

Refractory high entropy alloys for application in multicomponent aggressive gas mixtures

Żaroodporne stopy wysokoentropowe do zastosowań w wieloskładnikowych mieszaninach gazów agresywnych



DOI: 10.15199/62.2026.6.3

Niezwykle szybki rozwój praktycznie wszystkich gałęzi przemysłu chemicznego oraz pojawianie się nowych dziedzin technologii, stawia coraz większe wymagania materiałom konstrukcyjnym, zwłaszcza w aspekcie ich żaroodporności. Jest to szczególnie istotne w przypadku złożonych atmosfer agresywnych. Dotychczas stosowane rozwiązania tego problemu polegały na doborze składu danego stopu w odniesieniu do konkretnych warunków jego pracy. Wyniki przeprowadzonych badań wskazują jednak, że istnieje możliwość zaprojektowania uniwersalnego wysokoentropowego stopu metali wysokotopliwych z glinem i chromem, odpornego na atak wielu agresywnych reagentów (w pierwszej kolejności tlenu i siarki), w porównywalnym stopniu do tego, jaki ma miejsce w przypadku najlepszych stopów konwencjonalnych, przeznaczonych do pracy w ściśle określonych środowiskach.

Słowa kluczowe: metale wysokotopliwe, stopy wysokoentropowe, korozja wysokotemperaturowa, siarkowanie, utlenianie

A review, with 18 refs., of a universal alloy design consisting of refractory metals, along with Al and Cr, which demonstrates a comparable degree of resistance against the attack of several aggressive reagents (first and foremost O_2 and S) as that exhibited by best conventional alloys manufactured for operation in strictly defined environments.

Keywords: refractory metals, high entropy alloys, high-temperature corrosion, sulphidation, oxidation

Korozja wysokotemperaturowa w atmosferach złożonych

Pomimo intensywnych badań prowadzonych od kilkudziesięciu lat w dziedzinie korozji gazowej^{1, 2)}, skuteczna ochrona materiałów metalicznych pracujących w wysokich temperaturach wciąż stanowi poważne wyzwanie

High-temperature corrosion in multicomponent atmospheres

Despite intensive studies performed for decades in the field of gaseous corrosion^{1, 2)}, effective protection of metallic materials working at high temperatures still constitutes a serious challenge in several branches of technology,



Prof. Dr. DSc. Eng. Zbigniew GRZESIK (ORCID: 0000-0001-8994-5753) graduated from the Faculty of Materials Science and Ceramics at the AGH University of Krakow in 1985. That same year, he began working as an assistant professor at the Department of Solid State Physicochemistry at the same faculty. In 1993, he earned a PhD in technical sciences, and in 2006, a postdoctoral degree. In 2012, he was awarded the title of professor of technical sciences. He is currently an employee of the Department of Physical Chemistry and Modeling at the Faculty of Materials Science and Ceramics, AGH University of Krakow. His specialties include materials science, solid state physicochemistry, high-temperature corrosion, and diffusion.

Prof. dr hab. inż. Zbigniew GRZESIK (0000-0001-8994-5753) w roku 1985 ukończył studia na Wydziale Inżynierii Materiałowej i Ceramiki AGH w Krakowie. W tym samym roku rozpoczął pracę jako asystent w Katedrze Fizykochemii Ciała Stałego na macierzystym wydziale. W 1993 r. uzyskał stopień doktora nauk technicznych, a w 2006 r. stopień doktora habilitowanego. W 2012 r. otrzymał tytuł profesora nauk technicznych. Obecnie jest pracownikiem Katedry Fizykochemii i Modelowania Procesów na Wydziale Inżynierii Materiałowej i Ceramiki AGH w Krakowie. Specjalność – inżynieria materiałowa, fizykochemia ciała stałego, korozja wysokotemperaturowa, dyfuzja.



Dr. Eng. Grzegorz SMOŁA (ORCID: 0000-0003-0587-9125) received his Master's degree from the Faculty of Materials Science and Ceramics at the AGH University of Krakow in 2006. In 2011, he joined the Department of Solid State Physicochemistry at the same faculty as a Research Assistant. He was awarded his PhD in technical sciences in 2012. He is currently an Assistant Professor in the Department of Physical Chemistry and Process Modelling, Faculty of Materials Science and Ceramics at the AGH University of Krakow. Specialty – materials engineering, high-temperature corrosion, and thin protective coatings.

Dr inż. Grzegorz SMOŁA (ORCID: 0000-0003-0587-9125) w roku 2006 ukończył studia magisterskie na Wydziale Inżynierii Materiałowej i Ceramiki AGH w Krakowie. W 2011 r. rozpoczął pracę na stanowisku asystenta w Katedrze Fizykochemii Ciała Stałego na tym samym wydziale. Stopień doktora nauk technicznych uzyskał w 2012 r. Obecnie jest zatrudniony na stanowisku adiunkta w Katedrze Fizykochemii i Modelowania Procesów na Wydziale Inżynierii Materiałowej i Ceramiki AGH. Specjalność – inżynieria materiałowa, korozja wysokotemperaturowa oraz cienkie powłoki ochronne.

*** Address for correspondence/Adres do korespondencji:**

Katedra Fizykochemii i Modelowania Procesów, Wydział Inżynierii Materiałowej i Ceramiki, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, tel.: (12) 617-24-91, e-mail: grzesik@agh.edu.pl

w wielu gałęziach technologii, w szczególności w przemyśle chemicznym. Wynika to przede wszystkim z niezwykłej agresywności atmosfer występujących w wielu procesach przemysłowych, zwłaszcza tych składających się z mieszaniny różnorodnych gazów o właściwościach utleniających³⁻⁵). Wprawdzie metody ograniczania degradacji materiałów metalicznych w wysokotemperaturowych atmosferach zawierających jedynie tlen zostały już dobrze dopracowane, to nadal problematyczne pozostaje ograniczenie korozji w atmosferach zawierających oprócz tlenu również inne składniki gazowe, takie jak siarka, fluorowódor, para wodna i chlor^{1, 6-8}). Głównym powodem tej sytuacji jest fakt, że komercyjne stopy odporne na działanie tlenu ulegają gwałtownej korozji w atmosferach zawierających inny składnik agresywny, np. siarkę⁷). Z kolei metale wysokotopliwe, o bardzo dobrej odporności na siarkowanie nie mogą być stosowane w atmosferach tlenowych z uwagi na gwałtowny przebieg utleniania^{1, 7}). W przeszłości były podejmowane próby zaprojektowania materiałów odpornych zarówno na atak tlenu, jak i siarki, z których najbardziej obiecującymi wydawały się być dwuskładnikowe amorficzne stopy metali wysokotopliwych (głównie molibdenu i niobu) z glinem⁹⁻¹¹). Stopy te odznaczały się bardzo dobrą odpornością na siarkowanie, nawet wyższą niż ta uzyskiwana przez czyste metale wysokotopliwe, którą zawdzięczały narastaniu na ich powierzchni dwuwarstwowych zgorzelin zbudowanych z disiarczku metalu wysokotopliwego (np. MoS₂ lub NbS₂) pokrytego siarczkiem glinu (Al₂S₃). Wyraźne spowolnienie siarkowania tych stopów w porównaniu z czystymi metalami wysokotopliwymi wiązano z domieszkowaniem glinem siarczku metalu wysokotopliwego, zmniejszającym w tym siarczku stężenie macierzystych defektów jonowych. Niestety, badane stopy amorficzne charakteryzowały się jednocześnie ograniczoną odpornością na utlenianie. Najbardziej obiecujący spośród nich, stop Al-34Mo, wykazywał w pełni satysfakcjonującą odporność na utlenianie jedynie do temp. ok. 850°C, którą



Dr. Eng. Richard GAWEŁ (ORCID: 0000-0002-0778-6814) graduated from the Faculty of Chemical Engineering and Technology at the Cracow University of Technology in 2009. In 2016, he earned a PhD in Materials Science at the Faculty of Materials Science and Ceramics, AGH University of Krakow. He is currently an employee of the Department of Physical Chemistry and Modelling at the Faculty of Materials Science and Ceramics, AGH University of Krakow. Specialties – high-temperature corrosion, high-entropy alloys, solid oxide fuel cells, ceramic electrolytes, protective coatings and point defect chemistry.

Dr inż. Richard GAWEŁ (0000-0002-0778-6814) w roku 2009 ukończył studia na Wydziale Inżynierii i Technologii Chemicznej Politechniki Krakowskiej. W 2016 r. uzyskał stopień doktora nauk technicznych w dziedzinie inżynierii materiałowej na Wydziale

Inżynierii Materiałowej i Ceramiki AGH w Krakowie, gdzie obecnie jest pracownikiem Katedry Fizykochemii i Modelowania Procesów. Specjalność – korozja wysokotemperaturowa, stopy wysokoentropowe, stało tlenkowe ogniwa paliwowe, elektrolity ceramiczne, powłoki ochronne, chemia defektów punktowych.

specifically in the chemical industry. This is mainly due to the highly aggressive atmospheres that are present in many industrial processes, especially those consisting of a mixture of various gases with oxidizing properties³⁻⁵). While methods of limiting metallic material degradation in high-temperature atmospheres consisting only of oxygen have already been well developed, inhibiting corrosion in atmospheres additionally containing other gaseous components, such as sulphur, hydrogen fluoride, water vapour or chlorine^{1, 6-8}), remains problematic. The main reason for this is the fact that commercially available alloys resistant against oxygen attack undergo rapid corrosion in atmospheres containing another aggressive component, e.g., sulphur⁷). Conversely, refractory metals demonstrating very good resistance against sulphidation cannot be used in oxygen-containing atmospheres due to fast oxidation^{1, 7}). Attempts have been made in the past to develop materials resistant against both oxygen and sulphur attack, among which the most promising seemed to be two-component amorphous alloys built of a refractory metal (mainly molybdenum or niobium) and aluminium⁹⁻¹¹). These alloys distinguished themselves with very good sulphidation resistance, even higher than that obtained by pure refractory metals, which can be attributed to the growth of two-layer scales on their surfaces built of the given refractory metal disulphide (e.g., MoS₂ or NbS₂) covered by aluminium sulphide, Al₂S₃. The clear sulphidation inhibition in the case of these alloys compared to that of pure refractory metals was ascribed to aluminium doping of the refractory metal sulphide, which lowered the intrinsic ionic defects in that sulphide. Unfortunately, the investigated amorphous alloys simultaneously exhibited limited oxidation resistance. The most promising among them, i.e. Al-34Mo alloy, demonstrated satisfactory oxidation resistance, but only up to around 850°C, which can be accredited to the growth of a protective scale layer built of Al₂O₃. Above that temperature, rapid degradation occurred due to volatile molybdenum oxide formation⁹). The addition of 6 at. % silicon improved the oxidation resistance without simultaneously decreasing sulphidation resistance⁶), but only up to about 950°C. Higher silicon concentrations rapidly increased the sulphidation rate. These alloys also very quickly underwent corrosion in the presence of SO₂. The above-mentioned difficulties resulted in the problem of developing a universal metallic material capable of operation in various, often multicomponent corrosive atmospheres in a wide temperature range never being completely solved. Thus, a precise composition selection for individual alloys foreseen for work in specifically defined corrosive atmospheres is still necessary.

Refractory high entropy alloys designed for operation in complex atmospheres

In recent years, due to the development of refractory high-entropy alloys initiated by Senkov et al.¹²), it has

zawdzięczał powstawaniu ochronnej warstwy zgorzeliny zbudowanej z Al_2O_3 . Powyżej tej temperatury dochodziło do szybkiej degradacji powodowanej tworzeniem lotnych tlenków molibdenu⁹. Dodatek 6% at. krzemu poprawiał odporność na utlenianie, bez jednoczesnego pogorszenia odporności na siarkowanie⁶, ale tylko do temp. ok. 950°C. Większe ilości krzemu radykalnie podnosiły szybkość siarkowania. Stopy te również bardzo szybko ulegały korozji w obecności SO_2 . Wspomniane trudności sprawiły, że problem opracowania uniwersalnych materiałów metalicznych zdolnych do pracy w tak zróżnicowanych, często wieloskładnikowych atmosferach korozyjnych w szerokim zakresie temperatur do tej pory nie został w pełni rozwiązany. Nadal konieczny jest zatem precyzyjny dobór składu konkretnych stopów przeznaczonych do pracy w ściśle określonych atmosferach korozyjnych.

Żaroodporne stopy wysokoentropowe przeznaczone do pracy w atmosferach złożonych

W ostatnich latach dzięki zapoczątkowanemu przez Senkova i współpr.¹²⁾ wytwarzaniu żaroodpornych stopów wysokoentropowych^{13–16)} pojawiła się możliwość takiego doboru ich składu (równomolowy stop TaMoCrTiAl), aby zapewnić im małą szybkość utleniania nawet do temp. 1400°C¹³⁾. Jednocześnie ten sam stop, jak wykazały to wyniki badań uzyskane na Wydziale Inżynierii Materiałowej i Ceramiki (WIMiC) AGH w Krakowie przy współpracy z Karlsruhe Institute of Technology¹⁷⁾, w środowisku par siarki ulega niezwykle powolnej degradacji, porównywalnej do tej uzyskanej w przypadku najlepszych stopów amorficznych metali wysokotopliwych z glinem (rysunek). Za bardzo dobre właściwości ochronne zgorzelin powstających na stopie TaMoCrTiAl odpowiadają jednak inne warstwy produktów reakcji niż te obecne na stopach amorficznych. W przypadku utleniania powierzchnia stopu TaMoCrTiAl pokrywa się ochronną warstwą tlenku CrTaO_4 , a nie tlenku glinu¹³⁾. Natomiast podczas siarkowania nie powstają ochronne warstwy domieszkowanych glinem disiarczków metali wysokotopliwych, lecz złożone zgorzeliny tlenkowo-siarczkowe o doskonałych właściwościach ochronnych. Wewnętrzną warstwę tej zgorzeliny tworzy tlenek TiTaO_4 z metalicznymi wtrąceniami molibdenu, a zewnętrzna zbudowana jest z mieszaniny TiO_2 , $(\text{Cr},\text{Al})_2\text{O}_3$ i CrS . Po okresie początkowym siarkowania, nieprzekraczającym 5 h w temp. 1000°C, dodatkowo pod zgorzeliną powstaje strefa korozji wewnętrznej. Charakteryzuje się ona wyraźnym wzbogaceniem w siarczki i tlenki molibdenu oraz tantalum, przy jednoczesnym zubożeniu w związki pozostałych składników stopu¹⁷⁾. Należy zaznaczyć, że chociaż stop TaMoCrTiAl był siarkowany przy wysokim ciśnieniu par siarki S_2 równym 1 kPa, to ze względu na obecność tlenu w helu (o czystości 99,999 % at.) stosowa-

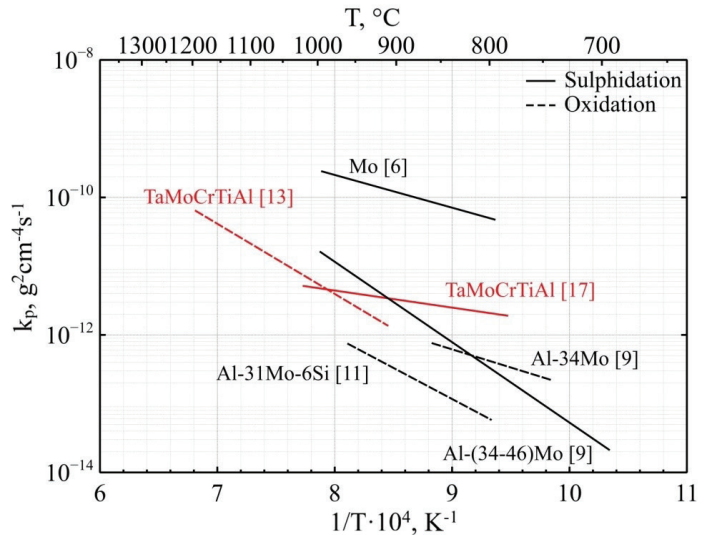


Figure. Comparison of the sulphidation and oxidation rates of some refractory alloys and molybdenum

Rysunek. Porównanie szybkości siarkowania i utleniania wybranych stopów żaroodpornych i molibdenu

become possible to tailor oxidation-resistant compositions^{13–16)}, (e.g., the equimolar TaMoCrTiAl alloy) which can exhibit a low oxidation rate even at temperatures up to 1400°C¹³⁾. Simultaneously the same alloy, as indicated by the experimental results obtained at the Faculty of Materials Science and Ceramics, AGH University of Krakow, in collaboration with the Karlsruhe Institute of Technology¹⁷⁾, in a sulphur vapour-containing environment undergoes unusually slow degradation, comparable to that received in the case of the best amorphous alloys built of refractory metals with aluminium (Figure). However, the very good protective properties of the scale grown on TaMoCrTiAl can be attributed to other reaction product layers than those present on the amorphous alloys. In the case of oxidation, the surface of TaMoCrTiAl alloy covers itself with a protective CrTaO_4 layer, as opposed to aluminium oxide¹³⁾. On the other hand, protective aluminium-doped refractory metal disulphide layers do not form during sulphidation. Instead, a complex oxide-sulphide scale grows that exhibits excellent protective properties. The internal layer of the scale is built of TiTaO_4 with metallic molybdenum inclusions, whereas the external layer contains a mixture of TiO_2 , $(\text{Cr},\text{Al})_2\text{O}_3$ and CrS . After an initial sulphidation period that does not exceed 5 h at 1000°C, an internal corrosion zone forms beneath the scale. This region is clearly rich in molybdenum and tantalum oxides and sulphides, while simultaneously lacking in the remaining alloy elements¹⁷⁾. It should be noted that even though TaMoCrTiAl underwent sulphidation at a high sulphur vapour pressure, S_2 , equal to 1 kPa, due to oxygen presence in helium (99,999 at.% purity) applied during the sulphidation process as an auxiliary gas, oxygen pressure in the reaction chamber remained at the level of 10^{-14} – 10^{-11} Pa

nym podczas siarkowania jako gaz pomocniczy, w układzie pomiarowym ciśnienie tlenu pozostawało na poziomie 10^{-14} – 10^{-11} Pa (w zakresie 800–1000°C). Zawartość tlenu w układzie pomiarowym była zatem wystarczająco wysoka, aby mogły powstawać wszystkie zaobserwowane tlenki w badanych zgorzelinach. Trzeba podkreślić, że tego rzędu wielkości ciśnienia tlenu i siarki występują w wielu procesach przemysłowych, jak chociażby podczas gazyfikacji węgla, co oznacza, że badane stopy mają duży potencjał aplikacyjny. Potencjał ten okazuje się być jeszcze większy, gdy uwzględnimy wyniki badań wstępnych, zgodnie z którymi szybkość korozji żaroodpornych stopów wysokoentropowych w atmosferach utleniających zawierających znaczące stężenia pary wodnej lub SO_2 w ilości 500 ppm pozostaje na bardzo niskim poziomie, co poszerza zakres stosowania tych stopów o bardziej złożone atmosfery. Warto dodać, że żaroodporne stopy wysokoentropowe na ogół są otrzymywane przez kilkukrotne topienie w piecu łukowym. Ze względu na wysokie temperatury topnienia takich metali, jak molibden, tantal i niob nie jest to podejście ekonomiczne, a dodatkowo ogranicza możliwości wytwarzania konkretnych elementów urządzeń i instalacji. W wyniku wspólnych badań przeprowadzonych na WIMiC AGH w Krakowie oraz na Wydziale Inżynierii Materiałowej i Cyfryzacji Przemysłu Politechniki Śląskiej wykazano, że można jednak z proszków metali składających się na taki stop wytworzyć dany element poprzez prasowanie tych proszków, a następnie ich spiekanie¹⁸⁾. Co istotne, już temperatura spiekania na poziomie 1000°C, a więc o ponad 1500°C niższa niż temperatura topnienia molibdenu, pozwala otrzymać trwały materiał w procesie syntezy prowadzonym jedynie przez 2 h. Wprawdzie w ten sposób otrzymany materiał nie jest jednorodny, a zatem trudno uznać, że jest to stop wysokoentropowy, ale cechuje się on relatywnie wysoką odpornością zarówno na utlenianie, jak i siarkowanie¹⁸⁾. W obecności tlenu i siarki proces jego korozji przebiega w przybliżeniu zgodnie z prawem parabolicznym, a wyznaczone wartości parabolicznej stałej szybkości utleniania, chociaż o ok. rząd wielkości wyższe niż te uzyskane dla stopów otrzymanych przez topienie łukowe, są nadal satysfakcjonująco wysokie. Biorąc pod uwagę, że są to wyniki początkowej fazy badań, uzasadnione jest oczekiwanie dalszej poprawy żaroodporności tak przygotowanych stopów w złożonych atmosferach agresywnych przez optymalizację procesu spiekania.

Podsumowanie

Żaroodporne stopy wysokoentropowe stanowią relatywnie nową grupę materiałów metalicznych, wykazujących doskonałą odporność na działanie agresywnych atmosfer utleniająco-siarkujących. Możliwość optymalizacji procesu ich syntezy w temperaturze o ok. 1500°C niższej niż temperatura topnienia metali wysokoto-

(in the temperature range 800–1000°C). Thus, oxygen content in the reaction chamber was sufficiently high for all observed oxides to form in the studied scales. It must be emphasized that these levels of oxygen and sulphur pressure exist in several industrial processes, for example, coal gasification, which means that the studied alloys demonstrate huge application potential. This potential is even greater when taking into consideration the initial experimental results which indicate that the corrosion rate of the refractory high entropy alloys in oxidizing atmospheres containing significant water vapour concentration or SO_2 in the amount of 500 ppm remains at a very low level, which widens the application range of these alloys to very complex atmospheres. It is worth adding that refractory high entropy alloys are generally synthesized by means of melting and re-melting several times in an arc furnace. Due to the high melting points of such metals as molybdenum, tantalum and niobium, this is not an economic approach, and furthermore, limits the possibility of manufacturing specific elements of an apparatus or installation. As a result of mutual studies performed at the Faculty of Materials Science and Ceramics, AGH University of Krakow, and the Faculty of Materials Engineering and Industrial Digitalization, Silesian University of Technology it has been demonstrated that a given element can be fabricated by pressing powders of the metals that will constitute the alloy, followed by sintering¹⁸⁾. What is noteworthy is that a sintering temperature of 1000°C, which is more than 1500°C lower than the melting temperature of molybdenum, allows for obtaining a durable material after a 2 h synthesis process. While it is true that the material synthesised in this manner is not uniform, and thus difficult to classify as a high entropy alloy, it still exhibits relatively high resistance against both oxidation and sulphidation¹⁸⁾. In the presence of both oxygen and sulphur, its corrosion proceeds approximately in accordance with the parabolic rate law, and even though the determined parabolic oxidation rate constants are around one order of magnitude higher than the respective alloy obtained by arc melting, they are still satisfactory. Taking into consideration that these investigations are in their early stages, it is reasonable to assume that the thermal stability of these alloys in harsh environments can be enhanced by optimizing the sintering process.

Conclusions

Refractory high entropy alloys are a relatively new group of metallic materials that demonstrate excellent resistance against the influence of aggressive oxidizing-sulphidizing atmospheres. The possibility of optimizing their synthesis process at a temperature about 1500°C below the melting point of refractory metals makes them potential candidates for materials that can find a wide range of applications at

pliwych, czyni je potencjalnymi kandydatami na materiały mogące znaleźć szerokie zastosowanie w miejscach, gdzie występują złożone atmosfery przemysłowe stanowiące mieszaniny gazów agresywnych zawierających tlen i siarkę.

Badania sfinansowane w części przez Narodowe Centrum Nauki [2024/55/B/ST11/01052].

Publikacja finansowana ze środków budżetu państwa w ramach programu Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego pod nazwą Wektory Nauki, nr projektu WNK/SN/0429/2025/1, kwota finansowania projektu 61 121,00 zł, całkowita wartość projektu 136 888,30 zł.

locations that are subjected to complex industrial environments consisting of aggressive gas mixtures containing oxygen and sulphur.

This research was funded in the part by the National Science Centre [2024/55/B/ST11/01052].

Publication financed from the state budget under the program of the Ministry of Science and Higher Education called Vectors of Science, project number WNK/SN/0429/2025/1, project financing amount PLN 61,121.00, total project value PLN 136,888.30.

Received/Otrzymano: 15-04-2026

Accepted/Zakceptowano: 03-06-2026

Reviewed/Zrecenzowano: 29-05-2026

Published/Opublikowano: 18-06-2026

REFERENCES/LITERATURA

- [1] N. Birks, G.H. Meier, F.S. Pettit, *Introduction to the high temperature oxidation of metals*, University Press, Cambridge 2009.
- [2] D.J. Young, *High temperature oxidation and corrosion of metals*, Elsevier, Amsterdam 2008.
- [3] B.A. Pint, [w:] *Developments in high-temperature corrosion and protection of materials* (red. Xu, H., Guo, H., Gong, S.), Woodhead Publishing, Cambridge, England, 2008.
- [4] H.E. Evans, [w:] *Shreir's corrosion*, Elsevier Ltd., The Netherland, Amsterdam 2010.
- [5] H. Xu, H. Guo, S. Gong, *Developments in high-temperature corrosion and protection of materials*, Woodhead Publishing, England, Cambridge 2008.
- [6] S. Mrowec, *Oxid. Met.* 1995, **44**, 177.
- [7] Z. Grzesik, S. Mrowec, *High Temp. Mater. Process.* 2012, **31**, 539.
- [8] G. Smoła, R. Gawęł, T. Kupka, M. Erb, C. Schnitter, Z. Grzesik, *Oxid. Met.* 2022, **9**, 109.
- [9] H. Habazaki, J. Dąbek, K. Hashimoto, S. Mrowec, M. Danielewski, *Corros. Sci.* 1993, **34**, 183.
- [10] H. Mitsui, H. Habazaki, K. Asami, K. Hashimoto, S. Mrowec, *Corros. Sci.* 1996, **38**, 1431.
- [11] K. Hashimoto, P.-Y. Park, J.-H. Kim, H. Yoshioka, H. Mitsui, E. Akiyama, H. Habazaki, A. Kawashima, K. Asami, Z. Grzesik, S. Mrowec, *Mater. Sci. Eng.* 1995, **A198**, 1.
- [12] O.N. Senkov, S.V. Senkova, D.M. Dimiduk, C. Woodward, D.B. Miracle, *J. Mater. Sci.* 2012, **47**, 6522.
- [13] B. Gorr, F. Müller, S. Schellert, H.-J. Christ, H. Chen, A. Kauffmann, M. Heilmaier, *Corros. Sci.* 2021, **166**, 108475.
- [14] L. Zhuo, Y. Xie, B. Chen, *J. Mater. Res. Technol.* 2024, **33**, 1097.
- [15] B. Gorr, S. Schellert, F. Müller, H.-J. Christ, A. Kauffmann, M. Heilmaier, *Adv. Eng. Mater.* 2021, **23**, 2001047.
- [16] W. Pan, D. Huang, W. Wang, G. Dou, P. Lyu, *High-Temp. Mater.* 2025, **2**, 10011.
- [17] G. Smoła, C. Tang, B. Schäfer, M. Dürrschnabel, C. Schroer, P. Gokelaere, B. Gorr, Z. Grzesik, *Corros. Sci.* 2026, in preparation.
- [18] G. Smoła, P. Gradoń, R. Gawęł, G. Moskal, Z. Grzesik, *Materials* 2026, **19**, 2364.



**Międzynarodowy Instytut Chemii Analitycznej
Polskiej Akademii Nauk**

we współpracy z

**Kujawsko-Pomorskim Centrum
Naukowo-Technologicznym
im. prof. J. Czochralskiego sp. z o.o.**

**ogłasza nabór na studia podyplomowe w roku 2026/2027
z zakresu:**

**PODSTAWOWE I ZAAWANSOWANE
TECHNIKI SEPARACYJNE
W EKO- I BIOANALITYCE**

Szczegółowe informacje są dostępne na stronie: centrumczochralskiego.pl