

Numerická simulace odlévání a tuhnutí 1,6t ingotu z nástrojové oceli pomocí softwaru THERCAST

Numerical Simulation of Casting and Solidification of 1,6t tool steel ingot in THERCAST Software

Ing. Ondřej Kotásek; Ing. Marek Dobiáš; doc. Ing. Petr Jonšta, Ph.D.; Ing. Vladislav Kurka, Ph.D.

MATERIÁLOVÝ A METALURGICKÝ VÝZKUM s.r.o., Pohraniční 693/31, Vítkovice, 703 00 Ostrava, Česká republika

Předložený článek se zabývá numerickou simulací odlévání a tuhnutí ingotu o hmotnosti 1,6 t z nástrojové oceli 40CrMnMo7, která se používá na formy a rámy větších rozměrů pro zpracování plastů a rámy pro tlakové lití kovů. Numerické simulace byly realizovány ve společnosti MATERIÁLOVÝ A METALURGICKÝ VÝZKUM s.r.o. pomocí softwaru THERCAST® pracujícím na bázi metody konečných prvků. Cílem práce bylo při zadaných okrajových podmínkách prověřit plnění kokily ocelí, parametry tuhnutí a predikování možného vzniku mikroporozity. Dosavadní získané výsledky ukázaly, že navržená technologie odlévání a tvar ingotu se z kvalitativního pohledu jeví jako vyhovující. V rámci budoucích výzkumných aktivit budou pro daný typ ingotu provedeny další série numerických simulací, při kterých bude sledován např. výskyt a rozložení segregací a vybrané napěťově-deformační charakteristiky.

Klíčová slova: numerická simulace; sw THERCAST®; nástrojová ocel 40CrMnMo7; ingot; lití; tuhnutí

The paper deals with numerical simulation of casting and solidification of a 1.6 t ingot made of 40CrMnMo7 tool steel, which is used for moulds and frames of larger dimensions for plastics processing and frames for metal die casting. The numerical simulations were carried out at MATERIÁLOVÝ A METALURGICKÝ VÝZKUM s.r.o. using THERCAST® software based on the finite element method. The aim of the work was to verify the mould filling with steel, the solidification parameters and the prediction of possible microporosity formation under the given boundary conditions. The obtained results shown that designed casting technology and ingot shape appear to be satisfactory from a qualitative point of view. In the framework of future research activities, further series of numerical simulations will be carried out for this type of ingot to investigate e.g. the occurrence and distribution of segregations and selected stress-strain characteristics.

Key words: numerical simulation; THERCAST® sw; 40CrMnMo7 tool steel; ingot; casting; solidification

1. Úvod

Řešení tepelných úloh v systémech s rozloženými parametry lze provést analyticky, numericky nebo experimentálně. V počítačových simulačních výpočtech tepelných dějů mezi odlitkem a slévarenskou formou mají uplatnění numerické metody. Jejich podstata závisí na diskretizaci proměnných, k čemuž přispívá typická opakovatelnost jednoduchých algebraických operací určitého typu. Numerické metody nám umožňují získat řešení dané tepelné úlohy v konečném počtu diskretních míst, a to jak v celé oblasti, tak i pouze v povrchové části. K řešení úloh se používá jedna ze dvou numerických metod – metoda konečných prvků nebo metoda konečných diferencí [1]. Metoda konečných prvků (Finite Elements Method) je numerickou metodou řešení (parciálních) diferenciálních rovnic v kontinuu. FEM využívá prostorové diskretizace většinou tzv. triangulací řešené oblasti, kde se hledá po částech spojitá funkce. Tímto se hranice řešené oblasti nahrazují polynomy. Základní elementy popisující plochu jsou plošky ve tvaru trojúhelníku [1, 2].

Pro optimalizaci metalurgických procesů pomocí numerických simulací využívá společnost MATERIÁLOVÝ A METALURGICKÝ VÝZKUM s.r.o. jako jednu z možností software THERCAST® pracující na bázi FEM. S vybraným termomechanickým modelem dokáže výkonný řešič vektorových rovnic predikovat relativně přesné výsledky tepelného pole kovu, eventuálně i vybraných okolních komponentů lící sestavy. Pomocí daného sw je možné stanovit např. dobu tuhnutí kovu, tlak, napětí, deformaci v kovu, jeho smrštění, přenos tepla mezi jednotlivými prvky lící soustavy a další a následně pak umožní určit přesný tvar finálního odlitku [3].

Hlavním cílem této práce bylo pomocí numerického modelování prozkoumat fyzikální vlastnosti nástrojové oceli během procesu odlévání, respektive tuhnutí a matematicky ověřit navrženou technologii lití. Byly prověřeny nastavené okrajové podmínky, jako je teplota, rychlost lití, geometrie ingotu (poměr H/D), sledován vývoj smrštění kovu a možných vad ingotu. Bylo rovněž ověřováno, zda během solidifikace nezůstane tekuté jádro uzavřené v kritické centrální oblasti ingotu.

Popis experimentu

Numerický výpočet se obecně skládá z následujících etap: preprocessing – zahrnuje tvorbu geometrie a generaci výpočetní sítě; processing – definice a samotné řešení výpočtu; postprocessing – analýza výsledků numerické simulace [4]. Pro experimenty byla použita nástrojová ocel 40CrMnMo7, jejíž chemické složení je uvedeno v tab. 1. Jedná se o ocel používanou na formy a rámy větších rozměrů pro zpracování plastů, rámy pro tlakové lití kovů apod. Vyznačuje se dobrou obrobiteľnosťou i v zušlechťeném stavu, dobře se prokaluje i ve větších rozměrech a je rovněž vhodná k nitridování a cementování. [4-6].

Tab. 1 Chemické složení oceli 40CrMnMo7 [hm. %]

Tab. 1 Chemical composition of the 40CrMnMo7 steel [wt. %]

C	Mn	Si	Cr	Mo	S	P
0,40	1,50	0,30	2,00	0,20	0,035	0,035

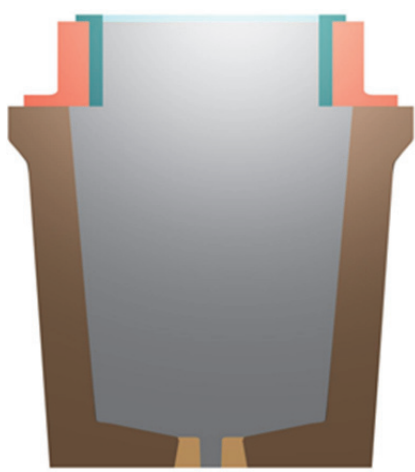
Vlastnosti žáruvzdorných materiálů, včetně materiálůvých modelů byly vygenerovány z knihovny softwaru THERCAST®. Vybrané termo-fyzikální veličiny použité pro simulace jsou uvedeny v tab. 2. Ocel byla odlévána spodem do litinové kokily o středním průměru 0,58 m, výšce 0,7 m a úkosu plochy stěny kokily od základní

kolmice na vtok 96,4°. Geometrie kokily a ingotu (1,6 t) jsou znázorněny na obr. 1. Objemová výpočetní síť ingotu byla tvořena čtyřstěny o velikosti strany 1,5 cm a v oblasti vtoku čtyřstěny o velikosti strany 0,8 cm. Počet definovaných elementů v těle ingotu byl 19729 a 2884 ve vtokové části, celkem tedy 22613. Zjemnění výpočetní sítě v oblasti vtoku kokily bylo provedeno za účelem přesnější simulace proudění, viz obr. 2. Výpočetní úloha byla nadefinována jako termomechanická.

Tab. 2 Vybrané termo-fyzikální veličiny použité pro simulace

Tab. 2 The thermo-physical variables used for simulations setting

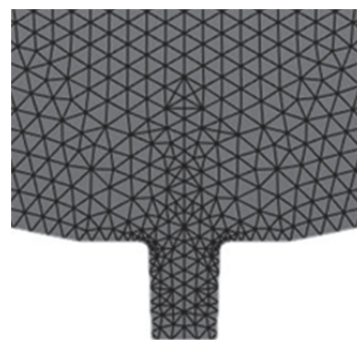
Tepelná vodivost	31 [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]
Specifické teplo	824 [J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]
Latentní teplo	245 000 [J·kg ⁻¹]
Hustota	7064 [kg·m ⁻³]
Teplota likvidu	1433 [°C]
Teplota solidu	1463 [°C]
Teplota lití	1540 [°C]
Rychlost lití	0,00132 [m ³ ·s ⁻¹]
Viskozita	0,0066 [kg·m·s ⁻¹]



(a)

(b)

Obr. 1 Geometrie (a) kokily a (b) ingotu
Fig. 1 Mould (a) and ingot (b) geometry

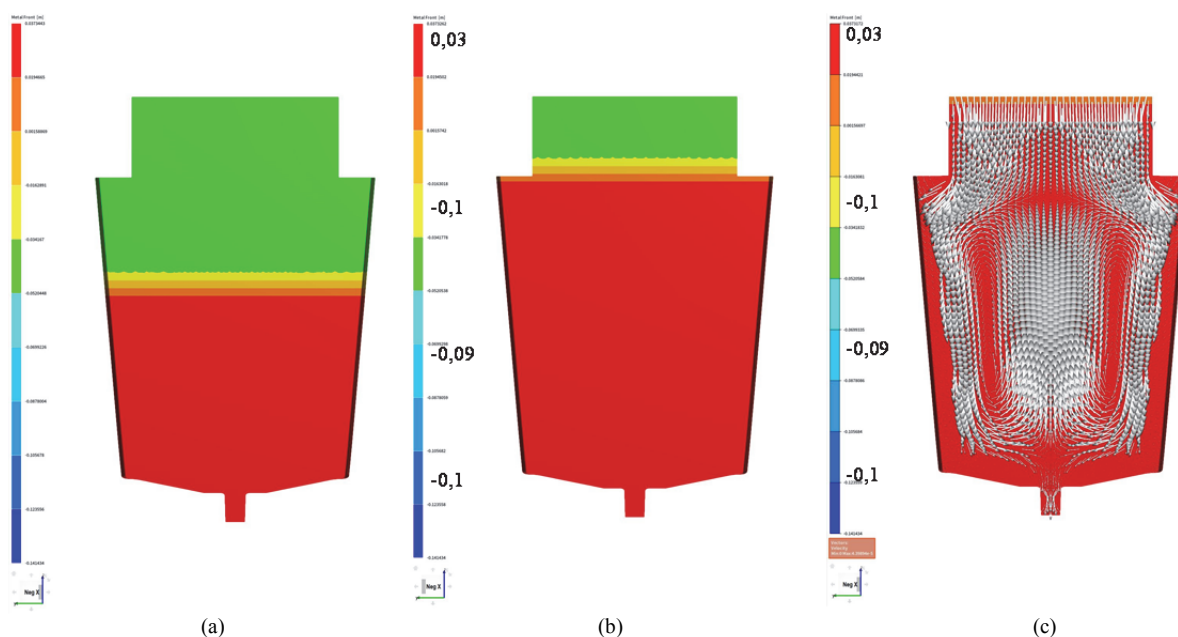


Obr. 2 Detail výpočetní sítě v oblasti vtoku do kokily
Fig. 2 Detailed view on the computational mesh in the mould inlet area

2. Výsledky

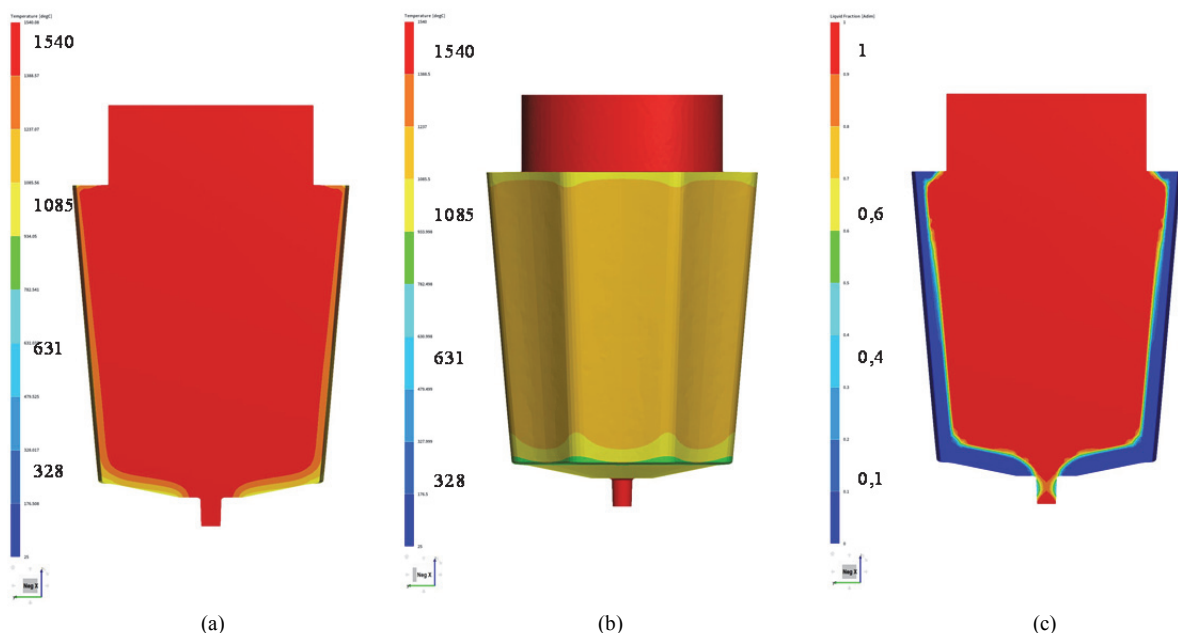
Výsledky simulace můžeme z časového hlediska rozdělit do dvou skupin. První skupina zahrnuje výsledky od počátku do konce lití oceli do kokily a druhá skupina výsledky související s procesy tuhnutí a ochlazování odlitého kovu v kokile. Obr. 3 prezentuje zaplnění ingotu v 50 %, 90 % a plnění ingotu na 99 % s vektory znázorněnými s relativním zmenšením na 20 %. Jejich

hodnoty (z povrchu) jsou kladné uvnitř kovu a záporné směrem ke vzduchu (m). U laminárního proudění je v celém objemu vidět pouze proudnicové proudění, kde jsou dráhy jednotlivých kapalných částic ve vrstvách vzájemně rovnoběžných. Celková doba lití ingotu byla simulována na 220 sekund. Obr. 4 ukazuje příklad teplotního pole a frakce kapalně fáze bezprostředně po úplném naplnění kokily. Výsledky ukazují teplotu ve °C.



Obr. 3 Plnění kokily taveninou při 50 % (a), 90 % (b), vektorový tok taveniny při 99 % zaplnění (c)

Fig. 3 Mould filling (a) 50%, (b) 90%, (c) flow using velocity vectors - 99%



Obr. 4 Teplotní pole (°C) po odlití - po průřezu ingotu (a), povrch ingotu (b), podíl tekuté fáze po dokončení liti (c)

Fig. 4 Temperature field (°C) after full ingot filling (a), in cross section (b), around the ingot liquid phase fraction (c)

Při simulaci byla sledována teplota od počátku odlévání až do úplného utuhnutí ingotu. Podíl tekuté a pevné fáze je určen stupnicí, na které 1 znamená tekutou fázi a 0 znamená pevnou fázi (obr. 5). Podle tepelného výpočtu bylo úplného ztuhnutí dosaženo přibližně za 11 000 s, tedy za cca 3 hodiny. Obr. 5 ukazuje podíl tekuté fáze oceli během tuhnutí při 50 %, 75 % a 95 % podílu pevné fáze. Výsledky simulace ukázaly, že se ve střední části ingotu vytváří tepelný uzel, který se postupně se zvětšujícím se podílem utuhlé fáze v čase posouvá směrem k hlavě ingotu. Je tedy možno konstatovat, že podmínky odlévání a design kokily byly vhodně zvoleny, protože umožňovaly postupné dosazování tekuté oceli do

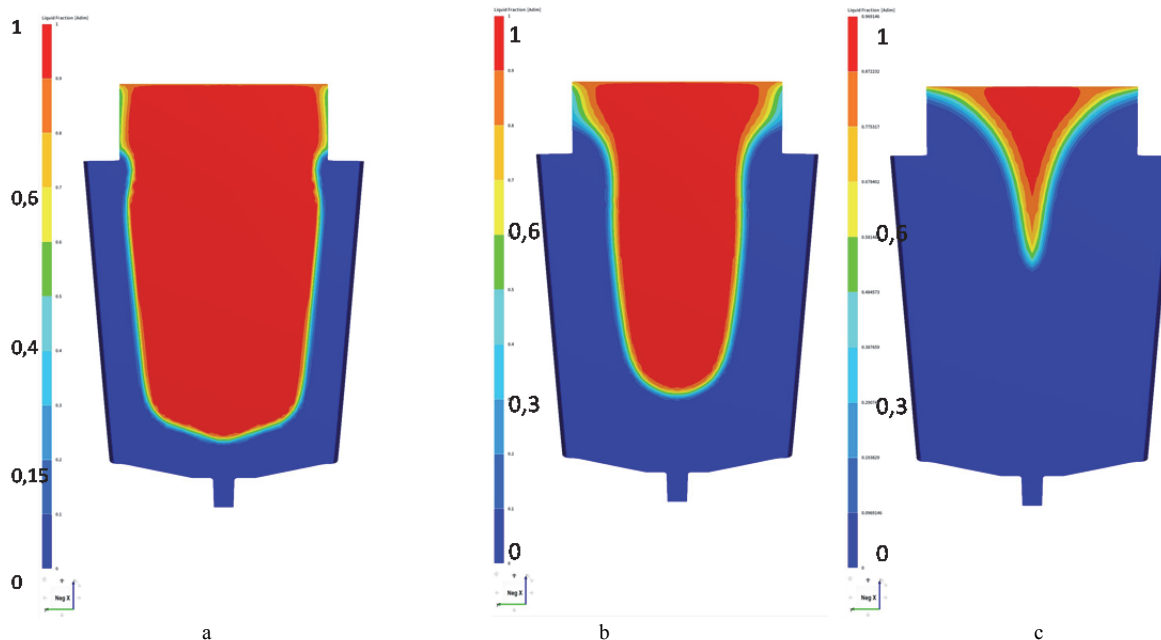
těla ingotu a nebylo pozorováno uzavření kapalného jádra v kritické centrální oblasti.

Snižováním teploty (ochlazováním), ale také např. v důsledku zvýšení tlaku dochází k objemovým ztrátám kovu v objemu tuhneícího ingotu, tzv. smrštění, viz obr. 6. Přehřátá tavenina při styku s kokilou následkem tepelného šoku a vysokého odvodu tepla vytvoří na povrchu ingotu natuhlou vrstvičku, takzvanou licí kůru. Smrštěním této kůry vzniká mezera mezi povrchem ingotu a kokilou. Přerušuje se tak dokonalý styk mezi těmito povrchy. Odvod tepla je poté omezený. Smršťování povrchu tuhneícího ingotu je v prvních fázích tuhnutí

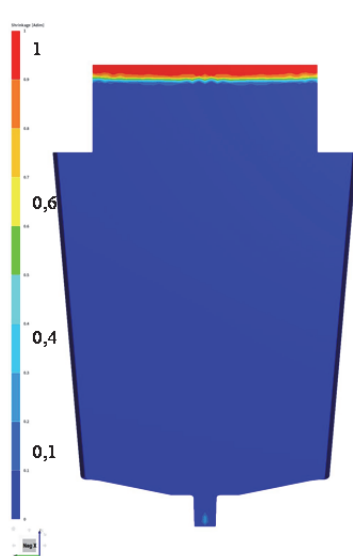
kompenzováno plastickou deformací oceli. U experimentálního 1,6 t ingotu bylo smrštění zvláště výrazné v hlavě ingotu a méně výrazné po obvodu ingotu. V rámci numerické simulace byl predikován rovněž vznik vnitřní porozity vzniklé v důsledku smrštění (obr. 7). Posouzení bylo provedeno dle Niyamova kritéria - rov. 1,

kde $\dot{T}$ je rychlost ochlazování a ΔT je gradient teploty. Zjištěná hodnota 0,02 poukázala na velmi nízkou pravděpodobnost možnosti vzniku defektů v těle ingotu.

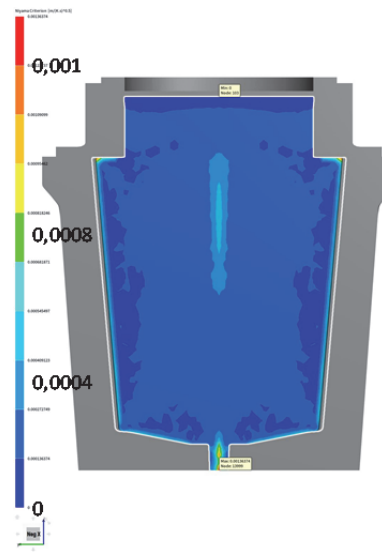
$$Ni = \frac{\sqrt{\|\dot{T}\|}}{\|\Delta T\|} \quad (1)$$



Obr. 5 Podíl tekuté fáze (50 % - a, 75 % - b, 95 % - c)
Fig. 5 Fraction of the liquid phase (50% - a, 75% - b, 95% - c)



Obr. 6 Smrštění 1,6 t ingotu
Obr. 6 Shrinkage of the 1.6 t ingot



Obr. 7 Výskyt porozity po průřezu ingotu
Fig. 7 Porosity in cross section of ingot

3. Závěr

S využitím softwaru THERCAST®, francouzského výrobce Transvalor, byly provedeny numerické simulace lití a tuhnutí 1,6 t těžkého ingotu z nástrojové oceli značky 40CrMnMo7. Práce se zabývala posouzením fyzikálních vlastností nástrojové oceli, vlivem vybraných

okrajových podmínek na lití a tuhnutí a predikcí možného výskytu vad v ingotu. Pozornost byla zaměřena na teplotu v ingotu při odlévání a ochlazování, na poměr kapalně fáze jako funkci teploty a času. Simulace ukázaly, že k úplnému ztuhnutí dojde přibližně za 3 hodiny, geometrie ingotu byla navržena vhodně, to znamená, že ingot chladl pozvolna, aniž by došlo k uzavření kapalně

jádra v jeho středu, což je mimo jiné důležitý parametr také pro kritérium podle Niyamy, které bylo vypočítáno jako velice malé, tj. minimální výskyt vad (porozity) v těle ingotu. Celkovým smrštěním se po utužení zmenšil objem těla ingotu přibližně o 5 %. Dosavadní získané výsledky ukázaly, že navržená technologie odlévání a tvar ingotu se jeví jako vyhovující. V rámci budoucích výzkumných aktivit budou pro daný typ ingotu provedeny další série numerických simulací, při kterých bude sledován např. výskyt a rozložení segregací a vybrané napěťově-deformační charakteristiky.

Poděkování

Tento příspěvek vznikl v rámci Institucionální podpory dlouhodobého a koncepčního rozvoje výzkumné organizace v roce 2022, kterou poskytlo Ministerstvo průmyslu a obchodu České republiky.

Literatura

- [1] ZIENKIEWICZ, O. C., TAYLOR, R. L. and FOX, D. D. *The Finite Element Method for Solid and Structural Mechanics*. 7th Ed. Elsevier, 2013. e-ISBN9780080951362.
- [2] DHAWAN, S., KAPOOR, S. and KUMAR, S. Numerical Method for Advection Diffusion Equation using FEM and B-Splines. *Journal of Computational Science*, 2012, 3, 5: 429–437.
- [3] TRANSVALOR [Software]. THERCAST®, THERCAST reference documentation: Part 1: Ingot Casting, 2020. [2022-11-13].
- [4] BARTON, G., LI, X. and HIRT, G. Finite-Element Modeling of Multi-Pass Forging of Nickel-Base Alloys Using a Multi-Mesh Method. In *Materials Science Forum*. Trans Tech Publications Ltd., 2007. pp 2503–2508.
- [5] KUTILOVÁ, K. *Návrh vytápění tvarově složité formy*. Diplomová práce. ZČU v Plzni. 2014. 101 s.
- [6] HAMMOND, D. R., DIMITROV, D. M. and TREURNICHT, N. F. The Effects of Cooling and Cutting Tool Coating on Tool Wear During Milling of Ti6Al4V and 40CrMnMo7. In *Southern African Institute of Industrial Engineering*. 2013.

Celosvětově unikátní CT zařízení se testovalo na high-tech surfech z Česka

Mnohonásobně silnější, výkonnější a s možností prozářit i velké bloky leteckých motorů. Speciální počítačovou tomografii na bázi 9MeV lineárního urychlovače, jedinou svého druhu, která je postavena v Cincinnati v USA, v prosinci 2023 otestovali vědci z CEITEC VUT.

Výzkumná laboratoř CT LAB CEITEC a celosvětový výrobce CT zařízení společnost Waygate Technologies se rozhodli ověřit studii proveditelnosti na vybraném produktu nejpokročilejší dostupné technologie, na kterém by se nejlépe prezentovaly výhody tohoto zařízení. Proto se tito partneři spojili s brněnskou firmou MSR Engines s.r.o., která se zabývá vývojem a výrobou motorových surfů, elektrických skateboardů a dronových pohonných jednotek. Jejich motorové surfovací prkno Jetsurf, které svou délkou téměř 2 metry a karbonovým tělem obsahující pohonnou jednotku, bylo ideálním předmětem na ověření geometrických i detekčních limitů CT přístroje.

Prkno se podařilo v rámci 9 dílčích skenů kompletně digitalizovat s voxelovým rozlišením 150 mikrometrů za 30 hodin. Měření se odehrálo v zákaznickém centru společnosti Waygate Technologies v USA. Vygenerovaný datový soubor o objemu 250 GB byl poté analyzován výkonnými stanicemi v CT laboratoři v Brně.

Všechna tato aktivita je součástí přípravné fáze projektu LINACTON, na jehož realizaci se podílí laboratoř počítačové tomografie (CT LAB). Cílem projektu je dostat vysokoenergetické CT do České republiky a zavést tuto technologii jak v průmyslu, tak i ve výzkumu. V Cincinnati je toto zařízení v provozu více než rok a zájem průmyslu o tento druh analýzy je velký.

„Jelikož se jedná o významný trend v oblasti nedestruktivního testování, bylo potřeba ověřit možnosti a aplikovatelnost této technologie na reálném produktu. Jsem rád, že se tato zkouška podařila realizovat právě s českou firmou. Věřím, že tato technologie může mít zanedlouho klíčovou roli ve zkušebnictví pro obranný, letecký a bateriový průmysl či neustále se rozvíjející aditivní výrobě,“ uvedl Jozef Kaiser, vedoucí výzkumné skupiny Pokročilé instrumentace a metody pro charakterizace materiálů.

– z tiskové zprávy –