

Vliv zvětšení teplosměnné plochy a jejího tvaru na průběh tuhnutí a tváření nového typu ingotu pomocí numerické simulace

Influence of Enlargement of Heat Exchange Surface and its Shape on the Course of Solidification and Forming of the New Type of Ingot by Numerical Simulation

Ing. Vladislav Kurka, Ph.D.; Mgr. Marek Vindyš; Ing. Jaroslav Pindor, Ph.D.

MATERIÁLOVÝ A METALURGICKÝ VÝZKUM s.r.o., Regionální materiálově technologické výzkumné centrum Pohraniční 693/31, 703 00 Ostrava-Vítkovice, Česká republika

Předkládaná práce obsahuje návrh nového tvaru ingotu o hmotnosti 5 t a ověření vlivu velikosti a tvaru teplosměnné plochy na vnitřní homogenitu při odlévání a tuhnutí pomocí numerické simulace v software Magma 5. Dále je v práci uveden vliv změny tvaru teplosměnné plochy ingotu na jeho protváření zjišťované v software Forge. Zvětšení teplosměnné plochy je docíleno zvlněním vnitřního povrchu kokily po celé její výšce či z části výšky, popř. je použito také zakřivení jejího povrchu. Zvýšení teplosměnné plochy má za cíl usměrnit tuhnutí ingotu od patní části směrem k hlavovému nástavci s cílem snížení pórovitosti a mikropórovitosti. Je to úvodní práce k danému tématu, které zahrnuje také problematiku protváření takto zvětšené teplosměnné plochy. Zvýšení velikosti teplosměnné plochy se ukázalo jako velmi přínosné, na druhou stranu vyvolává jak metalurgické, tak i tvářecí otázky, které je zapotřebí dořešit.

Klíčová slova: ocel; ingot; odlévání; tuhnutí; porozita

In the company MATERIAL AND METALLURGICAL RESEARCH Ltd. (hereinafter referred to as MMV), the Magma 5 software simulated casting and solidification of 5 tons of ingots made of carbon steel, which we call the CrC steel. The ingot-mold was designed to increase the heat exchange surface between the ingot and the ingot-mold. The enlargement of the heat exchange surface was aimed at accelerating and direct ingot ingress towards the head extension, and the main goal was to reduce porosity in the body of the ingot. Numerical simulations with a new assembly of ingot-molds for the casting of ingots were performed to find the most suitable shape of ingot. The ingot-mold assembly consists of a casting plate, 8 ingot-molds and a casting column, where numerical simulations were made for a quarter of the ingot-mold assembly. Selected versions of ingots obtained from simulation by Magma 5 were subjected to a numerical simulation of longitudinal rolling using the Forge software. Only the Magma geometry was imported from Magma. Rolled CrC steel had a homogeneously distributed initial temperature of 1200 °C. From the investigated numerical simulation of ingot casting and simulation of solidification with increased heat exchange surface with 4 or 5 corrugations on the wall and subsequent rolling of wavy ingots, it was found that for the rolling the most suitable is the use of 4 waves on the wall. It is important to note that this is a primary work and that by selecting the number of waves on the ingot wall this work begins and now proceeds by choosing the correct conicity and modification of the ingot shape to achieve porosity elimination during solidification, as well as an elimination of folds during rolling. The increase of the heat transfer surface is intended to direct the ingot ingress from the base towards the head extension in order to reduce the microporosity and porosity. Increasing the size of the heat exchange surface has proven to be very beneficial, on the other hand, it provokes both metallurgical and shaping activities that need to be solved.

Keywords: steel; ingot; casting; solidification; porosity

Ve společnosti MATERIÁLOVÝ A METALURGICKÝ VÝZKUM s.r.o. (dále jen MMV) se prováděly výzkumné práce vedoucí ke zlepšením vnitřních jakostních parametrů, např. chlazením odlévané taveniny, viz [1]. V MMV se v software Magma 5 simulovalo odlévání a tuhnutí ingotů o hmotnosti 5 t z uhlíkové oceli, která se v této práci označuje jako CrC ocel. Práce vychází ze znalostí autorů [2] a [3]. Její chemické složení je uvedeno v tab. 1. Byl proveden návrh zvětšení teplosměnné plochy mezi ingotem a kokilou. Zvětšení teplosměnné plochy mělo za cíl zrychlení a usměrnění tuhnutí ingotu směrem k hlavovému nástavci a hlavním cílem bylo snížení

porozity v těle ingotu. Pro nalezení nejvhodnějšího tvaru ingotu bylo provedeno 38 numerických simulací. U každé numerické simulace byla navržena nová konstrukce licí soustavy. Kokilová sestava se skládá z licí desky, 8 kokil a licího kůlu. Numerické simulace byly provedeny pro čtvrtinu kokilové sestavy.

Tab. 1 Chemické složení uhlíkové CrC oceli (hm. %)

Tab. 1 Chemical composition of carbon CrC steel (wt. %)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
1,00	0,25	0,35	0,010	0,002	1,50	0,05	-

1. Numerické simulace odlévání a tuhnutí

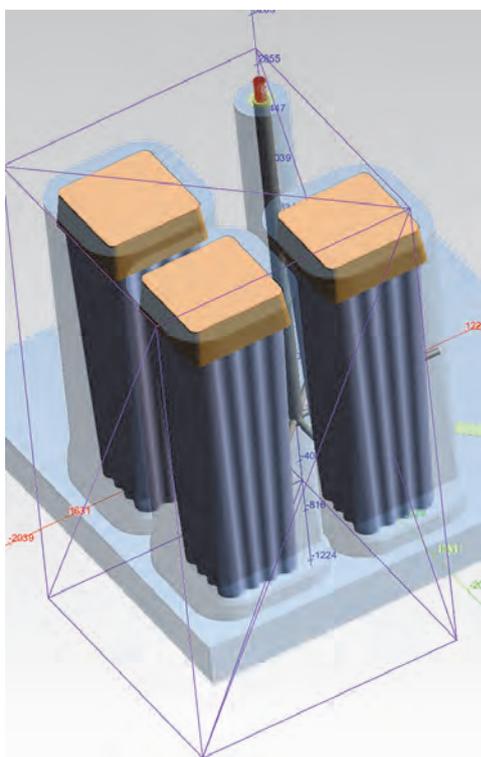
Numerické simulace lití a tuhnutí byly provedeny na reálné metalurgické podmínky velké hutní společnosti při

výrobě CrC oceli. U jednotlivých verzí numerických simulací se upravoval pouze tvar ingotu. V tab. 2 jsou uvedeny vybrané verze těchto numerických simulací. Jak je z tabulky patrné, změna tvaru ingotu má zásadní vliv na dobu tuhnutí, která se může lišit až o cca 40 min.

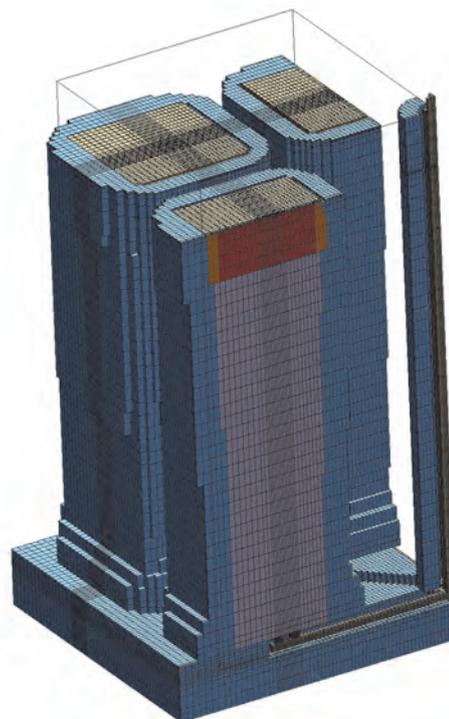
Tab. 2 Doba tuhnutí a tvar ingotu pro vybrané numerické simulace odlévání a tuhnutí v kokile nového tvaru

Tab. 2 Solidification time and ingot shape for selected numerical simulations of casting and solidification of the ingot-mold of new shape

Verze	Doba tuhnutí				Popis ingotu		
	Tělo ingotu		Hlava ingotu	Celý ingot	Horní půdorys, max. rozměr hrany	Spodní půdorys, min. rozměr hrany	Konicita
	(s)	(h:min:s)	(h:min:s)	(h:min:s)			
9	9105	2:31:45	0:25:16	2:57:01	Výchozí ingot		
01a	8511	2:21:51	0:26:56	2:48:47	12 oblouků, 495 mm	12 oblouků, 661 mm	lineární
02a	8647	2:24:07	0:30:16	2:54:23	12 oblouků, 495 mm	12 oblouků, 650 mm	lineární
03a	8893	2:28:13	0:30:16	2:58:29	12 oblouků, 479 mm	12 oblouků, 670 mm	lineární
04a	8889	2:28:09	0:31:06	2:59:15	12 oblouků, 490 mm	obdélník, 630 mm	lineární
01b	8595	2:23:15	0:27:46	2:51:01	24 oblouků, 520 mm	obdélník, 630 mm	rovná do 580 mm, poté zakřivení
02b	8622	2:23:42	0:27:46	2:51:28	24 oblouků, 520 mm	obdélník, 630 mm	zakřivení mírné
03b	8618	2:23:38	0:26:56	2:50:34	24 oblouků, 520 mm	obdélník, 630 mm	zakřivení větší
04b	8658	2:24:18	0:25:16	2:49:34	24 oblouků, 520 mm	obdélník, 630 mm	zakřivení sekvenční
05b	10342	2:52:22	0:19:26	3:11:48	24 oblouků, 520 mm	obdélník, 730 mm	dole rovná, poté zakřivení
05.1b	10292	2:51:32	0:20:58	3:12:30	24 oblouků, 497 mm	obdélník, 730 mm	dole rovná, poté zakřivení
06b	10264	2:51:04	0:22:39	3:13:43	24 oblouků, 520 mm	obdélník, 730 mm	zakřivení
07b	11507	3:11:47	0:18:36	3:30:23	24 oblouků, 520 mm	obdélník, 730 mm	lineární
08b	10949	3:02:29	0:18:30	3:20:59	24 oblouků, 470 mm	obdélník, 750 mm	lineární
09b	10332	2:52:12	0:18:30	3:10:42	24 oblouků, 408 mm	obdélník, 750 mm	lineární



Obr. 1 Příklad geometrie kokilové sestavy 01a podle software Magma 5
Fig. 1 An example of geometry of ingot-mold assembly 01a by Magma 5 software



Obr. 2 Příklad síťování kokilové sestavy 01a podle software Magma 5
Fig. 2 Example of elements in the ingot-mold of the ingot-mold assembly 01a by Magma 5 software

Po provedení návrhu tvaru kokily bylo nutno nejprve veškeré kokilové sestavy narýsovat v programu SolidWorks a poté byly převedeny do software Magma 5. Příklad této etapy práce ukazuje obr. 1. Takto zkonstruovaná kokilová sestava byla tzv. nasíťovaná, tedy rozčleněná na elementární části, jak to pro stejný příklad ukazuje obr. 2.

Z důvodu vzájemného porovnání byly všechny narýsované kokilové sestavy odlity za stejných metalurgických podmínek, kterými byly především teploty odlévání a doba lití.

Teploty odlévání:

- teplota solidu 1326 °C,
- teplota likvidu 1453 °C,
- teplota lití 1485 °C.

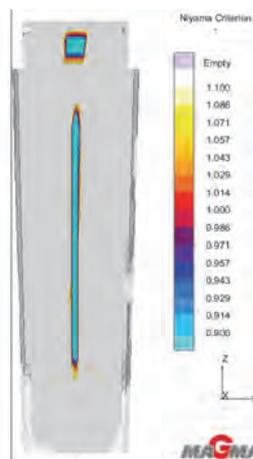
Doby lití:

- doba lití těla ingotu 12,25 min,
- doba lití hlavy ingotu 6,43 min,
- doba lití celé sestavy 18,68 min.

2. Vyhodnocení odlévání a tuhnutí

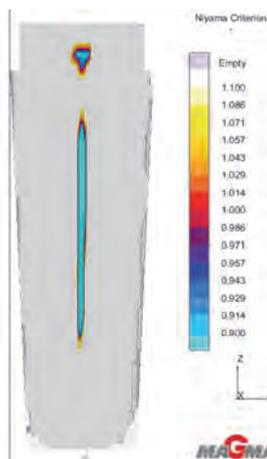
Odlité ingoty byly hodnoceny především dle kritérií, která mají vliv na možný vznik porozity v těle ingotu. Při hodnocení vychází Niyamovo kritérium u numerických simulací nejlépe ve verzi 09b. Taktéž i z pohledu na mikropórovitost vychází nejlépe tato varianta. Všechny ingoty vykazují vcelku dobrou celkovou porozitu, a proto se jí nebudeme podrobně zabývat. Z pohledu doby tuhnutí má nejlepší průběh verze 05b, 09b a 05.1b. Tento výsledek potvrzuje i doba tuhnutí z teploty likvidu na teplotu solidu. K nejnižšímu odmíšení C dochází u verze 02a, 04a, 01b, 04b, 09b a 07b. Odmíšení Cr je nejnižší u verze 02a, 03a, 03b, 09b a 07b. Odmíšení Mn je nejnižší u verze 02a, 04a, 02b, 04b, 09b a 07b.

Vycházejí z dostupných informací o možnosti válcování těchto ingotů byly z numerických simulací vybrány verze 01a a 08b. Pro tyto verze jsou v této práci uvedeny obrázky hlavních hodnotících kritérií. Na obr. 3 – 5 je uvedeno porovnání Niyamova kritéria, obr. 6 – 8 uvádí porovnání mikropórovitosti a obr. 9 – 11 znázorňuje porovnání doby tuhnutí ingotů z teploty likvidu na teplotu solidu.



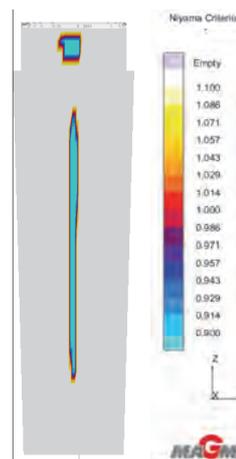
Obr. 3 Niyamovo kritérium 01a, rozmezí 0,9 – 1,1

Fig. 3 Niyam criterion 01a, range of 0.9 – 1.1



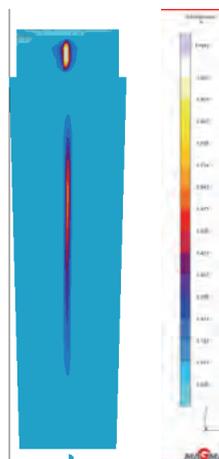
Obr. 4 Niyamovo kritérium 08b, rozmezí 0,9 – 1,1

Fig. 4 Niyam criterion 08b, range of 0.9 – 1.1



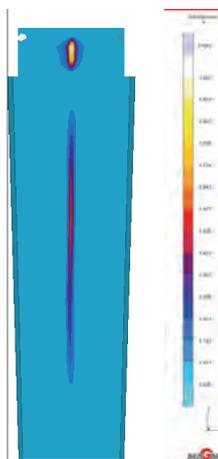
Obr. 5 Niyamovo kritérium 09, rozmezí 0,9 – 1,1

Fig. 5 Niyam criterion 09, range of 0.9 – 1.1



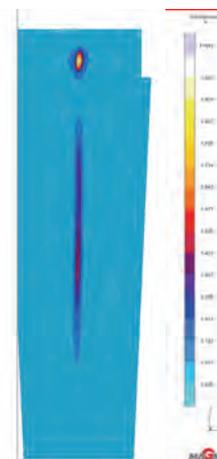
Obr. 6 Mikropórovitost 09, rozmezí 0 – 1 %

Fig. 6 Microporosity 09, range of 0 – 1 %



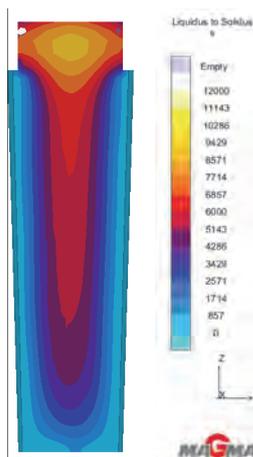
Obr. 7 Mikropórovitost 01a, rozmezí 0 – 1 %

Fig. 7 Microporosity 01a, range of 0 – 1 %



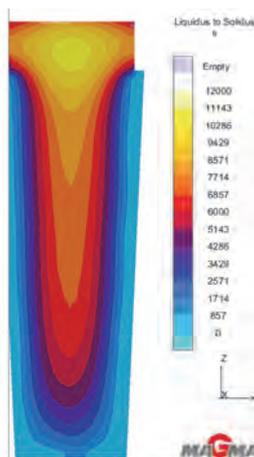
Obr. 8 Mikropórovitost 08b, rozmezí 0 – 1 %

Fig. 8 Microporosity 08b, of range 0 – 1 %



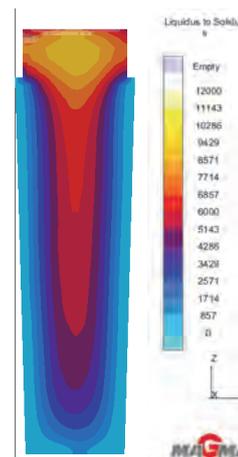
Obr. 9 Doba tuhnutí z teploty likvidu na teplotu solidu 01a, rozmezí 0 – 12 000 s

Fig. 9 Time of solidification from liquidus temperature to solidus temperature of 01a, range of 0 – 12,000 s



Obr. 10 Doba tuhnutí z teploty likvidu na teplotu solidu 08b, rozmezí 0 – 12 000 s

Fig. 10 Time of solidification from liquidus temperature to solidus temperature of 08b, range of 0 – 12,000 s

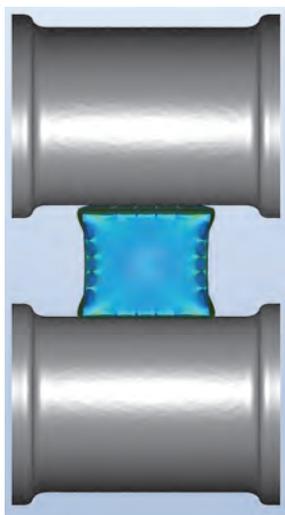


Obr. 11 Doba tuhnutí z teploty likvidu na teplotu solidu 09, rozmezí 0 – 12 000 s

Fig. 11 Time of solidification from liquidus temperature to solidus temperature of 09, range of 0 – 12,000 s

3. Numerické simulace válcování

Vybrané verze ingotů z programu Magma 5 označované 01a a 08b byly podrobeny numerické simulaci podélného válcování pomocí software Forge verze NxT 2.1 francouzské firmy Transvalor. Z programu Magma 5 byla importována pouze geometrie ingotů, nikoliv teplotní pole. Úloha byla řešena jako trojdimenzionální, bez použití rovin symetrie. Modely pracovních válců, jež byly použity k válcování, prezentuje obr. 12.



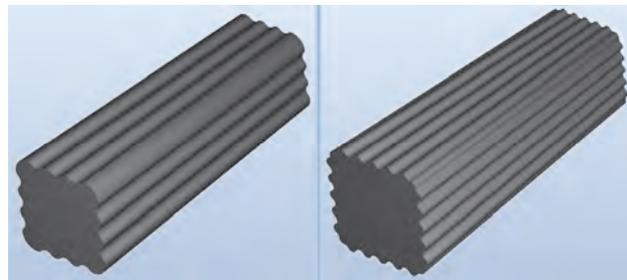
Obr. 12 Rozšířený model pracovních válců ve válcovací stoličce (kalibr 1) s ingotem

Fig. 12 Extended model of the work rolls in the rolling stand (caliber 1) with ingot

Ingoty 01a a 08b vložené do programu Forge ukazují obr. 13. Válcovaná CrC ocel měla homogenně rozloženou počáteční teplotou o výši 1200 °C. Materiálový model deformačního zpevnění podle Spittelovy aproximace byl vybrán z materiálové databáze programu Forge [4]. Tření mezi předválcem a pracovními válci bylo zvoleno jako viskoplastické [5]. Je vyjádřeno vztahem

$$\tau = -\alpha KV^p, \quad (1)$$

kde τ je tečné třecí napětí, α a p jsou materiálové parametry, K je referenční parametr velikosti zrna, V je třecí rychlost prokluzu mezi proválcem a pracovními válci [6]. V simulaci byly zvoleny hodnoty parametrů $\alpha = 0,5$ a $p = 0,15$. Přestup tepla mezi válci a ingotem byl zvolen jako doporučený „slabý za tepla“, a to ve výši $2 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Tab. 3 shrnuje úběrový plán pro simulaci válcování.



Obr. 13 Vstupující ingoty do procesu válcování: vlevo 01a, vpravo 08b
Fig. 13 Ingots entering the rolling process: left 01a, right 08b

Tab. 3 Úběrový plán válcování; ingot vstupuje do válcovací mezery patou

Tab. 3 Draught rolling schedule; ingot enters into the roll gap by the heel

Úběr	Výška válcovací mezery, (mm)	Hranění rozvalku o 90°
1	560	-
2	520	Ano
3	560	-
4	520	-

4. Vyhodnocení válcování ingotů

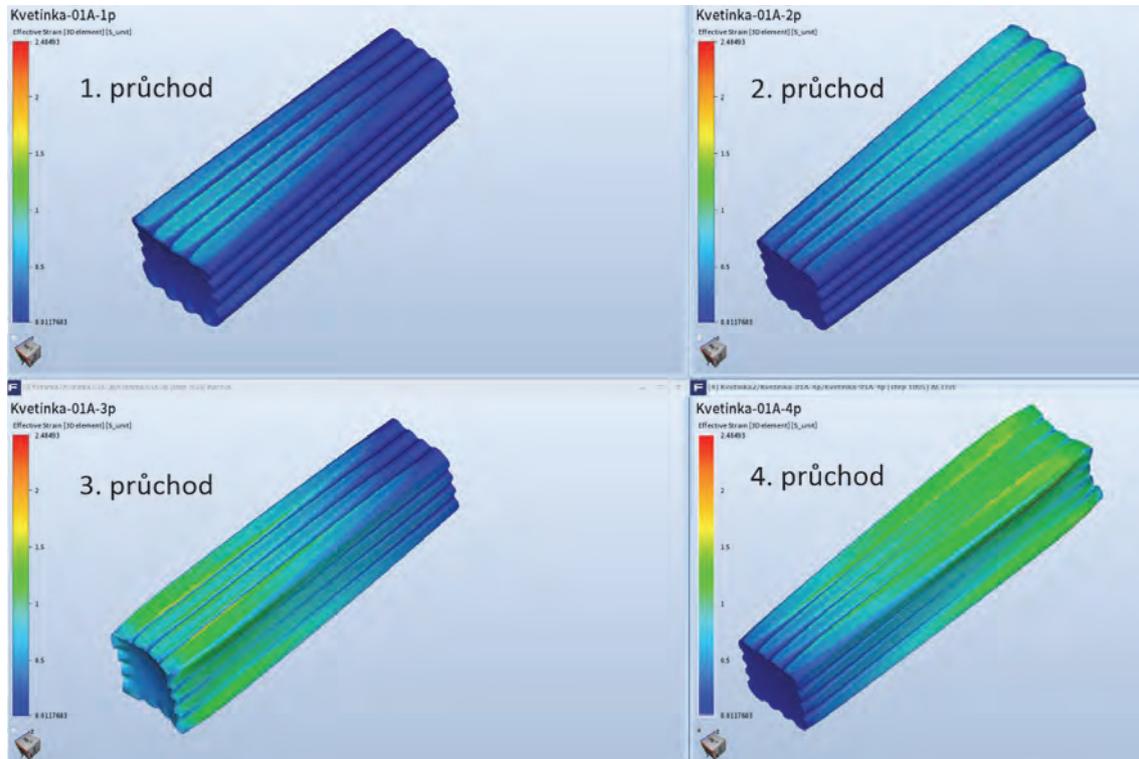
4.1 Válcování ingotu 01a

Ingot 01a prošel daným úběrovým plánem uvedeným tab. 3 bez jakýchkoliv záběrových problémů. Obr. 14 je ukazuje rozložení efektivní deformace v jednotlivých

válčovacích průchodech. Efektivní deformace je skalární veličina popisující celkový deformační stav. V diferenciálním tvaru se dá zapsat pomocí vztahu

$$d\bar{\epsilon} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\frac{1}{2} d\epsilon_{ij} d\epsilon_{ij}}, \quad (2)$$

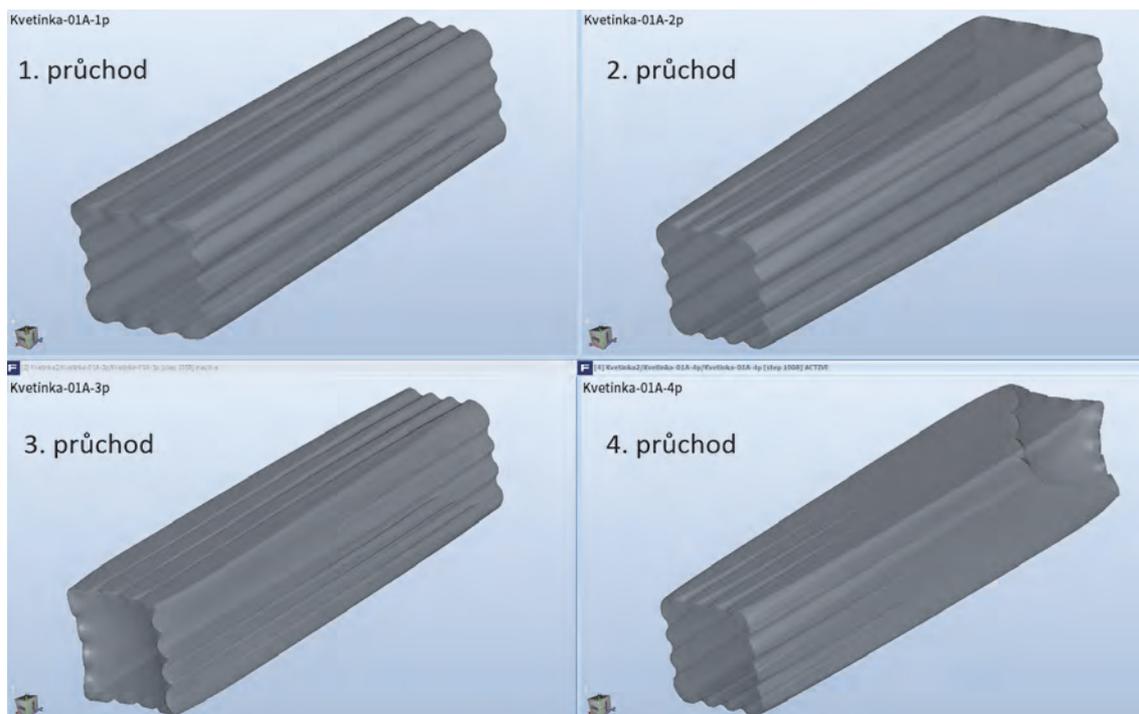
kde $d\epsilon_{ij}$ jsou infinitezimální složky tenzoru deformace.



Obr. 14 Rozložení efektivní deformace na povrchu ingotu 01a ve čtyřech válcovacích průchodech
Fig. 14 Distribution of effective deformation on the surface of ingot 01a in four rolling passes

Obr. 15 slouží pro znázornění přeložek vzniklých při válcování po jednotlivých úběrech. Vyhodnocovací program znázorňuje výskyt přeložek modrou barvou. Zde

tato barva zcela chybí, takže při válcování k tvorbě přeložek nedochází.

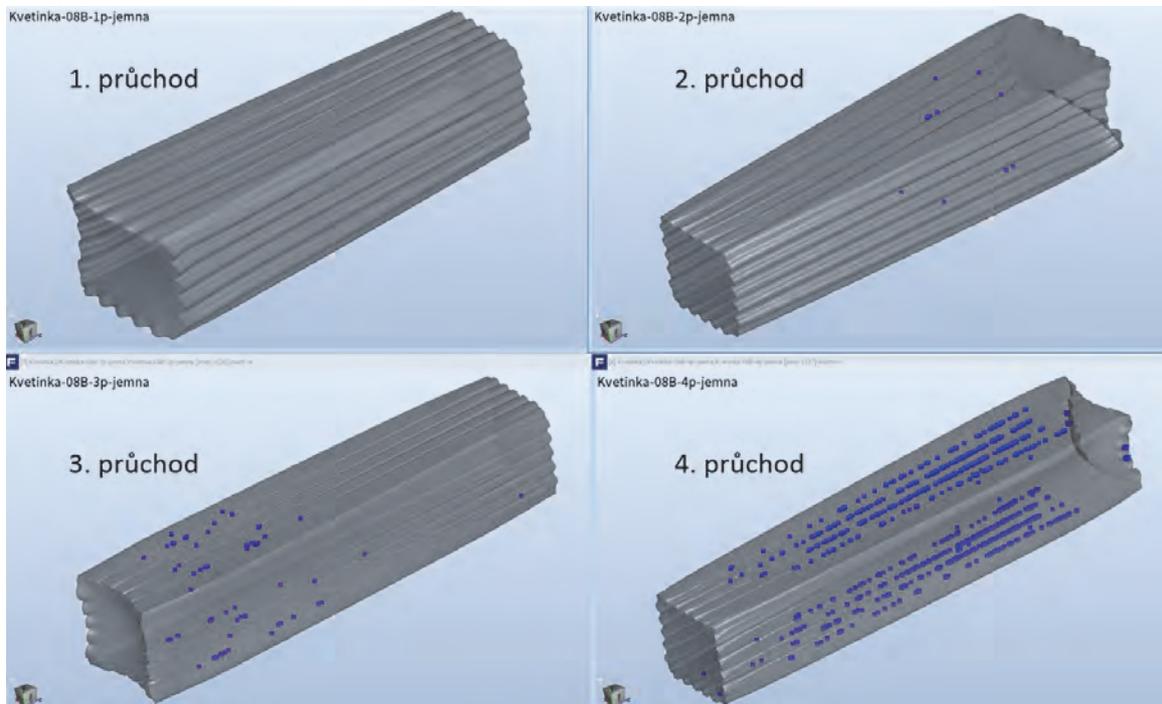


Obr. 15 Rozložení přeložek na ingotu 01a ve čtyřech válcovacích průchodech – žádné přeložky nevznikly (absence modré barvy)
Fig. 15 Distribution of folds on ingot 01a in four rolling passes – no folds have occurred (absence of blue colour)

4.2 Válcování ingotu 08b

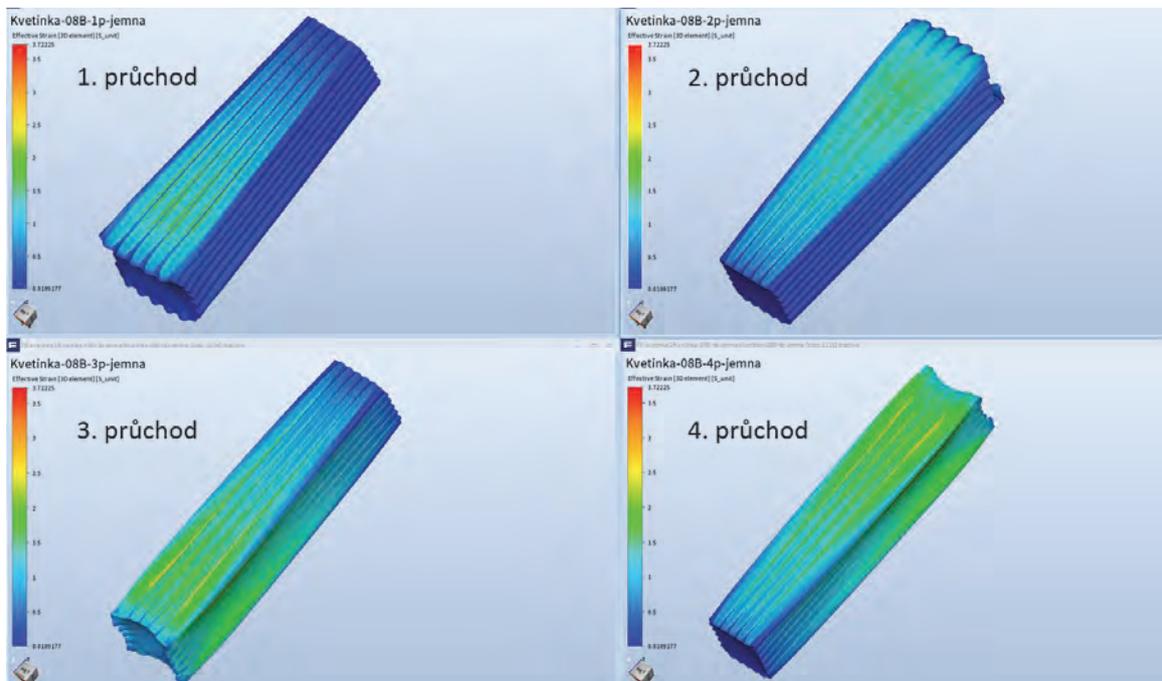
Při válcování ingotu verze 08b s pěti vlnami ve stěně vzniklo velké množství přeložek. Tyto přeložky se

vyskytovaly už od 2. úběru, jak je znázorněno modrou barvou na obr. 16. Rozložení efektivní deformace po jednotlivých úběrech ukazuje obr. 17.



Obr. 16 Rozložení přeložek na ingotu 08b ve čtyřech válcovacích průchodech; od 2. válcovacího průchodu přeložky začínají vznikat a jejich počet postupně roste

Fig 16 Distribution of folds on ingot 08b in four rolling passes; folds arise from the 2nd rolling pass and their number gradually increases



Obr. 17 Rozložení efektivní deformace na povrchu ingotu 01a ve čtyřech válcovacích průchodech

Fig. 17 Distribution of effective deformation on the surface of ingot 01a in four rolling passes

5. Výsledky modifikovaného úběrového plánu pro verzi 08b

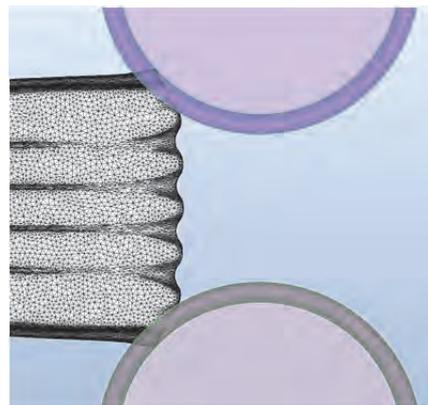
Z důvodu vzniku velkého množství přeložek vzniklých při válcování modifikace 08b byla úběrový plán modifikován tak, že se ingot hraní po každém průchodu (tab. 4). Přitom ingot nebylo možno válcovat způsobem vratným způsobem, ale pouze jednosměrně, protože při vstupu provalku do následujícího vratného průchodu by bylo velmi problematické zatlačení provalku do válcovací mezery a nedošlo by k záběru pracovními válci, jak je znázorněno na obr. 18.

Srovnání simulace 4. válcovacího průchodu na obr. 16 a 19 ukazuje, že množství přeložek je u modifikovaného úběrového plánu ještě větší než u nemodifikovaného úběrového plánu. Numerická simulace válcování dvou tvarových variant ingotu ukázala, že vhodnou pro válcování z hlediska povrchové jakosti je verze 01a se čtyřmi vlnami na stěně ingotu. Pro verzi ingotu s pěti vlnami na stěně by se musely změnit geometrické parametry tohoto zvlnění. Kvalita konečně-prvkové sítě i přes použité optimalizace výpočetního času byla vzhledem k potřebě sledovat potenciální vznik přeložek v podstatě nejnižší možná. Volbu kvalitnější konečně-prvkové sítě komplikoval fakt, že ingot měl složitý povrch a simulace probíhala v nezkrácené podobě. Modifikovaný průchodový plán pro verzi ingotu 08b nevedl k lepším výsledkům.

Tab. 4 Upravený úběrový plán pro modifikaci 08b; ingot vstupuje do válcovací mezery patou

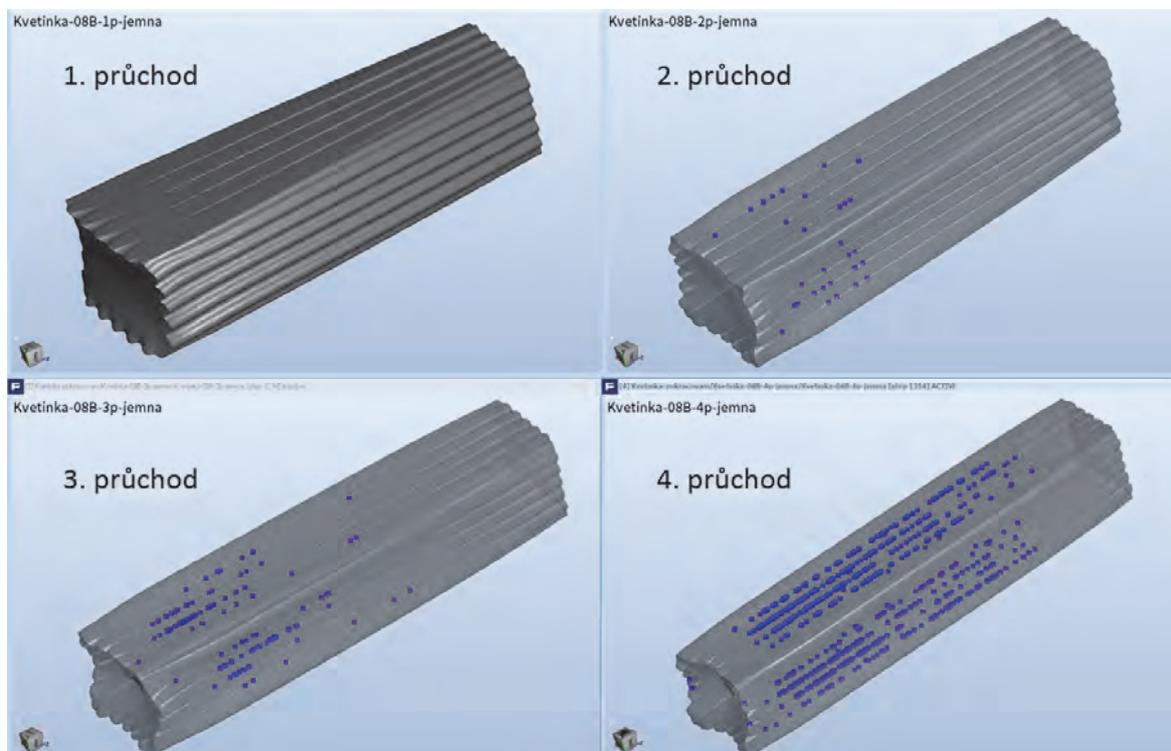
Tab. 4 Modified draught rolling schedule for the modification 08b; ingot enters into the roll gap by the heel

Úběr	Výška válcovací mezery	Hranění rozvalku o 90°
	(mm)	
1	560	Ano
2	560	Ano
3	520	Ano
4	520	-



Obr. 18 Vstup ingotu 08b do 2. válcovacího průchodu při modifikovaném vratném válcování

Fig. 18 Entry of the ingot 08b into the 2nd rolling pass in modified reverse rolling



Obr. 19 Rozložení přeložek na ingotu 08b ve čtyřech modifikovaných válcovacích průchodech; od 2. válcovacího průchodu se přeložky začínají vyskytovat a jejich počet postupně roste

Fig. 19 Distribution of folds on ingot 08b in four modified rolling passes; folds arise from the 2nd rolling pass and their number gradually increases

Závěr

Z provedené numerické simulace odlévání a tuhnutí ingotů se zvětšenou teplosměnnou plochou pomocí 4 či 5 zvlnění na stěně ingotu a následného válcování ingotů s takto zvlněným povrchem vyplynulo, že z hlediska minimalizace tvorby přeložek vzniklých při válcování je nejvhodnější využití 4 vlnek na stěně. Tento závěr je jen prvotním, dílčím výsledkem výzkumu a výběr počtu vlnek na stěně ingotu bude pokračovat spolu s volbou optimálního tvaru ingotu včetně jeho konicity. Cílem je eliminace porozity během tuhnutí a zabránění vzniku přeložek během válcování.

Poděkování

Tato práce vznikla při řešení projektu č. LO1203 "Regionální materiálově technologické výzkumné centrum - program udržitelnosti" financovaného Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy České republiky.

Literatura

- [1] PINDOR, J., KURKA, V., KOSŇOVSKÁ, J., ŠTEFANIŠINOVÁ, Š., SOCHA, L., PYSZKO, R. Effect of Cooling of the Ingot on its Macro-structural and Chemical Heterogeneity. *Hutnické listy*, 70 (2017) 3, 47–57. ISSN 0018-8069.
- [2] ŠMRHA, L. *Tuhnutí a krystalizace ocelových ingotů*, 1. vyd. Praha: SNTL, 1983. 308 s.
- [3] CHVOJKA, J. *Vady ingotů*, 1. vyd. Praha: SNTL, 1968. 256 s.
- [4] Transvalor [Software]. Forge NxT 2.1 SP1, Forge reference documentation: Part 5: Process data, Chapter I.A.6., Viscoplastic flow law according to the "Hansel-Spittel" model. 2018. [2019-01-25]
- [5] Transvalor [Software]. Forge NxT 2.1 SP1, Forge reference documentation: Part 5: Process data, Chapter III. Friction. 2018. [2019-01-25]
- [6] Mannsbart S. Modelování třecího odporu při objemovém tvárnutí za studena. VUT Brno, Fakulta strojního inženýrství. 31 s, 2006. [online]. [cit. 2019-01-04]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/107529503-Modelovani-treciho-odporu-pri-objemovem-tvareni-za-studena-friction-modeling-in-cold-bulk-forming-conditions.html>

Premiéra konference o lehkých materiálech na veletrhu HANNOVER MESSE

Lehké materiály už léta patří k stěžejním tématům veletrhu HANNOVER MESSE. V roce 2019 se toto téma dostává na významné fórum. Spolková vláda chce prostřednictvím summitu vyjádřit, že lehkým materiálům a konstrukcím přikládá velký význam. „Odlehčené materiály znamenají efektivitu využívání zdrojů,“ říká spolkový ministr Peter Altmaier. „Naším cílem je podporovat odlehčené materiály jako klíčovou technologii, a tím připravit cestu pro jejich ještě všestrannější využívání v průmyslu. Prostřednictvím konference o lehkých materiálech na veletrhu HANNOVER MESSE chceme podpořit potřebný dialog mezi politikou, hospodářskou sférou a vědou.“

Na 1. Lightweighting Summitu se počítá asi s 300 účastníky. Na konferenci vystoupí řada významných osobností a proběhnou zde dvě panelové diskuse. Pro veletrh je konference významnou událostí. „Zájem o odlehčené stavby prostupuje celým veletrhem HANNOVER MESSE,“ říká Dr. Jochen Köckler, předseda představenstva veletržní správy Deutsche Messe. „Nacházíme se nyní v situaci, kdy mnoho branží a výrobců teprve objevuje, jaký užitek odlehčené materiály mohou přinášet. Jde přitom o využívání nejrůznějších materiálů stejně jako o inovativní inženýring a digitalizované vývojové řetězce.“

Německý průmysl v minulých letech získal díky své kompetentnosti v oblasti lehkých materiálů renomé. Jak upevnit v budoucnu pozici Německa, bude také tématem první konference věnované lehkým materiálům. Také zde důrazně zazní, že využívání a kombinace různých materiálů jako jsou umělé hmoty, kombinované materiály, hliník, dřevo nebo ocel a beton jsou sice základem lehkých konstrukcí, ale zdaleka nepředstavují celé jejich spektrum. Pro ochranu materiálů a zdrojů a zlepšení funkčnosti jsou stejně důležité lehké konstrukce i koncepce lehkých materiálů. Lehké materiály hrají také klíčovou úlohu při zavádění digitálních vývojových řetězců a mají proto řadu vazeb k Průmyslu 4.0. - ústřednímu tématu veletrhu HANNOVER MESSE.

- z tiskové zprávy -