

Návrh a ověření kalibračního plánu důlní výztuže V32 pomocí metody konečných prvků v programu Simufact Forming

Design and verification of a roll pass schedule for a V32 mining support using the finite element method in the Simufact Forming program

doc. Ing. Richard Fabík, Ph.D.; Ing. Vít Baranec; Ing. Tomáš Kubina, Ph.D.; Ing. Milan Onderka

Liberty Ostrava a.s., Výzkum a Vývoj, Vratimovská 689/117, 719 00 Ostrava-Kunčice

Cílem této práce bylo zavedení nového profilu důlní výztuže V32 do výrobního portfolia firmy Liberty Ostrava a.s. s využitím MKP simulací v programu Simufact Forming.

V nedávné době byla v podmínkách Liberty Ostrava zřízena laboratoř se zaměřením na numerické simulace, které byly použity pro úspěšný návrh kalibrační řady polského profilu důlní výztuže V32. Pro profil V32 jsou, ve srovnání s běžnými profily TH, požadovány velmi přísné rozměrové tolerance.

V Liberty Ostrava se důlní výztuže válcují na zastaralé trati HCC (Heavy Cross Country) s použitím výhradně horizontálních válců. Návrh optimální kalibrační řady v kombinaci s návrhem tvaru rovináčů válečků je tak velmi náročný úkol, který se v takovýchto případech doposud řešil formou pokus omyl. Tento článek popisuje využití metody konečných prvků pro návrh kalibrační řady pro válcovací trať HCC. Řešitelský tým nejdříve navrhl kalibrační řadu profilu V32. Po první kalibrační zkoušce profil nespĺňoval požadavky na potřebné rozměrové tolerance. Pomocí MKP simulací bylo navrženo ověření kalibrační řady v programu Simufact Forming. Ověření probíhalo od kalibru ve stolicí č. 9 a postupně byly prováděny simulace až do kalibru stolice č. 6 tak, aby mohlo být lokalizováno kritické místo s nerovnoměrnou intenzitou deformace. Simulace ukázaly, že deformace v kalibru stolice č. 7 je nerovnoměrná a je nutné přepracovat tvar kalibru. Materiál ve stojině byl vystaven příliš velké deformaci, která měla za následek zvýšené prodlužování vývalku. Změnou tvaru následně prošly také zbylé kalibry ve stolicích č. 7, 8 a 9. Kalibrační řada navržená pomocí simulací byla ověřena kalibrační zkouškou a vyválcovaný profil splnil požadované rozměrové nároky a mechanické vlastnosti. MKP simulace se ukázaly jako užitečný nástroj, jak vizualizovat tok materiálu a sloužily k lepšímu pochopení procesů dějících se během válcování.

Klíčová slova: MKP simulace; matematické modelování; válcování; důlní výztuž

The aim of this work was to introduce a new profile of mining support V32 into the production portfolio of Liberty Ostrava a.s. using FEM simulations in the Simufact Forming program.

Recently, a laboratory focusing on numerical simulations was established in the conditions of Liberty Ostrava, which were used for the successful design of a roll pass schedule of the Polish profile of mining reinforcement V32. The V32 profile has very strict dimensional tolerances compared with profiles TH.

In Liberty Ostrava, mining reinforcements are rolled on the obsolete HCC (Heavy Cross Country) line using only horizontal rollers. The design of the optimal roll pass schedule in combination with the design of the shape of the straightening rollers is thus a very demanding task, which in such cases has so far been solved by trial and error. This paper describes the use of the finite element method for the design of a roll pass schedule on the HCC mill. The verification took place from the grooves in stand No. 9 and gradually simulations were performed up to the grooves of stand No. 6 so that a critical point with an uneven equivalent strain could be located. When comparing the different coefficients of friction with the samples taken during rolling, it was found that the friction coefficient did not have much of an effect on the shape accuracy of the result. A larger effect was found in the size of the finite element. Simulations have shown that the deformation in the grooves of stand No. 7 is uneven and it is necessary to rework the shape of the grooves. The material in the web was subjected to too much deformation, which resulted in increased elongation of the profile. The remaining grooves in stands No. 7, 8 and 9 were subsequently changed by shape. The footings of the profile underwent the biggest change, where defects occurred. The equivalent strain was gradually transferred to the root of the profile in the 7th stand. The roll pass schedule designed using simulations was verified by a operating test and the rolled profile met the required dimensional requirements and mechanical properties. FEM simulations have proven to be a useful tool to visualize the material flow and have served to better understand the processes that take place during rolling.

Key words: FEM simulations; Mathematical modelling; Rolling mill; Mining support

Úvod

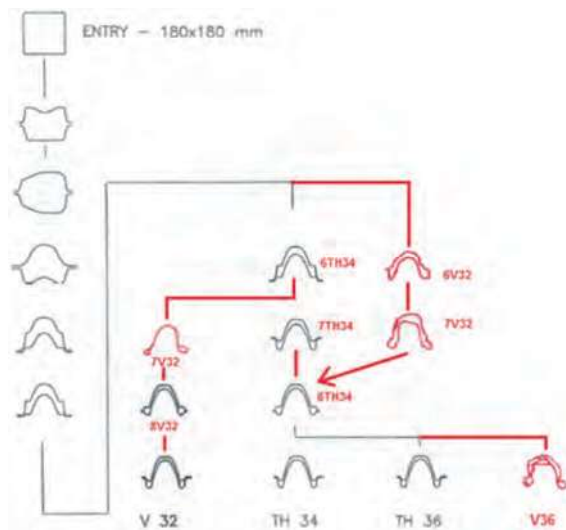
Matematické modelování na bázi metody konečných prvků (MKP) je v dnešní době velmi užitečným a také dostupným nástrojem pro optimalizaci tvářecích procesů.

Využití matematického modelování pomocí MKP při válcování za tepla je pro svou složitost a komplexnost výrazně ve stínu volného, a hlavně zápusťkového kování. V odborných časopisech najdeme mnoho článků věnujících se využití matematického modelování na bázi MKP v oblasti válcování dlouhých a plochých vývalků. Většina z těchto článků je však zaměřena výhradně na MKP a chybí zde srovnání se skutečným válcováním, nebo si autoři z reálného válcování pro srovnání vybírají jen některé aspekty a o dalších se nezmiňují [1-15].

Jedním z charakteristických rysů skutečných válcoven je široká variabilita technologických parametrů a jejich velmi obtížné, někdy zcela nemožné stanovení a popsání pomocí matematických rovnic, či okrajových a počátečních podmínek [16]. Týká se to často parametrů naprosto zásadních a teoreticky snadno dostupných, jako je geometrie nástrojů (válců), skok válců, vzájemná poloha válců (nastavení válcovací mezery a při válcování v kalibrech horizontální posunutí válců) geometrie polotovaru a počáteční poloha polotovaru a válce (horizontální a vertikální posun, natočení). Jejich získání není často vůbec snadné a vyžaduje velmi úzkou spolupráci s technologií a valciři. Dále tady máme materiálové parametry (co do dostupnosti je lze řadit na druhé místo), které se dají stanovit pomocí doplňujících fyzikálních zkoušek, nebo použitím reologických a TTT (rozpadové diagramy) databází simulačních programů (fyzikální vlastnosti materiálu polotovarů a nástrojů – deformační odpory ocelí, tepelné vlastnosti ocelí, teploty fázových přeměn atd.). Fyzikální (plastometrické) zkoušky nám poskytnou velmi přesné výsledky pro daný materiál, jsou relativně dostupné, ale na druhou stranu jsou časově a finančně náročné. Naopak data z databází jsou k dispozici okamžitě, ale jejich přesnost může být velmi diskutabilní. Třetí skupinou, tentokrát opět technologických parametrů, jejichž získávání je v praxi téměř nemožné a v laboratorních podmínkách vyžaduje speciální zařízení, jsou parametry, které popisují chování na rozhraní polotovar válec (součinitel tření a součinitel přestupu tepla) a vliv okolního prostředí. Hlavně třetí je jedním z největších zdrojů chyb při matematickém modelování válcování [17-20]. Autoři tohoto článku prezentovanou studii navazují na dřívější zkušenosti s matematickými simulacemi, které byly vždy prováděny v nejužším propojení s praxí [21-25].

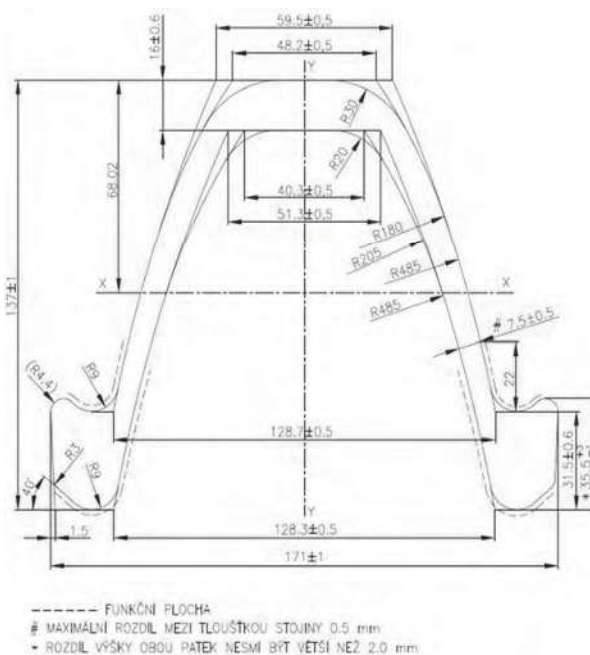
Problematika technologie výroby důlních výztuží je v Liberty Ostrava a.s. (LO) intenzivně rozvíjena už od 80. let minulého století s postupným záměrem posunout se k vyšším rozměrovým řadám. Dnes jsou běžně válcovány profily typu TH, které jsou rozměrově a tvarově blízké profilům typu V, ale nemusí splňovat tak náročné rozměrové tolerance jako profily V.

K dosažení požadovaných rozměrů jsou konkurencí LO používány moderní tratě se spojitým finálním pořadím v konfiguraci stolic univerzál – hranicí stolice – hotovni univerzál. Díky použití univerzálních stolic je možno dosahovat velmi přísných rozměrových tolerancí.



Obr. 1 Schéma válcování důlních výztuží TH a V
Fig. 1 Rolling scheme of mining support TH/V

Kalibrační předpis profilu V32 vychází z kalibračního předpisu pro válcování profilu TH34, jak dokumentuje schéma válcování důlních výztuží v LO na obr. 1. Jak je zřejmé z obr. 1 důlní výztuže se na HCC válcují 9 průchody, kdy první 3 lze považovat za předválcovací, dalších 5 za přípravné. Oproti profilům TH mají profily V přísnější tolerance rozměrů funkčních částí. Tedy hlavně v oblasti patek. Toleranční výkres profilu V32 je uveden na obr. 2.



Obr. 2 Toleranční výkres profilu V32
Fig. 2 Tolerance drawing of profile V32

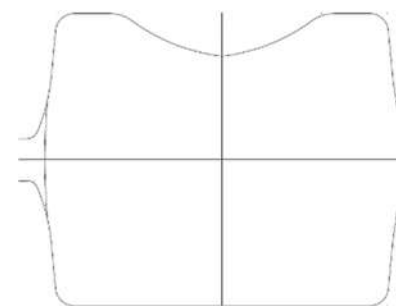
1. Kalibrační zkoušky

Před zahájením vlastních numerických simulací proběhlo několik kalibračních zkoušek. Na vlastní kalibrační zkoušku bylo nasazeno 20 ks sochorů externí jakosti H500M. V posledních 4. úběrech byly použity upravené válce navrhnuté pro válcování profilu V32. Proměřením bylo zjištěno, že celková výška prvního kusu přesahuje toleranci udávanou výkresem. Došlo tedy k přivření 8. a 9. stolic. Následující válcované kusy měly i přes provedené změny problémy s nedostatečným vyplněním materiálu v oblasti patek a také s nežádoucím lemem táhnoucím se po boku vývalku, jak je vidět na obr. 3.

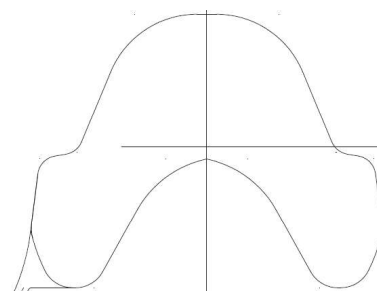


Obr. 3 Nežádoucí lem na bocích vývalků
Fig. 3 Unwanted defect on the sides of profiles

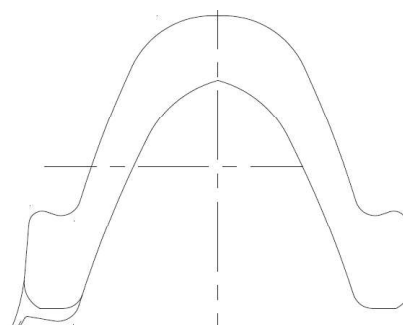
Pro druhou kalibrační zkoušku byly upraveny kalibry v posledních 4. úběrech. Profily získané touto zkouškou měly nevyplněnou a nízkou patku. Během zkoušky byly odebrány vzorky za stolicemi 1, 4, 6, 7 a 8. Každý ze vzorků byl naskenován pomocí skeneru a obrysy vzorků byly překresleny v programu AutoCAD do formátu dwg. Jednotlivé obrysy a jejich uložení v příslušném kalibru je možné vidět na obr. 4.



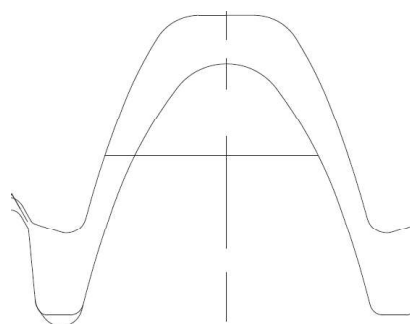
1. stolice



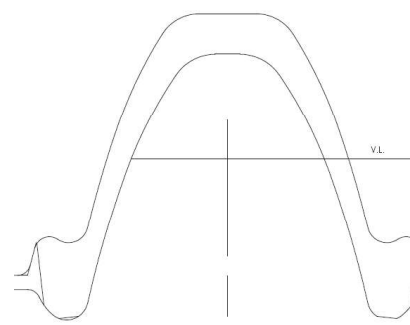
4. stolice



6. stolice



7. stolice



8. stolice

Obr. 4 Obrysy jednotlivých vývalků po různých úběrech
Fig. 4 Contours of individual profiles after different passes

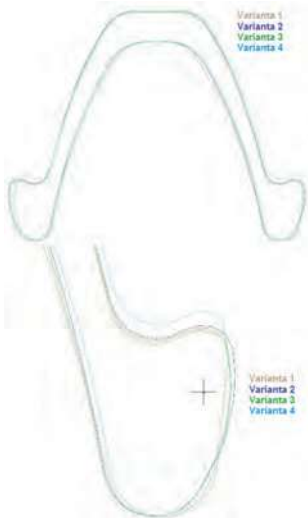
2. PC simulace válcování V32

Ještě před tím, než byly k dispozici jednotlivé obrysy vývalků, bylo provedeno několik simulací válcování v 9. stolici. Cílem těchto simulací bylo posouzení toku kovu v oblasti patky profilu V32 tak, aby bylo možné upravit předcházející kalibry a tím také průřez vývalku vstupující do 9. stolice. Celkem bylo otestováno 5 variant ideálního tvaru vstupujícího do 9. stolice, které jsou popsány v tab. 1. Srovnání tvarů jednotlivých vstupů je provedeno na obr. 5.

Tab. 1 Přehled simulací provedených v 9. stolici

Tab. 1 Overview of simulations performed in 9th stand

V	Polotovar (ideální)	Stručný popis	Změna
0	Obrys 8. stolice	Nákružky 6 mm, zkouška různých tvarů vstupu	První simulace
1	Obrys 8. stolice	Nákružky 6 mm, větší plocha na vstupu	Změna plochy vstupu obrysu
2	Obrys 8. stolice	Nákružky 6 mm, výška hlavy vstupu 18 mm	Úprava tvaru patky vstupu
3	Obrys 8. stolice	Nákružky 6 mm, větší plocha na vstupu	Opětovná úprava tvaru patky vstupu
4	Obrys 8. stolice	Nákružky 6 mm, výška hlavy vstupu 19 mm, větší plocha vstupu	Opětovná úprava tvaru patky vstupu vycházející z varianty

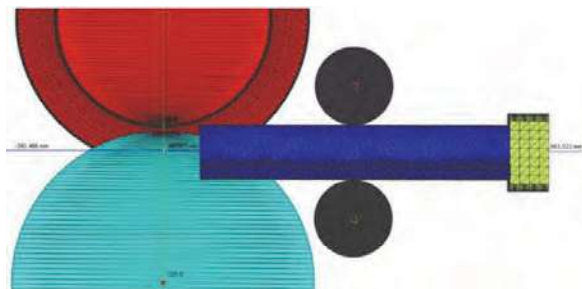


Obr. 5 Srovnání jednotlivých variant tvaru rozvalku vstupujícího do 9. stolice, nahoře celkový průřez, dole detail patky

Fig. 5 Comparison of individual variants of the shape of the profile entering the 9th stand, overall cross-section at the top, detail at the bottom

Všechny řešené simulace probíhaly se vstupní symetrickou podmínkou podle roviny yz. Jako konečnoprvková síť byla použita síť typu Tetmesh 157. Velikost prvků sítě byla nastavena na 10 až 15 mm. Pro všechny simulace byl zapnut automatický remeshing a vývalek vstupoval do remeshing boxu pro zjemnění sítě s jemností level 2 (odpovídá zmenšení prvků cca na polovinu). Pro usnadnění záběru byla použita tlačka a před vstupem do pásma deformace byly umístěny dva

opěrné válečky pro větší stabilitu výpočtu. Nastavení simulace je znázorněno na obr. 6.

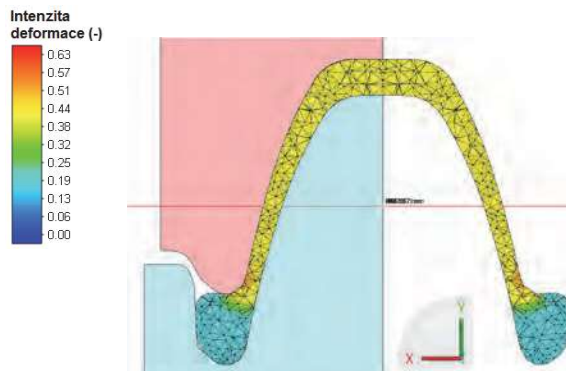


Obr. 6 Pohled ze strany roviny symetrie

Fig. 6 Side view of the plane of symmetry

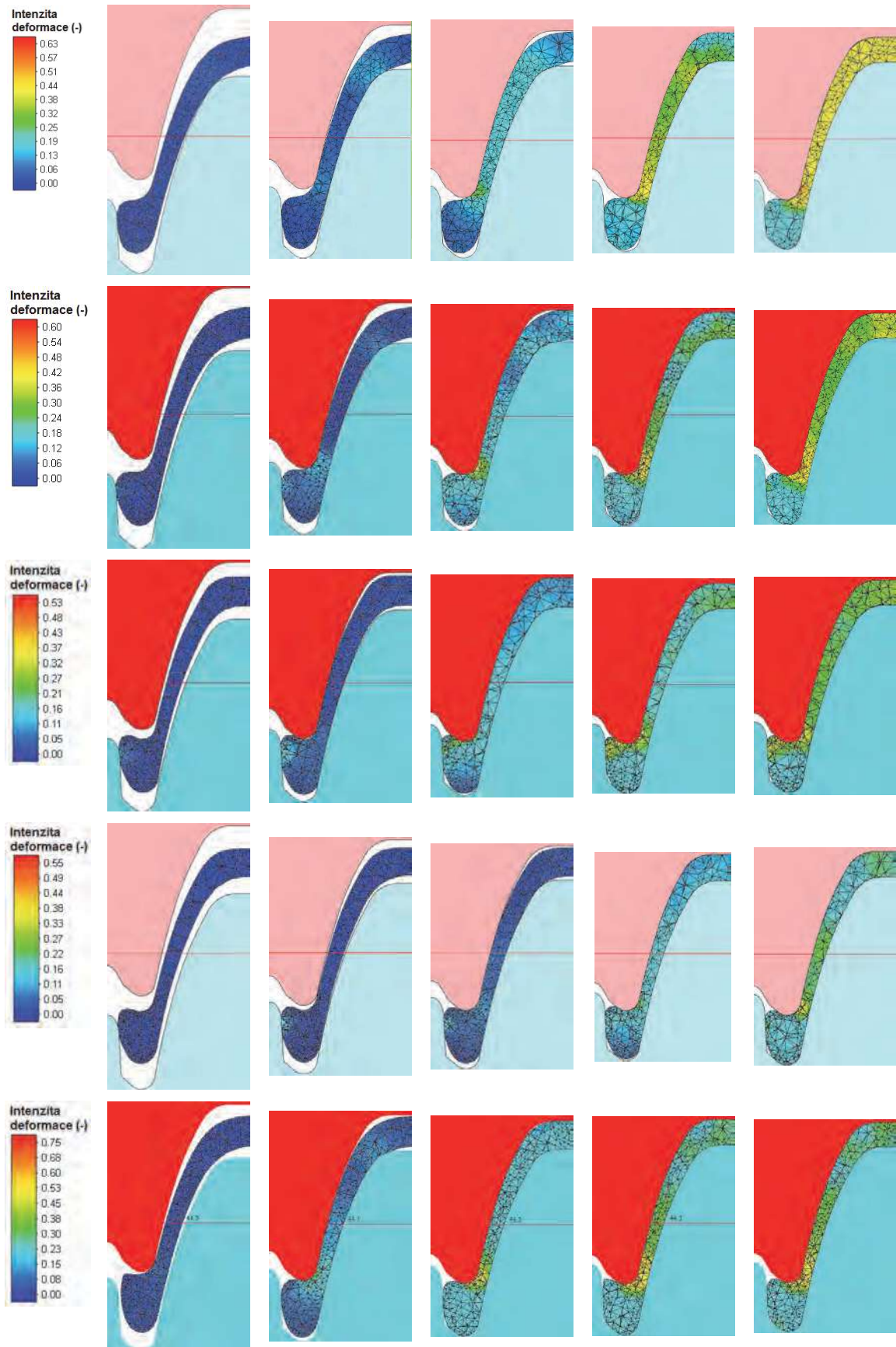
Počáteční teploty byla stanovena na základě provozních měření a byla ve všech případech 980 °C. Ve všech simulacích byl použit kombinovaný model tření, kdy pro nižší hodnoty kontaktního tlaku platí Coulombův model (kluzné tření) reprezentovaný součinitelem tření $\mu = 0,6$ a pro vyšší hodnoty kontaktního tlaku platí Trescův model (smykové tření) s třecím faktorem $m = 0,6$. Obecně se dá říct, že kombinovaný model je vhodný pro většinu procesů objemového tváření, protože eliminuje slabé stránky obou modelů. Součinitel přestupu tepla do válců byl nastaven na hodnotu $\alpha = 10 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$.

Během vyhodnocování výsledků bylo nutné detailně se zaměřit na tok kovu v patce profilu, a proto je většina výsledků prezentována v příčném řezu podle obr. 7. Srovnání rozdílů v toku kovu vybraných variant simulací dokládá série příčných řezů pásmem deformace na obr. 8. Postupně lze vidět u jednotlivých variant, jak se měnilo rozložení materiálu mezi patkou a zbytkem profilu, až se ve výsledku došlo k co nejlepšímu vyplnění patky. V prvních 4. variantách docházelo k prvotnímu kontaktu vývalku a válců v místě patky, díky čemuž došlo relativně pozdě k úplnému kontaktu provalku a válců mimo patky. Až poslední varianta se zúžením a zároveň zvýšením patky na vstupu způsobila lepší postupný kontakt od kořene k patce. To vedlo k úplnému vyplnění patek.



Obr. 7 Stolice 9: Příčný řez ve výstupní rovině pásma deformace (varianta 0) Zobrazená veličina: Intenzita deformace

Fig. 7 Stand 9: Cross section in the output plane of the deformation zone (variant 0) Displayed quantity: Equivalent strain



Obr. 8 Stolice 9: Příčné řezy pásmem deformace postupně od místa prvního kontaktu směrem k výstupní rovině, varianty jsou zobrazeny v řádcích v pořadí: Var. 0; Var. 1; Var. 2; Var. 3 a Var. 4. Zobrazená veličina: Intenzita deformace

Fig. 8 Stand 9: Cross-sections of the deformation gradually from the point of first contact towards the output plane, the variants are shown in the order: Var. 0; Var. 1; Var. 2; Var. 3 and Var. 4. Displayed quantity: Equivalent strain

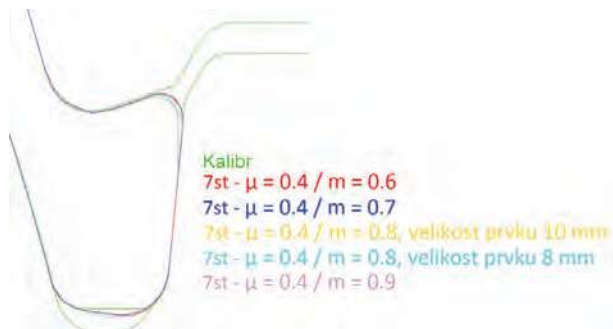
3. Posouzení vlivu tření

Během druhé kalibrační zkoušky vyvstaly problémy s nevyplněnou a nízkou patkou profilu. Při srovnání obrysu odebraného ze vzorku a obrysu vytvořeném simulací vyvstala otázka, zda je správně stanoven třecí koeficient. V předchozích simulacích byl koeficient nastaven na základě zkušeností řešitelského kolektivu. Tření mezi provalkem a válcem může mít zásadní vliv na tok kovu v pásnu deformace a tím i na výsledný tvar provalku. Obzvláště při simulaci válcování v kalibrech je znalost tření klíčová pro přesnost výpočtu. Pro ověření třecího koeficientu a jeho vlivu na přesnost výsledků byla provedena série simulací s různými hodnotami třecích koeficientů. Výsledky byly následně srovnány s obrysy vývalků odebranými za jednotlivými stolicemi. V následujícím odstavci budou popsány výsledky simulací provedených v 7. stolici. Varianty simulací jsou shrnuty v tab. 2.

Tab. 2 Přehled simulací provedených v 7. stolici
Tab. 2 Overview of simulations performed in 7th stand

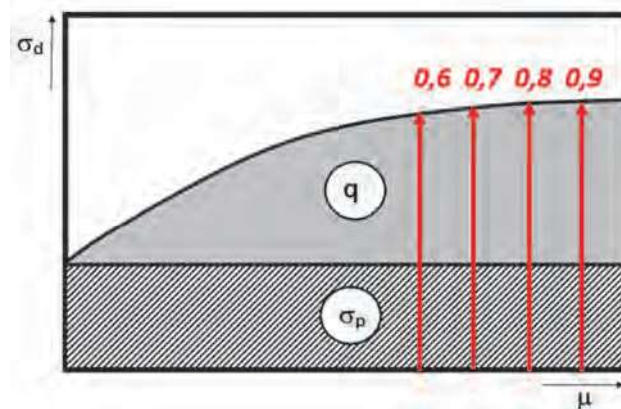
V	Stručný popis	Změna
0	Tvarová shoda simulace se vzorkem V32, Test tření C-Shear Friction coeff. $\mu = 0,4$ / Interface friction factor $m = 0,6$	První simulace
1	Test tření C-Shear Friction coeff. $\mu = 0,4$ / Interface friction factor $m = 0,7$	Součinitel tření
2	Test tření C-Shear Friction coeff. $\mu = 0,4$ / Interface friction factor $m = 0,8$	Součinitel tření
3	Test tření C-Shear Friction coeff. $\mu = 0,4$ / Interface friction factor $m = 0,8$, velikost prvku	Součinitel tření, změna velikosti prvku sítě
4	Test tření C-Shear Friction coeff. $\mu = 0,4$ / Interface friction factor $m = 0,9$	Součinitel tření

Geometrie vstupního polotovaru byla vytvořena na základě rozměrů vývalku za stolicí 6. Okrajové podmínky (kromě tření), počáteční podmínky (kromě teploty, která je pro tento úběh nastavena jako konstanta na 1070 °C) zůstává konfigurace simulace stejná, jako v předchozí kapitole.

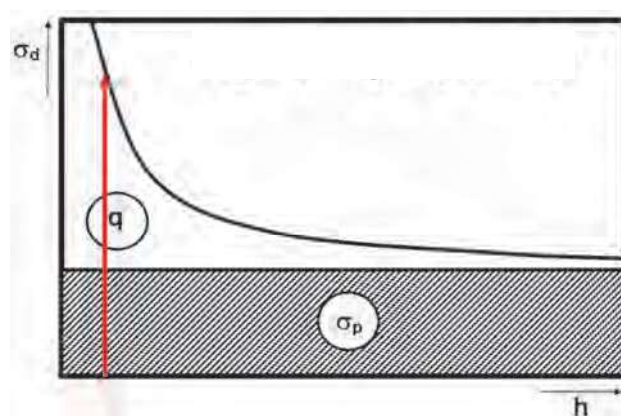


Obr. 9 Srovnání příčného řezu v oblasti patky pro různé hodnoty třecího faktoru a sítě
Fig. 9 Comparison of the cross section in the foot area for different values of the friction factor and the element size

Jak dokazují výsledky na obr. 9, nemá tření na tok kovu v tomto případě významný vliv. Vysvětlení nám mohou dát grafy na obr. 10 a 11, které ukazují velikost třecího napětí q (jako složky deformačního odporu (viz rovnice na obr. 11)) v závislosti na koeficientu tření (obr. 10) a velikosti stykové plochy, resp. tloušťky provalku (obr. 11). Jak je zřejmé z porovnání obou grafů, u těles s malou tloušťkou, ze které rezultuje velká styková plocha mezi válcem a provalkem, dojde k výraznému navýšení deformačního odporu, které snadno překryje i vliv velikosti koeficientu tření. V oblastech se zvýšeným deformačním odporem pak bude omezeno šíření na úkor prodloužení. Z toho plyne, že je nutné upravit kalibraci tak, aby se dostalo více materiálu do oblastí patek, ještě v úběrech, kde má provalek větší tloušťku (nejpozději ve stolici č. 7). Později již bude šíření materiálu velmi omezeno. Mnohem větší vliv na výsledný tvar vývalku má, jak ukázala varianta s třecím faktorem $m = 0,8$, zvolená hustota sítě. Zde byly provedeny dvě simulace se stejnými okrajovými podmínkami, ale s rozdílnou hustotou sítě. Nastavení varianty bylo následně použito pro zbývající simulace, protože vyšší hodnoty třecího faktoru usnadňují záběr a tím stabilizují výpočet.



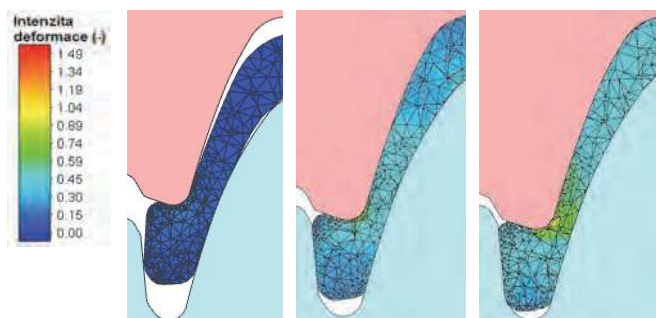
Obr. 10 Vliv součinitele tření na třecí napětí q a deformační odpor oceli
Fig. 10 Influence of coefficient of friction on friction stress q and deformation resistance of steel



Obr. 11 Vliv velikosti stykové plochy na třecí napětí q a deformační odpor během válcování.
Fig. 11 Influence of the size of the contact surface on the friction stress q and the flow stress during rolling.

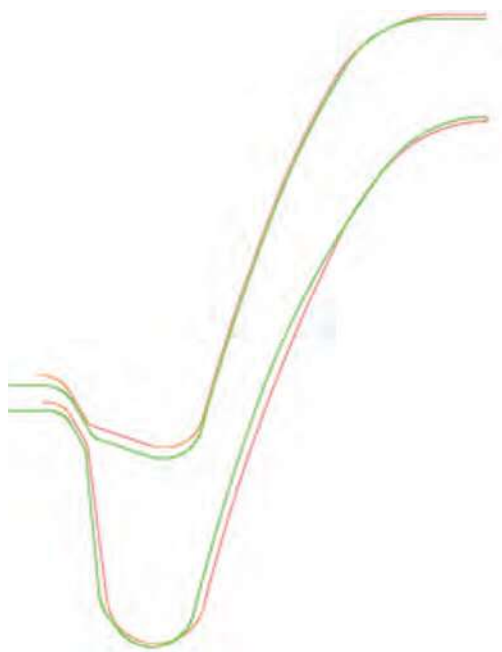
4. Návrh finálního kalibračního předpisu

Návrh finálního kalibračního předpisu probíhal od 6 stolice, protože kalibrační řada profilů TH a V se začíná lišit právě až od 6 stolice. Nejdříve byla provedena série simulací od 6 do 9 stolice. Do 6 stolice vstupoval model vývalku navrhnutý podle obrysu vzorku odebraného za 5. stolicí. Během této série simulací bylo lokalizováno kritické místo nacházející se v 7 stolicí, kterou bylo nutné přerobit. Deformace v 7. stolicí je poměrně nerovnoměrná. Ve stojině, v oblasti těsně nad patkami, je materiál vystaven poměrně velké deformaci, která má za následek zvýšené prodlužování provalku v těchto místech a tím i „vytahování“ materiálu z oblasti patek, jak je dokumentováno na obr. 12. Pro dosažení lepšího rozložení intenzity deformace byl tvar kalibru v 7 stolicí upraven. Díky úpravě tvaru kalibru došlo ke kvantitativní, ale i kvalitativní změně v rozložení intenzity deformace. Tvar upraveného kalibru je vidět na obr. 13 a srovnání polí intenzity deformace je provedeno na obr. 14.

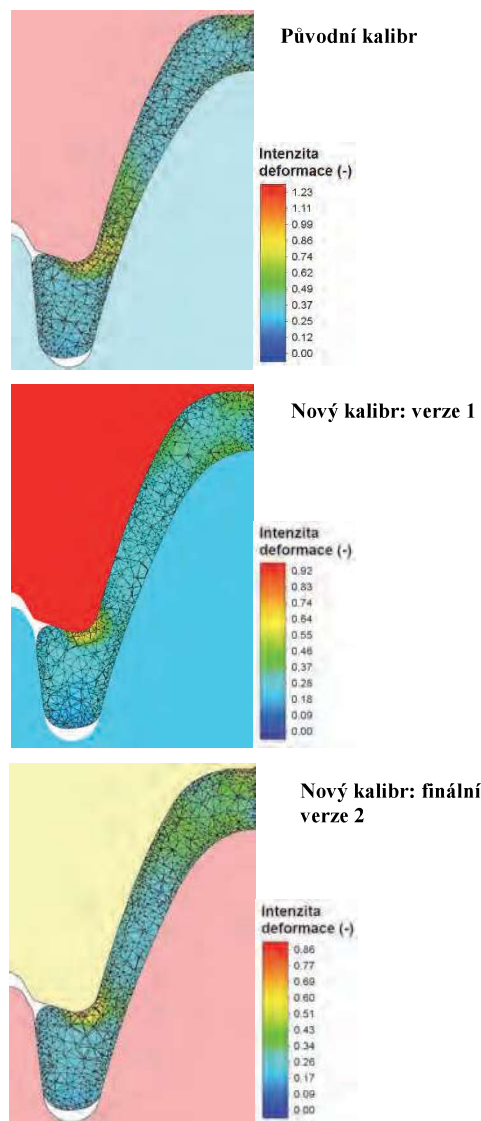


Obr. 12 Stolice 7: Vývoj rozložení intenzity deformace v různých řezech pásmem deformace (varianta 0)

Fig. 12 Stand 7: Development of equivalent strain distribution at different section of deformation zone (variant 0)



Obr. 13 Stolice 7: Původní (zelený) kalibr a nový tvar kalibru (červený)
Fig. 13 Stand 7: Original (green) grooves and new grooves shape (red)

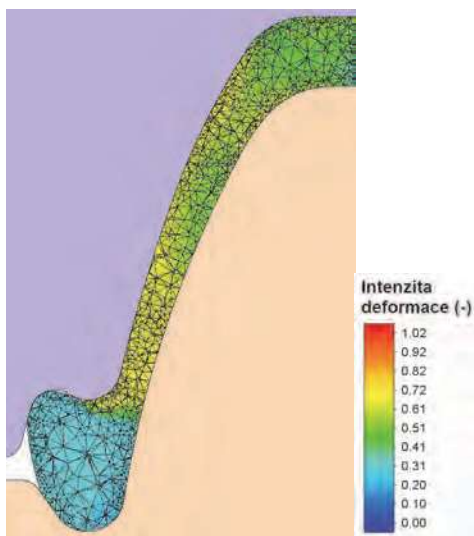


Obr. 14 Stolice 7: srovnání polí intenzity deformace
Fig. 14 Stand 7: comparison of equivalent strain field

V původní kalibraci docházelo k intenzivní deformaci ve spodní části stojiny (blízko patky), což mělo za následek omezený tok kovu do oblasti patek, jak bylo diskutováno v předchozí kapitole. Modifikací kalibru se postupně podařilo přesunout oblast intenzivní deformace do kořene profilu a získat tak konečný tvar, který by měl být lepším vstupem do následující 8. stolice. Pro simulace válcování v 8. a 9. stolicí byl použit výstup z kalibru 7. stolice „Nový kalibr – finální verze 2“. Na obr. 15 resp. obr. 16 je zobrazen tvar vývalku na výstupu z 8. resp. 9. stolice. Oblast patek je po 8. úběru širší než v předchozích případech, a proto dojde v 9. úběru k výrazně lepšímu vyplnění patek, jak dokumentuje obr. 17, kde je provedeno srovnání s tvarem vývalku, který byl získán při 2. kalibrační zkoušce. Ze srovnání je zřejmá míra zaplnění patek v blízkosti. To dokazuje, že provedené změny tvaru předchozích kalibrů splnily svůj účel a otevírají tak valcírům více možností, jak regulovat tvar vývalku v reakci na aktuální chování materiálu např. způsobené rozdílným skokem válců. Před poslední kalibrační zkouškou byla kalibrační řada naposledy ověřena sérií

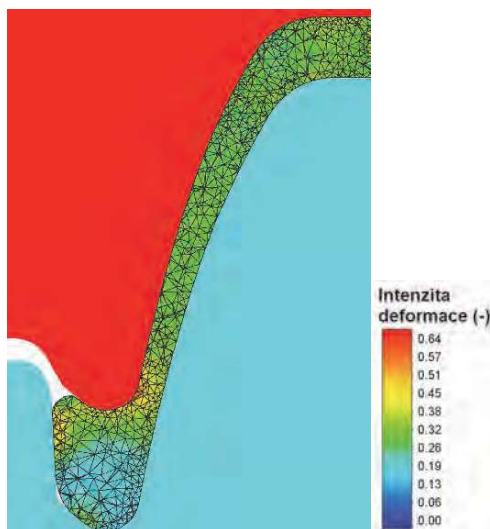
simulací od 6. do 9. stolice. Tok kovu v kalibru 6. stolice ukázal, že oblast patek je výrazně méně protvářena než zbytek profilu. Tento poznatek je důležitý z pohledu mechanických hodnot, protože vzorky pro testování jsou odebrány právě z této oblasti. Nicméně rozměry odpovídaly tolerančnímu výkresu a obavy z nedostatečných mechanických hodnot v patkách nebyly kalibrační zkouškou potvrzeny. Výsledná pole intenzity

deformace při válcování od 6. do 9. stolice jsou znázorněny na obrázku 18. Kalibrační řada navrhnuta pomocí simulací byla úspěšně ověřena pomocí poslední kalibrační zkoušky. Profil V32 splňoval rozměrové a mechanické požadavky a byl ve formě tyčí a z nich připravených oblouků podroben testování v institutu GIG (Central Mining Institute, Katowice, Polsko), který následně Liberty Ostrava udělil certifikát.



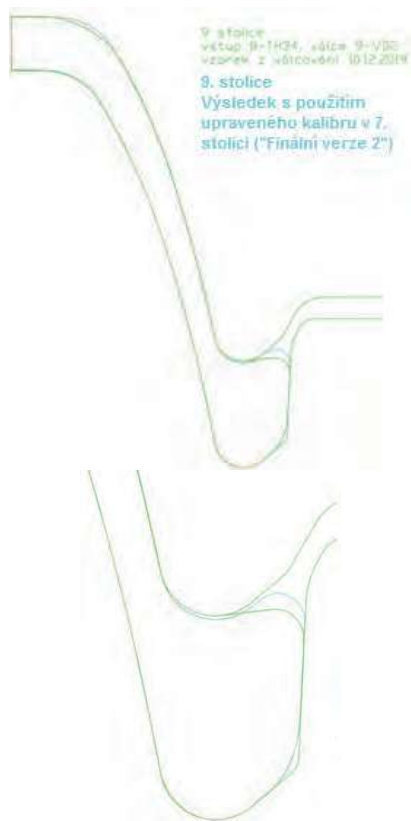
Obr. 15 Stolice 8: intenzita deformace a tvar vývalku na výstupu z pásma deformace

Fig. 15 Stand 8: comparison of equivalent strain field and shape of profile at the exit of the deformation zone

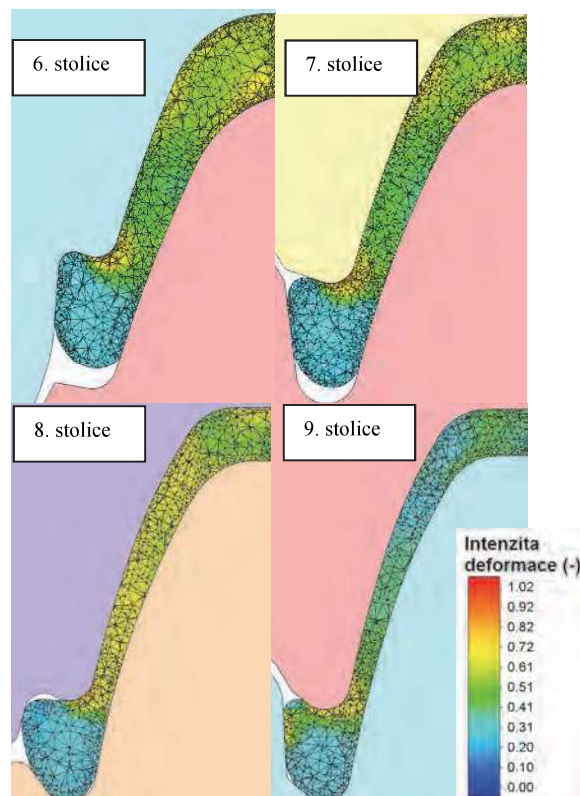


Obr. 16 Stolice 9: intenzita deformace a tvar vývalku na výstupu z pásma deformace

Fig. 16 Stand 8: comparison of equivalent strain field and shape of profile at the exit of the deformation zone



Obr. 17 Srovnání obrysů finálních vývalků
Fig. 17 Comparison of contours of final profiles



Obr. 18 Intenzita deformačních polí finální kalibrační řady od 6. do 9. stolice

Fig. 18 Equivalent strain fields of the final roll pass schedule from the 6th to the 9th stand

Závěr

Simulace toku kovu při válcování pomocí programu SIMUFACT byla použita při rozšíření výrobního portfolia HCC trati o nové důlní profily pro polský trh. Umožnila lépe pochopit tok kovu při rozdílných tloušťkách hlavních částí profilu a najít kritické místo v kalibraci válců. Úpravou tvaru přípravných kalibrů byl potlačen nežádoucí směr toku materiálu a přeměrován do oblastí zajišťujících přesné vyplnění hotovného kalibru. Válcované důlní profily nyní splňují přísné rozměrové tolerance a práce řešitelského kolektivu významně přispěla k získání certifikátů pro nový trh.

Literatura

- [1] KUMAR, D., DIXIT, U. A slab method study of strain hardening and friction effects in cold foil rolling process. *Journal of Materials Processing Technology* 171 (2006) 331-340.
- [2] KOMORI, K. Simulation of deformation and temperature in multi-pass caliber rolling. *Journal of Materials Processing Technology* 71 (1997) 329-336.
- [3] KOMORI, K., KOUMURA, K. Simulation of deformation and temperature in multi-pass H-shape rolling. *Journal of Materials Processing Technology* 105 (2000) 24-31.
- [4] KOMORI, K. Simulation of deformation and temperature in multi-pass three-roll rolling. *Journal of Materials Processing Technology* 92+93 (1999) 450-457.
- [5] KIUCH, M., YANAGIMOTO, J. Computer aided simulation of shape rolling process. *Proc. of the 16th NAMRC*, 1987, pp. 34-40.
- [6] HAJDUK, D., ŠIMEČEK, P. Simulation of forming conditions during section rolling using the finite element method. *Transactions of STEELSIM*, Brno, 2005, pp. 421-427.
- [7] PERÁ, J. P., VILLANUEVA, R. Application of FE-methods in practical groove roll design of structurals. *Transactions of STEEL ROLLING*, Paris, 2006.
- [8] INAKOV, R. Finite element simulation of profile rolling of wire. *Journal of Materials Processing Technology*, 142, (2003) 355-361.
- [9] GŁOWACKI, M. Termomechaniczno-mikrostrukturalny model walcowania w wykrojach kształtowych. *Rozprawy, monografie*. 76. Wydawnictwa AGH, Kraków 1998, ISSN 0867-6631.
- [10] ZHOU, S. X., *Journal of Materials Processing Technology*, 134 (2003), 338-351.
- [11] CHUNG, W.K., CHOI, S.K., THOMSON, P.F. *Journal of Materials Processing Technology*. 38 (1993) 85-102.
- [12] XIONG, S., LIU, X., WANG, G., ZHANG, Q. *J. Mater. Eng. Perform.* 6 (1997) 757-765.
- [13] SHANGU, X., XIANGHUA, L., GUODONG, W., QIANG, Z. *Journal of Materials Processing Technology*. 69 (1997) 37-44.
- [14] XIONG, S.W., LIU, X.H., WANG, G.D., ZHANG, Q. *Journal of Materials Processing Technology* 2000;101(1-3):146-51.
- [15] XIONG, S., ZHENG, G., LIU, X., WANG, G. *Journal of Materials Processing Technology* 120 (2002) 53-61.
- [16] FABÍK, R., KLİBER, J., MAMUZIĆ, I., KUBINA, T., AKSENOV, S. Mathematical modelling of flat and long hot rolling based on finite element methods (FEM). *METALURGIJA = Metallurgy*, 2012, Volume 51, Issue 3, Pages 341-344, ISSN 0543-5846 (print), ISSN 1334-2576 (online). ISBN 0543-5846.
- [17] KUBINA, T., KUKOL, R., SCHINDLER, I. Měření součinitele tření při válcování na laboratorní stolici K350 (Measuring of friction coefficient at rolling on laboratory mill K350). *Hutnické listy*, Ocelot, s.r.o., 2008, s. 114-118.
- [18] AKSENOV, S., FABÍK, R., KLİBER, J. The numerical prediction of friction forces distribution within the roll bite when hot rolling steel. *Acta Metallurgica Slovaca*, 13, 2007, 4, pp. 660-666.
- [19] AKSENOV, S., FABÍK, R., KLİBER, J., GAJDZICA, T. Verification of Friction Models by different rolling conditions. In: *14. Mezinárodní vědecká konference FORMING 2007*, Podbánské, 2007, ISBN 978-80-227-2702-0.
- [20] FABÍK, R., KLİBER, J. Inverse analysis calculation of heat transfer coefficient for FEM simulation of rails hardening. *Acta Metallurgica Slovaca*, 11, 2005, 3, pp. 341-350.
- [21] AKSENOV S., FABÍK R., KLİBER J., KOTAS, M. Experimental and Computer Study of Rolling in Roughing Mill Group. *Hutnické listy*, 2009, roč. 62, č. 4, s. 64-66. ISSN 0018-8069.
- [22] FABÍK, R., AKSENOV, S. Optimization of crop losses by finite element simulation of slab edging. *Metal Forming Conference 2008, Steel research international*, 2008, 79 Special Edition, č. 1, s. 432-439. IF 0,478. ISBN 978-3-514-00754-3.
- [23] FABÍK, R., Laboratory and mathematical simulation of slab edging. In. *Metal 2010*, Conference Proceedings. Ostrava : Tanger Ltd, 2010. s. 339-345. ISBN 978-80-87294-17-8.
- [24] KOTAS, M., FABÍK, R., GAJDZICA, T., KLİBER, J. Finite Elements Method (FEM) Simulation of Bar Rolling in Oval-Circle Pass Schedule. In. *Metal 2010*, Conference Proceedings. Ostrava : Tanger Ltd, 2010. s. 251-256. ISBN 978-80-87294-17-8.
- [25] BARON, R., FABÍK, R. Mathematical Modelling of Deformation Behaviour of X15CrNiSi20-12 Heat Resisting Steel During Rolling of Special Sections, *Hutnické listy*, 2010, č. 4, s. 114-118. ISSN 0018-8069.

WorldSteel představuje data za rok 2020

www.worldsteel.org, tisková zpráva 27.1.2021

Celosvětová produkce surové oceli dle WorldSteel za rok 2020 meziročně klesla o 0,9 % na 1 864 mil. tun. Jedná se tak o první meziroční pokles poprvé od roku 2015. Jasným lídrem ve výrobě nadále zůstává Čína, jejíž podíl na celkové výrobě se zvýšil z 53 % v roce 2019 na 56,5 % v roce 2020.