

## Aplikace vybraných statistických metod v metalurgii

### Application of Specific Statistical Methods in Metallurgy

Ing. Jan Morávka, Ph.D.<sup>1</sup>; Ing. Jan Kufa<sup>1</sup>; Ing. Radek Hermann<sup>2</sup>; Ing. Bohuslav Chmiel<sup>2</sup>; Ing. Jaromír Kaleta<sup>2</sup>; Ing. Tomáš Huczala, Ph.D.<sup>2</sup>; Ing. Marek Bilko<sup>2</sup>; Ing. Petr Podolinský<sup>2</sup>; Ing. Jiří Cibulka, Ph.D.<sup>2</sup>; Ing. Lukáš Pindor, Ph.D.<sup>2</sup>; Ing. Zdeněk Solowski<sup>2</sup>; Ing. Petr Mlčoch<sup>2</sup>; Ing. Petr Klus<sup>2</sup>; Ing. Rostislav Milata<sup>2</sup>

<sup>1</sup> MATERIÁLOVÝ A METALURGICKÝ VÝZKUM s.r.o., úsek 941 Metalurgický výzkum, Pohraniční 693/31, 703 00 Ostrava-Vítkovice, Česká republika

<sup>1</sup> TŘINECKÉ ŽELEZÁRNY, a. s., Technologie a výzkum, Průmyslová 1000, Staré Město, 739 61 Třinec, Česká republika

V článku je prezentována aplikace vybraných statistických metod při řešení výzkumných projektů v metalurgickém výzkumu a provozní praxi za delší časové období. Text článku je řazen do kapitol a podkapitol podle toku výroby, materiálu a energie v hutním podniku – v Třineckých železárnách, a.s. Jsou zde zahrnuty technologické (výrobní) úseky: aglomerace, vysoké pece, mimopecní odsíření surového železa, sekundární metalurgie (licí pánev, argónovací homogenizační stanice, pánvová pec, vakuovací stanice), obě zařízení plynulého odlévání oceli, spojitá jemná válcovací trať, spojitá drátová válcovací trať a válcovna předvalků a těžkých profilů. Dlouhodobě a se zvláštním zřetelem jsou analyzovány procesy na elektroocelárně, jako i ekologické aspekty použití mikrovlnných technologií a prosazování polotovaru z odpadů do výrobního procesu (na vysokých pecích a na elektroocelárně). Statistické metody vycházejí z analýzy závislosti sledovaných ukazatelů kvality polotovarů či výrobků (povrchová, podpovrchová, vnitřní kvalita, mechanické vlastnosti) anebo samotného technologického procesu (kvalita, efektivnost) na technologicko-provozních veličinách příslušného výrobního řetězce, počínaje chemickým složením surového železa anebo oceli a konče výrobními parametry finalizačních úseků, tj. jde o tzv. kvalimetrickou analýzu. Při řešení daných úloh analýzy je využita celá škála širokého a neustále se rozšiřujícího spektra statistických metod, které jsou k dispozici ve speciálních statistických programech. Mezi nejčastěji používané matematicko-statistické metody patří průzkumová (exploratorní) analýza, odhad (fitování) typu pravděpodobnostního rozdělení, korelační analýza, jednofaktorová i dvoufaktorová analýza rozptylu (ANOVA), dvouvýběrové a párové testy shody dvou středních hodnot a rozptylů, párová lineární, polynomická i nelineární regrese a lineární, nelineární a linearizovaná vícenásobná regrese statická i dynamická, zobecněné lineární modely (GLM), z vícerozměrných metod pak analýza hlavních komponent, shluková analýza, kanonická korelační analýza a metoda částečných nejmenších čtverců. V několika případech pak byla možnost použít i tzv. metodu DOE (Design of Experiment), tj. metodu optimálního plánování experimentů umožňující dosáhnout maximálně možného (obecně nelineárního interakčního) modelu při minimálním počtu pokusů. Tato metoda je uplatnitelná v experimentech na reálných objektech, ale i v rámci fyzikálního a numerického modelování metalurgických procesů. Mezi použité speciální statistické metody patří vícekritériální analýza variant, analýza systému měření (MSA), dynamické regresní modely, logistická regrese, matematické, matematicko-statistické a numerické modelování a metoda transformace fyzikálně-matematických a kybernetických modelů na diskrétní statistické regresní modely. Výsledky analýz jsou vždy průběžně konzultovány s výzkumníky a technologi z oboru hutnictví za účelem zvýšení jejich relevantnosti v hutních technologiích a přímé použitelnosti v daném výrobním úseku ve smyslu doporučení ke změnám jeho parametrů s cílem zvýšení kvality výroby či jejího zefektivnění.

**Klíčová slova:** statistické metody; matematická-statistika; aplikace; metalurgie

The paper presents an application of the specific statistical methods at solution of research projects in the field of metallurgical research over a long period of time. The text is divided into chapters and subchapters according to the production flow of material and energy in a metallurgical plant, specifically in the Třinec Iron and steelworks, a.s. Statistical methods are based on analyses of the dependence of the observed indicators of products quality (surface, subsurface, internal quality, mechanical properties) or of the technological process (quality, efficiency) on technological and operational variables. During solution a wide and continually expanding range of statistical methods was used. These methods are available in special statistical programs. The most frequently used statistical methods include exploratory analysis (EDA), estimation (fitting) of the type of probability distribution, correlation analysis, one-way and two-way analysis of variance (ANOVA), independent and paired sample t-tests, simple linear, polynomial and nonlinear regression and multiple linear, nonlinear and linearized regression (static and dynamic), generalized linear models (GLM), multivariate methods, such as principal component analysis, cluster analysis, canonical correlation analysis and partial least squares method. Special statistical methods include DOE (Design

of Experiment), i. e. method of optimal design of experiments allowing to achieve the best (generally nonlinear interaction) model in a minimum number of trials. This method is applicable in experiments using real objects, but also for physical and numerical modelling of metallurgical processes. Other special methods include multiple criteria decision analysis, measurement system analysis (MSA), dynamic regression, logistic regression, mathematical modelling and numerical method of transformation of physicomathematical and cybernetic models for discrete statistical regression models. On the basis of the long-term application of statistical methods in research projects in the field of metallurgical research and operational experience, it can be concluded, that use of appropriate statistical methods appears to be a useful part of solution of most tasks in metallurgy. It is necessary to consult all achieved results with relevant researchers and technologists during solution of research projects. These consultations are beneficial for both sides.

**Key words:** statistical methods; mathematical-statistics; application; metallurgy

Vzhledem ke složitým, obecně nelineárním, vícerozměrným a stochastickým, fyzikálně-chemickým jevům v hutnictví, se uplatnění *metod matematické statistiky* jeví jako nutná součást expertních analýz.

V případech, kde (zatím) neexistuje vhodný fyzikálně chemický model pro popis složitých metalurgických dějů, se jako vhodné jeví aproximační empirické *matematicko-statistické modely*.

Při aplikaci matematické i aplikované statistiky v oboru metalurgie byly použity následující statistické metody:

- průzkumová (exploratorní) analýza (EDA – Exploratory Data Analysis),
- analýza časových řad (TSA – Time Series Analysis),
- odhad (fitování) typu pravděpodobnostního rozdělení,
- korelační analýza,
- dvouvýběrové a párové testy shody dvou středních hodnot a rozptylů,
- jednofaktorová i dvoufaktorová analýza rozptylu (ANOVA – Analysis of Variance) s uvažováním parametrických i neparametrických testů,
- párová lineární, polynomická a nelineární regrese,
- lineární, nelineární a linearizovaná vícenásobná statická i dynamická regrese,
- zobecněné lineární modely (GLM),
- z vícerozměrných metod pak:
  - analýza hlavních komponent (PCA – Principal Component Analysis),
  - shluková analýza (CLU – Cluster Analysis),
  - kanonická korelační analýza (CCA – Canonical Correlation Analysis)
  - a metoda částečných nejmenších čtverců (PLS – Partial Least Squares),
- metoda plánovaných experimentů (DOE – Design of Experiments),
- vícekritériální analýza variant,
- analýza systému měření (MSA – Measurement System Analysis),
- logistická regrese,
- matematické, matematicko-statistické a numerické modelování,

- metoda transformace fyzikálně-matematických a kybernetických modelů na diskrétní statistické regresní modely.

Teoretický popis principů a metod aplikované matematické statistiky je uveden v literatuře [1 – 13].

Vybrané metody a postupy statistické analýzy dat dosud nacházely své úspěšné uplatnění při řešení nejrůznějších úkolů na celé řadě dílčích agregátů výrobního toku v Třineckých železárnách, a.s. (TŽ, a.s.).

Cílem a obsahem příspěvku je prezentovat výsledky *aplikace* metod matematické statistiky při řešení výzkumných projektů v oblasti metalurgického výzkumu a provozní praxe za delší časové období.

## 1. Aglomerační proces

Základním cílem spolupráce v analýze aglomeračního procesu v TŽ, a.s. (se dvěma provozy: aglomerace 1 a aglomerace 2) bylo řešení optimálního podílu paliva (koks) v aglomerační směsi, řízení zásobníku zpětného aglomerátu, nalezení algoritmu průběžného hledání polohy maximální teploty plynu v odsávacích komorách a analýza vlivu technologických parametrů na měrný výkon spékání na aglomeraci 1.

V analýze aglomeračního procesu v TŽ, a.s. byly aplikovány statistické metody: DOE (metoda optimálního plánování a vyhodnocení experimentů), matematické modelování a vícerozměrná regrese.

Jako příklady aplikace jsou v následujících podkapitolách uvedeny: hledání optimálního podílu paliva (koks) v aglomerační směsi a analýza vlivu technologických parametrů na měrný výkon spékání na aglomeraci 1.

### 1.1 Optimální podíl koks

V souladu s náplní řešeného vnitropodnikového výzkumného projektu v TŽ, a.s. byl vypracován a realizován návrh DOE (Design of Experiment) experimentu pokusného spékání aglomerační směsi obsahující *homogenizovanou směs* aglorudy a koncentráty, *koks* (K), *vápenec* (V) a *zpětný aglomerát* (ZA) [14, 15].

Cílem experimentu bylo získat matematický model závislosti optimálního podílu paliva (pro bilanci zpětného aglomerátu rovnou 100 %) na podílu vápence a podílu zpětného aglomerátu v aglomerační směsi.

Pro realizaci řešení byl zvolen plánovaný experiment podle metody DOE, protože je vhodným uspořádáním cílevědomě sestavených dílčích pokusů tak, aby rozsah (počet měření, pokusů) experimentu byl co nejmenší, ale objem i forma informací o zkoumaném procesu co největší (nejkvalitnější) [16 – 18].

Plán experimentu typu DOE byl z důvodu minimalizace počtu pokusů (které jsou úměrné ceně) a současně z důvodu podchycení potřebných interakcí faktorů navržen jako tzv. úplný faktorový plán se dvěma úrovněmi faktorů (dvouúrovňový), bez replikace a s doplněním o dva tzv. středové (centrální) body, takže obsahoval 10 pokusů.

Základními faktory experimentu byly relativní podíly koksu pK (%), vápence pV (%) a zpětného aglomerátu pZA (%), vztažené na tzv. rudnou vsázku vstupující do aglomeračního závodu (tab. 1):

Tab. 1 Návrh plánu třífaktorového experimentu  
Tab. 1 Design of the 3factorial experiment

Pokus	Faktory			Odezva	Poznámka
	pK	pV	pZA	Y	
	(%)				
1	3	0	50		
2	5	2	30		centrální bod
3	7	4	50		
4	7	0	10		
5	3	4	10		
6	5	2	30		centrální bod
7	3	4	50		
8	7	0	50		
9	7	4	10		
10	3	0	10		

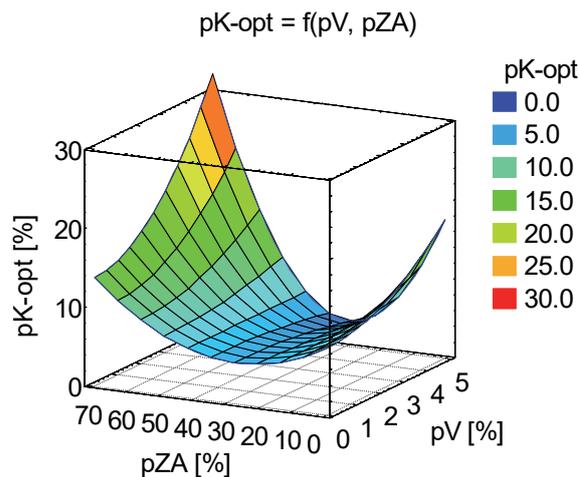
Navržený plán experimentu byl po konzultacích realizován v laboratoři pokusného spékání ve Výzkumném ústavu hutnictví železa (VÚHŽ) v Dobré u Frýdku-Místku.

Výsledný 3D regresní model, získaný metodou DOE, má, pro závislost optimálního podílu paliva – koksu pK, následující tvar:

$$pK = b_0 + b_1 pV^2 + b_2 pV^2 pZA + b_3 pV^2 pZA^2 + b_4 pZA + b_5 pZA^2 \quad (1)$$

Daný regresní model vykazoval vysoký koeficient determinace  $R^2 = 97,3\%$ .

Z uvedené regresní rovnice modelu vyplývá 3D zobrazení optimálního podílu paliva na podílu vápence a podílu zpětného aglomerátu, jak ukazuje obr. 1



Obr. 1 3D graf aproximované závislosti optimálního podílu paliva  
Fig. 1 3D plot of optimum rate of coke

Získaný model měl být implementován do tzv. výrobního informačního systému (VIS) TŽ, a.s., kde měl sloužit operátorům provozu aglomerace 1 (A1) jako rádce pro nastavení optimálního podílu paliva (koksu).

## 1.2 Analýza vlivu technologických parametrů na výrobnost aglomerace 1

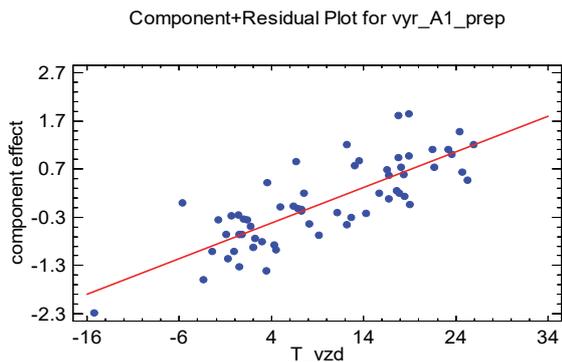
Hlavním cílem statistické analýzy bylo vyhodnocení vlivu jednotlivých výrobně-technologických proměnných na výrobnost aglomerace 1. Vycházelo se přitom z provozních dat zaznamenaných v letech 2012 – 2014.

Proces výroby aglomerátu byl popsán pomocí celkem 33 vysvětlujících proměnných, od kvality rudné vsázky po nastavení spékacího procesu. Výrobnost aglomerace 1 byla definována jako průměrná denní výrobnost aglomerace, přepočtená na stejnou hodnotu časového využití a m<sup>2</sup> spékací plochy ( $vyr_{AI\_prep}$  (t·m<sup>-2</sup>·den<sup>-1</sup>)).

Vyhodnocení vlivu jednotlivých technologických proměnných a jejich interakce s výrobností aglomerace 1 bylo provedeno pomocí metody vícerozměrné lineární regrese.

Regresní rabat (vysvětlovací schopnost nalezeného modelu) je 67 %. To znamená, že tato závislost je zhruba ze dvou třetin vysvětlena nalezeným regresním modelem a zhruba z jedné třetiny (33 %) je ovlivňována ještě jinými (neznámými) vlivy.

Na základě výsledného regresního modelu bylo možné detailně kvantifikovat vliv jednotlivých proměnných na výrobnost aglomerace 1, např.: „Teplota vzduchu při spékání zvyšuje výrobnost aglomerace. Zvýšení teploty o 10 °C zvýší výrobnost o 0,73 t·m<sup>-2</sup>·den<sup>-1</sup>“. Graficky je tato závislost vyjádřena na obr. 2.



Obr. 2 Parciální regresní graf (T\_vzd – vyr\_A1\_prep)

Fig. 2 Partial regression diagram (T\_vzd – vyr\_A1\_prep)

Získaná rovnice závislosti výrobnosti aglomerace 1 na jednotlivých technologických proměnných může být použita k predikci výrobnosti tohoto provozu a je východiskem k diskusi o možnostech zvyšování jeho výrobnosti při současných technologických podmínkách [19].

## 2. Vysokopecní pochod

Základním cílem matematicko-statistické analýzy vysokopecního pochodu v TŽ, a.s. (se dvěma vysokými pecemi VP4 a VP6) bylo vyhodnocení vlivu vybraných technologických proměnných na měrnou spotřebu vysokopecního koksu, stanovení koeficientu záměny vysokopecního koksu prachovým uhlím a vícekritériální analýza variant sypání vsázky.

Při analýze vysokopecního pochodu byly aplikovány statistické metody jako analýza EDA, 1f ANOVA, korelační analýza, párová regrese, vícenásobná regrese a vícekritériální analýza variant.

### 2.1 Vícekritériální analýza variant sypání vsázky na vysoké peci č. 4 v období zvýšeného podílu pelet ve vsázce

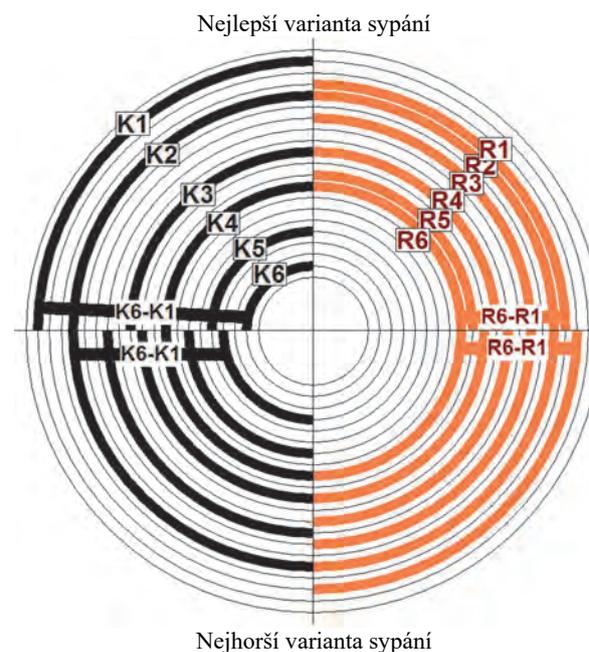
V této podkapitole je podrobněji popsána vícekritériální analýza variant sypání vsázky na VP4 v období zvýšeného podílu pelet ve vsázce.

Cílem bylo pomocí metody vícekritériální analýzy variant vyhodnotit efektivnost chodu VP4 při různém nastavení parametrů (kružnic) sypání koksové a rudné vsázky z materiálůvých komor sazebný do pracovního prostoru VP4 v období zvýšeného množství pelet ve vsázce. Výsledky obdobné analýzy již byly publikovány v [20].

V modelech vícekritériální analýzy variant je dána konečná množina  $m$  variant, které jsou hodnoceny podle  $n$  kritérií. Cílem je najít variantu, která je podle všech kritérií celkově hodnocena co nejlépe (nalézt variantu optimální či kompromisní), případně seřadit varianty od nejlepší po nejhorší.

Základní prvky řešení úlohy jsou jednak **varianty**, tzn. vzájemně se odlišující varianty sypání vsázky, dále **kritéria** – ukazatele, s jejichž využitím jsou varianty sypání kvantitativně ohodnoceny a nakonec jsou to **váhy kritérií**, čili preference kritérií pro hodnocení kvality vysokopecního pochodu vyjádřené odborníky na vysokopecní technologii.

Výsledkem analýzy bylo seřazení devíti hodnocených variant sypání od nejlepší po nejhorší z hlediska kvality vysokopecního pochodu. Jako velmi užitečné se ukázalo grafické porovnání nejlepší a nejhorší varianty sypání (obr. 3).



Obr. 3 Porovnání nejlepší (horní polovina kružnice) a nejhorší (dolní polovina) varianty sypání na VP4

Fig. 3 Comparison of the best (upper half of the circle) and of the worst (bottom half of the circle) burden distribution variants

Na základě výsledků provedené vícekritériální analýzy variant byla doporučena optimální varianta sypání koksové a rudné vsázky a rovněž formulovány obecné technologické závěry a doporučení pro sypání rudy a koksu v období zvýšeného podílu pelet ve vsázce na VP4 [21].

## 3. Mimopecní odsíření surového železa

Hlavním cílem matematicko-statistické analýzy technologického procesu mimopecního odsíření surového železa (MPO) v TŽ, a.s. bylo zjištění a posouzení efektivity aplikace tzv. patternů (dílčích procesů odsíření charakterizovaných různou intenzitou dávkování obou reagentů CaO a Mg) s ohledem na jejich průměrný stupeň odsíření a průměrné dávkované množství reagentů.

V oblasti analýzy činnosti tohoto zařízení (v období let 2009 až 2016) byly aplikovány následující statistické metody při řešení dílčích problémů:

- exploratorní analýza a analýza časových řad: kvantitativní proměnné MPO, stupeň odsíření,
- párová lineární korelace a regrese:
  - vypočtených a skutečných (naměřených) hodnot hmotnosti obou reagentů,
  - parametrů odsíření a čísel patternů (procesů),
- párová nelineární, linearizovaná a polynomičká regrese:
  - pro závislost konečného relativního hm. obsahu síry na jejím počátečním obsahu a podílu obou reagentů v surovém železe,
  - závislosti odsířovacího poměru na době odsíření,
  - závislosti stupně odsíření na (měrném) podílu reagentů (MMF model [22], Hillův model [23, 24]),
- vícenásobná nelineární (exponenciální, hyperbolická a hyperbolicko-polynomičká) i linearizovaná regrese, jako i regrese GLM:
  - poměru odsíření (podílu počátečního a konečného obsahu síry) na kvantitativních i kategoriálních parametrech odsíření,
  - skutečného množství odsířovadel (reagentů) na parametrech odsíření,
  - predikce hm. obsahu síry před odsířením na parametrech odpichu a přelévání surového železa,
- jednofaktorová analýza rozptylu (ANOVA) vybraných parametrů odsíření u obou stanic MPO, včetně analýzy absolutní a relativní efektivity patternů (procesů odsíření).

### 3.1 Použití Hillovy funkce

V této podkapitole je na ukázkou prezentováno použití tzv. Hillovy funkce při popisu závislosti stupně odsíření na množství reagentů. Hillova rovnice, model či funkce je používána v biologii (biochemii) v tzv. enzymatické kinematice [11].

Její použití ve fyzikální chemii při popisu dějů odsířování surového železa na pracovišti MPO v TŽ, a.s. vycházelo z potřeby najít vhodnou (semi) empirickou regresní funkci, která by popisovala závislost střední hodnoty stupně odsíření (jako ukazatele kvality/intenzity procesu odsíření) na (absolutním či relativním) množství reagentů (vápná CaO a hořčíku Mg).

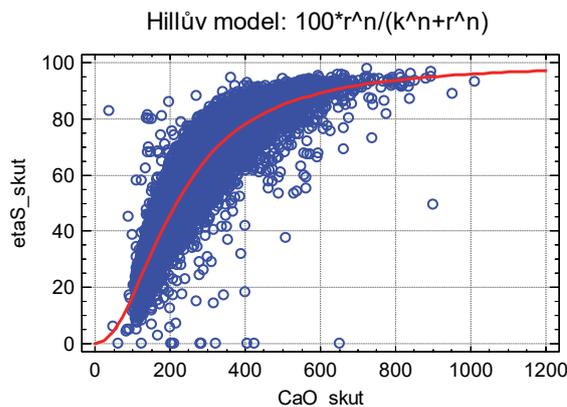
Z matematického hlediska je možné obecný 3parametrový Hillův model zapsat ve tvaru [23, 24]:

$$y = V_{\max} \cdot \frac{x^n}{k^n + x^n}, \quad (2)$$

kde  $y$  je počáteční reakční rychlost,  $V_{\max}$  představuje limitní (nepřesně maximální) rychlost dosaženou v systému,  $x$  označuje koncentraci substrátu, parametr  $n$

je tzv. koeficient sigmoidity, zvaný též Hillův a parametr  $k$  je tzv. pseudo Michaelisova konstanta.

Na obr. 4 [23, 24] je vidět výsledek aplikace obecné Hillovy funkce na reálná data MPO z roku 2013 pro závislost stupně odsíření (jako ekvivalentu rychlosti, intenzity chemické reakce) na skutečném dávkovaném množství CaO u všech patternů celkem asi pro 11 000 procesů odsíření.



Obr. 4 Stupeň odsíření vs. CaO\_skut

Fig. 4 Degree of the desulphurization vs CaO\_actual

Z výsledků aplikace tohoto modelu je zřejmé, že koeficient  $n = 2,068 \approx 2,0$ ,  $k = 216,4$  kg, index determinace  $R^2 = 83,4$  %. Hodnota pseudo Michaelisovy konstanty ( $k$ ) přímo odpovídá nejvíce efektivnímu a nejčastěji používanému patternu odsíření.

Aplikace modelu na reálná data odsíření pomocí analýzy ukázala, že Hillův model věrně popisuje mimopecní proces odsíření surového železa v TŽ, a.s.

## 4. Sekundární metalurgie

Hlavním cílem statistické analýzy procesu *mimopecního zpracování oceli* (MPZ, sekundární metalurgie) v TŽ, a.s. bylo zjištění kritických dílčích procesů a vlivu chemických prvků v oceli (hm. %) na navazující technologické procesy s dopadem na sledovanou kvalitu polotovárů a konečných výrobků.

Podrobný rozbor vlivu všech dostupných veličin úseku MPZ byl začleněn do statistické analýzy vlivu parametrů celého technologického toku na velikost podílu vyhovujících tyčí rozměru  $\varnothing 68$  mm, vyrobených v roce 2014 z precipitační oceli typu 38MnV ve spojitě jemně válcovně (KJT) – viz [25].

Poprvé v historii byly do datového souboru začleněny i všechny dostupné veličiny (parametry, proměnné) úseku MPZ, které sestavil a jejich vliv analyzoval Ing. Marek Bilko. Jím sestavený pracovní soubor pro vybrané tyče o průměru 68 mm pro tavby z úseků:

- kyslíkové konvertory (KK),
- sekundární metalurgie (MPZ),
- plynulé odlévání 2 (ZPO2)

obsahoval v konečné fázi 280 proměnných.

Analýza byla rozčleněna podle navazujících zařízení MPZ: KK - kyslíkový konvertor, LP - licí pánev, AR - argónovací homogenizační stanice, LF - pánvová pec, RH - vakuovací stanice.

V oblasti analýzy zařízení a procesů ve vyjmenovaných provozních úsecích byly aplikovány tyto statistické metody: analýza EDA, 1f ANOVA, párová regrese, vícenásobná i GLM regrese.

Další a podrobnější popis zjištěných skutečností z daného technologického úseku výroby je prezentován v kap. 6.

Výsledky získané analýzou v tomto úseku výroby byly úspěšně a efektivně realizovány v technologické praxi, a to se žádoucím dopadem na cílové zvýšení povrchové kvality oceli.

## 5. Zařízení plynulého odlévání oceli

Základním cílem analýzy procesu plynulého odlévání oceli v TŽ, a.s. (se dvěma pracovišti: ZPO1 a ZPO2) bylo zjištění vhodného nastavení dominantních veličin tohoto procesu (přehřátí oceli nad likvidem, licí rychlost, intenzita primárního a sekundárního chlazení, tlaky v tažně-rovnacích stolicích) za účelem stabilizace a optimalizace tohoto procesu s ohledem na metalurgickou délku předlitků a jejich povrchové i vnitřní teploty v předem stanovených místech licího oblouku. Vhodné nastavení daných veličin plynulého odlévání oceli má dopad na povrchovou i vnitřní kvalitu předlitků, která se následně přenáší do souvisejících polotovarů a výrobků (tyčí a drátů).

Při analýze daného technologického procesu byly použity následující statistické metody při řešení níže uvedených dílčích problémů:

- exploratorní analýza a analýza časových řad, párová korelace a lineární i nelineární regrese, vícenásobná statistická i dynamická, jako i zobecněná (GLM) regrese, simulační DOE experiment, matematické a matematicko-statistické modelování,
- dílčí řešené problémy:
  - analýza korelovanosti souhrnných průměrů a směrodatných odchylek veličin licí rychlosti, mazání a tření v určité tavbě,
  - matematický model rozdílu teplot vody v primárním chlazení (PCH),
  - vlastnosti a dávkování licích prášků,
  - matematicko-fyzikální model teploty povrchu sochoru,
  - návrh simulačních experimentů s fyzikálně-matematickým dynamickým modelem ZPO2 pro odlévání oceli značky S355x,
  - statistická analýza výsledků simulačního experimentu č. 1 s numerickým modelem ZPO2 firmy Concast pro odlévání oceli značky S355x,

- analýza míry reohřevu kontislitku po výstupu z krystalizátoru.

V následujících dvou podkapitolách je jako příklad aplikace uveden DOE návrh a statistické analýzy:

- výsledků simulačního experimentu s fyzikálně-matematickým dynamickým modelem ZPO2 firmy Concast pro odlévání oceli značky S355x,
- míry reohřevu kontislitku po výstupu z krystalizátoru.

### 5.1 DOE návrh a statistická analýza výsledků simulačního experimentu s fyzikálně-matematickým dynamickým modelem ZPO2 firmy Concast

S ohledem na sledovaný základní cíl *minimalizace povrchových vad tyčí* vyráběných z dané oceli S355x bylo rozhodnuto o numerickém simulačním experimentu s fyzikálně-matematickým dynamickým modelem ZPO2 firmy CONCAST (SM) – bližší informace jsou uvedeny v [26, 27].

Záměrem uskutečnění experimentů bylo získání výsledků pro vytvoření matematických modelů použitelných pro návrh nastavení základních parametrů ZPO2 se zaměřením na:

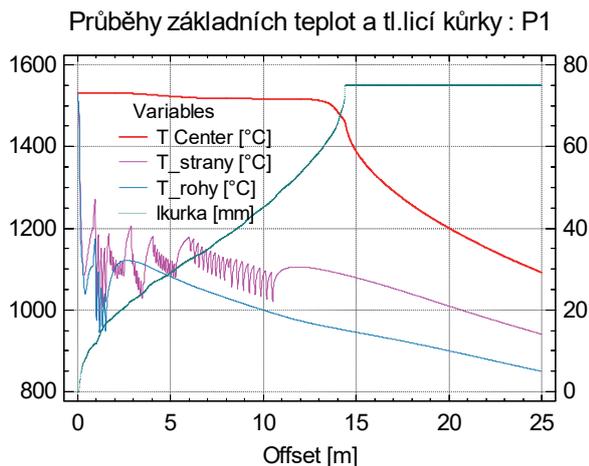
- *stabilizaci* (metalurgické délky, teploty povrchu sochoru na konci oblouku, tj. před tažně-rovnacími stolicemi) a
- *optimalizaci* (minimalizaci rozkmitu, či variability teplot v krystalizátoru a v zónách sekundárního chlazení)

uvedených charakteristických veličin při měnicích se základních veličinách: *přehřátí oceli*, *licí rychlost* a *intenzita sekundárního chlazení* (SCH) v jednotlivých zónách (zvláště v 1. zóně).

Simulace měly být uskutečněny pomocí SM Concast i VUT Brno s následným ověřením pomocí provozních experimentů na ZPO2.

S ohledem na maximalizaci výpovědní schopnosti získané informace a minimalizaci počtu pokusů experimentu byla pro návrh a vyhodnocení simulací zvolena metoda DOE. Experiment vycházel z úplného 3faktorového dvouúrovňového plánu s jedním centrálním bodem, který měl pro 3 veličiny (tzv. faktory)  $2^3 + 1 = 9$  pokusů (P1 ÷ P9).

Pro názornost je na obr. 5 znázorněn průběh prvotních charakteristických veličin po délce licího oblouku (od menisku až po paličky) pro pokus P1. Jsou to jak teplotní parametry předlitku – sochoru (teplota v jádru  $T_{center}$ , průměrná teplota stěn  $T_{strany}$  a průměrná teplota hran  $T_{rohý}$ ), tak i průměrná tloušťka licí kůrky:



Obr. 5 Průběh základních veličin – pokus P1  
Fig. 5 Development of the basic variables – experiment P1

Kritéria *optimality* byla definována prostřednictvím středních hodnot a variačních rozpětí rozdílů průměrných teplot stěn a hran po celé délce SCH, jako i v jeho jednotlivých zónách.

S ohledem na minimalizaci odchylek uvedených parametrů se jevílo jako vhodné, aby optimální metalurgická délka dosahovala vyšších hodnot, a to více jak 17 či 18 m, kdy se konec tekuté zóny v ose předlitku nachází za tažně-rovnacími stolicemi (TRS). Tím se docílí zmenšení povrchového i vnitřního odporu a pnutí při ohýbání, rovnání a tažení předlitku. Takováto volba vede současně k vyšším licím rychlostem.

Cílem úlohy *stabilizace* metalurgické délky byla skutečnost, že zvolená (optimální) metalurgická délka ( $L_m$ ) by se neměla měnit při změnách základních tří ovlivňujících veličin, které byly stanoveny pro simulační experiment (*přehřátí oceli*, *licí rychlost* a *intenzita SCH* v její 1. zóně).

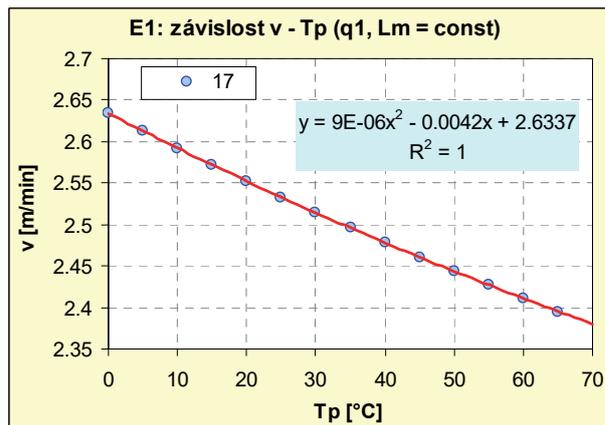
Regresní model závislosti metalurgické délky  $L_m$  na daných veličinách získaný metodou DOE má tvar:

$$L_m = b_0 + b_1 \cdot T_p + b_2 \cdot v + b_3 \cdot q1 + b_4 \cdot v \cdot T_p + b_5 \cdot v \cdot q1 + e \quad (3)$$

kde  $b_i$  jsou regresní koeficienty regresního modelu (DOE),  $e$  jsou rezidua regresního modelu,  $T_p$  je přehřátí oceli nad likvidem,  $v$  je licí rychlost,  $q1$  je intenzita sekundárního chlazení (SCH) v dominantní 1. zóně.

Na základě uvedeného modelu byl pro konstantní hodnotu metalurgické délky (požadavek stabilizace této veličiny), tj. pro  $L_m = \text{const} = L_{mc}$ , odvozen požadovaný model závislosti *licí rychlosti* na *přehřátí*.

Model byl zadán v podstatě implicitně, a proto byl řešen numericky. Řešení pro případ  $L_m = 17$  m v grafické podobě ukazuje obr. 6.



Obr. 6 Graf závislosti  $v - T_p$  pro  $L_m = 17$  m  
Fig. 6 Diagram of the relation  $v - T_p$  for  $L_m = 17$  m

Z obr. 6 je zřejmé, že optimální závislost  $v = f(T_p)$  má tvar konvexní kvadratické závislosti, přičemž pro zvolené  $L_m = 17$  m by pro  $T_p = 0$  °C měla být licí rychlost asi  $2,63 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ , pro rozmezí  $T_p \in (5; 65)$  °C by se licí rychlost měla měnit pouze asi o  $0,2 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ , a to v rozmezí asi od  $2,6$  do  $2,4 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ .

Odvozená optimální konvexní kvadratická závislost licí rychlosti ( $v$ ) na přehřátí ( $T_p$ ) umožňuje *stabilizaci* hodnot metalurgické délky při volbě její konstantní (*optimální*) hodnoty.

## 5.2 Analýza míry reohřevu kontislitku po výstupu z krystalizátoru pomocí simulačního DOE experimentu

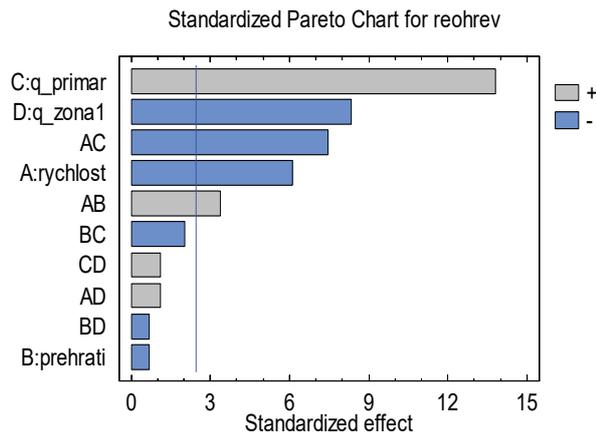
Pro vyhodnocení vlivu vybraných technologických faktorů na velikost reohřevu kontislitku po výstupu z krystalizátoru na zařízení plynulého odlévání ZPO2 v TŽ, a.s. byl navržen DOE experiment, kde jednotlivé pokusy představovaly simulace v *Off-line teplotním modelu ZPO2*. Experiment sledoval 2 základní cíle:

- určit ty faktory, jež mají dominantní vliv na velikost reohřevu,
- zjistit takové nastavení faktorů, které umožní minimalizovat velikost reohřevu.

Reohřev povrchu oceli po výstupu z krystalizátoru byl definován jako rozdíl maximální teploty v 1. zóně sekundárního chlazení a teploty na konci krystalizátoru.

Z množiny technologických faktorů, které potenciálně ovlivňují míru reohřevu povrchu kontislitku byly vytipovány čtyři hlavní faktory: rychlost lití, přehřátí oceli, průtok vody v krystalizátoru a průtok vody v 1. zóně. Byl sestaven plán experimentu DOE a jednotlivé pokusy provedeny simulací podle teplotního modelu.

Získaný model je statisticky významný, s výpovědní schopností 96,4 %. Vliv sledovaných faktorů na výši reohřevu kontislitku je zobrazen na tzv. Paretově grafu (obr. 7).



Obr. 7 Paretův graf efektu faktorů  
Fig. 7 Pareto chart of factors effect

Výsledkem realizovaného simulačního DOE experimentu bylo pochopení vlivu vybraných technologických faktorů na výši reohřevu kontislitku po výstupu z krystalizátoru, což umožnilo a usnadnilo přípravu navazujících provozních experimentů [28].

## 6. Spojitá jemná válcovací trať

Hlavním cílem analýzy technologického procesu a povrchové kvality odlévaných *sochorů* na ZPO2 s dopadem na sledovanou kvalitu válcovaných *tyčí* (a z nich následně vyrobených *řetězů*) na spojitě jemné válcovací trati (kontijemná trať KJT) v TŽ, a.s. (v období roků 2011 až 2016) bylo nalezení ovlivňujících (nezávislých) proměnných z celého předchozího toku výroby i ze samotného válcovacího procesu, které se projeví na povrchové kvalitě daných výrobků.

V analýze daného technologického procesu byly použity následující statistické metody při řešení níže uvedených dílčích problémů:

- EDA a TSA analýza, jednofaktorová ANOVA, vícenásobná korelace, párová a vícenásobná i zobecněná GLM regrese, matematické modelování,
- dílčí řešené problémy:

### Tyče

- statistická analýza vybraných veličin měřených v oblasti krystalizátoru na licích proudcích LP3 a LP8 v určité tavně, odlévané na ZPO2, kdy byly na obou proudcích použity odlišné licí prášky, a to s ohledem na ukazatel povrchové kvality oceli,
- analýza vlivů na povrchové vady (o hloubce max. 0,3 mm) kruhových tyčí průměru 60 a 70 mm, odválcovaných ze sochorů odlitých na ZPO2 na licím proudci LP8 v určité tavně z oceli značky S355x,
- analýza vlivů na povrchové vady kruhových tyčí průměru 35, 70, 80 mm a všech průměrů, odválcovaných ze sochorů odlitých na ZPO2 z oceli značky S355x,

- statistická analýza povrchových vad 11 tyčí o průměru 70 mm odválcovaných z 11. sochoru odlitého na LP8 ZPO2 v určité tavně z oceli značky S355x,
- statistická analýza vadnosti tyčí průměru 60 mm vyrobených z oceli značek S355 ve 260 zakázkách v určitém období s ohledem na vybrané výrobní parametry KKO a ZPO2,
- statistická analýza vlivu parametrů celého technologického toku (KK – MPZ – ZPO2 – KJT, včetně vlivu parametru okolního vzduchu v době technologických operací na těchto zařízeních) na velikost podílu vyhovujících tyčí rozměru  $\varnothing$  68 mm, vyrobených v roce 2014 z vybrané oceli na provozu KJT. Základní pracovní soubor obsahoval 320 proměnných a 2 717 záznamů (řádků) vztahujících se k zakázkám dodávek tyčí z dané oceli. Z výsledků rozsáhlé analýzy vyplynulo, že míra vypovídací schopnosti ukazatele kvality tyčí klesala ve směru toku materiálu v technologii výroby: nejlepší vypovídací schopnosti tohoto ukazatele bylo dosaženo na úseku KK – MPZ, pak na úseku ZPO2 a nejméně na posledním úseku KJT,

### Řetězy

- statistická analýza dat za účelem zjištění vlivu výrobních parametrů na povrchovou kvalitu a mechanické vlastnosti tyčí z vysokopevnostní řetězové oceli,
- statistická analýza výrobně-technologických dat procesu výroby kruhových tyčí pro řetězy na provozu KJT v TŽ, a.s. s ohledem na ukazatel povrchové kvality oceli v zakázkách za období 1 roku,
- statistická analýza výrobně-technologických dat procesu výroby kruhových tyčí pro řetězy na provozu KJT v TŽ, a.s. s ohledem na *nárazovou práci* v zakázkách za období 1 roku,
- statistická analýza výrobně-technologických dat procesu výroby kruhových tyčí pro řetězy na provozu KJT v TŽ, a.s. s ohledem na jejich *nárazovou práci* i *povrchovou kvalitu* v zakázkách za období 1 roku,
- matematický model závislosti licí rychlosti na průměru kontislitku ve tvaru funkční závislosti typu *hyperboly 2. stupně* (mocninné kvadratické závislosti se záporným mocnitelem),

### Sochory

- prvotní statistická analýza povrchových defektů tří sochorů detekovaných laserovým profiloměrem Micro-Epsilon (pracovníky VUT Brno) a odpovídajících povrchových vad zjištěných defektoskopickým zařízením Circoflux na tyčích průměru 70 mm pro vybrané sochory odlité na třech různých licích proudcích ve zvolené tavně z oceli značky S355x,

- o statistická analýza povrchových defektů 5 sochorů změřených profiloměrem VUT a povrchových vad detekovaných zařízením Circoflux,
- o statistická analýza výsledků detekce defektů na 19 sochorech odlitých z oceli určité značky ve vybrané tavbě a odpovídajících vad na tyčích průměru 72 mm při použití laserové triangulační metody v březnu roku 2015,
- o korelace mezi počtem vad zachycených na sochoru pomocí laserové triangulace a různými kritérii povrchové kvality tyčí u vybrané značky oceli,
- o dotazy, připomínky, návrhy a statistická analýza ke zprávě VUT Brno: Kontrola kvality povrchu sochoru, hledání propadlých stěn na sochorech, návrh vhodné filtrace naměřených dat LTM (vyhlazovací filtr autorů *Hodrick-Prescott* a nastavení jeho jediného parametru), definice křivosti profilu (*variáční rozpětí*, definované jako rozdíl maxima a minima filtrovaných naměřených hodnot – jde o rozkmit křivosti, rozkmit zvlnění profilu strany sochoru, jako i činitel kmitavosti PPN – počet průchodů nulou).

Souhrnné výsledky ukazují, že největší nepříznivé vlivy na povrchovou kvalitu tyčí se vyskytují na počátku procesu (KK – MPZ), které se dále přenáší s přidáváním dalších nepříznivých vlivů na následujících úsecích (ZPO2, KJT). Daným prvotním vlivům na kvalitu je tedy třeba věnovat náležitou pozornost již na samém počátku materiálového toku v technologii výroby.

### 6.1 Modelování vlivu tepelně-teplotních poměrů při odlévání sochorů na povrchovou kvalitu tyčí

V této podkapitole je jako příklad aplikace uvedeno kyberneticko-statistické modelování vlivu tepelně-teplotních poměrů při odlévání sochorů na povrchovou kvalitu tyčí (blíže viz [29, 30]).

Cílem řešení byla analýza chování základního ukazatele povrchové kvality tyčí na základě sestaveného fyzikálně adekvátního modelu podchycujícího tepelně-teplotní poměry při odlévání sochorů.

Na základě zjednodušující fyzikální interpretace byl pro měřenou povrchovou teplotu odléváných sochorů sestaven aproximační dynamický kybernetický model, z něj pak spojitý matematický model ve tvaru obyčejné diferenciální rovnice s konstantními koeficienty. Tento model lze následně pomocí diskretizace času převést na matematický model diskrétní ve tvaru obyčejné diferenční rovnice s konstantními koeficienty a v konečném důsledku na model regresní.

Protože ukazatel povrchové kvality tyčí vykazuje charakter pravděpodobnosti výskytu jevu, byl při regresní analýze dat použit vícenásobný logistický regresní model.

Pro ověření modelu byla vybrána data z konkrétní tavby při odlévání oceli značky S355x na krajním LP8 zaří-

zení ZPO2 v TŽ, a.s. a při válcování čtvercových sochorů 150×150 mm do kruhových tyčí Ø 70 mm na provozu KJT.

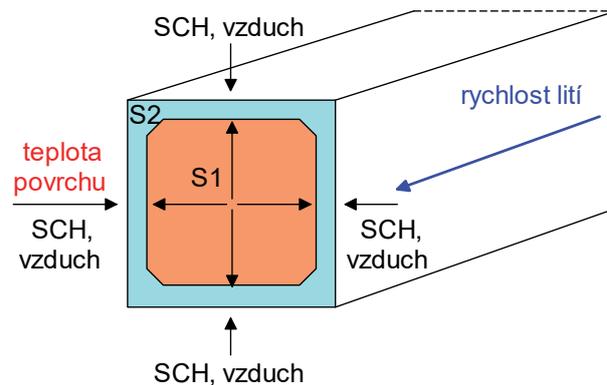
Fyzikální interpretace průběhu povrchové teploty sochorů (fyzikální model) a kybernetický (staticko-dynamický) teplotní model vycházejí z představy, že na měřené povrchové teplotě sochoru se projevují dva kombinované protichůdné vlivy:

- silnější, *dlouhodobější* vliv reohřevu prostřednictvím tepelné kapacity tekutého jádra sochoru a tepelného toku (přímo úměrně závislého na lici rychlosti)

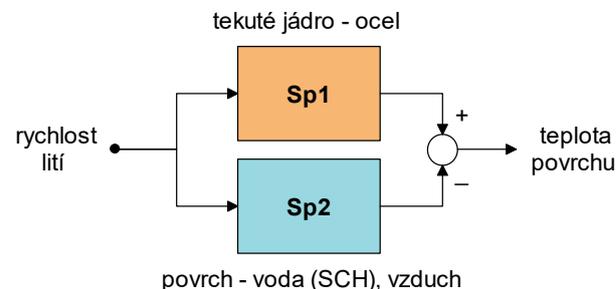
versus

- slabší, *krátkodobější* a přechodný vliv chlazení vodou v oblasti sekundárního chlazení (SCH, jehož chladicí intenzita je přímo úměrně závislá na lici rychlosti), jakož i dlouhodobý vliv ochlazování povrchu sochoru prouděním okolního vzduchu (asi nejslabší vliv).

Schematicky (fyzikálně a kyberneticky) je protipůsobení (antiparalelní působení) obou vlivů znázorněno na obr. 8, 9 (kde S1 a S2 jsou statické aproximační dílčí tepelné soustavy sochoru, Sp1 a Sp2 jsou jejich kybernetické dynamické ekvivalenty ve smyslu dynamických proporcionálních soustav 1. řádu):



Obr. 8 Fyzikální schéma teploty povrchu sochoru  
Fig. 8 Physical scheme of billet surface temperature



Obr. 9 Kybernetické schéma teploty povrchu sochoru  
Fig. 9 Cybernetic scheme of billet surface temperature

Postupným převodem modelů lze pro povrchovou teplotu sochoru dostat obecnou diferenční rovnici, z níž už lze sestavit konkrétní vícerozměrnou (vícenásobnou) lineární dynamickou regresní rovnici (v parametrech i proměnných) s chybovým členem:

$$y_i = d_0 + d_2 y_{i-1} - d_3 y_{i-2} + f_1 v_i + f_2 \Delta v_i + \varepsilon, \quad (4)$$

kde regresand  $y$  je teplota povrchu sochoru,  $d_0$  je absolutní člen a  $\varepsilon$  je chybový (reziduální) člen regresní rovnice.

Ukazatel povrchové kvality tyčí  $Q$  lze převést na ukazatel  $rQ$ , který má charakter pravděpodobnosti výskytu jevu, takže nabývá hodnot z intervalu  $\langle 0;1 \rangle$ .

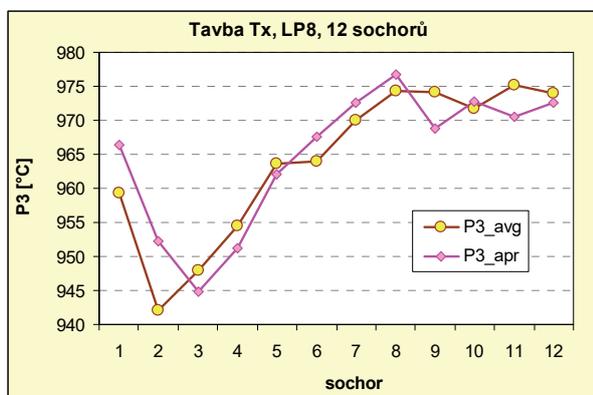
Konečný tvar modelu výskytu povrchových vad tyčí s ohledem na licí rychlost a její změnu ve formě vícenásobného logistického regresního modelu je následující:

$$u = b_0 + b_1 \cdot v + b_2 \cdot dv + \varepsilon, \quad (5)$$

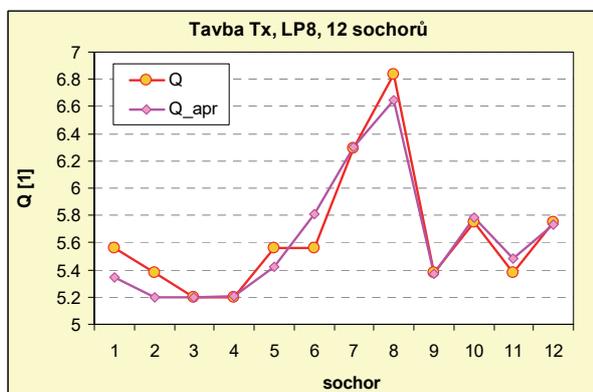
$$y = rQ = \frac{\exp(u)}{1 + \exp(u)} = \frac{e^u}{1 + e^u} = \frac{1}{1 + e^{-u}}, \quad (6)$$

kde je  $u$  – pomocná vstupní proměnná charakteru rychlosti ( $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ ), parametry  $b_i$  – regresní koeficienty modelu, index  $i$  v rozmezí  $\langle 0;k \rangle$  pro  $k$  regresorů,  $v$  – licí rychlost ( $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ ),  $dv$  – diferenciální změna, diference licí rychlosti  $\approx \Delta v$  ( $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ ),  $y$  – odezva  $\in \langle 0;1 \rangle$  (-), regresand  $rQ$  – pravděpodobnostní ukazatel povrchové kvality tyčí  $\in \langle 0;1 \rangle$  (-).

Výsledky vícenásobné dynamické regresní analýzy pro povrchovou teplotu  $P3$  a vícenásobné statické logistické regrese pro ukazatel povrchové kvality tyčí  $Q$  jsou v grafické formě prezentovány na obr. 10, 11:



Obr. 10 Časový predikční graf teploty  $P3$  u sochorů  
Fig. 10 Time prediction graph of the temperature  $P3$  for billets



Obr. 11 Časový predikční graf ukazatele kvality  $Q$  u tyčí  
Fig. 11 Time prediction graph of the quality indicator  $Q$  for steel bars

Z výsledků regresní analýzy je zřejmé, že na oba základní regresandy  $P3$  a  $Q$  měla vliv licí rychlost a její změna se stejným kladným znaménkem a s přibližně stejnou souhrnnou vypořádací schopností kolem 86 %.

Logistický model překvapivě ukázal, že vliv změny licí rychlosti byla asi 2,6krát větší než vliv samotné licí rychlosti.

Na základě výsledků dané analýzy byla formulována doporučení pro řízení tavby, která byla v praxi realizována ve smyslu omezení maximální změny licí rychlosti a pozvolného nárůstu nebo poklesu skutečné licí rychlosti ve srovnání s rychlostí nastavenou operátorem (žádanou rychlostí).

## 7. Spojitá drátová válcovací trať

Hlavním cílem analýzy technologického procesu a kvality válcovaných drátů na spojité drátové válcovací trati (kontidrátová trať KDT) v TŽ, a.s. bylo nalezení vlivných proměnných z celého předchozího toku výroby i ze samotného válcovacího procesu, které měly vliv na ukazatele povrchové kvality drátů (blíže [31 – 34]).

V oblasti analýzy tohoto technologického procesu byly použity následující statistické metody při řešení níže uvedených dílčích problémů:

- exploratorní EDA analýza, jednofaktorová ANOVA, korelační analýza, normalizační mocninná Boxova-Coxova transformace, párová lineární i nelineární a vícenásobná regrese, matematická analýza,
- dílčí řešené problémy:
  - hodnocení povrchové kvality sochorů z jisté tavby u značky QST32-3,
  - analýza vlivu vybraných technologických parametrů na povrchovou kvalitu drátů ze šroubárenských nízkouhlíkových a MnTiB ocelí v období leden 2012 – únor 2013 s ohledem na ocelárenské a válcovské parametry,
  - normalizační mocninná Boxova-Coxova transformace ukazatelů povrchové kvality drátů,
  - statistické vyhodnocení vytipovaných parametrů odlévání šroubárenských, nízkouhlíkových a MnTiB ocelí na ZPO2 v souvislosti s optimalizací lití těchto jakostí, s rozčleněním na dvě části,
  - prvotní statistická analýza výrobně-technologických dat procesu výroby drátů pro šrouby na provozu KDT v TŽ, a.s.,
  - statistická analýza výrobně-technologických dat procesu výroby drátů z oceli jakosti C10CE pro šrouby na provozu KDT v TŽ, a.s.,
  - fyzikálně-matematický model závislosti rychlosti válcování na průměru drátu a délky sekce na průměru drátu ve tvaru hyperboly 2. stupně,
  - statistická analýza výrobně-technologických dat procesu výroby drátů z oceli jakosti MnTiB pro šrouby na provozu KDT v TŽ, a.s.,

- vytvoření vzorců dle normy SEP 1664 pro výpočet prokalitelnosti při Jominyho zkoušce z chemického složení MnTiB oceli pomocí vícenásobné regrese,
  - statistická analýza výrobně-technologických dat procesu výroby drátů z oceli jakosti MnTiB pro šrouby na provozu KDT v TŽ, a.s.,
  - statistické vyhodnocení parametrů lití, definovaných objednatel, na parametry RQI a na počet fatálních vad naměřených defektometrem na KDT u taveb uhlíkových drátů s hm. obsahem C = 0,6 – 0,9 % odlitých v 1. pololetí 2014,
  - statistická analýza vadnosti drátů kordových a víceuhlíkových ocelí vyrobených v určitém období roku 2014 s ohledem na vybrané výrobní parametry ZPO2 a KDT,
  - nelineární aproximace a regrese Grossmanova diagramu, diagramu kritického průměru, závislosti tvrdosti na vzdálenosti od čela vzorků,
  - statistická analýza parametrů chemického složení a mechanických vlastností drátů vybraných značek šroubářenských ocelí s cílem definování detekčních mezí pro nové tavby.
- analýza výsledků mezilaboratorního porovnávacího měření tvrdosti u kolejnic určitého typu,
  - sestavení a verifikace predikční regresní rovnice pevnosti v tahu a tažnosti kolejnic určitého typu podle nejnovějšího vydání normy ČSN EN 13674-1 pro několik let,
  - vliv pracovníka zkušebny na výsledky měření,
  - statistická analýza hodnocení tvrdosti temene kolejnic v závislosti na chemickém složení a parametrech válcování i ochlazování kolejnic určitého typu v kampaních,
  - statistická analýza hodnocení tvrdosti a hloubky oduhlíčení u kolejnic určitého typu,
  - analýza systému měření (MSA) u stanovených hloubek oduhlíčení pro vybrané vzorky kolejnic,
  - matematicko-fyzikální modelování modelu tvrdosti temene kolejnic,
  - prvotní analýza dat pokusu měření teploty kolejnice na chladníku,
  - statistická analýza mechanických vlastností kolejnic určitého profilu v kampaních s pokusnými tavnými,
  - statistická analýza a sestavení modelu závislosti tvrdosti dle Brinella na vzdálenosti od čela u 7 vzorků kolejnic určitého profilu podle Jominyho zkoušky bez tepelného zpracování,
  - statistická analýza vlivu výrobních parametrů na mikrostrukturu 16 vzorků kolejnic určitého profilu z taveb vybrané kampaně,
  - statistická analýza vlivu vlastností vzduchu v oblasti chladicího lože a nasávaného vzduchu venkovního na hodnoty tvrdosti kolejnic vybraného profilu odválcovaných v určitém období,
  - statistická analýza vlivu doby řízeného chlazení vzduchem kolejnic určitého typu v oblasti chladicího lože VH na výsledné mechanické vlastnosti ve vybrané kampani,
  - aproximační fyzikálně adekvátní matematický model závislosti THRC (tvrdost podle Rockwella) na VOC (vzdálenosti od čela vzorku),
  - statistická analýza vlivu výrobních parametrů na mikrostrukturu 16 vzorků kolejnic vybraného profilu z taveb určité kampaně,
  - odvození vztahu pro hustotu reálného vlhkého vzduchu ve tvaru nelineární funkce tří základních veličin reálného vzduchu: jeho teploty, tlaku a vlhkosti a spolupráce při jeho implementaci do informačního systému VIS,
  - statistická analýza vlivu vlastností vzduchu v oblasti chladicího lože a nasávaného vzduchu venkovního na hodnoty tvrdosti kolejnic vybraného profilu odválcovaných v určitém období,
  - statistická analýza technologických parametrů válcování pásnic z oceli jakosti S355x na provozu VHb - Univerzální trať Bohumín za

## 8. Válcování kolejnic

Základním cílem analýzy technologického procesu a kvality válcovaných kolejnic na válcovně předválek a hrubých profilů (VH) v TŽ, a.s. (za období roků 2011 až 2016) bylo nalezení vlivných proměnných z daného úseku výroby s ohledem na jejich vliv na tvrdost HB a strukturu kolejnic.

V analýze tohoto technologického procesu byly použity následující statistické metody při řešení níže uvedených dílčích problémů:

- analýza časových řad, exploratorní analýza, odhad typu pravděpodobnostního rozdělení, dvouvýběrový F-test (shoda rozptylu) a t-test (shoda středních hodnot), korelační analýza, párová lineární i nelineární a vícenásobná regresní i GLM analýza, jednofaktorová analýza rozptylu (ANOVA), analýza hlavních komponent (PCA), vytvoření aproximačního fyzikálně adekvátního matematického modelu, matematicko-fyzikální analýza (odvození vztahu pro hustotu vlhkého vzduchu, aproximace teplotních křivek chlazení kolejnic, aplikace a modifikace Avramiho vztahu, návrh matematického a regresního modelu poklesu pyrometricky měřené povrchové teploty hlav kolejnic, aproximační transformovaná Boltzmannova funkce popisu vlivu rychlosti ochlazování na fázové složení a tvrdost vzorků kolejnic, jako i pro podíl martenzitu a perlitu),
- dílčí řešené problémy:
  - matematicko-statistická analýza vlivu technologických parametrů na finální HB tvrdost kolejnic určitého typu,

účelem zajištění požadovaných hodnot meze kluzu Re dle normy ČSN EN 10025,

- statistická analýza a aproximace naměřených teplotních křivek chlazení kolejnicových pásů vybraného typu z určitých válcovacích kampaní,
- statistická analýza vlivu parametrů nuceného chlazení a dílčích technologických veličin na hodnoty Brinellovy tvrdosti na temeni kolejnic vybraného typu z určité válcovací kampaně,
- aproximace průběhu teplotních křivek chlazení pomocí lineární (3L) úsekové piecewise funkce,
- aplikace Hodrickova-Prescottova filtru na reálná data diferencí teplot povrchu kolejnic,
- aplikace Avramiho modelu na reálná data všech pyrometricky měřených povrchových teplot chlazených kolejnic,
- návrh matematického a nelineárního regresního modelu poklesu pyrometricky měřené agregované povrchové teploty hlav kolejnic,
- matematicko-statistická analýza vlivu rychlosti ochlazování na fázové složení a tvrdost HBW vzorků IH kolejnic legovaných chromem.

### 8.1 Aproximační fyzikálně adekvátní matematický model závislosti tvrdosti HRC na vzdálenosti od čela vzorku

V této podkapitole je jako příklad aplikace uveden aproximační fyzikálně adekvátní matematický model závislosti tvrdosti podle Rockwella (THRC) na vzdálenosti od čela vzorku kolejnice (VOC).

Daný problém se vyskytl při řešení statistické analýzy a sestavení modelu závislosti tvrdosti HB dle Rockwella (naměřeno) a Brinella (přepočteno) na VOC u 7 vzorků kolejnic určitého profilu podle typu Jominyho zkoušky, avšak bez tepelného zpracování (blíže [35]).

Cílem bylo sestavit vhodný aproximační fyzikálně adekvátní matematický model závislosti THRC (tvrdost podle Rockwella) na VOC.

Základním principem fungování modelu je *protipůsobení* dvou dynamických kompartmentů K1, K2 (kompartiment je část celku, která má specifické vlastnosti, přičemž je obvykle od ostatních částí oddělen zřetelnou vnější hranicí) na jeden objekt (v jednom objektu) [12].

V daném případě zkoumání průběhu tvrdosti po průřezu kolejnice v její ose od odbroušeného temene směrem do středu stojiny (čili pro Jominyho zkoušku vzorků odebraných z hlavy kolejnicového pásu) představuje kompartment:

- K1: *externí* (vnější) vliv – vstupní veličinu typu ochlazování (odebírání tepla) hlavy kolejnice prouděním vzduchu při jejím chladnutí na chladníku,
- K2: *interní* (vnitřní) vliv – vstupní veličinu typu akumulace tepla (dodaného při ohřevu kolejnice

v krokové peci), jako i deformační reohřev kolejnice při tváření.

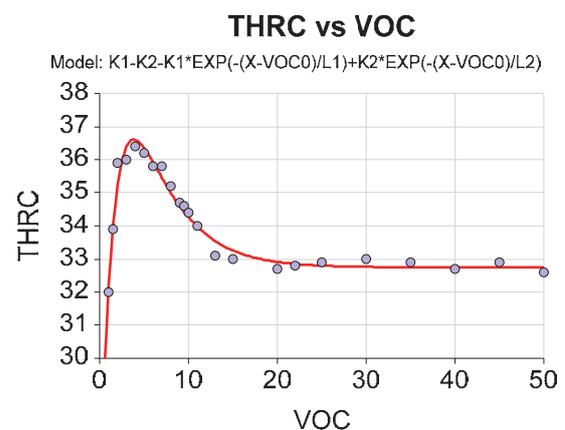
Předpokládá se, že oba kompartmenty mají charakter proporcionalních (setrvačných) soustav 1. řádu. Po sestavení Laplaceových obrazů výstupních veličin a výstupu celé soustavy, lze při použití zpětné Laplaceovy transformace dostat vztah vyjadřující skutečnost, že výstup celé soustavy je rozdílem délkových přechodových funkcí (odezev na jednotkový skok) obou soustav.

Závislost tvrdosti HRC (proměnná THRC) na VOC má pak následující tvar mírně modifikované přechodové funkce uvedené zkoumané soustavy:

$$THRC = (k_1 - k_2) - k_1 \cdot \exp\left\{-\frac{(VOC - VOC_0)}{L_1}\right\} + k_2 \cdot \exp\left\{-\frac{(VOC - VOC_0)}{L_2}\right\}, \quad (7)$$

kde je THRC - tvrdost dle Rockwella [1], VOC - vzdálenost od čela vzorku (mm),  $VOC_0$  - vzdálenost od čela vzorku, kdy THRC nabývá nulové hodnoty (mm),  $k_1, k_2$  - zesílení 1. a 2. části soustavy (1/mm),  $L_1, L_2$  - délková konstanta tepelné setrvačnosti 1. a 2. částí soustavy (mm).

Výsledek nelineární regrese s daným modelem pro vzorek č. 4 je prezentován na obr. 12:



Obr. 12 Nelineární regrese závislosti THRC na VOC: vzorek 4  
Fig. 12 Nonlinear regression of THRC versus VOC: sample 4

Daný regresní model vykazoval u všech vzorků poměrně vysoký koeficient determinace  $R^2$  v rozmezí 84 až 97 %.

Bylo zjištěno, že na parametry rov. (7) má rozhodující vliv chemické složení oceli a dva kategoriální faktory: lící proud na ZPO1 a lidský faktor.

## 9. Elektroocelárna

Hlavním cílem analýzy technologického procesu s ohledem na kvalitu ingotů, bram a pásnic (ploštin) odlévaných na elektroocelárně (EO) v TŽ, a.s. a válcovaných na válcovně VH a následně na univerzální trati

Bohumín (v období roků 2009 až 2016) bylo zjištěno vlivů na tvrdost HB, vrubovou houževnatost, UZ výmět, dále na ukazatele struktury oceli dle normy SEP 1614, na teploty ohřevu a teploty válcování ploštin, na chemické složení, velikost a hustotu vměstků, jako i návrh a optimalizace tvaru kokil i parametrů odlévání oceli.

V analýze tohoto technologického procesu byly použity následující statistické metody při řešení níže uvedených dílčích problémů:

- matematické a matematicko-statistické modelování, exploratorní analýza a analýza časových řad, jednofaktorová analýza rozptylu (ANOVA), korelační analýza, párová lineární i nelineární regrese, vícenásobná lineární i nelineární a GLM statická i dynamická regrese, analýza hlavních komponent skupin proměnných (PCA), kanonická korelační analýza (CCA) a metoda částečných nejmenších čtverců (PLS), metoda DOE.

Podrobněji lze popis aplikace matematicko-statistických metod při řešení dílčích problémů uvést v následujícím členění:

- matematické (matematicko-statistické) modelování:
  - návrhu nových nelineárních kokil,
  - víceroznicového predikčního modelu (VPM) chemického ohřevu lázně (vycházející z disertační práce Ing. T. Huczaly [36]). Modelování obsahovalo vývojový diagram, jeho slovní popis, listing matematického programu Scilab, jako i strukturovaný excelovský sešit modelu ve smyslu podkladů pro programování [37],
- exploratorní analýza a analýza časových řad:
  - tvrdosti HB ploštin,
  - vrubové houževnatosti vzorků ploštin,
  - ukazatelů struktury oceli dle normy SEP 1614,
- jednofaktorová analýza rozptylu (ANOVA) pro stanovení vlivu:
  - lidského faktoru na tvrdost a UZ výmět ploštin,
  - typu kokil a ingotů, jako i výrobních parametrů na UZ výměty a vrubovou houževnatost ploštin,
  - lidského faktoru na teploty ohřevu a teploty válcování ploštin,
  - vlivu kategoriálních parametrů reálných dat taveb sloužící k definování regresních vztahů stochastické části modelu VPM,
- párová korelace a lineární i nelineární regrese:
  - vlivu rozměrů ploštin a chemického složení oceli na jejich tvrdost,
  - kvantitativních veličin toku výroby na UZ výměty ploštin,
  - vlivu teplot ohřevu na teploty válcování ploštin,
  - korelace proměnných vrubové houževnatosti, proměnných velikosti zrna, chemického složení strusky a chemického složení vměstků, ukazatelů struktury oceli dle normy SEP 1614,

- vlivu chemického složení oceli a oceli vzorků, hustoty vměstků, velikosti zrna na kvantifikované proměnné ukazatelů struktury oceli dle normy SEP 1614,
- vlivu struktury dle SEP 1614 na vrubovou houževnatost ploštin,
- vlivu kvantitativních parametrů reálných dat taveb sloužící k definování regresních vztahů stochastické části modelu VPM,
- vícenásobná lineární i nelineární a GLM statická i dynamická regrese:
  - vlivu chemie oceli na tvrdost ploštin,
  - vlivu chemického složení oceli a oceli vzorků, parametrů výroby na EO, extrémů velikosti zrna, metalografické čistoty, počtu vměstků podle velikosti, hustoty vměstků, chemického složení vměstků na vrubovou houževnatost ploštin,
  - vlivu chemického složení strusky na chemické složení, velikost a hustotu vměstků,
  - vlivu chemického složení oceli a oceli vzorků na kvantifikované proměnné ukazatelů struktury oceli dle normy SEP 1614,
  - vlivu kategoriálních i kvantitativních parametrů reálných dat taveb sloužící k definování regresních vztahů stochastické části modelu VPM,
- analýza hlavních komponent skupin proměnných (PCA), kanonická korelační analýza (CCA) a metoda částečných nejmenších čtverců (PLS): chemického složení strusky a chemického složení vměstků,
- metoda DOE: u statistické analýzy výsledků numerické simulace lití oceli do kokily určitého tvaru z numerického simulačního programu MAGMA 5 [38].

### 9.1 DOE optimalizace závislosti licí rychlosti na teplotě u ingotů

V této podkapitole je na ukázkou prezentována DOE optimalizace závislosti licí rychlosti na teplotě zvolené nástrojové oceli s cílem minimalizace středové nekvality daných ingotů (blíže [38]).

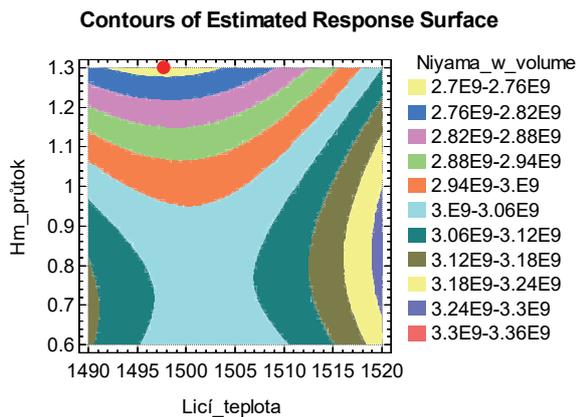
Obsahem řešení byla optimalizace závislosti licí rychlosti na teplotě uvažované nástrojové oceli s cílem minimalizovat středovou nekvalitu daných ingotů, definovanou pomocí 9 kritérií. Byla využita statistická analýza výsledků numerické simulace z programu MAGMA 5 odlišit nástrojové oceli značky X do kokily tvaru Y pomocí metody DOE ve statistickém programu Statgraphics Centurion.

Matematický model vycházel z tzv. metody odezvo- vých, responsních ploch (Response Surface Method), která uvažuje tzv. *úplný kvadratický model* ve tvaru pro 2 uvažované vstupní proměnné:  $x_1$  = licí teplota,  $x_2$  = hmotnostní průtok oceli:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + e \quad (8)$$

kde  $y$  je odezva, výstup, ukazatel kvality ingotu [fyzikální jednotka] = [f.j.],  $b_0$  je absolutní, poziční člen [f.j.],  $b_i$  jsou regresní koeficienty [f.j.]  $e$  je reziduum, „zbytek“ [f.j.].

Na obr. 13 je prezentován vrstevnicový graf základního kritéria *Niyama\_w\_volume* v závislosti na lící rychlosti (hmotnostním průtoku) a lící teplotě dané nástrojové oceli.



Obr. 13 Vrstevnicový graf pro kritérium *Niyama\_w\_volume*  
Fig. 13 Contours diagram of the criterion *Niyama\_w\_volume* criterion

Základní závěry statistické analýzy metodou DOE lze stručně shrnout následujícím způsobem:

- získané optimální body všech 9 kritérií jsou rozmístěny ve dvou protilehlých a protichůdných oblastech (shlucích), přičemž v těchto oblastech leží i body dvou kardinálních kritérií nekvality ingotů – *Niyama-weighted volume* (s prioritou 1) a *Porosity-weighted volume* (priorita 2). Znamená to, že daná kritéria mají protichůdný vliv na hodnotu teploty liti a hmotnostní průtok oceli,
- to svědčí o složitosti, nelinearitě a deterministické chaotičnosti procesu liti oceli z pánve do kokil,
- vzhledem k tomu, že nelze vybrat pouze jedno kritérium optimality a že dvě základní (dominantní) kritéria určují protichůdné požadavky na nastavení lící rychlosti a průtočného množství, není možné stanovit funkční závislost rychlosti na teplotě liti v optimální podobě. Jako nejvýhodnější při současném stavu poznání se jeví volit konstantní hodnoty teploty a průtoku uprostřed intervalů možných hodnot.

Stanovení optimálního návrhu tvaru kokil a optimální závislosti rychlosti liti (hmotnostního průtoku) na teplotě liti oceli je složitá a komplexní záležitost. Její řešení je možné pouze v postupných krocích s využitím numerické simulace a fyzikálního ověřování v reálné provozní praxi.

## 10. Ekologie v metalurgii

Cílem analýzy použití mikrovlnných technologií a prosazování polotovárů z odpadů do výrobního procesu (na vysokých pecích a na elektroocelárně) v TŽ, a.s. (za období roků 2009 až 2016) bylo technologicko-ekologické ověření a statistické vyhodnocení těchto technologií v hutnictví [39, 40].

V analýze daných technologických procesů byly použity následující statistické metody při řešení níže uvedených dílčích problémů:

- exploratorní analýza dat včetně testování normality a náhodnosti, dvouvýběrové a párové parametrické testy shody středních hodnot a rozptylů, jednofaktorová ANOVA, párová lineární i nelineární regrese, vícenásobná regrese, metoda DOE experimentů, kyberneticko-matematicko-statistické modelování,
- dílčí řešené problémy:
  - statistické porovnání výsledků zpracování hutních kalů v rotační a elektrické indukční peci,
  - statistická analýza parametrů redukce briket z druhé série taveb v rotační peci,
  - aproximace časových průběhů vlhkosti a teploty kamenů pomocí kybernetických modelů,
  - statistická analýza výsledků při pokusném prosazování briket HT 296 A z železného koncentráту z odsíření do vsázky VP4,
  - statistická analýza výsledků při druhém pokusném prosazování briket ze strusek mimopecního odsíření surového železa do vsázky VP4,
  - analýza výsledků při třetím pokusném prosazování briket z železného podsítného separátu z odsíření a odprašků do vsázky VP4,
  - matematicko-statistická analýza výsledků při pokusném prosazování briket z ocelárenského aglomerátu s přidávkem zaolejovaných okují do vsázky KK,
  - návrh experimentu pro vysušování žárovzdorných hmot pomocí mikrovln v areálu TŽ, a.s.,
  - analýza výsledků mikrovlnného vysušování žárovzdorných hmot a briketovaných kalů,
  - použití logistické funkce pro aproximaci a nelineární regresi normovaných základních veličin lících kamenů, tj. hmotnosti a vlhkosti,
  - návrh experimentu pro vysušování vzorků z žárobetonu pomocí mikrovln,
  - analýza aplikace mikrovln na vysušování vzorků z žárobetonu,
  - analýza výsledků při třetím pokusném prosazování briket z železného koncentráту strusek MPO do vsázky VP4,
  - výzkum a vývoj nových technologických postupů při zpracování druhotných surovin,
  - statistická analýza fyzikálně-chemických vlastností kovonosných briket vyrobených v roce 2014 a 2015 firmou Progres Ekotech, s.r.o.,

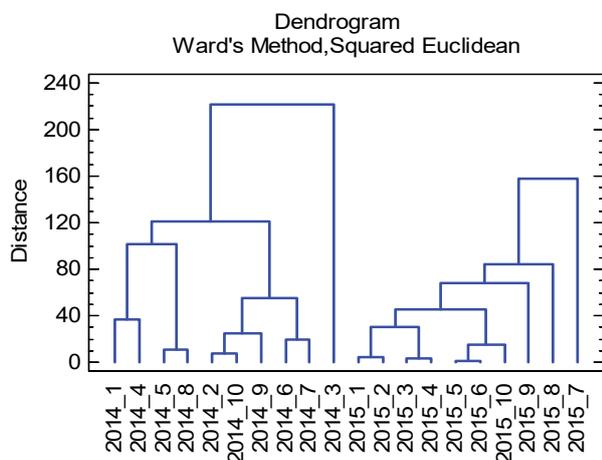
- aproximační nelineární regrese závislosti podílů nejmenších frakcí na počtu pádů (u pádových zkoušek briket) pomocí 4parametrové Weibullovy funkce,
- shluková analýza chemických vlastností briket.

### 10.1 Shluková analýza chemických vlastností briket

V této podkapitole je jako příklad aplikace uvedena shluková analýza chemických vlastností briket. V rámci vnitropodnikového výzkumného projektu TŽ, a.s. s názvem „Výzkum a vývoj environmentálně šetrných technologií pro recyklaci hutních odpadů“ byly z hlediska chemického složení analyzovány 2 dávky kovonosných briket, vyrobené v letech 2014 a 2015 (blíže [41]).

Cílem statistické analýzy bylo ověření podobnosti chemického složení briket vyrobených v obou dávkách. U každé brikety bylo definováno celkem 28 proměnných – změřených obsahů prvků a sloučenin (hm. %). V souladu s cílem statistické analýzy byla použita tzv. analýza shluků, což je metoda, která se zabývá určením podobnosti vícerozměrných objektů, tj. objektů, u nichž je změřeno větší množství znaků, a následnou klasifikací objektů do shluků.

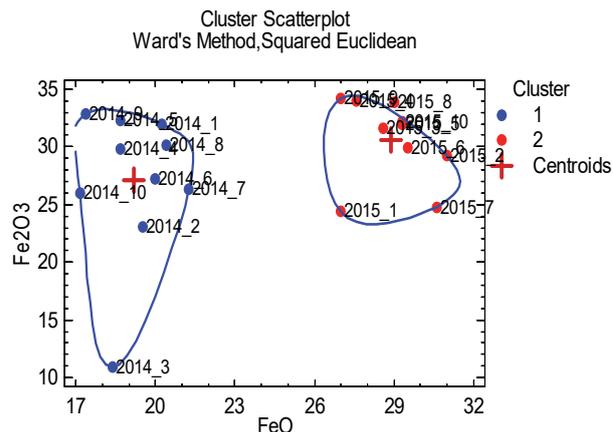
Podobnost objektů (briket) z hlediska chemického složení je graficky vyjádřena pomocí tzv. dendrogramu (obr. 14).



Obr. 14 Dendrogram briket vyrobených v roce 2014 – 2015  
Fig. 14 Dendrogram of the briquettes produced in 2014 – 2015

Interpretace dendrogramu objektů je snadná. Objekty blízko sebe jsou propojeny spojovací úsečkou ve spodní části diagramu, mají malou vzdálenost, čili značnou podobnost. Objekty propojené v horní části diagramu mají malou podobnost a mezi sebou vykazují velkou vzdálenost.

V posledním kroku je nutné provést interpretaci vhodně vybraných rozptylových grafů, a to vždy pro dvojici proměnných, kde se ukazuje rozdělení všech objektů (briket) do vytvořených shluků, jako např. na obr. 15.



Obr. 15 Rozmístění briket v rozptylovém grafu podle hm. obsahu Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> a FeO

Fig. 15 Distribution of briquettes on scatterplot according to Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and FeO content

Přínosem provedené shlukové analýzy bylo zhodnocení homogenity briket z obou dávek z hlediska chemického složení a objasnění výrazné odlišnosti chemického složení některých briket s návazností na jejich fyzikální a termoplastické vlastnosti [41].

### Závěr

Dlouholeté zkušenosti a výsledky z aplikace metod matematické statistiky při řešení výzkumných projektů v metalurgickém výzkumu a provozní praxi poskytují následující poznatky:

- používání vhodných metod matematické statistiky se jeví jako *užitečná součást řešení* většiny úkolů (problémů) v metalurgii,
- v průběhu řešení projektů je při uplatňování statistických analýz nutná *průběžná konzultace* výsledků s příslušnými výzkumníky a technologi z provozní praxe. Tyto konzultace jsou oboustranně prospěšné.

### Poděkování

Výsledek výzkumu, vývoje a inovací byl dosažen s využitím institucionální podpory na rozvoj výzkumné organizace poskytované „Ministerstvem průmyslu a obchodu“.

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] ANDĚL, J. *Statistické metody*. 4. upr. vyd. Praha: Matfyzpress MFF UK Praha, 2007, 299 s.
- [2] BATES, D. M., WATTS, D. G. *Nonlinear Regression Analysis & its Applications*. New York, John Wiley and Sons, 1988.
- [3] BUDÍKOVÁ, M., KRÁLOVÁ M., MAROŠ, B. *Průvodce základními statistickými metodami*. 1. vyd. Praha: Grada Publishing, a.s., 2010, 272 s. ISBN 978-80-247-3243-5.

- [4] HEBÁK, P. aj. *Statistické myšlení a nástroje analýzy dat*. 1. vyd. Praha: Informatorium, s.r.o. 2013, 880 s. ISBN 978-80-7333-105-4.
- [5] KRYSICKI, W. *Rachunek prawdopodobieństwa i statystyka matematyczna w zadaniach*. Część II. Statystyka matematyczna. I. vyd. Warszawa: PWN, 1986, 328 s. ISBN 83-01-06013-1.
- [6] MELOUN, M., MILITKÝ, J. *Statistické zpracování experimentálních dat*. 1. vyd. Praha: PLUS, 1994, 839 s.
- [7] MELOUN, M., MILITKÝ, J. *Kompedium statistického zpracování dat*. Metody a řešené úlohy včetně CD. 1. vyd. Praha: Academia, 2002, 764 s.
- [8] MELOUN, M., MILITKÝ, J. *Interaktivní statistická analýza dat*, 1. vyd. Praha: Karolinum (UK) Praha, 2012, 953 s.
- [9] NOSKIEVIČ, P. *Modelování a identifikace systémů*. Ostrava: MONTANEX, 1999, 276 s.
- [10] REKTORYS, K. *Přehled užití matematiky*. 3. vyd. Praha: SNTL, 1973. 1140 s.
- [11] SEBER, G. A. F., WILD, C. J. *Nonlinear Regression*. John Wiley & Sons, 1989.
- [12] ZÍTEK, P. *Simulace dynamických systémů*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1990, 420 s.
- [13] ZVÁRA, K. *Regrese*. Praha: Matfyzpress MFF UK, 2008
- [14] MORÁVKA, J., HERMANN, R. Využití metody DOE pro stanovení optimálního podílu paliva při spékání agglomeračních. In *Sborník přednášek XIX. International Scientific Conference Iron and Steelmaking*, 7.-9.10.2009, Szczyrk (Polsko). Prace IMŻ 5 (2009), tom 61. ISSN 0137-9941
- [15] MORÁVKA, J., HERMANN, R. Aplikace plánovaného experimentu v hutnictví. In *Sborník přednášek konference REQUEST (REliability QUality ESTimation) 2009*, 26.-27.11.2009, TU Liberec.
- [16] TOŠENOVSKÝ J., NOSKIEVIČOVÁ D. *Statistické metody pro zlepšování jakosti*. Ostrava: Montanex, 2000.
- [17] MAROŠ B., TRÁVNÍČEK T. Plánování experimentu. In *5<sup>th</sup> International Conference Aplimat 2006*, Ústav matematiky FSI STU Bratislava, 20 s.
- [18] MORÁVKA J., MAROŠ B., MICHÁLEK K. Vliv neortogonalita plánu experimentu na statistickou korektnost modelu. In *Sborník příspěvků 16. mezinárodní konference Technical Computing Prague*, Humusoft s.r.o. a VŠCHT Praha, listopad 2008, abstrakt: s. 73, příspěvek (CD): 15 s.
- [19] KUFA, J. *Vývoj technologií s cílem zvýšení výrobnosti aglomerací*. Dílčí technická zpráva. Ostrava/Třinec: MMV s.r.o., březen 2014, 27 s.
- [20] KUFA, J., SCHIFFAUER, L., FARUZEL, P., KLUS, P. Vícekriteriální analýza variant sypání vysokopeční vsázky. In *Iron and Steelmaking: XXIV. International scientific conference*. 22.-24. 10.2014, Horní Bečva, Beskydy, Česká republika. s. 128-131. ISBN 978-80-248-3627-0.
- [21] KUFA, J. *Vývoj technologie řízení vysokých pecí při vyšším obsahu pelet ve vsázce*. Dílčí technická zpráva. Ostrava/Třinec: MMV s.r.o., říjen 2015. 38 s.
- [22] MORÁVKA, J. Approximation Model of Pig Iron Desulphurizing Rate on Reagent Consumption. (Aproximace závislosti stupně odsíření surového železa na spotřebě reagentů). In *XX. international scientific conference Iron and Steelmaking*, SR (Tatranská Lomnica), 20.-22.10.2010
- [23] MORÁVKA J. Aplikace Hillovy funkce při statistické analýze mimopecního odsíření surového železa. In *XXIV. mezinárodní vědecké konference Iron and Steelmaking*. VŠB-TUO, 2014, 219 s.
- [24] MORÁVKA, J. *Statistické vyhodnocení činnosti a parametrů zařízení mimopecního odsíření surového železa v TŽ, a.s. za rok 2013*. Případová studie. Ostrava/Třinec: MMV s.r.o., 31.1.2014, 36 s.
- [25] MORÁVKA, J., BILKO, M. *Statistická analýza vlivu parametrů celého technologického toku na procento vyhovujících tyčí Ø 68 mm vyrobených v roce 2014 z precipitační oceli typu 38MnV na KJT v Třineckých železárnách, a.s.* Případová studie. Třinec: MMV s.r.o., prosinec 2014 /květen-srpen 2011, 78/116 s.
- [26] MORÁVKA, J. *Matematicko-statistická analýza technologického procesu a dat se zaměřením na zlepšení povrchové kvality litého sochoru, tyčí a drátů*. Závěrečná technická zpráva. Třinec: MMV s.r.o., červen 2013, 172 s.
- [27] MORÁVKA J. Efektivní aplikace metody DOE v numerické simulaci optimalizovaného procesu odlévání sochorů v TŽ, a.s. In *Sborník XXIV. mezinárodní vědecké konference Iron and Steelmaking*. VŠB-TUO, 2014, 219 s.
- [28] KUFA, J. *Využití laserové triangulační metody s cílem optimalizace technologií pro zlepšení povrchové a podpovrchové kvality ocelových polotovárů*. Dílčí technická zpráva. Ostrava/Třinec: MMV s.r.o., leden 2015, 20 s.
- [29] MORÁVKA, J. Kyberneticko-statistické modelování vlivu tepelně-teplotních poměrů při odlévání sochorů na povrchovou kvalitu tyčí. In *31. ročník konference o teorii a praxi výroby a zpracování oceli Oceláři/Steelcon*, Tanger, s.r.o., 2015. Příspěvek č. 3610. 7 s.
- [30] MORÁVKA, J. Analysis of the Surface Quality of Steel Bars with Use of Approximation Models (Analýza povrchové kvality tyčí za pomoci aproximačních modelů). *Hutnické listy*, 69 (2016) 1, 3-9. ISSN 0018-8069
- [31] MORÁVKA, J. *Statistická analýza výrobních dat za účelem zlepšení úrovně povrchové kvality drátů ze šroubárenských ocelí*. Závěrečná technická zpráva. Ostrava/Třinec: MMV s.r.o., červen 2013, 101 s.
- [32] MORÁVKA, J., KUFA, J. *Statistická analýza výrobně-technologických dat procesu výroby drátů z oceli jakosti MnTiB pro šrouby na provozu KDT v TŽ, a.s.* Závěrečná technická zpráva. Ostrava/Třinec: MMV s.r.o., prosinec 2014, 146 s.
- [33] KUFA, J., MORÁVKA, J. *Statistická analýza vadnosti drátů kordových a víceuhlíkových ocelí vyrobených v období 1. 1. 2014 až 29. 6. 2014 s ohledem na vybrané výrobní parametry ZPO 2 a KDT*. Technická zpráva. Ostrava/Třinec: MMV s.r.o., červenec 2014-leden 2015, 104 s.
- [34] MORÁVKA, J. *Statistická analýza parametrů chemického složení a mechanických vlastností drátů vybraných značek šroubárenských ocelí s cílem definování detekčních mezí pro nové tavby*. Závěrečná technická zpráva. Ostrava/Třinec: MMV s.r.o., březen 2016, 40 s.
- [35] MORÁVKA, J. 2014. *Statistická analýza výrobně-technologických dat za účelem optimalizace klíčových technologických parametrů pro zlepšení mechanických hodnot kolejnic*. Závěrečná technická zpráva. Ostrava/Třinec: MMV s.r.o., prosinec 2014, 94 s.
- [36] HUCZALA, T. *Řízení chemického ohřevu během sekundárního zpracování oceli*. Disertační práce. Ostrava: KMS FMMI VŠB-TUO, 2015, 122 s.
- [37] MORÁVKA, J. *Statistická analýza dat a vytvoření off-line verze modelu VPM pro predikci teploty oceli v pánvi po chemickém ohřevu za účelem optimalizace tohoto ohřevu na VOD elektroocelárny TŽ, a.s.* Závěrečná technická zpráva. Ostrava/Třinec: MMV s.r.o., prosinec 2015, 53 s.
- [38] MORÁVKA, J. *Statistická analýza dat výroby subledeburitické nástrojové oceli*. Závěrečná technická zpráva. Ostrava/Třinec: MMV s.r.o., prosinec 2014, 79 s.
- [39] MLČOCH, P., MORÁVKA, J.. Vysušování žáruvzdorných hmot pomocí mikrovlnného záření. *Hutnické listy*, 63 (2010) 5, 58-62.
- [40] MLČOCH, P., MORÁVKA, J. Recyklace separátu strusky z mimopecního odsíření surového železa ve vysoké peci. *Hutnické listy*, 63 (2010) 5, 82-85.
- [41] MORÁVKA, J., KUFA, J. *Statistická analýza chemicko-fyzikálních vlastností kovonosných briket vyrobených v roce 2014 a 2015 firmou Progres Ekotech, s.r.o.* Dílčí technická zpráva. Ostrava/Třinec: MMV s.r.o., červen 2015, 12 s.