

Recenzované výzkumné články

Zavedení výroby dutých výkovek z dutých ingotů ve VÍTKOVICE HEAVY MACHINERY a.s.

The Launching of Production of Hollow Forgings from hollow Ingots in the Company VÍTKOVICE HEAVY MACHINERY a.s.

Ing. Jiří Petržela, Ph.D.¹; doc. Ing. Miroslav Greger, CSc.²; Ing. Pavel Machovčák, Ph.D.¹

¹ VÍTKOVICE HEAVY MACHINERY a.s., Ruská 2887/101, 703 00 Ostrava-Vítkovice, Česká republika

² VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta materiálově-technologická, 17. listopadu 2172/15, 708 00 Ostrava-Poruba, Česká republika

Článek pojednává o zavedení výroby dutých výkovek, u nichž se použije jako výchozí polotovár dutý ingot ve VÍTKOVICE HEAVY MACHINERY a.s. Tato technologie výroby dutých výkovek je prospěšná tím, že přináší nejen úsporu materiálu a energie, ale i lepší vlastnosti výkovek díky lepší výchozí lici struktuře oceli. První část je věnována problematice samotné výroby dutého ingotu a potížem, které bylo nutno postupnými kroky překonat. Zásadní věcí bylo navrhnout způsob lití dutého ingotu a konstrukci lici soupravy tak, aby při chladnutí a tuhnutí tohoto ingotu nevznikaly vnitřní trhliny. Dále je popsána výroba reálného dutého výkovku – rotorové hřídele z dutého ingotu s označením 16Kd115 a doložena shodnost dosažených hodnot mechanických vlastností s výsledky pro stejný výkovek z plného ingotu. Závěrečná část se věnuje způsobu výpočtu stupně prokování u dutých výkovek z dutých ingotů.

Klíčová slova: dutý ingot; lici sestava; matematická simulace; dutý výkovek; pēchování dutého ingotu; sekání dutého výkovku; úspora materiálu; úspora energií; stupeň prokování

This article deals with the launching of hollow forgings production in the company VÍTKOVICE HEAVY MACHINERY a.s., for which a hollow ingot is used as a starting semi-product. This production technology of hollow forgings is beneficial not only by material and energy savings but also by better properties of forgings due to better initial casting structure of steel. The first part of this article deals with the problems of production of hollow ingot itself and with some issues, which had to be overcome by consecutive steps. The essential objective was to design the procedure of casting of hollow ingot and the construction of casting set to prevent origination internal cracks during cooling and solidification of such ingot. The production of real hollow forging is then described – the rotors shaft from hollow ingot designated as 16Kd115 and the verification of the conformity of achieved values of mechanical properties with the results of the same hollow forging made from solid ingot. The final part of the article deals with the method of calculation of reduction ratio for hollow forgings made from hollow ingots.

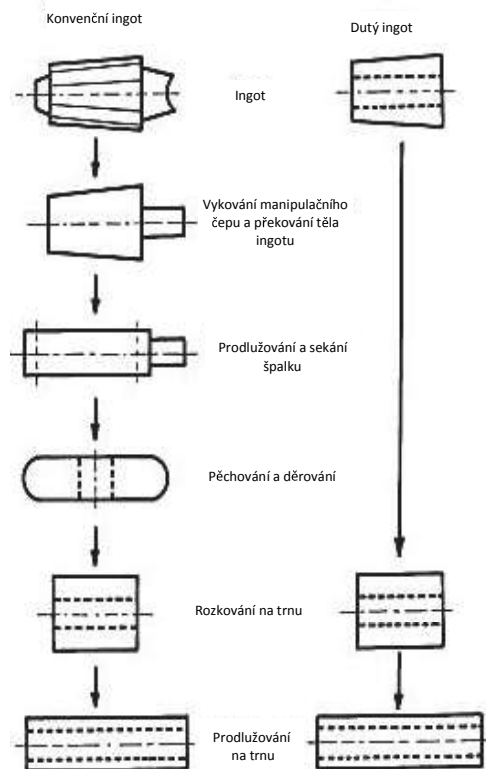
Key words: hollow ingot; casting set; mathematical simulation; hollow forging; upsetting of hollow ingot; cutting of hollow forging; material savings; energy savings; reduction ratio.

Jedním z významných produktů volných kováren jsou duté výkovky, především kroužky a dutá tělesa. Nejčastěji jsou tyto výkovky určeny pro namáhavé konstrukce části strojů nebo pro tlaková zařízení v energetice, a to i v jaderné energetice. Proto jsou na ně kladena velmi přísná kritéria jakosti a rovněž vysoké požadavky na mechanické vlastnosti. Duté výkovky patří mezi velmi náročné výrobky jak z hlediska tváření (časově zdlouhavý výrobní proces a náročný i na pomocné tvářecí nářadí), tak i z hlediska obrábění (problém s dodržením ideálního tvaru a rozměrů kroužků při mechanickém opracování). Běžně se tyto výkovky vyrábějí z plných ingotů. Pokud z nich vyrábíme duté výkovky, je zapotřebí zařadit do

výrobního procesu kování operace pēchování a děrování špalku. Jsou to operace zdlouhavé, náročné na přesnost děrování, vyžadující meziotřev pro děrování a použití větší hmotnosti vstupního plného ingotu, což vše v souhrnu zvyšuje výrobní náklady. Porovnání technologií kování dutých výkovek s použitím plného a dutého ingotu ilustruje obr. 1.

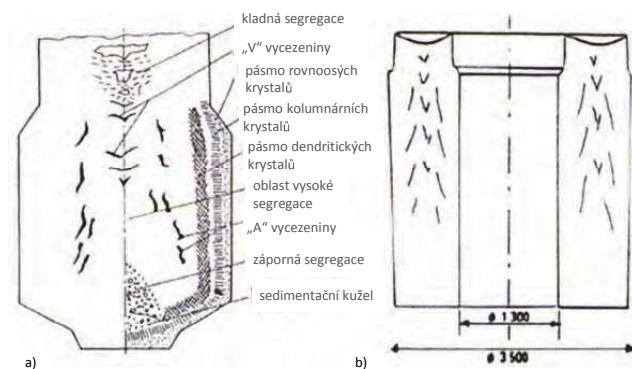
Naproti tomu použití dutého ingotu výrobní náklady významně snižuje. Další výhodou použití dutého ingotu jakožto vstupního materiálu pro kování dutých výkovek je i lepší výchozí lici struktura díky rychlejšímu chlazení a tuhnutí dutého ingotu. Lze tedy očekávat, že vlastnosti

i struktura výkovku budou více homogenní ve všech směrech a rozsah segregací bude výrazně menší než v případě použití klasických ingotů (obr. 2).



Obr. 1 Porovnání procesu kování dutých výkovků s použitím plného a dutého ingotu

Fig. 1 The comparison of forming processes for the production of hollow forgings with the use of hollow and solid ingot as starting material



Obr. 2 Základní tvar ingotů a segregace v ingotech: a) segregace v klasickém ingotu, b) segregace v dutém ingotu

Fig. 2 The basic shape of an ingot and distribution of segregations: a) the segregations in solid ingot, b) the segregations in hollow ingot

Na základě předpokládané nižší spotřeby materiálu, snížení doby ohřevů a meziuhřevů i následného opracování lze odhadnout, že při výrobě jednoho kusu výkovku z dutého ingotu bude úspora přímých nákladů dosahovat až 20 %.

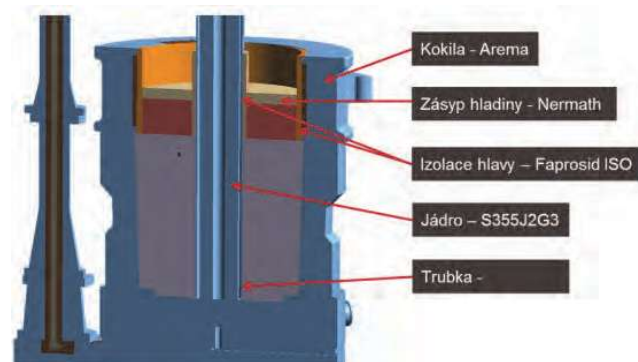
Z výše uvedených důvodů se ve VÍTKOVICE HEAVY MACHINERY a.s. (dále VHM a.s.) klade důraz na rychlé zavedení výroby dutých výkovků z dutých ingotů. Jak

však ukázaly některé výsledky v minulosti, přináší tato nová technologie jistá úskalí ať už v oblasti výroby samotného dutého ingotu, nebo i při výrobě dutých výkovků z těchto ingotů [1].

1. Odlévání dutých ingotů

Ve VHM a.s. se problematikou výroby dutého ingotu zabývá již několik let, a to i v rámci grantových projektů. V minulosti byly ověřovány různé velikosti dutých ingotů, různé postupy lití a různé konstrukce lící soupravy [2, 3]. Tyto práce však byly převážně zaměřeny na konstrukci lící soustavy s využitím dutého jádra (měnil se úkos tohoto jádra), které bylo chlazeno vzduchem. I když se podařilo vyrobit duté ingoty, vždy to bylo spojeno s určitými problémy. Jedním z velkých problémů bylo vytažení jádra z ingotu již na ocelárně – většinou se muselo jádro vytahovat/vytlačovat na lise v kovárně a to přinášelo jednak zdržení ve výrobě a jednak nutnost dutý ingot vychlazovat. V průběhu chladnutí dutého ingotu a nemožnosti včasného vytažení jádra tak vznikaly mikrotrhliny na jeho vnitřním povrchu, které se pak rozšiřovaly během následného kování na trnu. Druhým a ještě významnějším problémem byla skutečnost, že se po vytažení jádra objevovaly na vnitřní ploše dutého ingotu trhliny, které nemohly být následným kováním zaceleny, neboť první kovářskou operací je rozkování na trnu, tj. zvětšování průměrů dutého polotovaru, což je spojeno se značným rozvozem tahového stavu napjatosti. Při kování docházelo ke vzniku tahových napětí kolmých na směr trhlín orientovaných převážně do podélného směru.

Proto bylo přistoupeno k změně výroby dutého ingotu – zejména byla změněna konstrukce lící soupravy [4]. Bylo ponecháno použití dutého jádra, které je chlazeno proudem vzduchu. Jeho průměr se však zmenšil, aby bylo umožněno použití tzv. vnitřní chladicí trubky (obr. 3).



Obr. 3 Nová sestava lící soupravy pro dutý ingot 16Kd115

Fig. 3 The new casting set for casting of hollow ingot 16Kd115

Způsob chlazení a konstrukční změny lící soupravy se natolik lišily od předchozích variant, že bylo zapotřebí provést kontrolní matematickou simulaci lití a tuhnutí ingotu 16Kd115 v lící soupravě. Cílem matematické simulace bylo:

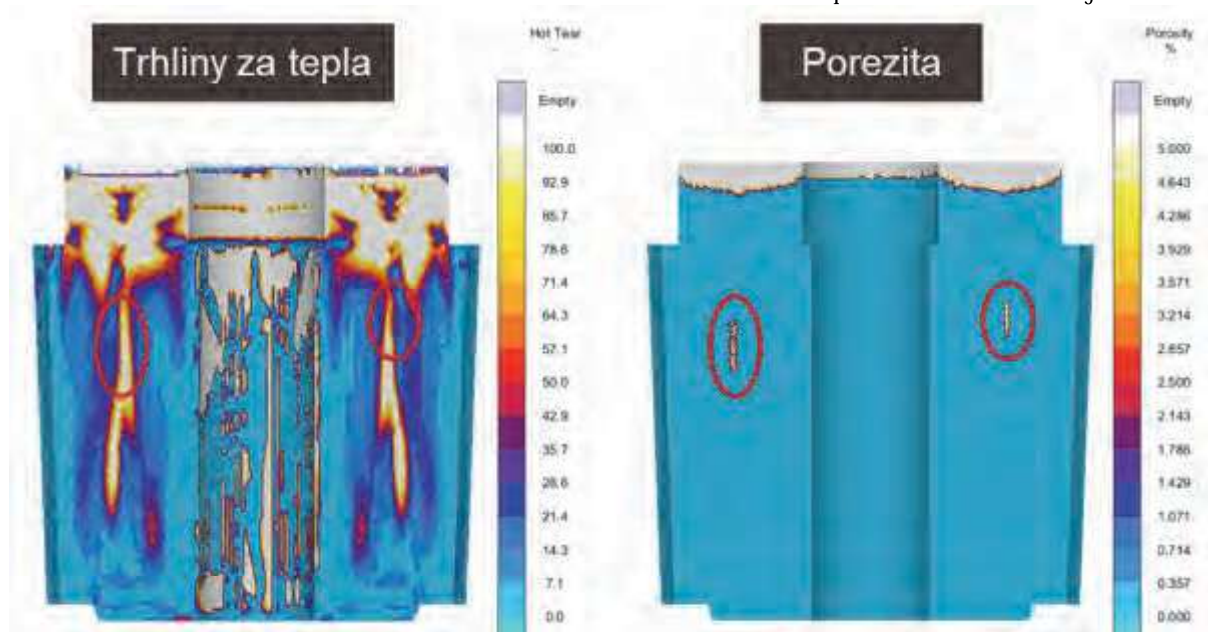
- predikovat vnitřní kvalitu dutého ingotu (pórovitost, řediny, makrosegregace),

- zjistit vliv proudění vzduchu v dutině mezi chladicí trubicou a jádrem na teplotní pole uvnitř trubky, na možnou její deformaci, způsob vytážení jádra po skončení tuhnutí ingotu a na rozložení napětí v ingotu.

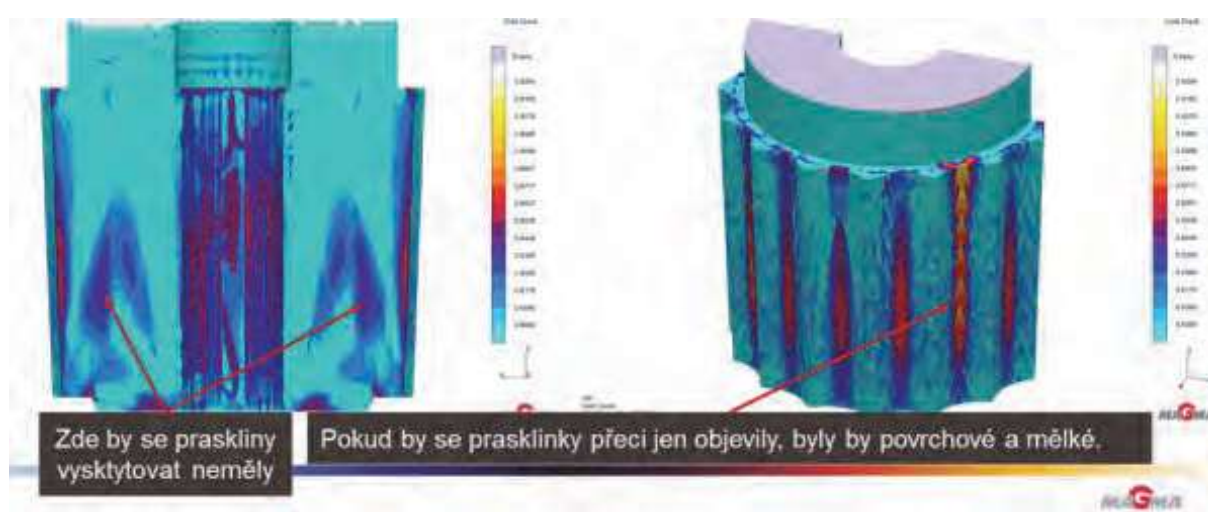
Výsledky simulace potvrdily předpoklad vzniku pórovitosti v dutém ingotu, která je dána geometrií ingotu a ochlazovacími podmínkami, avšak její rozsah by neměl vést ke vzniku zmetkovitosti [4]. Chladicí trubka by se neměla protavit, i když maximální teplota je cca 36 °C pod teplotou solidu. Pouze hrozí určitá deformace/zborcení tvaru (ovality) zahřáté chladicí trubky.

Dalším cílem simulace bylo stanovit, zda v dutém ingotu mohou vznikat trhliny za tepla a praskliny za studena, stanovit, jak se dutý ingot bude deformovat při tuhnutí, predikovat deformaci chladicí trubky vlivem smršťování ze strany ingotu a také stanovit způsob vytážení středového jádra z kokily.

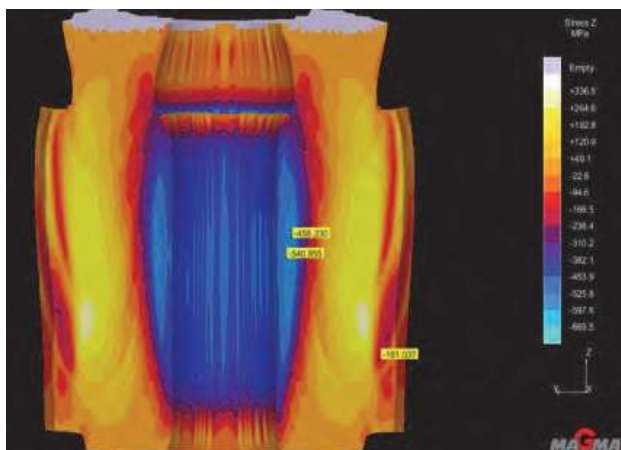
Obr. 4 až 6 znázorňují předpokládaný výskyt ředin a výskyt trhlin za tepla. Z obrázků je zřejmé, že vady se vyskytují v horní polovině těla dutého ingotu přibližně ve stejném místě, takže jejich společný vliv se může násobit. Jejich rozsah a velikost ale nijak nepřevyšuje obvyklý výskyt a dá se s velkou pravděpodobností předpokládat, že se v následném průběhu kování eliminují.



Obr. 4 Předpokládaná místa vzniku trhlin za tepla (vpravo vznik ředin)
Fig. 4 Anticipated places of hot crack formation (on the right – shrinkage porosity)



Obr. 5 Vlevo – místa s převyšující mezi pevností. Vpravo – předpokládaná místa vzniku povrchových trhlin za studena
Fig. 5 On the left – places with exceeded tensile strength. On the right – anticipated places of the surface cold crack formation



Obr. 6 Rozložení napětí v průřezu po vychlazení na pokojovou teplotu
Fig. 6 The stress distribution in hollow ingot cross section during cooling to the room temperature

Z uvedených výsledků simulace vzniku napětí v dutém ingotu během tuhnutí vyplývá určitá možnost vzniku malých trhlinek jen na stykové ploše ingot-chladičí trubka. Pokud nedojde k dokonalému svaření těchto dvou materiálů, nebudou mít tyto povrchové trhlinky výrazný vliv na výslednou jakost výkovku. Trhlinky by se také mohly vyskytovat ve středové části ingotu, přesně ve stejném místě, kde se nachází mikro a makropórovitost a také pozitivně segregované legující prvky, které snižují teplotu solidu. Tyto trhliny mohou mít vzhled jako pórovitost. Opět však nehrozí nebezpečí vzniku závažných jakostních problémů, neboť jejich rozsah a velikost nepřevyšuje bezpečnou hranici. Praskliny za studena by se mohly vyskytovat pouze na povrchu ingotu výrazného negativního vlivu na jakost.

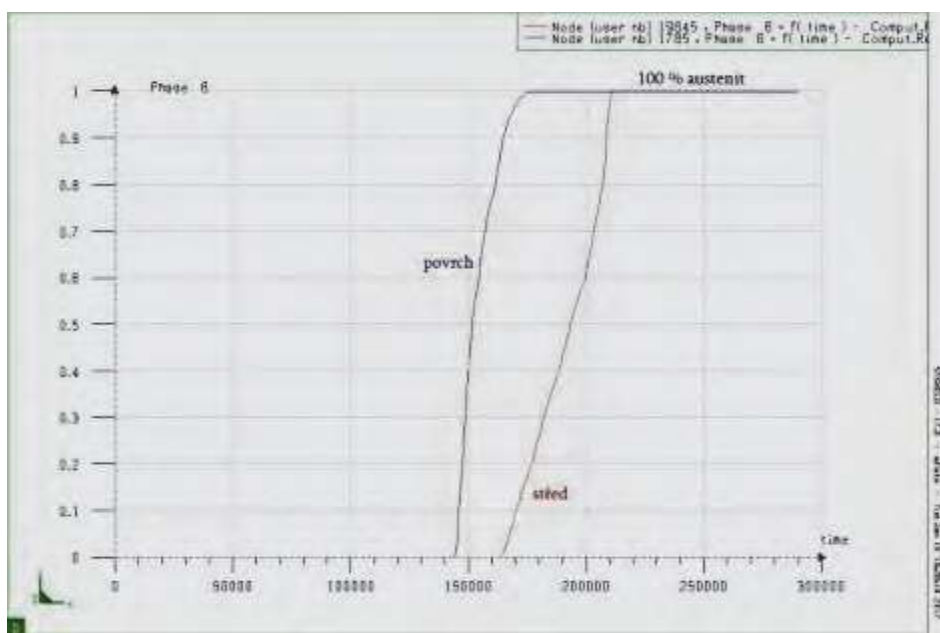
Matematická simulace ukazuje, že jádro u této konstrukce lící soupravy je možné bez problémů vytáhnout již po odlití a tím se umožní bezproblémové smrštění chladnoucího dutého ingotu [4].

2. Kování dutých výkovků z dutých ingotů

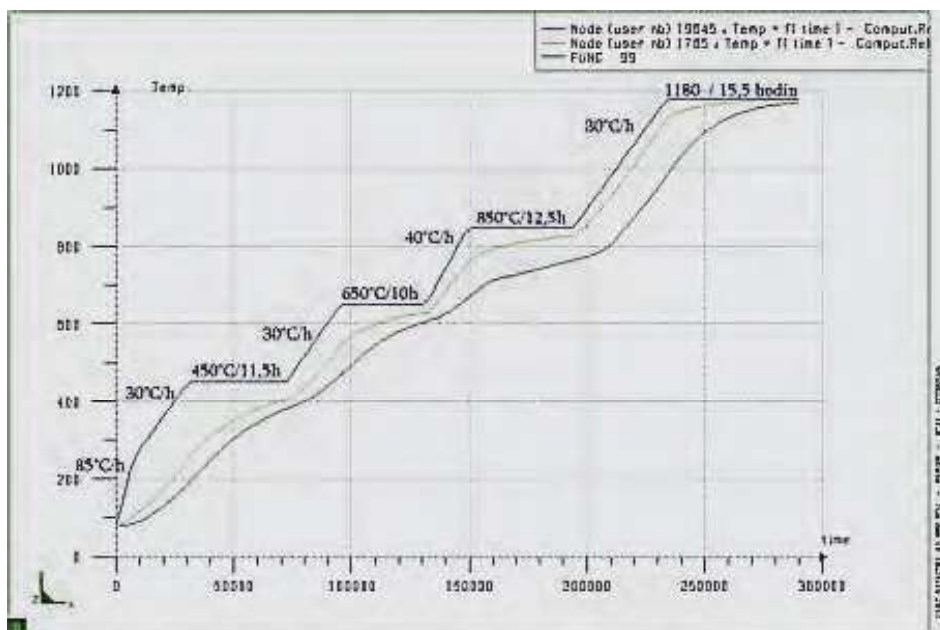
Před procesem kování dutého výkovku z dutého ingotu bylo zapotřebí si některé nové postupy ověřit pomocí matematických simulací. Jednou z prvních simulací bylo porovnání ohřevu plného a dutého ingotu. Smyslem této simulace bylo upřesnit režim ohřevu dutého ingotu a zároveň prokázat, že ve srovnání s ohřevem klasického plného ingotu dojde i k úspoře spotřeby plynu na jeho ohřev. Výsledky simulace tento předpoklad prokázaly (obr. 7 až 10).



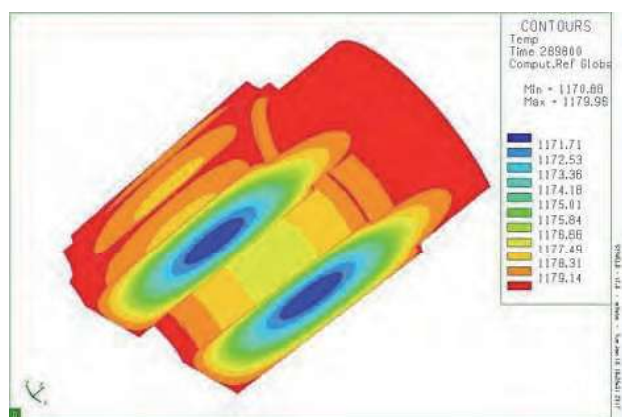
Obr. 7 Model dutého ingotu
Fig. 7 The hollow ingot model



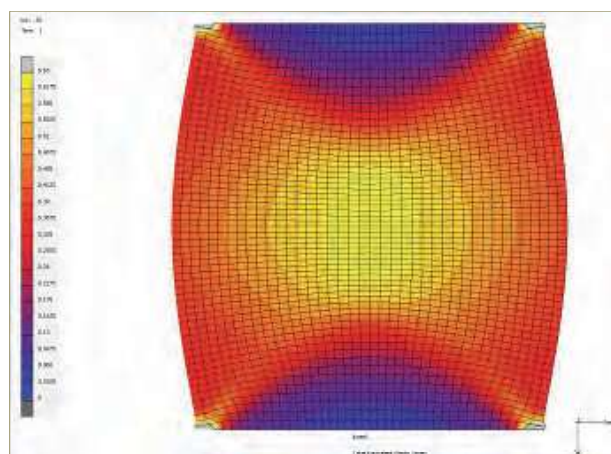
Obr. 8 Austenitizace dutého ingotu
Fig. 8 Austenization of the hollow ingot



Obr. 9 Režim ohřevu dutého ingotu
Fig. 9 Heating mode diagram for the hollow ingot

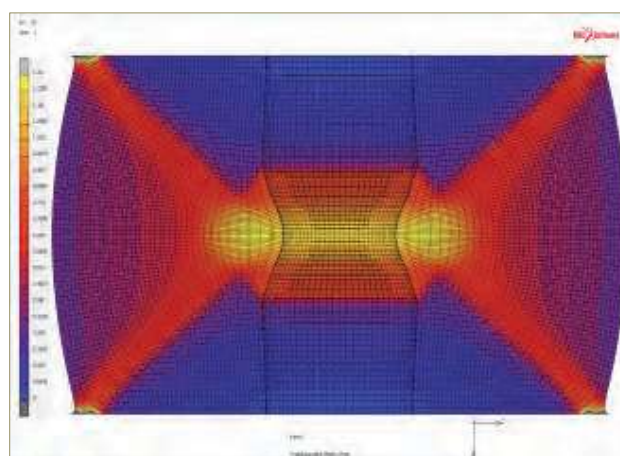


Obr.10 Mapa rozložení teplot při ohřevu
Fig. 10 The diagram of temperature distribution during heating



Obr. 11 Rozložení deformací při pěchování plného ingotu
Fig. 11 The strain distribution during upsetting of solid ingot

Velká materiálová a zejména energetická úspora při aplikaci dutého ingotu ve výrobě dutých výkovek vzniká tím, že ve srovnání s použitím plného ingotu lze zcela vynechat kovářské operace pěchování špalku a jeho následné děrování po novém ohřevu [5]. Úkolem simulační analýzy bylo poukázat na rozdíly v rozložení deformací na podélném řezu pěchovaného dutého a plného ingotu. Smyslem pěchovací operace při volném kování je kromě jiného také rozrušení původní lící struktury a dosažení optimálního prokování středových oblastí ingotu, kde se nacházejí největší lící vady. Simulací bylo prokázáno, že při pěchování dutého ingotu nejsou největší deformace zacíleny do středových oblastí stěn dutého ingotu, ale do oblastí blízkých vnitřnímu povrchu dutého ingotu, a mívají tak oblasti s největším výskytem lících vad (obr. 11 – 13). Při výrobě dutých výkovek z dutých ingotů to však není na závadu. Duté ingoty vlivem rychlejšího chladnutí/tuhnutí oceli mají menší segregace a obvykle se pěchování ingotu nepoužívá.



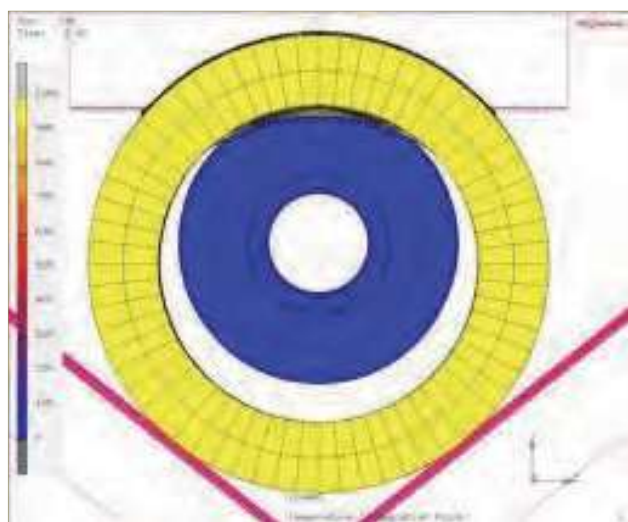
Obr. 12 Rozložení deformací při pěchování dutého ingotu
Fig. 12 The strain distribution during upsetting of solid ingot



Obr. 13 Rozložení deformací při pěchování dutého ingotu – tenčí stěna dutého ingotu

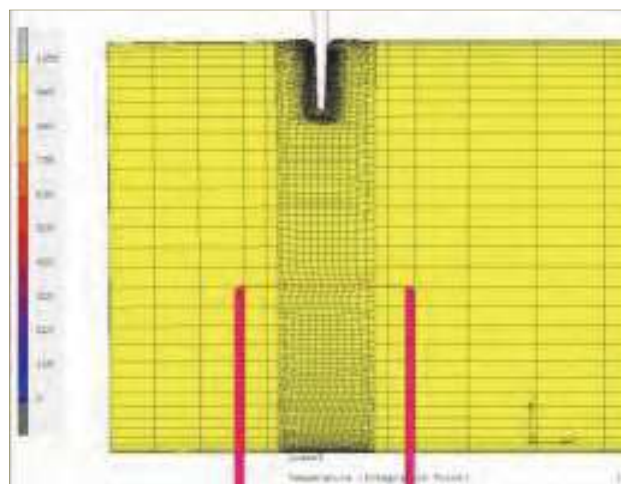
Fig. 13 strain distribution during upsetting of solid ingot – thinner wall thickness of hollow ingot

Zcela neznámým procesem bylo sekání hlavy z dutého ingotu (pálení hlavy nepřicházelo v úvahu, protože proces kování by byl přerušen). U plného ingotu se hlava překovává na manipulační čep, který se pak pomocí speciálního nástroje (sekáče) oddělí od zbytku výkovku. Při sekání je plný výkovek opřen o spodní kovadlo – tato technologie nemůže být použita při sekání dutého výkovku, neboť by docházelo k borcení tvaru. Právě pomocí matematických simulací, kdy byly postupně měněny jednak tvar sekáče a také umístění pomocných nářadí, byla nakonec navržena taková technologie sekání dutého výkovku, aby nedocházelo k přílišné změně jeho tvaru. Některé výsledky této simulace znázorňují obr. 14. a 15.



Obr. 14 Sestava nářadí při sekání

Fig. 14 The forming tools assembly for cutting

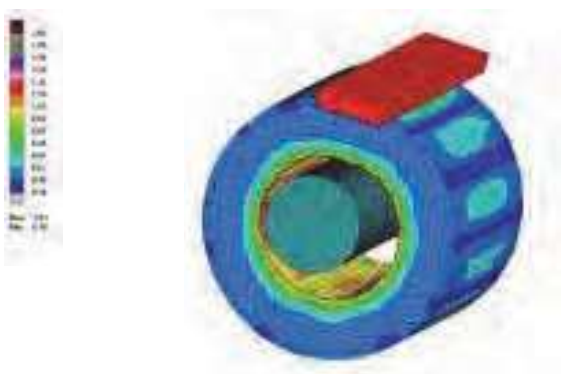


Obr. 15 Průběh sekání dutého výkovku

Fig. 15 The progress of cutting of hollow ingot

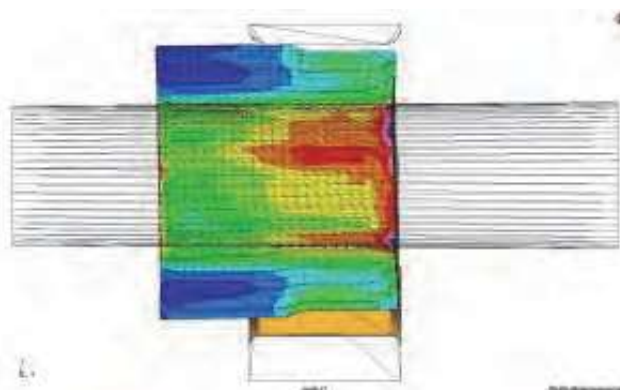
Rovněž samotné kování na trnu bylo podrobena simulační analýze s cílem potvrzení dosavadního postupu při rozkování a prodlužování dutého výkovku, příp. optimalizace tohoto postupu, zejména stanovení optimálních parametrů těchto operací za účelem dosažení

jak potřebného prokování struktury, tak i zkrácení použitých tvářecích operací. Jako příklad jsou uvedeny obr. 16 a 17 znázorňující rozložení deformace při uvedených kovacích operacích.



Obr. 16 Rozložení deformace při rozkování na trnu

Fig. 16 The strain distribution during saddle forging

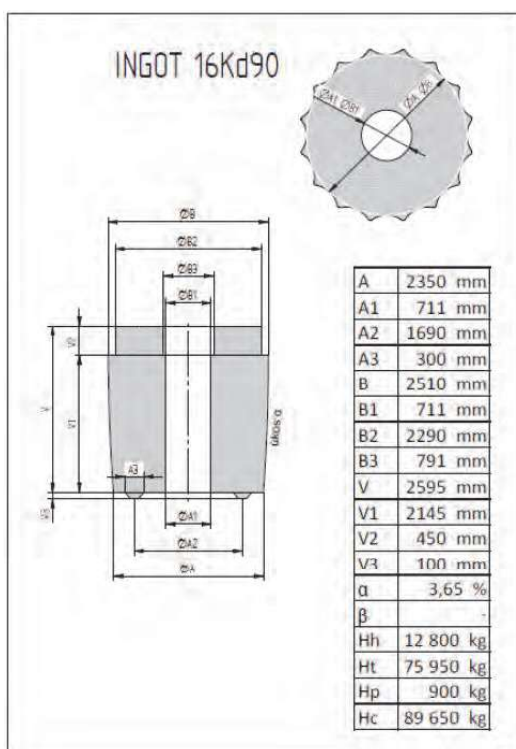


Obr. 17 Rozložení deformace při prodlužování na trnu

Fig. 17 The strain distribution during elongation over a mandrel

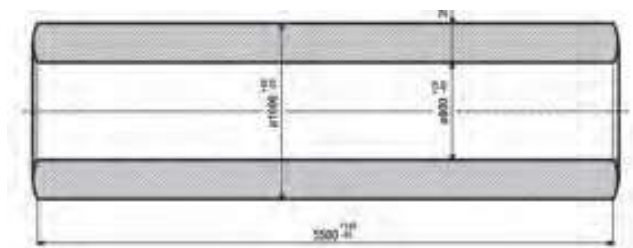
3. Výroba dutého výkovku z dutého ingotu ve VHM a.s.

Na základě provedených matematických simulací bylo přistoupeno k odlití dutého ingotu s použitím nové konstrukce licí soupravy. Za tím účelem bylo upraveno původní jádro použité u předchozích pokusů, které bylo opracováním upraveno na menší průměr. Licí souprava byla doplněna chladicí trubkou. Byla opět použita stejná kokila jako při předešlých pokusech (kokila 16Kd115), takže ingot měl stejné vnější rozměry. Dutý ingot byl však vyroben s menší hmotností hlavy – hlava ingotu byla snížena na 500 mm (z původních 900 mm) a součástí hlavy nebyly manipulační čepy, které mohly by být příčinou razantního rozvoje vnitřní trhliny. Výkres kokily je uveden na obr. 18.



Obr. 18 Výkres kokily dutého ingotu
Fig. 18 The drawing of ingot mould for hollow ingot

Na obr. 19 je uveden kovářský náčrtek pro výrobu rotorové hřídele z materiálu S355J2G3.



Obr. 19 Kovářský náčrtek dutého výkovku
Fig. 19 The forging draft of hollow forging



Obr. 20 Úspěšně odlitý dutý ingot
Fig. 20 The successful cast hollow ingot

Kování dutého výkovku proběhlo bez problémů a bylo dosaženo rozměrů dle kovářského náčrtu (obr. 21). Celkový stupeň prokování na straně hlavy ingotu činil 3,35 a na straně paty ingotu 3,27. Celková doba kování činila 192 min (bez meziohřevů).



Obr. 21 Výkovek z dutého ingotu
Fig. 21 The forging made from hollow ingot

Dosažené mechanických vlastností dutého výkovku hřídele jsou uvedeny v tab. 1. Výsledky byly porovnány s výsledky mechanických hodnot dosažených na stejném typu výkovku ale s použitím plného ingotu tab. 2. Z porovnání hodnot mechanických vlastností dutého výkovku kovaného z dutého ingotu a výkovku hřídele kovaného z plného ingotu vyplývá, že tyto hodnoty jsou téměř stejné a lze konstatovat že nově navržená technologie jak lití dutého ingotu tak i kování výkovku z něj nemá žádný vliv na zhoršení mechanických vlastností, obzvláště když v tomto případě byla do postupu kování zařazena operace pýchování [6].

Tab.1 Mechanické vlastnosti dutého výkovku z dutého ingotu

Tab. 1 Mechanical properties of hollow forging made from hollow ingot

Mechanické vlastnosti dutého výkovku vyrobeného z dutého ingotu					
Místo odběru zkušební materiálu	Požadované hodnoty (pro rotorovou hřídel)	$R_{p0,2}$	R_m	A_5	KV_2
		min. 355	min. 500	min. 22	27 při - 20 °C
		MPa		%	J
Naměřené hodnoty okraj dutého výkovku	Podél	440	624	27,9	142; 146; 130
	Příčně	431	618	25,7	84;128; 68
Naměřené hodnoty cca 1 m od okraje dutého výkovku	Podél	449	626	26,6	134; 128; 134
	Příčně	430	617	25,2	126; 126; 68

Tab. 2 Mechanické vlastnosti rotorové hřídele kované s plného ingotu

Tab. 2 Mechanical properties of rotorshaft forged from solid ingot

Mechanické vlastnosti rotorové hřídele vyrobené z plného ingotu				
Směr odběru	$R_{p0,2}$	R_m	A_5	KV_2
	MPa		%	J
Podél	425	615	25	135; 138;142
Příčně	422	610	24	127;124;95

4. Výpočet stupně prokování u dutých výkovků kovaných z dutých ingotů

Pro výpočet stupně prokování (dále jen PK) při výrobě dutých těles z plných (klasických) ingotů lze použít známý základní vzorec:

$$PK = A^n \cdot P^n \cdot K \sqrt{P^*} \cdot \frac{s_p}{s} \quad (1)$$

kde:

PK je celkový stupeň prokování,

A – pěchovací ekvivalent ($A = 0,7$ až $0,9$),

P – stupeň pěchování $\left(\frac{D_p^2}{D_i^2}\right)$, který se stanoví jako poměr příčného průřezu napěchovaného ingotu a středního příčného průřezu ingotu,

K – stupeň prodlužování $\left(\frac{D_i^2}{D_s^2}\right)$, který se stanoví jako poměr středního příčného průřezu dutého ingotu a příčného průřezu předkovku,

P^* – stupeň pěchování dutého předkovku $\left(\frac{D_k^2}{D_s^2}\right)$, který se stanoví jako poměr příčného průřezu napěchovaného předkovku a příčnému průřezu ingotu,

s_p – tloušťka stěny napěchovaného dutého ingotu,

s – konečná tloušťka stěny dutého tělesa.

Pro další výpočty je možno uvažovat s konstantami, které jsou u výrobců výkovků běžně zavedeny:

$$PK \geq 3 \quad A = 0,8$$

Zavedením těchto konstant a dosazením poměrových výrazů za proměnné získá rov. (1) tvar:

$$PK = 0,8^2 \cdot \frac{D_p^2}{D_i^2} \cdot \frac{D_i^2}{D_s^2} \cdot \sqrt{\frac{D_k^2}{D_s^2}} \cdot \frac{s_p}{s} \geq 3 \quad (2)$$

a po úpravě

$$PK = 0,8^2 \cdot \frac{D_p^2}{D_i^2} \cdot \frac{D_i^2}{D_s^2} \cdot \frac{D_k \cdot s_p}{s} \geq 3 \quad (3)$$

Při volbě konkrétního ingotu pro kování dutého tělesa známe z jednotlivých členů rov. (3) hodnoty D_i , D_p , s a neznáme hodnoty D_s , D_k , s_p .

4.1 Odvození průměru ingotu D_s

Pokud bude dutý výkovek kován z plného ingotu, pak průměr ingotu D_s můžeme odvodit ze spotřební hmotnosti výkovku m_{sv} a technologických zásad, podle kterých výška těla ingotu H_s nesmí překročit hodnotu $2,5 D_s$. Při kování z dutého ingotu je vhodné mít větší tloušťku stěny ingotu, abychom dosáhli požadovaného stupně prokování bez jeho případného pěchování [7].

Pro výpočet hmotnosti těla ingotu lze použít vztah m_s :

$$m_s = \frac{\pi \cdot D_s^2}{4} \cdot H_s \cdot \rho \quad (4)$$

Dosazením za $H_s = 2,5 D_s$ získáme vztah:

$$m_s = \frac{2,5 \cdot \pi \cdot D_s^3}{4} \cdot \rho \quad (5)$$

a po úpravě a zaokrouhlení získáme vztah pro výpočet průměru špalku D_s :

$$D_s^3 = \frac{m_s}{2\rho} \quad (6)$$

V rov. (4) až (6) a následujících vztazích značí ρ měrnou hmotnost kovaného materiálu.

4.2 Odvození hodnoty D_k a s_p

Z technologického hlediska platí u vyděrovaného špalku následující zásady [8]:

$$s_p = \frac{D_k}{3}, \quad D_a = S_p, \quad H_k = D_k$$

kde D_a je vyděrovaný průměr otvoru v napěchovaném špalku, H_k je výška špalku.

Pro výpočet hmotnosti vyděrovaného špalku lze použít vztah:

$$m_v = \frac{\pi(D_k^2 - s_p^2)}{4} \cdot H_k \cdot \rho \quad (7)$$

a po dosazení $s_p = \frac{D_k}{3}$, a $H_k = D_k$, a úpravě dostáváme pro výpočet hmotnosti vyděrovaného kotouče vztah:

$$m_v = 0,7 \cdot D_k^3 \cdot \rho \quad (8)$$

Po úpravě získáme z rov. (8) základní vztah pro výpočet D_k :

$$D_k^2 = \sqrt[3]{\left(\frac{m_v}{0,7}\right)^2} \quad (9)$$

Dosazením rov. (6) a (9) do rov. (3) získáme rov. (10), z níž už můžeme určit všechny potřebné hodnoty pro výrobu dutého výkovku:

$$3 \leq 0,8^n \left(\frac{D_p^2}{D_i^2}\right)^n \cdot D_i^2 \cdot \frac{0,67\rho \sqrt[3]{m_v^2}}{m_v s \sqrt{(0,7\rho)^2}} \quad (10)$$

4.3 Kontrola PK a volba ingotu u nepěchovaných ingotů

V případě, že nedochází k pěchování, platí $n = 0$ a rov. (10) získává tvar:

$$3 \leq D_i^2 \cdot \frac{0,67\rho \sqrt[3]{m^2}}{m \cdot s \sqrt{(0,7\rho)^2}} \quad (11)$$

Vhodný ingot pro výrobu dutých těles musí mít střední průměr, který odpovídá vztahu:

$$D_i = \sqrt{\frac{4,5 \cdot m \cdot s \sqrt[3]{(0,7\rho)^2}}{\rho \sqrt[3]{m^2}}} \quad (12)$$

4.4 Kontrola PK a volba ingotu u 1× pěchovaných ingotů

V těchto případech $n = 1$ a rov. (10) získává tvar:

$$3 \leq 0,8 \cdot D_p^2 \cdot \frac{0,67\rho \sqrt[3]{m^2}}{m \cdot s \sqrt{(0,7\rho)^2}} \quad (13)$$

Vhodný ingot pro výrobu dutého tělesa musí mít po napěchování průměr odpovídající vztahu:

$$D_p \geq \sqrt{\frac{5,6 \cdot m \cdot s \sqrt[3]{(0,7\rho)^2}}{\rho \sqrt[3]{m^2}}} \quad (14)$$

Ingoty s vícenásobným pěchováním se pro výrobu dutých těles nepoužívají, a proto nejsou pro tyto případy dále odvozovány potřebné vztahy.

5. Optimalizace postupu kování a určení mezních rozměrů dutých těles

5.1 Omezení daná silou lisu

Vybrané postupy kování dutých těles využívají pro zvýšení stupně prokování operaci pěchování [9]. Ta je silově náročná.

Pro výpočet mezních rozměrů napěchovaného předkovku můžeme vyjít z některého vzorce pro výpočet síly při pěchování. Nejjednodušší z nich má tvar:

$$F = \sigma \left(1 + 0,15 \frac{D_o}{H_o}\right) \cdot S_o \quad (15)$$

kde D_o je vnější průměr těla dutého ingotu (předkovku), H_o je výška těla dutého ingotu (předkovku), S_o je plocha příčného průřezu dutého ingotu (předkovku), σ je deformační odpor oceli.

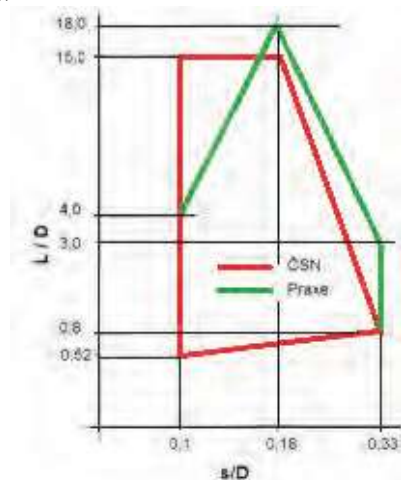
Nebo můžeme použít simulační výpočet, který je přesnější, poněvadž můžeme pracovat s reálným teplotním polem, zohlednit klesající rychlost příčnicku při pěchování apod.

5.2 Mezní rozměry dutých těles

K rozhodujícím rozměrům dutého tělesa patří: délka výkovku, vnitřní průměr výkovku a tloušťka stěny výkovku. V praxi kováren se používá výrobní rozsah rozměrů dutých těles podstatně větší, než uvádí ČSN.

5.2.1 Délka výkovků

Největší délka výkovku dutého tělesa je omezena vztahy L/D , s/D a také velikostí přídavek na obrábění, kde L je délka výkovku, D je vnější průměr výkovku a s je tloušťka stěny výkovku. Vztah mezi L/D a s/D je uveden na obr. 22.



Obr. 22 Vzájemné vztahy mezi základními rozměry výkovků dutých těles

Fig. 22 Mutual relationship among basic dimensions of forgings from hollow bodies

Jeho rozbořením a matematickým vyjádřením dostaneme pro určení největší délky výkovku následující závislosti:

$$L \leq 15 D \quad (16)$$

$$L \leq 0,0376 D \cdot \left(\frac{s}{D}\right) - 4,84. \quad (17)$$

Uvedené podmínky platí pro neosazená dutá tělesa. U osazených dutých těles musí být uvažován tzv. redukovaný vnější průměr a redukovaná tloušťka stěny, které se stanoví podle následujících vztahů:

$$D_r = \sqrt{\frac{4 \cdot m_j}{\pi \cdot \rho \cdot L}} \quad (18)$$

$$s_r = \frac{D_r - D_a}{2} \quad (19)$$

kde D_r je redukovaný vnější průměr výkovku dutého tělesa,

s_r – redukovaná tloušťka stěny výkovku dutého tělesa,

D_a – vnitřní průměr dutého tělesa,

m_j – jmenovitá hmotnost výkovku dutého tělesa,

ρ – hustota oceli.

Z tabulky pro určení přídavek na obrábění vyplývá další omezení výrobního rozsahu, které lze vyjádřit vztahem:

$$L < 16\,000 \text{ mm} \quad (20)$$

V závislosti na kovaném průměru se pro stanovení délky používají vztahy:

$$D \leq 150 \text{ mm}; \quad L \leq 2D$$

$$D \leq 400 \text{ mm}; \quad L \leq 2,5D$$

$$D \leq 500 \text{ mm}; \quad L \leq 4D \quad (21)$$

$$D \leq 1250 \text{ mm}; \quad L \leq 12,5D$$

$$D \leq 1600 \text{ mm}; \quad L \leq 10D$$

Nejmenší délka dutého tělesa se vypočítá z následujícího vztahu mezi geometrickými parametry L/D a s/D na obr. 22):

$$L_{min} \geq 1,195D \cdot \left(\frac{s}{D}\right) \cdot 0,361 \quad (22)$$

Rozmezí délek dutých těles používaných ve výrobní praxi kováren, zejména v rozsahu poměrů s/D od 0,18 do 0,33, je podstatně širší než stanoví ČSN. V praxi používaný rozsah je zakreslen do diagramu na obr. 22. Jeho rozbořením vyplývá, že podmínky uvedené v rov. (2) a (3) mají po úpravě následující tvar:

$$L \leq 18D \quad (23)$$

Pro $s/D \leq 0,18$ lze vypočítat délku L ze vztahu:

$$L \leq 1118D \cdot \left(\frac{s}{D}\right) \cdot 2,57 \quad (24)$$

Pro $s/D \geq 0,18D$, lze vypočítat délku L ze vztahu:

$$L \leq 0,11D \cdot \left(\frac{s}{D}\right) - 2,96 \quad (25)$$

5.2.2 Rozsah vnitřních průměrů dutých těles

Pro stanovení mezních hodnot vnitřních průměrů platí jednoznačně zásady uvedené v ČSN:

$$1600 \text{ mm} \geq D_a \geq 80 \text{ mm} \quad (26)$$

V praxi se však dutá tělesa s průměrem $D_a \leq 100 \text{ mm}$ a délky $L = 3$ až $4D$ obvykle vyrábějí jako plné podélné výkovky, které se, jak dále odst. 5.2.4 vysvětluje, vyvrtají.

5.2.3 Rozsah tlouštěk stěny dutých těles

Pro stanovení mezních hodnot tlouštěk stěny dutých těles platí vztahy:

$$0,33 D \geq s \geq 0,1D \quad (27)$$

Tyto zásady jsou dodržovány i v praxi kováren až na případy uvedené v následujícím odstavci.

5.2.4 Výroba tlustostěnných dutých těles.

Při výrobě tlustostěnných dutých těles (tj. těles, kde $D_a < 0,5 D$) je vhodné posoudit, zda jeho výroba kovárením je ekonomicky výhodná. Jsou pro to následující důvody:

Spotřební hmotnost výkovku dutého tělesa je obvykle vyšší, než je hmotnost plného výkovku. Je to dáno tím, že:

- přídávky na obrábění pro výkovky dutých těles jsou větší než přídávky pro podélné výkovky,
- vypočtená spotřební hmotnost je u výkovku dutého tělesa nejméně o 9 % vyšší než u plného výkovku.

Zpracovací náklady na výrobu výkovku dutého tělesa jsou vzhledem k složitější technologii výroby vyšší než u podélných výkovků.

Dutou součást lze z plného výkovku vyrobit vyvrtáním jádra. Režie při obrábění je pro tuto operaci výrazně nižší, než jsou režie kováreny. Proto se v případě výroby štíhlých výkovků se stejnou spotřební hmotností jako u plných výkovků přistupuje k vrtání středového jádra po celé délce kusu.

5.2.5 Postup při výběru vhodného ingotu pro dutá tělesa

V zásadě se volí vždy nejmenší ingot, který vyhovuje pro daný výkovek z hlediska jeho užitkové hmotnosti.

Provede se kontrola na velikost stupně prokování PK pro nepěchovaný ingot. Pokud vybraný ingot nevyhovuje, tak se provede teprve kontrola na pěchování. Nevyhovuje-li ingot rozměrům u pěchovaného ingotu, volím se nejbližší těžší ingot a postup se opakuje až do splnění podmínky pro stupeň prokování PK .

Závěr

Výkovky kroužků a dutých těles se často používají pro výrobu tlakových nádob například v chemickém průmyslu nebo v jaderné energetice a energetice. Tyto výkovky mají velké rozměry a na jejich jakost a mechanické vlastnosti jsou kladeny vysoké nároky. Z toho důvodu je třeba věnovat jejich výrobě zvýšenou pozornost. Pokud se zvládné technologie výroby těchto výkovků s použitím dutých ingotů, je velký předpoklad, že vysoké nároky na požadované mechanické vlastnosti byly splněny a navíc tato technologie přináší snížení výrobních nákladů. Tato technologie se ve VHM a.s. postupně provozně zavádí, což významně přispívá k posílení postavení firmy na celosvětovém trhu s těmito komoditami.

Při kování dutých výkovků z dutých ingotů je nutné respektovat technologické zásady, jejichž dodržení umožňuje ekonomicky výhodnou a jakostní výrobu, která je výrazně ovlivněna stupněm prokovaní. Pro výpočet stupně prokovaní byl analyzován známý a při konvenčním kování běžně používaný vztah, který byl pro jeho využití při určení vhodného průměru těla D_i a tloušťky stěny ingotu upraven tak, aby zahrnoval účinky petchování těla ingotu D_{ip} . Dále byl stanoven průměr ingotu D_i vhodný pro dosažení požadovaných rozměrů dutých těles. Základní vztah byl modifikován i pro výrobu dutých těles kovaných bez využití operace petchování, a také s aplikací operace petchování. Je nutno stanovit optimální stupeň prokovaní pro dosažení dostatečně prokované vnitřní struktury dutých výkovků kovaných z dutých ingotů, který by byl respektován i koncovými odběrateli dutých výkovků.

Tato problematika byla řešena v rámci grantového projektu TRIO – č. FV10360, za velmi účinné spolupráce s pracovníky VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta materiálově-technologická.

Poděkování

V článku jsou prezentovány poznatky získané při řešení projektu TRIO, č. FV 10360. Autoři článku děkují Ministerstvu průmyslu a obchodu ČR za podporu řešeného projektu.

Literatura

- [1] PETRŽELA, J., GREGER, M. *Roční zpráva o řešení projektu FV 10360*. (Výzkum a vývoj nové technologie výroby dutých výkovků v programu TRIO) Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2018, 32 s.
- [2] MACHOVČÁK, P., OPLER, A., CARBOL, Z., KORBÁŠ, M., KOVÁČ, M. and KRUTIŠ, V. The Development of Hollow Ingot Casting Technology at VÍTKOVICE HEAVY MACHINERY a. s. In *METAL 2013, 22nd International Conference on Metallurgy and Materials*. Conference Proceedings, Brno, 2013, s. 43–49. ISBN 978-80-87294-41-3.
- [3] MACHOVČÁK, P., OPLER, A., CARBOL, Z., KORBÁŠ, M., KOVÁČ, M., KRUTIŠ, V. Vývoj technologie odlévání dutých ingotů na ocelárně VÍTKOVICE HEAVY MACHINERY a. s. In *Oceláři, 28. ročník konference o teorii a praxi výroby a zpracování oceli*. Sborník přednášek, Rožnov pod Radhoštěm, 2012. 68–74. ISBN 978-80-87294-28-4.
- [4] GLAWATÝ, L., CARBOL, Z. et al. Příprava výroby dutého ingotu 16Kd 115 z mat. A668 a vzorové kování dle zakázky – turbínová hřídel pro BELO MONTE (Alstom) ve VHM a.s. (Podniková zpráva) Ostrava: VÍTKOVICE HEAVY MACHINERY a.s., 7 s.
- [5] GREGER, M., LÁSZLÓ V., PETRŽELA, J., KAWULOK, R., SUŠOVSKÝ, M., KWARTENG, O. Výkovky kroužků z oceli X10CrMoVNb9-1. *Kovárenství*, 62 (2017), 8–12. ISSN 1213-9289.
- [6] GREGER, M., PETRŽELA, J., LÁSZLÓ, V., SUŠOVSKÝ, M., KAWULOK R., JUHAS, M. Technologie výroby volných výkovků kroužků. *Kovárenství*, 60 (2017), 62–65. ISSN1213-9289.
- [7] WOLFGARTEN, M., ROSENSTOCK, D., SCHAEFFER, L. and HIRT, G. Implementation of an Open-die Forging Process for Large Hollow Shafts for Wind Power Plants with Respect to an Optimized Microstructure. *La Metallurgia Italiana*, (2015) 4, 43–49.
- [8] RECKER, D., FRANZKE, M. and HIRT, G. Forged Hollow Shafts for Wind Power Drives. In *Proc. of Conf. for Wind Power Drive*, Aachen. 2013, pp. 199–214.
- [9] SUM, M. et al. Mathematical Design and Finite Elements Method Simulation of Large Conical Shell Shape Forming for Nuclear Steam Generator. *Steel Research Journal*, (2012), 147–150.

Výrobci svařovaných ocelových trubek se dočkali nového vydání evropské normy!

www.ocelarskaunie.cz, 4. 6. 2019

Jedná se o EN 10217 pro výrobu svařovaných ocelových trubek pro tlakové nádoby a tlaková zařízení. Všechny 6 částí této normy bylo vydáno s platností od 04/2019.

Od května 2019 jsou v platnosti rovněž nová vydání EN 10210-2 a EN 10219-2 pro výrobu dutých profilů a norma EN 10225 pro výrobky ze svařitelných konstrukčních ocelí pro ropná zařízení ukotvená při pobřeží. Tato norma je oproti minulému vydání nově rozdělena do 4 samostatných částí (část 1 – plechy, část 2 – profily, část 3 – duté profily tvářené za tepla a část 4 – svařované duté profily tvářené za studena).

A ještě jedna dobrá zpráva na závěr, v květnu 2019 byly komisí CEN TC 459/SC konečně schváleny finální návrhy FprEN 10025-2 až 6 pro výrobky válcované za tepla z konstrukčních ocelí. Předpokládaný termín vydání těchto norem je 09/2019.