

Záverečná karta projektu

Názov projektu Evidenčné číslo projektu **APVV-14-0244****Vývoj softvérovej podpory s využitím fyzikálnej simulácie pre optimalizáciu procesov plynulého odlievania ocele ako systémov s rozloženými parametrami pre Železiarne Podbrezová, a. s.**Zodpovedný riešiteľ **prof. Ing. Gabriel Hulkó, DrSc.**Príjemca **Slovenská technická univerzita v Bratislave - Strojnícka fakulta**

Názov pracoviska, na ktorom bol projekt riešený

Ústav automatizácie, merania a aplikovanej informatiky - Strojnícka fakulta Slovenská technická univerzita v Bratislave.

Názov a štát zahraničného pracoviska, ktoré spolupracovalo pri riešení

Udelené patenty/podané patentové prihlášky, vynálezy alebo úžitkové vzory, ktoré sú výsledkami projektu

Číslo úžitkového vzoru: 8424 - Spôsob a systém detekcie úniku trosky do medzipanvy v procese kontinuálneho odlievania ocele.

Dátum nadobudnutia účinkov úžitkového vzoru: 06.05.2019.

Najvýznamnejšie publikácie (knihy, články, prednášky, správy a pod.) zhrňujúce výsledky projektu – uveďte aj publikácie prijaté do tlače

HULKÓ, G., BELAVÝ, C., ONDREJKOVIČ, K., BARTALSKÝ, L. and BARTKO, M. 2017. Control of technological and production processes as distributed parameter systems based on advanced numerical modeling. Control Engineering Practice a Journal of the International Federation of Automatic Control – IFAC, ELSEVIER, Volume 66, pp. 23-38.

ONDREJKOVIČ, K., BUČEK, P., HULKÓ, G. 2018. Utilizing Industry-oriented Finite Elements Codes in the Design of Virtual Steel Mill Concept. Preprint of the 18th IFAC Symposium on Control, Optimization and Automation in

Mining, Mineral and Metal Processing, pp. 53-58. Shanghai. Also in the IFAC-PapersOnLine, Volume 51, Issue 21, 2018, pp. 313-319, ELSEVIER.

TAKÁCS, Gergely - ONDREJKOVIČ, Karol - HULKÓ, Gabriel. A low-cost non-invasive slag detection system for continuous casting. In IFAC-PapersOnLine. Vol. 50, 20th World congress on the International Federation of Automatic Control. Toulouse, France. July 9 - 14, 2017, s. 440-447, online. ISSN 2405-8963.

HULKÓ, G., ONDREJKOVIČ, K., BUČEK, L. and BARTKO, M. 2016. Software sensor as distributed parameter system for the control of secondary cooling in the continuous casting of steel. Preprint of the 17th IFAC Symposium on Control, Optimization and Automation in Mining, Mineral and Metal Processing, pp. 53-58. Vienna. Also in the IFAC-PapersOnLine, Volume 49, Issue 20, 2016, Pages 49-54, ELSEVIER.

HULKÓ, G., ONDREJKOVIČ, K., BUČEK, P., BARTALSKÝ, L. 2018. Riadenie a optimalizácia sekundárneho chladenia ako systému s rozloženými parametrami pomocou softvérového senzora. Zborník jubilejnej konferencie k 10. výročiu založenia Výskumno-vývojového centra Železiarne Podbrezová, s. r. o. - ŽP VVC 2018, pp. 29-34, Tále.

HULKÓ, G., BELAVÝ, C., ONDREJKOVIČ, K., BARTALSKÝ, L. 2019. Control of Distributed Parameter Systems an Engineering Approach – Tutorial. 22th IEEE Process Control, Vysoké Tatry. 8 strán. Videozáznam cca. hodinového tutoriálu aj s výsledkami riešeného projektu: https://www.youtube.com/watch?v=FjTYaaPMKTY&feature=youtu.be&fbclid=IwAR2TJfUTJ36eESusDVpu01LrdxEa7pYIR_2_ytdrB1d7tgc1MntnafiwlGo

Uplatnenie výsledkov projektu

V rámci projektu "Vývoj softvérovej podpory s využitím fyzikálnej simulácie pre optimalizáciu procesov plynulého odlievania ocele ako systémov s rozloženými parametrami pre Železiarne Podbrezová, a. s." boli navrhnuté a rozpracované softvérové nástroje OPTIexpert a OPTIcontrol pre optimalizáciu procesov plynulého odlievania ocele ako systémov s rozloženými parametrami. Tieto softvérové nástroje sú už druhý rok úspešne využívané vo Výskumno-vývojovom centre Železiarne Podbrezová, s.r.o. pri riešení úloh optimalizácie procesov plynulého odlievania ocele pre Železiarne Podbrezová, a. s.

Súhrn výsledkov riešenia projektu a naplnenia cieľov projektu v slovenskom jazyku (max. 20 riadkov)

V rámci projektu "Vývoj softvérovej podpory s využitím fyzikálnej simulácie pre optimalizáciu procesov plynulého odlievania ocele ako systémov s rozloženými parametrami pre Železiarne Podbrezová, a. s." boli navrhnuté a rozpracované softvérové nástroje OPTIexpert a OPTIcontrol pre optimalizáciu procesov plynulého odlievania ocele ako systémov s rozloženými parametrami. Pritom pre numerické modelovanie procesu plynulého odlievania bolo využité virtuálne softvérové prostredie ProCAST developera ESI Group Paríž. Úlohy riadenia a optimalizácie boli riešené pomocou softvérových blokov DPS Blockset for Simulink - third-party software product of The MathWorks, Inc. DPS Blockset for Simulink sa rozpracováva na riešiteľskom pracovisku v spolupráci so spoločnosťou The MathWorks v programe CONNECTIONS. Softvérové nástroje OPTIexpert a OPTIcontrol sú už druhý rok úspešne využívané vo Výskumno-vývojovom centre Železiarne Podbrezová, s.r.o. pri riešení úloh optimalizácie procesov plynulého odlievania ocele pre Železiarne Podbrezová, a. s. Zvláštna pozornosť bola venovaná výrobe nosného formátu 205R40 na zariadení plynulého odlievania ocele v Železiarni Podbrezová, a. s. v kategórii kotlových akostí, konkrétne 10CrMo9-10. Totiž pri tejto akosti boli v určitých prípadoch zaznamenané až 20% výmety vo výrobe valcovaných bezšvíkových rúr za tepla z celkovej vsádzky plynule odlievaných oceľových odliatkov. Pomocou navrhnutých softvérových nástrojov prebiehala komplexná numerická analýza a optimalizácia procesu výroby tohoto formátu. Výsledky numerických analýz boli verifikované v Plastometrickom laboratóriu Regionálneho Materiálově Technologického Výskumného Centra (RMTVC), VŠB – TU Ostrava. Navrhnutý a verifikovaný elasto-plastický numerický model v RMTVC VŠB - TU Ostrava dáva možnosť k lokalizácii vzniku trhlín iniciovaných medzi teplotou likvidu a teplotou solidu v dôsledku šmykových napätí, pôsobiacich počas fázovej premeny materiálu.

Navrhnutý a verifikovaný termický model dáva možnosť aj k lokalizácii miest vzniku termických trhlín, iniciovaných pod teplotou solidu. Vzhľadom k pohybu solidifikačného frontu smerom do vnútra odliatku zárodok trhlín pri nedostatočnej relaxácii materiálu môžu ďalej postupovať do vnútra odliatku čo dáva usmernenie k celkovým úpravám technológie sekundárneho chladenia.

Boli navrhnuté optimalizované prechody teplotných polí medzi jednotlivými ustálenými prevádzkovými režimami, ktoré riadiaci systém s numerickým senzorom v režime rozloženého sledovania garantuje pre zabezpečenie požadovaného stupňa relaxácie materiálu v procese plynulého odlievania kontiodliatkov. Pritom syntéza riadenia v priestorovej závislosti sa rieši ako extrémálna úloha aproximácie a v časovej závislosti sa využíva Kalmanov filter pri ohraničenom prediktívnom riadení s numerickým modelom procesu ochladzovania. Systém riadenia s rozloženými parametrami bol upravený pre meranie teplotných polí kontiodliatkov pomocou dvojfarebných pyrometrov umiestnených vo vybraných bodoch sekundárnej zóny chladenia pri zachovaní rozloženého charakteru riadených teplotných polí s cieľom zjednodušenia implementácie algoritmov riadenia.

Súhrn výsledkov riešenia projektu a naplnenia cieľov projektu v anglickom jazyku (max. 20 riadkov)

Within the project „Development of software support utilizing physical simulation for optimization of continuous casting processes as distributed parameter systems for Železiarne Podbrezová, a. s.“ the software tools OPTIexpert and OPTIcontrol were elaborated to optimize the continuous casting processes as distributed parameter systems. For the numerical modeling of continuous casting process a virtual software environment ProCAST from ESI Group Paris was utilized. The control and optimization tasks were solved by the software blocks of DPS Blockset for Simulink - third-party software product of The MathWorks, Inc. The DPS Blockset for Simulink is being elaborated at principal investigator's institute in cooperation with The MathWorks within the CONNECTIONS program. Software tools OPTIexpert and OPTIcontrol for the second year are being successfully utilized in the Research and Development Centre of Železiarne Podbrezová, a. s. – steel mills - in the optimization continuous casting processes for Železiarne Podbrezová, a. s. A special attention was paid to a production of the main cast section 205R40 on the continuous casting machine in Železiarne Podbrezová, a. s. listed in the category of boiler steel grades, namely 10CrMo9-10. In some cases the levels of measured defects in the hot rolling process were about 20% of the total batch consisting of continuous casting blocks. Using the proposed software tool a complex numerical analysis and optimization of production process was carried out. The results of numerical analyses were verified in Plastometric laboratory of Regionální Materiálově Technologické Výzkumné Centrum (RMTVC), VŠB – TU Ostrava. The proposed and verified elasto-plastic numerical model in RMTVC VŠB – TU Ostrava gives possibilities to localize thermally induced cracks between liq. and solidus temperatures caused by shear stresses, acting during the material's phase changes. The proposed and validated thermal model gives options for localization of thermally induced cracks, initiated under the material's solidus temperature. Regarding to the movement of solidification front to the center of the casting a crack may initiate and continue further into the center of the casting domain. Accordingly a secondary cooling program can be adjusted. The temperature field transitions were designed and optimized in-between individual operating modes, tracked by the control system with the numerical sensor, working in the distributed parameter mode, to guarantee the least possible thermally induced stress loads during the casting. The control synthesis in the spatial domain is solved as an extremal approximation problem while in the temporal domain a Kalman filter is used in frame of constrained model predictive control with the numerical model of the cooling process. The distributed parameter control loop was optimized for two color pyrometers in the selected locations of secondary cooling zone while ensuring the distributed nature of temperature fields with the objective of control algorithms implementation.