

Analýza vzniku vad při odlévání oceli 34CrMo4 na základě numerické simulace

Analysis of the Formation of Defects During the Casting of 34CrMo4 Steel Based on Numerical Simulation

Ing. Jana Růžička^{1,*}; doc. Ing. Adéla Macháčková, Ph.D.¹; Ing. Filip Radkovský, Ph.D.¹

¹ VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta materiálově-technologická, Katedra metalurgických technologií, 17. listopadu 2172/15, 708 00, Ostrava-Poruba, jana.ruzicka@vsb.cz

Abstrakt

Tato práce se zabývá analýzou vnitřních vad při odlévání rotoru setrvačnickové energetické jednotky z oceli 34CrMo4 s originální konstrukcí, a to s využitím numerické simulace. Cílem je posoudit vliv charakteru proudění taveniny, teplotního pole a průběhu tuhnutí na jejich vznik a distribuci v odlitku. Numerická simulace byla provedena v softwaru MAGMASOFT®, který umožňuje modelování proudění, přenosu tepla a solidifikace. Výsledky ukazují, že turbulentní proudění během plnění formy podporuje tvorbu oxidických produktů, jež představují zdroj nekovových vměstků. Oblasti s prodlouženou dobou tuhnutí a sníženým teplotním gradientem byly identifikovány jako kritické z hlediska vzniku pórovitosti. Z technologického hlediska je klíčové řízení procesu tuhnutí tak, aby docházelo k jejich řízenému přesunu do nálitkové soustavy. Optimalizace technologických parametrů lití tak umožňuje snížení výskytu vad a zvýšení vnitřní kvality odlitků.

Klíčová slova: ocel 34CrMo4; numerická simulace; pórovitost; tuhnutí

Abstract

This study analyses internal defects during the casting of a 34CrMo4 steel rotor for a flywheel energy storage system with an original design, using numerical simulation. The objective is to assess the influence of molten metal flow characteristics, the temperature field and the solidification process on their formation and distribution within the casting. The numerical simulation was performed using MAGMASOFT® software, which enables the modelling of flow, heat transfer and solidification. The results show that turbulent flow during mold filling promotes the formation of oxide products, which are a source of non-metallic inclusions. Areas with prolonged solidification times and reduced temperature gradients have been identified as critical in terms of porosity formation. From a technological standpoint, it is crucial to control the solidification process so that these defects are directed into the feeder system. Optimizing the casting process parameters thus reduces the incidence of defects and improves the internal quality of the castings.

Key words: 34CrMo4 steel; numerical simulation; porosity; solidification

1. Úvod

Kvalita vnitřní struktury ocelových odlitků zásadně ovlivňuje jejich mechanické vlastnosti a provozní spolehlivost, zejména u komponent vystavených cyklickému zatížení, jako jsou rotory setrvačnicků. Přítomnost vnitřních vad, zejména pórovitosti a nekovových vměstků, může vést ke snížení únavové životnosti a iniciaci trhlin. Zatímco tradiční hodnocení kvality odlitků je zaměřeno především na objemové vady, stále větší pozornost je věnována i vzniku a chování nekovových vměstků během procesu odlévání.

Ty vznikají především v důsledku interakce taveniny s okolním prostředím a jsou úzce spojeny s charakterem proudění během plnění formy. Turbulentní proudění podporuje zavzdušnění taveniny a vznik oxidických produktů, které jsou následně transportovány do objemu odlitku.

Významnou roli při vzniku a redistribuci vad a vměstků hraje také teplotní pole a průběh tuhnutí. Tyto faktory určují nejen jejich formování, ale i jejich konečné rozmístění v odlitku. Z technologického hlediska je klíčové řídit proces tuhnutí tak, aby docházelo k jejich přesunu do náliťkové soustavy, která je následně odstraněna. Přestože literatura primárně řeší problematiku plynulého odlévání oceli, popisované principy řízení teplotního pole, směrového tuhnutí a vzniku vnitřních vad jsou obecně aplikovatelné také na proces odlévání do forem, zejména z hlediska řízení solidifikace a omezení vzniku smršťovacích defektů [1].

Pro detailní analýzu těchto jevů se v současnosti využívají numerické simulační nástroje, například software MAGMASOFT®, které umožňují modelovat proudění taveniny, přenos tepla a proces tuhnutí v reálných podmínkách odlévání.

Cílem práce je analyzovat podmínky vedoucí ke vzniku vad při odlévání rotoru z oceli 34CrMo4 na základě numerické simulace a posoudit jejich vazbu na proudění taveniny, teplotní pole a proces tuhnutí. Práce současně využívá a dále rozvíjí přístup numerického modelování aplikovaný v předchozích studiích [2].

2. Materiály a metody

Pro numerické simulace byla zvolena nízkolegovaná ocel 34CrMo4 (1.7220), která je běžně využívána pro mechanicky namáhané součásti, u nichž je klíčová zejména únavová odolnost. V zakaleném stavu vykazuje vyvážené mechanické vlastnosti, zejména pevnost a houževnatost [3-5]. Chemické složení použité oceli je uvedeno v **tab. 1**. Materiálové vlastnosti byly definovány na základě databázových údajů softwaru MAGMASOFT® (materiál GS34CrMo4) s uvažováním jejich teplotní závislosti.

Tab. 1 Chemické složení oceli 34CrMo4 použité pro numerické simulace (hm. %) [6]

Tab. 1 Chemical composition of 34CrMo4 steel used for numerical simulations (wt. %) [6]

| Prvek | C | Si | Mn | P | S | Cr | Mo |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| hm. % | 0.340 | 0.400 | 0.650 | 0.020 | 0.015 | 1.000 | 0.375 |

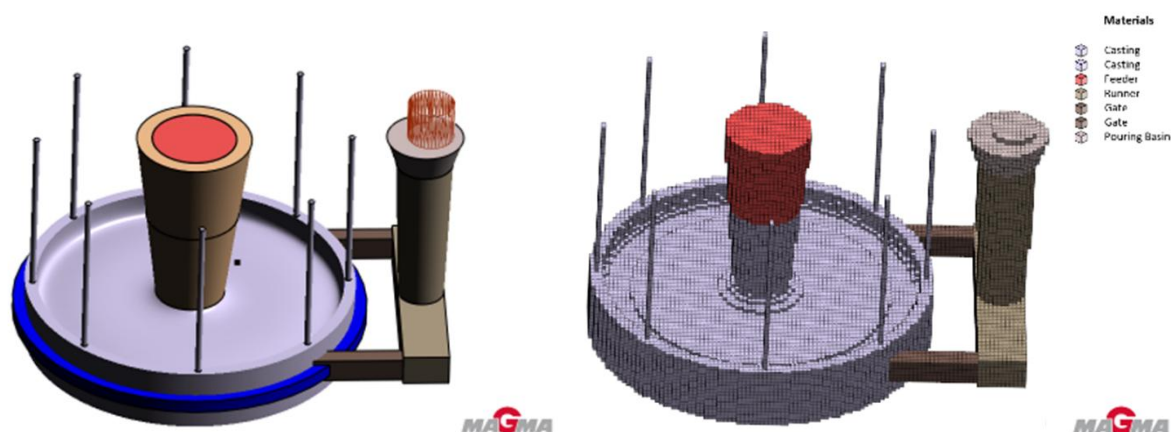
Numerická analýza procesu odlévání byla realizována s využitím simulačního softwaru MAGMASOFT®, který umožňuje řešení proudění taveniny, přenosu tepla a procesu tuhnutí v rámci jednotného výpočtového modelu. Simulace byla provedena pro gravitační odlévání rotoru setrvačnicku, přičemž geometrie odlitku byla vytvořena na základě 3D modelu a převedena do výpočtové sítě o přibližně 70 000 buňkách.

Klíčovým parametrem simulace byla rychlost plnění formy, která zásadně ovlivňuje charakter proudění taveniny a průběh plnění formy. Při vyšších rychlostech dochází k přechodu do turbulentního režimu proudění, což může vést k zavzdušnění taveniny a vzniku oxidických produktů. Tyto jevy představují významný faktor z hlediska vzniku vnitřních vad a nekovových vměstků.

Výstupy simulace jsou využity nejen pro identifikaci vad, ale i pro interpretaci podmínek jejich vzniku. Prezentované výsledky vycházejí z analýzy vybrané simulační varianty procesu odlévání. Cílem práce nebyla komplexní optimalizace technologického postupu prostřednictvím vícekritériálního simulačního návrhu, ale identifikace kritických oblastí z hlediska proudění, tuhnutí a vzniku vad.

3. Výsledky a diskuse

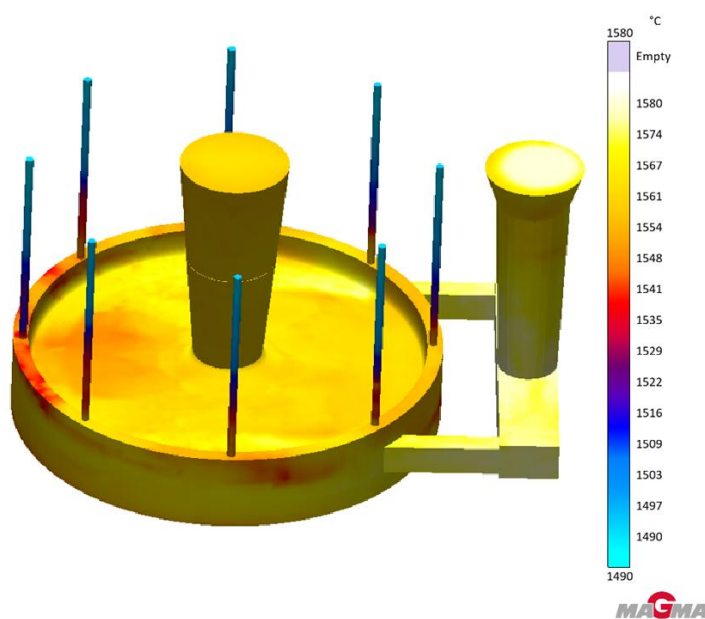
Geometrie odlitku rotoru a odpovídající výpočtová síť (**obr. 1**) byly navrženy s cílem dostatečně zachytit kritické oblasti z hlediska proudění a tuhnutí, zejména v okolí vtokového systému a v místech změny průřezu. Hustota sítě v těchto oblastech umožňuje spolehlivou interpretaci lokálních jevů ovlivňujících vznik vad.



Obr. 1 Geometrie odlitku rotoru (vlevo) a numerická výpočtová síť (vpravo)

Fig. 1 The geometry of the rotor casting (left) and the numerical computational mesh (right)

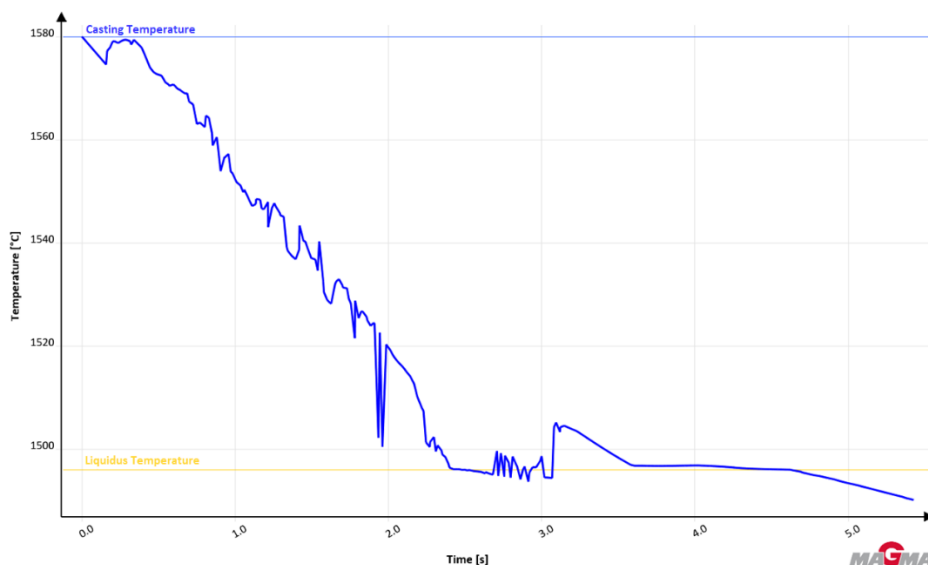
Jak je patrné z **obr. 2**, rozložení teploty na povrchu odlitku po zaplnění formy vykazuje výrazné teplotní gradienty mezi střední částí a okrajovými oblastmi. Nejvyšší teploty jsou soustředěny ve střední části odlitku a nálitku a ve vtokovém systému, což vede k prodloužené době tuhnutí v těchto oblastech. Tento stav vytváří podmínky pro akumulaci kapalně fáze a omezený odvod tepla, což je z hlediska vzniku vad kritické. Naopak rychlé ochlazování okrajových částí může vést k předčasnému tuhnutí, které omezuje plynulý tok taveniny a podporuje vznik nehomogenit ve struktuře.



Obr. 2 Rozložení teploty po zaplnění formy

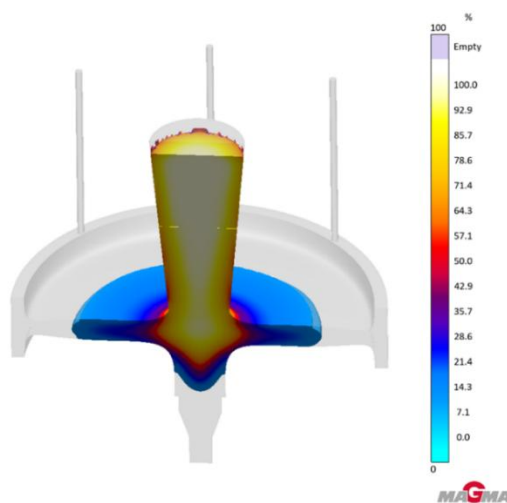
Fig. 2 Surface temperature distribution after mold filling

Vývoj minimální teploty během plnění formy je znázorněn na **obr. 3** a naznačuje lokální nestabilitu teplotního pole. Kolísání teplot v průběhu plnění lze interpretovat jako důsledek neustáleného proudění taveniny, včetně přechodů mezi laminárním a turbulentním režimem. Turbulentní proudění je spojeno se zvýšenou interakcí taveniny s okolním prostředím, což může vést k jejímu zavzdušnění a ke vzniku oxidických produktů. Tyto produkty představují potenciální zdroj nekovových vměstků, které jsou následně transportovány proudem taveniny [7].



Obr. 3 Vývoj minimální teploty během plnění formy
Fig. 3 Evolution of minimum temperature during mold filling

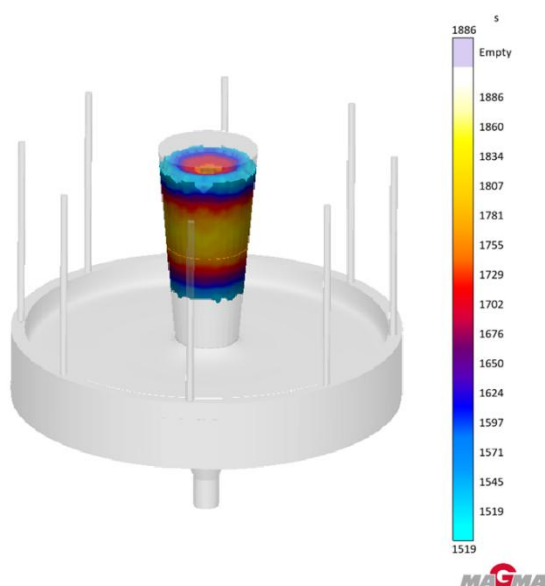
Na **obr. 4** je zachyceno rozložení kapalné fáze po ukončení lití, které ukazuje přetrvávání kapalného kovu ve střední části odlitku i nálitku. Tento jev indikuje nedostatečně řízené směrové tuhnutí, kdy nedochází k plynulému postupu tuhnutí směrem k nálitku. V důsledku toho vznikají oblasti se sníženým gradientem tuhnutí, které představují preferenční lokality pro koncentraci vad. Z hlediska transportu vměstků jsou tyto oblasti významné, neboť snížená rychlost proudění a prodloužená doba setrvání kapalné fáze podporují jejich zachycení v objemu odlitku. Z technologického hlediska lze tyto oblasti považovat za vhodné pro přesun vad a vměstků do nálitkové soustavy.



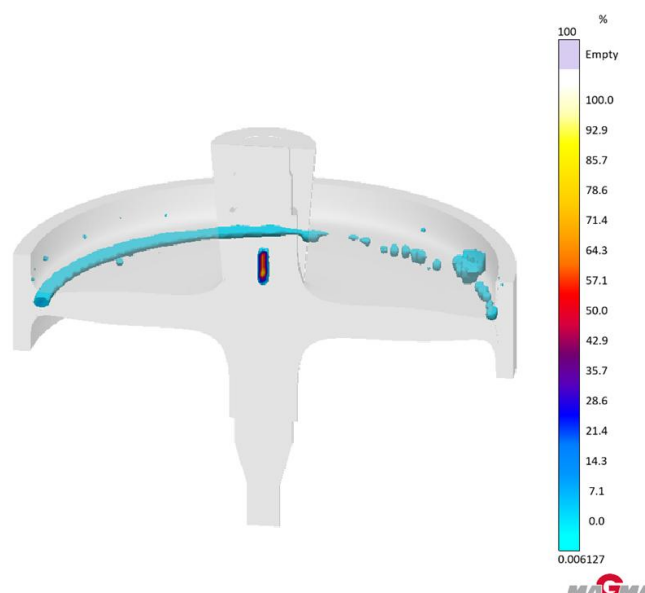
Obr. 4 Rozložení kapalné fáze po ukončení lití / **Fig. 4** Distribution of liquid phase after casting

Na tuto skutečnost navazuje **obr. 5**, kde je patrný lokální tepelný uzel v nálitkové soustavě. Tato oblast s prodlouženou dobou tuhnutí představuje zdroj kapalného kovu, avšak současně vede k nerovnoměrnému průběhu směrového tuhnutí. V důsledku přetrvávající kapalně fáze dochází ke snížení teplotního gradientu mezi odlitkem a nálitkem, což omezuje účinnost dosazování smršťovacích objemových změn. Tento stav vytváří podmínky pro vznik pórovitosti v přilehlých oblastech odlitku a současně podporuje zachycení vměstků v důsledku snížené intenzity proudění [7].

Celkové rozložení pórovitosti v odlitku je uvedeno na **obr. 6**. Nejvýraznější výskyt pórů je patrný ve střední části odlitku, dále v oblasti přechodů a v místech napojení geometrických prvků, zatímco menší podíl pórovitosti se objevuje také v oblasti okružní. Takové rozmístění souvisí s lokálním průběhem tuhnutí a s omezenou možností dosazování tekutého kovu během smršťování. Současně se jedná o oblasti, kde lze vzhledem k prodloužené době setrvání kapalně fáze a snížené intenzitě proudění předpokládat zvýšenou pravděpodobnost zachycení vad v objemu odlitku.



Obr. 5 Lokální tepelný uzel v nálitku
Fig. 5 Local hot spot in the feeder



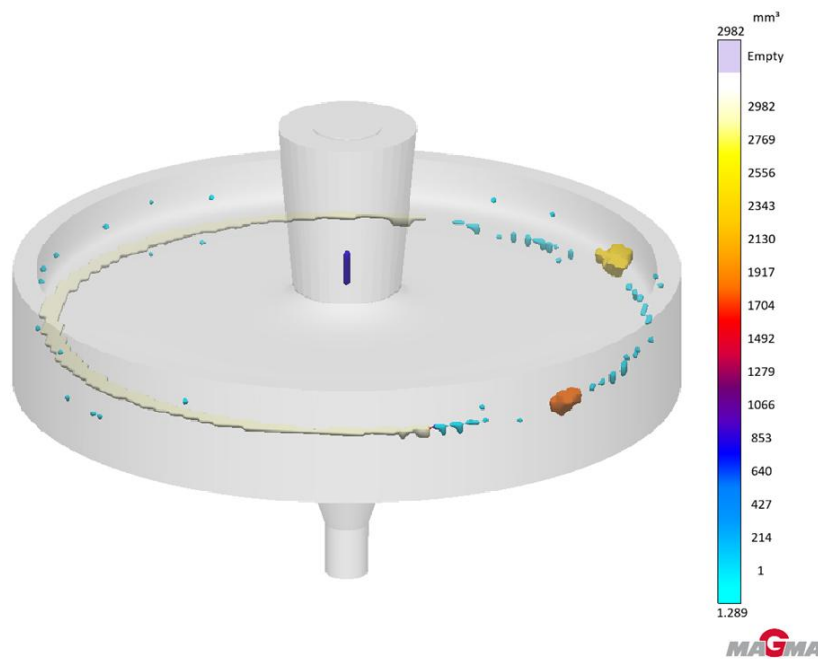
Obr. 6 Celkové rozložení pórovitosti v odlitku
Fig. 6 Total porosity distribution in the casting

Objem jednotlivých pórů v odlitku je znázorněn na **obr. 7**. Největší póry jsou lokalizovány zejména ve střední části odlitku a v okolí zářezů vtokové soustavy, kde jejich objem dosahuje nejvyšších hodnot, přičemž v obvodové oblasti okružní je patrný úzký protáhlý pór.

Tyto výsledky potvrzují, že pórovitost není rozložena rovnoměrně, ale soustřeďuje se do konkrétních lokalit s nepříznivými podmínkami tuhnutí. V těchto oblastech lze současně očekávat i akumulaci vad, neboť kombinace postupující solidifikace a omezeného proudění zvyšuje pravděpodobnost jejich zachycení a fixace ve struktuře.

Z hlediska komplexního hodnocení kvality odlitku je zásadní vzájemná vazba mezi prouděním, teplotním polem a procesem tuhnutí. Případné turbulentní proudění během plnění formy podporuje vznik oxidických vměstků, zatímco charakter tuhnutí ovlivňuje jejich následnou redistribuci a zachycení. Oblasti s nedostatečně řízeným tuhnutím a sníženým gradientem teploty tak představují kritická místa z hlediska kumulace jak pórovitosti, tak vměstků.

Z pohledu provozního zatížení rotoru setrvačnicku mají tyto defekty zásadní význam. Kombinace pórovitosti a vměstků vytváří lokální koncentrátoři napětí, které mohou působit jako iniciační místa únavových trhlin. Jejich přítomnost ve střední části odlitku, která je vystavena významnému mechanickému namáhání, tak představuje potenciální riziko snížení životnosti a spolehlivosti komponenty [8].



Obr. 7 Objem jednotlivých pórů v odlitku
Fig. 7 The volume of individual pores in the casting

4. Závěr

Numerická simulace procesu odlévání rotoru z oceli 34CrMo4 potvrdila významnou vazbu mezi charakterem proudění taveniny, teplotním polem, průběhem tuhnutí a vznikem vnitřních vad v odlitku. Bylo zjištěno, že oblasti s prodlouženou dobou tuhnutí a sníženým teplotním gradientem, zejména ve střední části odlitku a v okolí náliťkové soustavy, představují kritická místa z hlediska vzniku pórovitosti.

Současně bylo potvrzeno, že turbulentní proudění během plnění formy podporuje vznik oxidických produktů, které mohou představovat zdroj nekovových vměstků. Kombinace nepříznivých hydrodynamických a tepelných podmínek tak vytváří prostředí pro jejich zachycení a akumulaci v objemu odlitku.

Z technologického hlediska je však klíčové řízení procesu tuhnutí tak, aby docházelo k řízenému přesunu vad a vměstků do náliťkové soustavy, která je následně odstraněna. Správně navržené směrové tuhnutí a odpovídající teplotní gradient umožňují minimalizovat výskyt těchto defektů v samotném odlitku.

Z hlediska provozního zatížení rotoru mají tyto defekty zásadní význam, neboť mohou působit jako iniciační místa únavových trhlin a tím negativně ovlivňovat životnost komponenty.

Výsledky práce ukazují, že optimalizace technologických parametrů lití, zejména řízení rychlosti plnění formy a průběhu směrového tuhnutí, vede ke snížení výskytu vad. Současně umožňuje jejich cílenou lokalizaci mimo funkční část odlitku, a tím ke zvýšení jeho vnitřní kvality. Využití numerické simulace v předvýrobní fázi tak umožňuje optimalizovat technologii odlévání ještě před realizací samotného procesu, což vede ke snížení zmetkovitosti, efektivnějšímu využití materiálu a zkrácení výrobního času.

Poděkování

Tato práce byla vypracována v rámci v rámci dotačního programu „Podpora vědy a výzkumu Moravskoslezském kraji 2025“ (RRC/12/2025) a financována z rozpočtu Moravskoslezského kraje.

Literatura

- [1] DOLEJŠÍ, Zdeněk. *Plynulé odlévání oceli: tepelně technické poměry při plynulém odlévání oceli*. Poradenská příručka, č. 42. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1987.
- [2] RŮŽIČKA, Jana; MACHÁČKOVÁ, Adéla a RADKOVSKÝ, Filip (2025). Numerical Modeling of the Casting Process of Alloyed Steel 34CrMo4. In: *STEELSIM 2025: 11th International Conference on Modeling and Simulation of Metallurgical Processes in Steelmaking: 2-4 September 2025, Třinec*. Třinec, s. 236-241. ISBN 978-80-02-03097-3.
- [3] ZHENG, Qiang; LI, Kejian; YIN, Xueguo; LI, Bingbing; LI, Chunhong et al. *Corrosion Properties of 34CrMo4 Steel Modified by Shot Peening*. Online. Scanning, vol. 2017, s. 1928198. Dostupné z: <https://doi.org/10.1155/2017/1928198>. [citováno 2026-03-16].
- [4] CHENAKIN, Sergey; FILATOVA, Ver; MAKEEVA, Iryna a VASYLYEV, Mykhaylo. *Ultrasonic impact treatment of CoCrMo alloy: Surface composition and properties*. Online. Applied Surface Science, vol. 408, s. 11-20. ISSN 0169-4332. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.03.004>. [citováno 2026-03-16].
- [5] MATSUNAGA, Hisao; YOSHIKAWA, Michio; KONDO, Ryota; YAMABE, Junichiro a MATSUOKA, Saburo. *Slow strain rate tensile and fatigue properties of Cr–Mo and carbon steels in a 115 MPa hydrogen gas atmosphere*. Online. International Journal of Hydrogen Energy, vol. 16, s. 5739-5748. ISSN 0360-3199. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.02.098>. [citováno 2026-03-16].
- [6] MAGMA GmbH. MAGMASOFT® [computer software]. Version 6.1. Aachen: MAGMA GmbH, 2025.
- [7] CAMPBELL, John. *Complete Casting Handbook: Metal Casting Processes, Metallurgy, Techniques and Design*. Online. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2011. ISBN 978-1-85617-809-9. Dostupné z: <https://old.foundrygate.com/upload/artigos/ft0Ku31Q3bfcyfBS8gZTLyud5574.pdf>. [citováno 2026-03-16].
- [8] MURAKAMI, Yukitaka. *Metal Fatigue: Effects of Small Defects and Nonmetallic Inclusions*. Online. Oxford: Elsevier, 2002. ISBN 0-08-044064-0. Dostupné z: <http://nguyen.hong.hai.free.fr/EBOOKS/SCIENCE%20AND%20ENGINEERING/MECANIQUE/ENDOMMAGEMENT-RUPTURE/Metal%20Fatigue.pdf>. [citováno 2026-03-16].

INFORMATIVNÍ ČLÁNEK

Třinecké železárny udržely hospodaření v černých číslech díky úsporám. Tržby klesly o 2,8 miliardy

22. června 2026

Třinecké železárny, největší firma skupiny Moravia Steel, dosáhly v roce 2025 tržeb ve výši 44 536 milionů korun, což představuje pokles oproti 47 371 milionům korun v roce 2024. Výroba surové oceli zůstala stabilní na úrovni 2 424 kilotun. Výsledek hospodaření po zdanění činí 186 milionů korun.

Investice Třineckých železáren v roce 2025 dosáhly celkem 1 506 mil. Kč a byly zaměřeny především na modernizaci výroby, snižování provozních nákladů, obnovu zařízení a rozvoj robotizace a automatizace. Třinecké železárny jsou jediným výrobcem kolejnic a železničního příslušenství v České republice. Z celkového objemu prodeje tohoto segmentu (219 kt) směřovalo 90 % na export.

Originál článku naleznete zde: trz.cz