

Determination of the temperature distribution in the lining layers of a shaft furnace with a vertical TSL lance

Wyznaczenie rozkładu temperatur w warstwach wymurówki pieca szybowego z pionową lancą TSL



A heat flow model was developed for the pilot installation of a TSL shaft furnace. It allowed to det. the temp. distribution on the furnace walls and its bottom at different levels of the furnace, taking into account the type of materials and the thickness of the lining layers. The temp. of individual lining layers as a function of the distance from the external wall of the furnace, examined at various levels, was increasing. The highest temp. of the lining layers occurred at the level of the liquid bath. The lowest temp. were recorded at the level of the furnace vault. High temp. also occurred in the lining layers at the bottom of the furnace.

Keywords: TSL shaft furnace, computer modeling, temperature distribution

Opracowano model przepływu ciepła dla instalacji pilotowej pieca szybowego TSL. Pozwolił on wyznaczyć na różnych poziomach pieca rozkład temperatur na jego ścianach i jego spodzie, uwzględniając rodzaj materiałów i grubość warstw wymurówki. Temperatura poszczególnych warstw wykładzin w funkcji odległości od zewnętrznej ściany pieca badana na różnych poziomach miała charakter wzrostowy. Najwyższe temperatury warstw wykładzin występowały na poziomie ciekłej kąpieli. Najniższe temperatury odnotowano na poziomie sklepienia pieca. Wysokie temperatury występowały również w warstwach wykładzin znajdujących się na spodzie pieca.

Słowa kluczowe: piec szybowy TSL, modelowanie komputerowe, rozkład temperatur

Technologia procesu wytapiania TSL (*top submerged lance*) zaczęła rozwijać się w Australii i została nazwana Isasmelt. Proces rozwoju technologii TSL Isasmelt skupiał się głównie na procesach pirometalurgicznych, czyli wytapianiu koncentratów miedziowych i procesie konwertowania. Technologia TSL stała się alternatywą dla procesu wytapiania w piecu zawieszonym. Znalazła ona szerokie zastosowanie w takich krajach, jak USA, Anglia, Belgia, Niemcy, Indie, Chiny, Peru, Malezja, Afryka Południowa i Zimbabwe¹⁻⁴.

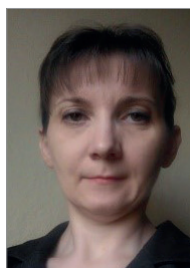
Do głównych zalet tego procesu należą: prosta konstrukcja pieca, elastyczny dobór paliwa (węgiel, koks, olej opałowy, gaz naturalny), długi okres użytkowania lancy, łatwa obsługa, małe wymagania odnośnie do przygotowania

wsadu (jedynie wymieszanie bez konieczności mielenia i suszenia), duża szybkość wytapiania, niski poziom wytwarzanych pyłów i wysoki odzysk siarki wprowadzanej we wsadzie^{2, 3, 5}.

Technologia TSL w porównaniu z tradycyjnymi procesami wytapiania jest wysoce wydajna z uwagi na szeroki dobór paliwa przy mniejszym jego zużyciu. Cechują ją korzystniejsze jednostkowe wskaźniki zużycia energii w porównaniu z innymi procesami.

Technologia procesu TSL cieszy się szerokim zastosowaniem i ciągle się rozwija. Zainteresowanie nią wzrasta z uwagi na możliwość produkcji różnych metali (miedzi, ołowiu, cynku i niklu) przy dużym wyborze rodzaju paliwa^{2, 6}.

Piec szybowy z pionową lancą TSL (rys. 1), będący na wyposażeniu Centrum Hutnictwa w Sieci Badawczej Łukasiewicz – Instytucie Metali Nieżelaznych, pierwotnie znalazł zastosowanie do opracowania nowej technologii odmiedziowania żużla zawieszowego. Piec TSL o kształcie cylindrycznym i wymiarach: średnica zewnętrzna 1 m, średnica wewnętrzna 0,44 m i wysokość 1,85 m, stanowi główny element instalacji pilotowej wraz z układem lancy zasilanej olejem opałowym i lancy zasilanej w sprężone powietrze oraz tlen, układem regulacyjnym i pomiarowym mediów zasilających lancę, systemem mocowania i regulacji położenia lancy, załadunku wsadu, odbioru produktów



Dr inż. Ewa KOLCZYK (ORCID:0000-0001-5355-7150) w roku 2003 ukończyła studia na Wydziale Inżynierii Materiałowej, Metalurgii i Transportu Politechniki Śląskiej w Gliwicach. Stopień doktora nauk technicznych uzyskała w 2011 r. na tym samym wydziale. Pracuje w Sieci Badawczej Łukasiewicz – Instytucie Metali Nieżelaznych w Gliwicach. Specjalność – modelowanie procesów, energetyka hutnicza.

* Adres do korespondencji:

Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Metali Nieżelaznych, ul. Sowińskiego 5, 44-100 Gliwice, tel.: (32) 238-03-04, e-mail: ewa.kolczyk@imn.lukasiewicz.gov.pl

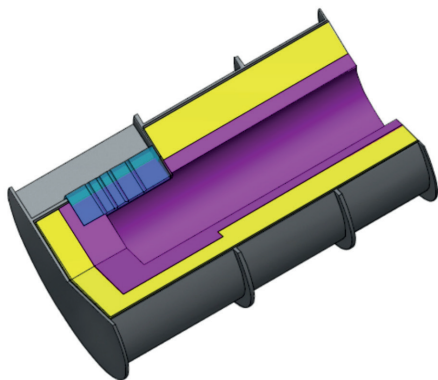


Fig. 1. A shaft furnace with a TSL lance: lining Topkrom (pink color), lining Almid (yellow color), Promaform and steel (grey color), drain window (blue color)

Rys. 1. Piec szczybowy z lancą TSL: wymurówka Topkrom (kolor różowy), wymurówka Almid (kolor żółty), wykładzina Promaform i stal (kolor szary), okno spustowe (kolor niebieski)

ciekłych, dopalania gazu, chłodnicy i układem odpylania gazów procesowych.

W pracy wykonano obliczenia mające na celu wyznaczenie rozkładu temperatur w poszczególnych warstwach wymurówki pieca TSL, uwzględniając rodzaj materiałów wymurówki, grubość jej warstw oraz wysokości poziomów pieca.

Część doświadczalna

Założenia do obliczeń

Przedmiotem obliczeń był piec TSL o cylindrycznym kształcie (rys. 1), pokryty na zewnątrz poszyciem ze stali, pod którym znajdowała się warstwa ogniotrwałych płyt z ceramicznych włókien glinokrzemianowych Promaform 1260. Piec miał dwie warstwy wymurówki. W zależności od wysokości pieca grubość wymurówki miała różny wymiar: na poziomie I członu Almid 128 mm, Topkrom 140 mm, a powyżej Almid 192 mm i Topkrom 76 mm.

Zewnętrzna warstwa wymurówki wykonana była z ogniotrwałego materiału szamotowego Almid Al44. Za nią znajdowała się wymurówka z materiału magnezjowo-chromitowego Topkrom MCZ28FG. Na poziomie I członu pieca (759 mm) znajdował się blok spustowy wykonany z materiału Runcast BKW88CR. Jest to niskocementowy beton ogniotrwały produkowany z wysokojakościowych korundów spiekanych, którego głównym dodatkiem jest tlenek chromu.

Table 1. Type of material and thickness of lining layers of the furnace

Tabela 1. Rodzaj materiału i grubość warstw wykładzin pieca

| Materiał | Grubość do poziomu I członu pieca, mm | Grubość powyżej I członu pieca, mm | Grubość na spodzie pieca, mm |
|-----------|---------------------------------------|------------------------------------|------------------------------|
| Stal | 12 | 12 | 16 |
| Promaform | 10 | 10 | 5 |
| Almid | 128 | 192 | 140 |
| Topkrom | 140 | 76 | 192 |

W tabeli 1 przedstawiono grubość poszczególnych warstw wykładzin na ścianach pieca do poziomu I członu pieca, powyżej I członu i na spodzie pieca.

Dla modelu przepływu ciepła przyjęto następujące założenia: (i) stan ustalony, (ii) piec został podzielony na kilka sekcji zgodnie z rys. 2, w których zakłada się równomierne temperatury w stopionej kąpieli oraz w fazie gazowej, (iii) średnie temperatury w fazie gazowej pieca były liniowo interpolowane między temperaturą kąpieli a najwyższą temperaturą szacowaną na podstawie temperatury gazu odlotowego, (iv) jednowymiarowe przewodzenie ciepła, konwekcja naturalna, wymuszona w kierunku ścian bocznych i spodu pieca.

Strumień ciepła przenikający przez cylindryczną przegrodę wyznaczono z zależności (1):

$$\dot{Q} = \pi L \frac{T_{ot1} - T_{ot2}}{\sum_i R_i} \quad (1)$$

w której \dot{Q} oznacza strumień ciepła przenikający przez ściany pieca, W, L długość przegrody, m, T_{ot1} temperaturę środowiska wewnątrz pieca: ciekłej kąpieli albo fazy gazowej, K, T_{ot2} temperaturę otoczenia, K, i rodzaj materiału warstwy ściany pieca i spód, R_i współczynnik oporu i -tego materiału warstwy, K/W.

Strumień ciepła przenikający przez płaską przegrodę wyznaczono ze wzoru (2):

$$\dot{Q} = A \frac{T_{ot1} - T_{ot2}}{\sum_i R_i} \quad (2)$$

w którym A oznacza powierzchnię, przez którą przenika ciepło, m².

Do obliczenia współczynnika wnikania ciepła wykorzystano równania korelacyjne w zależności od rodzaju ruchu ciepła⁶⁾. Dla konwekcji naturalnej wykorzystano zależność (3):

$$Nu = 0,135 (Gr Pr)^{1/3} \quad (3)$$

w której Nu oznacza liczbę Nusselta, Gr liczbę Granhofa, a Pr liczbę Prandtla.

Dla konwekcji wymuszonej dla przepływu laminarnego w zakresie liczby $Re < 2 \cdot 10^5$ korzystano z zależności (4):

$$Nu = 0,664 Re^{0,5} Pr^{1/3} \quad (4)$$

w której Re oznacza liczbę Reynoldsa⁷⁾.

Do obliczeń przyjęto, że temperatura powietrza wynosiła 20°C, temperatura gazów odlotowych 1275°C, temperatura ciekłej kąpieli 1375°C, gęstość ciekłej kąpieli 3200 kg/m³, lepkość kinematyczna ciekłej kąpieli 1,27e-4 m²/s, współczynnik przewodzenia ciepła dla ciekłej kąpieli 0,15 W/m K, pojemność cieplna właściwa ciekłej kąpieli 1285 J/kg K, prędkość ciekłej kąpieli 1 m/s i prędkość powietrza z otoczenia 0,2 m/s.

Obliczenia prowadzono dla wyznaczonych umownie poziomów pieca TSL, zgodnie z danymi na rys. 2, tzn.

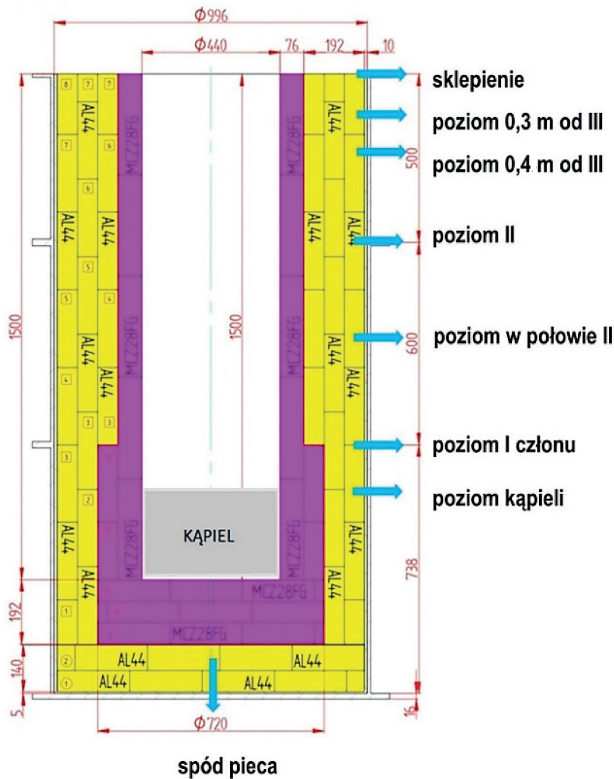


Fig. 2. Diagram of the TSL furnace with marked divisions into sections
Rys. 2. Schemat pieca TSL z zaznaczonymi podziałami na sekcje

na poziomie ciekłej kąpiel, na poziomie I członu pieca, w połowie II członu, na poziomie II członu, 0,3 m od sklepienia pieca, 0,4 m od sklepienia, na poziomie sklepienia, od spodu pieca i od strony okna spustowego. Na poszczególnych poziomach pieca wyznaczono właściwości fazy gazowej na podstawie zanalizowanego składu gazowego produktów procesu redukcji żużla (tabela 2).

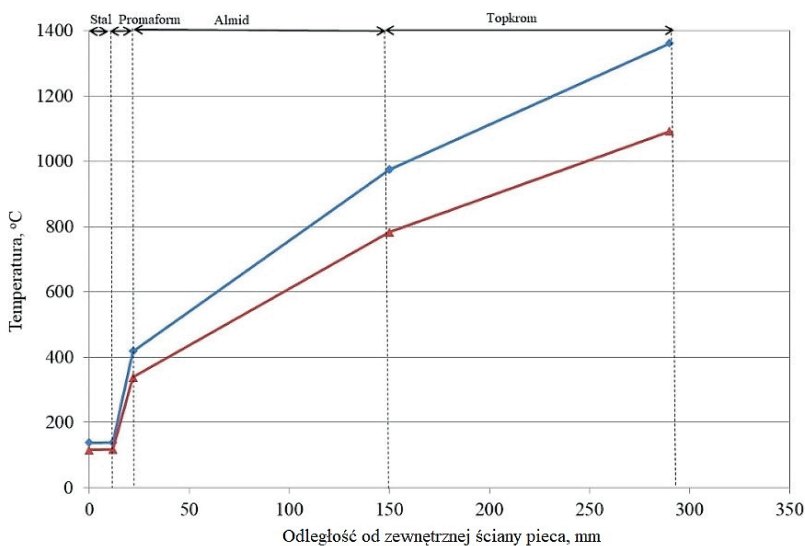


Fig. 3. Temperature distribution of the furnace lining layers up to the first stage (● – bath, ▲ – I stage)

Rys. 3. Rozkład temperatury warstw wykładzin pieca do poziomu I członu (● – kąpiel, ▲ – I członu)

Table 2. Properties of gasphase

Tabela 2. Właściwości fazy gazowej

| Poziom | T , °C | ρ , m ³ /kg | C_p , J/K kg | v , m ² /s | λ , W/K m |
|---------------------|----------|-----------------------------|----------------|-------------------------|-------------------|
| Sklepienie | 1275 | 0,235 | 1139 | 2,29E-04 | 0,095 |
| 0,4 m od sklepienia | 1283 | 0,234 | 1140 | 2,31E-04 | 0,096 |
| 0,3 m od sklepienia | 1292 | 0,232 | 1141 | 2,31E-04 | 0,096 |
| II członu | 1317 | 0,229 | 1143 | 2,39E-04 | 0,097 |
| Połowa II członu | 1341 | 0,225 | 1145 | 2,45E-04 | 0,098 |
| I członu | 1366 | 0,222 | 1147 | 2,52E-04 | 0,099 |

Table 3. Temperature of lining layers – bath level and the first stage

Tabela 3. Temperatura warstw wykładzin – poziom kąpiel i I członu

| Materiał | Temperatura, °C poziom kąpiel | Temperatura, °C poziom I członu |
|-----------|-------------------------------|---------------------------------|
| Topkrom | 1362 | 1092 |
| Almid | 975 | 783 |
| Promaform | 418 | 338 |
| Stal | 139 | 116 |

Table 4. Temperature of lining layers; bottom of the furnace and vault

Tabela 4. Temperatura warstw wykładzin; spód pieca i sklepienie

| Materiał | Temperatura, °C | |
|-----------|-----------------|------------|
| | spód | sklepienie |
| Topkrom | 1352 | 869 |
| Almid | 1045 | 741 |
| Promaform | 523 | 241 |
| Stal | 383 | 89 |

Wyniki obliczeń i ich omówienie

Temperatury wykładzin ścian bocznych pieca na poziomie ciekłej kąpiel wynosiły w wymurówce Topkrom 1362°C, w wymurówce Almid 975°C, w materiale Promaform 418°C, a na płaszczu stalowym 139°C. Powyżej kąpiel, na wysokości I członu pieca temperatury wykładzin uległy obniżeniu (rys. 3). Temperatura wymurówki Topkrom wynosiła 1092°C i była niższa o 270°C, a wymurówki Almid 783°C i była niższa o 192°C. Warstwa Promaform miała również temperaturę niższą o 80°C, a płaszcz stalowy niższą o 23°C (tabela 3).

Wysokie temperatury wykładzin stwierdzono również na spodzie pieca, co wynikało z ruchu ciepła przekazywanego od ciekłej kąpiel o temp. 1375°C. Grubsza warstwa wymurówki Topkrom na spodzie pieca w porównaniu z tą samą wymurówką na ścianie bocznej na poziomie ciekłej kąpiel zapewniła lepszą izolację cieplną, gdyż temperatura w tej warstwie była o 10°C niższa. Z kolei w wymurówce Almid na spodzie pieca temperatura wynosiła 1045°C, a więc była o 70°C wyższa w porównaniu z temperaturą tej wymurówki na ścianie bocznej na poziomie kąpiel (tabela 4). Temperatury w pozostałych warstwach na spodzie pieca były również wyższe, w warstwie Promaform o 105°C, a w stali o 244°C (rys. 4).

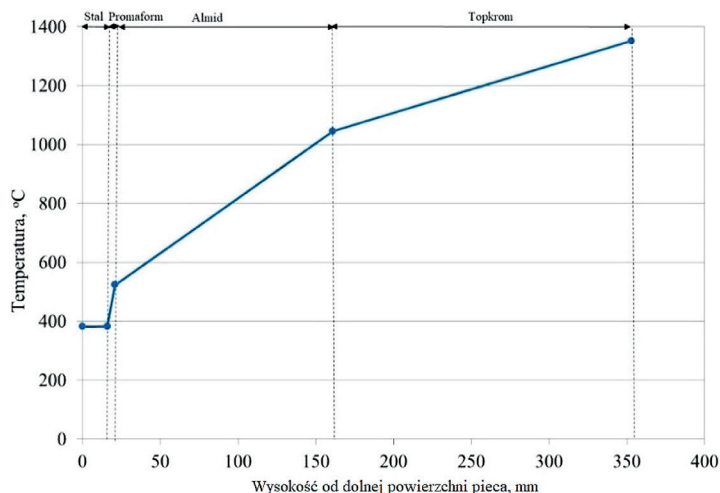


Fig. 4. Temperature distribution of furnace lining layers from the bottom of the furnace

Rys. 4. Rozkład temperatury warstw wykładzin pieca od spodu pieca

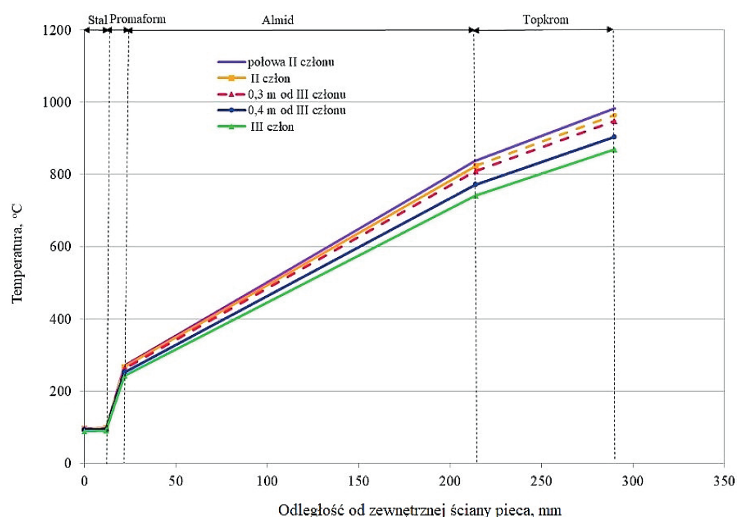


Fig. 5. Temperature distribution of furnace lining layers above first stage

Rys. 5. Rozkład temperatury warstw wykładzin pieca powyżej I członu

Wymiary wymurówek Topkrom i Almid powyżej I członu pieca ulegały zmianie, tzn. grubość wymurówki Topkrom była o połowę mniejsza, zaś wymurówka Almid była grubsza. Temperatury wymurówki Topkrom powyżej I członu pieca stopniowo się obniżały. I tak na poziomie II członu pieca temperatura tej wymurówki była niższa o 129°C, a na sklepieniu pieca o 223°C w odniesieniu do temperatury na wysokości I członu pieca (tabela 5). Zmniejszenie grubości wymurówki Topkrom powodowało, że temperatury wymurówki Almid powyżej I członu pieca były dużo wyższe. Przy temp. 783°C dla wymurówki Almid na wysokości I członu pieca temperatura wzrastała o 40°C na wysokości II członu, a o 26°C na wysokości 0,4 m od sklepienia. Dopiero na wysokości 0,3 m od sklepienia pieca i na jego szczycie temperatury wymurówki Almid były niższe i wynosiły odpowiednio 771°C i 741°C (tabela 6). Temperatury Promaform i płaszcza stalowego stopniowo się obniżały na wysokości pieca, osiągając najniższe wartości na sklepieniu, odpowiednio 241 i 89°C (rys. 5).

Table 5. Temperature of lining layers; level of half of the 2nd stage and 2nd stage

Tabela 5. Temperatura warstw wykładzin; poziom połowy II członu i II członu

| Material | Temperatura, °C poziom połowy II członu | Temperatura, °C poziom II członu |
|-----------|--|-------------------------------------|
| Topkrom | 983 | 963 |
| Almid | 838 | 823 |
| Promaform | 270 | 266 |
| Stal | 97 | 96 |

Table 6. Temperature of lining layers; level 0.3 m and 0.4 m from the 3rd element

Tabela 6. Temperatura warstw wykładzin; poziom 0,3 m i 0,4 m od III członu

| Material | Temperatura, °C poziom 0,4 m od III członu | Temperatura, °C poziom 0,3 m od III członu |
|-----------|--|--|
| Topkrom | 948 | 904 |
| Almid | 809 | 771 |
| Promaform | 261 | 250 |
| Stal | 95 | 91 |

Podsumowanie

Na podstawie danych technologicznych został opracowany model przepływu ciepła dla instalacji pilotowej pieca szybowego TSL. Model przewidywał rozkład temperatury wykładzin ścian bocznych i spodu pieca.

Temperatura poszczególnych warstw wykładzin w funkcji odległości od zewnętrznej ściany pieca na różnych poziomach miała charakter wzrostowy. W rejonie ciekłej kąpieli o temp. 1375°C wykładziny pieca TSL osiągnęły najwyższe temperatury. Wymurówka Topkrom osiągnęła najwyższą temperaturę na ścianie bocznej (1362°C) i na spodzie pieca (1352°C). Wymurówka Almid osiągnęła najwyższą temperaturę na spodzie pieca i na ścianie bocznej pieca, odpowiednio 1045°C i 975°C. Dla materiału Promaform i płaszcza stalowego najwyższe temperatury występowały na spodzie pieca, odpowiednio 523°C i 383°C, a niższe o 105°C dla Promaform i o 244°C dla stali na ścianie bocznej pieca.

Najniższe temperatury wykładzin pieca stwierdzono na poziomie sklepienia w wymurówce Topkrom 869°C, w wymurówce Almid 741°C, w materiale Promaform 241°C i w stali 89°C.

Otrzymano: 18-09-2024

Zrecenzowano: 29-09-2024

Zaakceptowano: 13-10-2024

Opublikowano: 20-11-2024

LITERATURA

- [1] M. Bakkar, S. Nikolic, *Miner. Eng.* 2011, **24**, nr.7, 610.
- [2] P. Arthur, J. Edwards, *Proceedings European Metallurgical Conference, Gesellschaft der Metallurgen und Bergleute, Hanover 2003.*
- [3] <http://www.glencoretechnology.com/.rest/api/v1/documents/3f912fe463bec7f0de40789ad95b319/XTpaperMopaniMSUPyromet05.pdf>, dostęp 12 września 2024 r.
- [4] <https://www.totalmateria.com, Ausmetl/Isasmelt matre smetling>, dostęp 12 września 2024 r.
- [5] A. Kandalam, M.A. Reuter, M. Stelter, M. Reinmüller, M. Gräbner, A. Richter A. Charitos, *Metals* 2023, **13**, 1728.
- [6] D. Obiso, M. Reuter, A. Richter, *Metall. Mater. Trans. B* 2021, **52b**, 3064.
- [7] J. Tomeczek, *Termodynamika*, Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice 1999.