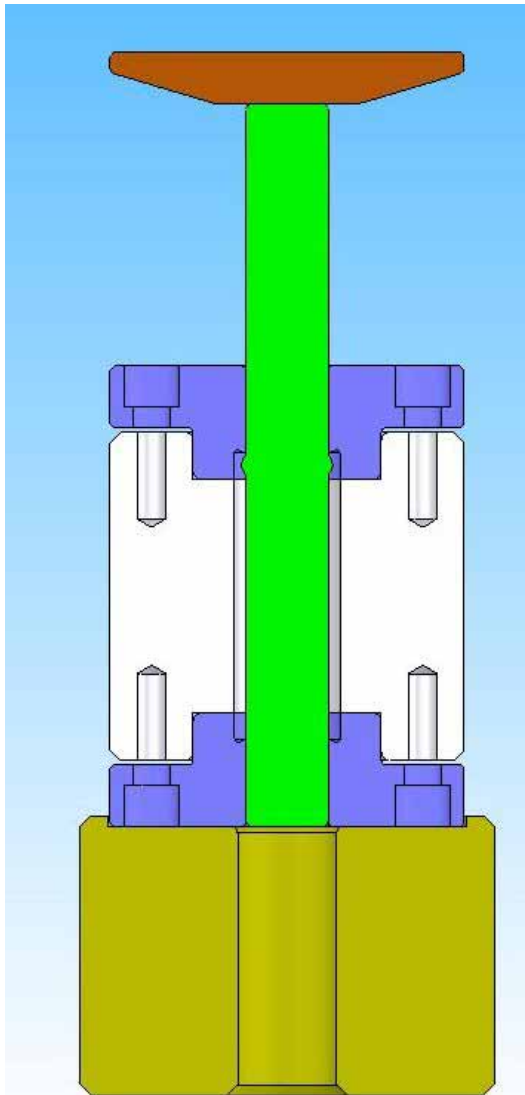
Návrh nástroje pro RET

Nástroje se sestávají z matrice (jakost ČSN 19571), dvou čel (jakost ČSN 19614), trnu (jakost ČSN 19312), horní (jakost ČSN 15241) a spodní (jakost ČSN 12050) podložky. Rozměry matrice jsou $\varnothing 171/159$ mm, tloušťka stěny 60mm. Čelo má rozměry $\varnothing 171/55$ mm a je uchyceno k matrici pomocí šesti pevnostních šroubů M16. Trubka má rozměry TR KR 51x5,6 – 141 (vnější průměr x tloušťka stěny - délka). Na jednom konci je vnitřní část trubky osoustružena tak, aby bylo možno vložit do tohoto vybrání trn ($\varnothing 39,8/350$ mm). Montáž se provádí sešroubováním čela s matricí, vložením trubky a nasunutím trnu. Celek je uzavřen čelem, které opět sešroubojeme s matricí. Tuto sestavu pak položíme na spodní podložku a na trn vložíme horní podložku. Takto je sestava připravena k experimentu na lisu (lis 10000 kN). Reverzního chodu trnu dosáhneme tím, že sestavu matrice otočíme o 180° a znovu vložíme za použití podložek pod lis. Celá sestava nástroje je znázorněna na dalších obrázcích.

5. ZÁVĚR

Obě varianty nástroje pro techniku ECAP byly otestovány a využívány pro výrobu vzorků s vysokou vnesenou deformací. Lze konstatovat, že využitelnost předepnuté bandážované zápustky je podstatně lepší ve srovnání s dělenou klínovanou zápustkou. Při protlačování u ní dochází k podstatně menší deformaci a materiál má menší tendenci být protlačován zpětně do prostoru mezi trn a zápustku. U dělené klínované zápustky je tato tendence značná, hliníkové slitiny, které byly testovány, zatékají do vůle mezi zápustku a trn, tato vůle vzniká pružnou deformací zápustky při lisování. Přítomnost tenoučké vrstvy protlačovaného materiálu mezi zápustkou a trnem znásobuje deformační odpor a namáhání formy, může pak docházet buď k zastavení lisu nebo poškození formy. Přestože u bandážované zápustky je tento jev podstatně omezen, nelze říci, že by byl eliminován zcela. Pro jeho další snížení nebo úplné odstranění by se patrně muselo předepnutí bandáže ještě

zvýšit. Rovněž nová koncepce kratších trnů s odlehčením se jeví podstatně výhodnější a méně náchylná na destrukci trnu. Příznivý aspekt je rovněž lisování na hydraulickém lisu 10000 kN s plynulejším přechodem na max. tvářecí sílu.



Obr.12 Sestava nástroje technologie RD (šrouby a tvářená trubka jsou skryty)

U techniky CGP byla otestována pouze první varianta lisovacího nástroje. Nástroj je plně funkční, je však využitelný pouze pro menší zatížení – jednak proto, že je upínán na kovací lis o síle 1000 kN, jednak proto, že konstrukce nástroje nedovoluje vyšší zatížení. Kritické špičky napjatosti vznikají v rádiusech ozubení kovadel i rovnadel a to především při operaci rovnání, kdy zuby kovadel a rovnadel do sebe zapadají a vlivem vysokého tlaku a jemných geometrických nepřesností dochází k silným ohybovým momentům v rádiu u kořene zubů. Z tohoto důvodu již jednou došlo ke zlomení rovnadla, místo iniciace se nacházelo u kořene zubu.

Nástroj podle druhé varianty je již vyroben a bude odzkoušen v nejbližší době. Očekává se zlepšení a možnost vyššího zatížení nástroje z následujících důvodů:

Poloměr rádiu u kořene zubu je podstatně zvětšen. Při rovnání nejsou vkládány zuby rovnadel do zubů kovadel. Nástroje jsou masivnější a jsou vyrobeny z pevnějších a houževnatějších materiálů. Nástroje jsou konstruovány pro upnutí na hydraulický lis 10 000 kN, který umožňuje větší sílu a plynulejší změny zatížení.

Nástroj pro techniku RD je vyroben a bude v nejbližší době testován.