



**CMES**

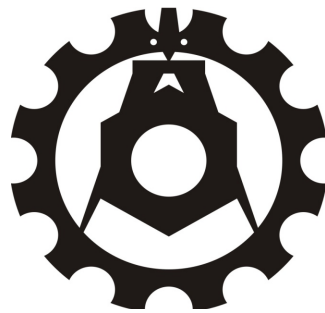
---

**CMES.POLLUB.PL**

Metody komputerowe w naukach  
inżynieryjnych

Computer methods in engineering science

# Monografie – Politechnika Lubelska



Politechnika Lubelska  
Wydział Mechaniczny  
ul. Nadbystrzycka 36  
20-618 LUBLIN

# Metody komputerowe w naukach inżynieryjnych

Computer methods in engineering science

redakcja  
Miroslaw Szala



Politechnika Lubelska  
Lublin 2017

Recenzenci:

dr hab. inż. Janusz Krawczyk, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

dr hab. inż. Krzysztof Nowacki, Politechnika Śląska

prof. dr hab. inż. Andrzej Wac-Włodarczyk, Politechnika Lubelska

dr hab. inż. Mariusz Walczak, Politechnika Lubelska

dr hab. Agata Zdyb, Politechnika Lubelska

Publikacja wydana za zgodą Rektora Politechniki Lubelskiej

© Copyright by Politechnika Lubelska 2017

ISBN: 978-83-7947-257-4

Wydawca: Politechnika Lubelska

ul. Nadbystrzycka 38D, 20-618 Lublin

Realizacja: Biblioteka Politechniki Lubelskiej

Ośrodek ds. Wydawnictw i Biblioteki Cyfrowej

ul. Nadbystrzycka 36A, 20-618 Lublin

tel. (81) 538-46-59, email: wydawca@pollub.pl

[www.biblioteka.pollub.pl](http://www.biblioteka.pollub.pl)

---

Elektroniczna wersja książki dostępna w Bibliotece Cyfrowej PL [www.bc.pollub.pl](http://www.bc.pollub.pl)

## Spis treści

Sławomir Gulkowski	
<b>Modeling and simulation of photovoltaic system using Matlab/Simulink environment .....</b>	<b>6</b>
Robert Jasionowski	
<b>CAMSS 2016 – materials engineering database as a support in academic education process .....</b>	<b>24</b>
Jerzy Lipski, Jakub Pizoń	
<b>Decision process support with use of a mobile system.....</b>	<b>35</b>
Daniel Łukasik, Mirosław Szala	
<b>Metodyka rozwiązywania zagadnień problemowych TRIZ.....</b>	<b>45</b>
Łukasz Woźniak, Paweł Surdacki, Leszek Jaroszyński	
<b>Numeryczny model taśmy nadprzewodnikowej YBCO 2G w uzwojeniach transformatora .....</b>	<b>62</b>
Robert Jarosz, Łukasz Poloczek, Bartłomiej Dybowski, Andrzej Kielbus	
<b>Proces produkcji monolitycznych wielkogabarytowych odlewów dla przemysłu energetycznego.....</b>	<b>78</b>
Andrzej Maruszczyk, Katarzyna Mordal	
<b>Galwanotechnika – przegląd aktualnego stanu wiedzy .....</b>	<b>95</b>
Tadeusz Hejwowski, Daniel Łukasik	
<b>Materiały na powłoki zwiększające trwałość maszyn i urządzeń przemysłu cementowego .....</b>	<b>108</b>
Tadeusz Hejwowski, Daniel Majewski	
<b>Mikrostruktura powłok natryskiwanych metodą płomieniowo – proszkową.....</b>	<b>129</b>

## MODELING AND SIMULATION OF PHOTOVOLTAIC SYSTEM USING MATLAB/SIMULINK ENVIRONMENT

### 1. Introduction

Today's World rely strongly on fossil fuels i.e. oil, coal, natural gas for their energy needs. Following the statistical data from 2011 published by US Department of Energy Information (Table 1) almost 90% of sources of energy in the US are non-renewable [1].

Table 1. Usage of different kind energy sources in USA [1]

Sources of Energy		Use [%]
Non-renewable	Petroleum	36
	Natural Gas	26
	Coal	20
	Nuclear Electric Power	8
Renewable Energy		9

Studying data about total energy used by human civilization measured per year [2] one can find systematic increasing trend of World Energy Consumption. Table 2 shows available reserves, expiration time of oil, natural gas and coal reserves. It leads to the conclusion that fossil fuel resources in the World will run out in a very short period of time. There is also problem with damages of natural environment caused by using fossil fuels.

Table 2. Reserves expiration time of fossil fuels [3]

Fossil fuel type	Available reserve	Years of extraction remaining
Oil reserve	1 237 900 million barrels	40 years
Natural gas reserve	177 360 billion m <sup>3</sup>	60 years
Coal reserve	850 million tons	134 years

---

<sup>1</sup> Lublin University of Technology, Faculty of Environmental Engineering, Institute of Renewable Energy Engineering, Nadbystrzycka 38, 20-618 Lublin, Poland, email: s.gulkowski@pollub.pl

According to the information mentioned before there is a strong demand of seeking energy from new energy resources. In contrast to fossil fuels which can run out very fast, renewable energy can be considered “as resource that can renew itself as quickly as the energy received from the energy resource and more quickly than the consumption speed of the resource” [4]. These energy sources can be listed as wind energy, solar energy, ocean energy, geothermal and biomass energy. Because of their availability and cleanliness they seem to be a very good solution in energy production in the future. It is stated that 50% of the world energy needs will be fulfilled by renewable energy sources in the year of 2040. Availability of renewable energies in general depends on culture of individual community and distribution of the natural resources which depends on geographical locations [1].

However solar energy is available in most areas of our planet. In most simple terms, solar energy is the energy resource coming from the sun with the constant intensity equals  $1370 \text{ W/m}^2$  outside the earth's atmosphere. This value can change between the values of  $0\text{--}110 \text{ W/m}^2$  in the Earth surface. This large amount of energy can be used to produce electricity in photovoltaic process. From technological point of view two most common types of PV modules can be distinguished: crystalline silicon (85–90% of the market), and thin film with 10–15% of the total market. The conversion efficiency of PV module tested in laboratories under Standard Test Conditions (STC – see section 4 for more detailed description) is as follows [5]:

- monocrystalline Si solar modules: 11–19.5%,
- polycrystalline Si solar modules: 10–16%,
- thin film modules: 3–11.5%.

In reality these conversion factors can be lower than measured under the STC factors due to resistances in the electrical circuit, irradiance level, dirt and dust, shade, and air speed and temperature. The operation temperature of PV modules has a significant impact on the conversion efficiency and energy output which decreases with increase of temperature of the module. For example increasing temperature from  $22^\circ\text{C}$  to  $60^\circ\text{C}$  leads to decrease in efficiency from 12.7% to 9%. In order to stop the reduction of the PV efficiency because of module temperature it is necessary to cool down the module [6]

Because of the fact that photovoltaic systems are non-polluting, do not create greenhouse gases, do not create waste that must be stored, such as nuclear energy they seem to be a promising solution in the area of production energy. Solar panels have no moving part so they are also far quieter than wind turbines. They require very little maintenance beyond regular cleaning because they don't have moving parts to break and replace. Almost overall cost of the PV system is the initial cost of panels installation. Except of this cost energy production is almost for free [8]. For this reason many countries today produce electricity with use of solar panels.



Photovoltaic systems can be divided into 2 systems:

- grid-connected system (on-grid) – PV system that is connected to a public grid in order to send energy to the grid,
- stand-alone system (off-grid) – PV system that is not connected to the public grid; it requires batteries to storage energy produced by PV system.

Table 3 shows photovoltaic capacity load of the EU countries. It can be seen that Germany can be consider as a leader of photovoltaic technology in EU.

Photovoltaic technology is often consider to be useful only in warm or sunny climate regions. However, because of decreasing cost of modules, PV systems can be installed and used in cold regions as well, even in places that have snow. In some cases PV installations can have even better efficiency in cold climate because of the negative temperature coefficient of the solar cells [8].

**Table 3. Photovoltaic capacity load of the EU countries in 2013 [3]**

Country	New installation in 2013		
	On grid [MWp]	Off grid [MWp]	Total [MWp]
Germany	3305.0	5.0	3310.0
Italy	1461.0	1.0	1462.0
France	613.0	0.0	613.0
Holland	300.0	0.0	300.0
Denmark	155.0	0.2	155.2
Cyprus	17.5	0.1	17.6
Poland	2.1	0	2.1

In the light of information presented above and in order to better understand the dynamic behavior of photovoltaic systems this paper presents results of modeling and computer simulations of PV systems in terms of the most important values that determine amount of energy produced by photovoltaic installations: irradiance and temperature of the modules. Modeling Sun’s path for given location and time of the year have been carried out. On the basis of these calculations amount of energy per day has been calculated as well as theoretical total amount of solar energy available for a given location in one year. Influence of different level of irradiance and temperature on energy conversion in PV module has been also discussed. All simulations have been carried out with use of Matlab/Simullink environment.

## 2. Solar paths modeling

In order to use part of the large amount of solar energy reaching Earth’s surface one has to know path of the Sun over the course of a day. Due to Earth’s rotation around the Sun and the fact that the Earth’s axis is at angle of 23.45° relative to

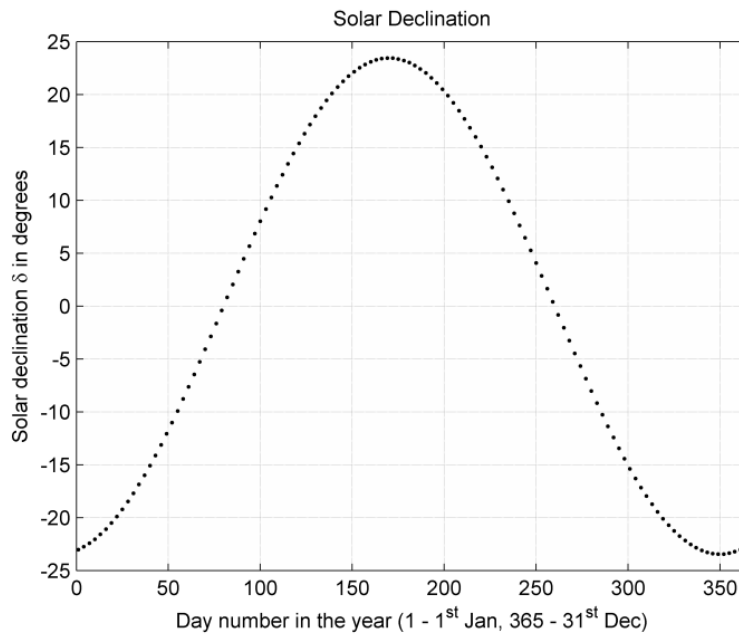
the ecliptic Sun's rays come from varying directions to the equatorial plane. The angle between the direction of the Sun and equatorial plane is known as the *solar declination*  $\delta$ , and can be calculated from equation (1):

$$\delta = -23,45 \cdot \cos \left[ \left( 2 \cdot \frac{\pi}{360} \right) \cdot (d + 10) \right] \quad (1)$$

where:  $d$  is the day number. Example of calculations for 2<sup>nd</sup> of January ( $d=2$ ) is given below:

$$\delta = -23,45 \cdot \cos \left[ \left( 2 \cdot \frac{\pi}{360} \right) \cdot (2 + 10) \right] = -22,93 \quad (2)$$

Figure 1 shows calculated *solar declination*  $\delta$  for year with the days numbered sequentially from 1 to 365, where 1 is the 1<sup>st</sup> of January and 365 is December the 31<sup>st</sup>.



**Figure 1. Solar declination  $\delta$  in one year calculated starting from 1<sup>st</sup> January (day 1) and finished on December 31<sup>st</sup>.**

Rotation of the Earth around its axis results in displacement of the Sun during the day. It can be expressed by *hour angle* given by equation (3).

$$\omega_s = (ST - 12) \cdot 15^\circ \quad (3)$$

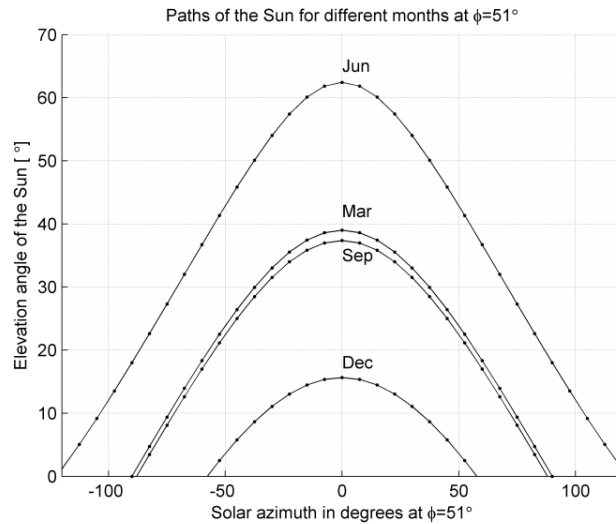
$ST$  is true solar time (local time) in hours (0–24 h). From a given point on Earth surface the Sun position can be determined by two main angles: *altitude angle* ( $h_s$ ) and *azimuth angle* ( $\gamma_s$ ). The *altitude angle* can be expressed as the angular height of the Sun in the sky measured from the horizontal plane and is calculated according to the equation (4).

$$\sin h_s = \sin \varphi \cdot \sin \delta + \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega_s \quad (4)$$

Where:  $\varphi$  is the latitude of the location,  $\delta$  is the angle of declination and  $\omega_s$  is the hour angle. The *azimuth angle* given by equation (5) is an angular displacement of the Sun reference line projected onto the horizontal plane from the south.

$$\sin \gamma_s = \frac{\cos \delta \cdot \sin \omega_s}{\cos h_s} \quad (5)$$

Figure 2 shows results of calculation of difference between paths of the Sun for 21<sup>st</sup> day of the March, June, September and December for latitude  $\varphi=51^\circ$  (Poland). At sunrise or sunset  $h_s=0$ . Figure 3 shows the dependence of the Solar path on latitude.



**Figure 2. Solar paths calculated for the 21<sup>st</sup> of March, June, September and December at latitude  $\varphi=51^\circ$**

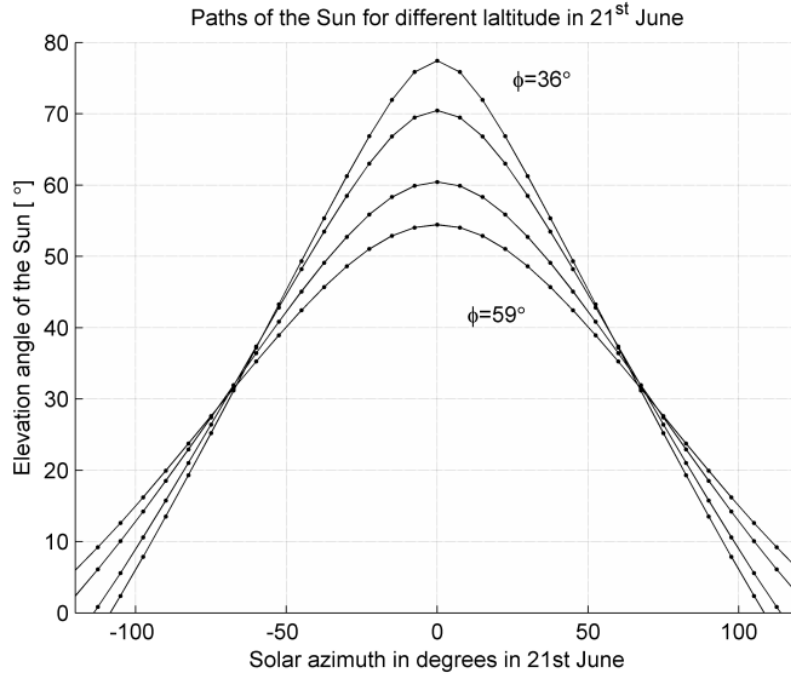


Figure 3. Solar paths at various locations with different latitude  $\phi=36^\circ$  (Malaga),  $\phi=45^\circ$  (Grenoble),  $\phi=53^\circ$  (Hamburg),  $\phi=60^\circ$  (Oslo) calculated for the 21<sup>st</sup> of June

It can be seen from Figures 2–3 that solar path strongly depends on the month of the year as well as on the latitude of location. It can be assumed that energy obtained from photovoltaic system depends on these values as well.

### 3. Modeling of solar radiation on horizontal surface

The irradiance at the outer edge of the Earth's atmosphere at horizontal plane parallel to the Earth's surface is called *extraterrestrial radiation*  $G_{ex}$ . Amount of radiation outside the atmosphere is called *solar constant*  $G_0$ . Solar radiation value outside the atmosphere varies with the rotation of the Earth around the Sun. The maximum value is  $1414 \text{ W/m}^2$  in early January and the minimum is  $1322 \text{ W/m}^2$  in early July. However, recommended mean value of this constant is  $1367 \text{ W/m}^2$ . Equation (6) shows relationship between *extraterrestrial radiation*  $G_{ex}$  and *solar constant*  $G_0$ .

$$G_{ex} [\text{W/m}^2] = G_0 \cdot \sin(h_s), \text{ where } h_s > 0 \quad (6)$$

Passing the sunlight through the Earth's atmosphere results in diffusion and also absorption of some wavelengths of the light. For this reason global irradiance  $G_T$  on the horizontal plane of the Earth's surface is weaker than *extraterrestrial radiation*  $G_{ex}$ . The global solar radiation that reaches the horizontal surface consists of two main components [9]:

- direct solar radiation GB
- diffuse solar radiation GD

Direct beam that falls directly from the Sun can be calculated from equations (7) and (8).

$$G_B = G_{B,norm} \cdot \sin(h_s), \quad (7)$$

where:

$$G_{B,norm} = A e^{\frac{-K}{\sin(h_s)}} \quad (8)$$

$A$  factor is an apparent extraterrestrial flux and  $K$  is a dimensionless factor called *optical depth*. Both of them depends on a day number  $N$ . Following equations (9–10) can be used to compute these factors.

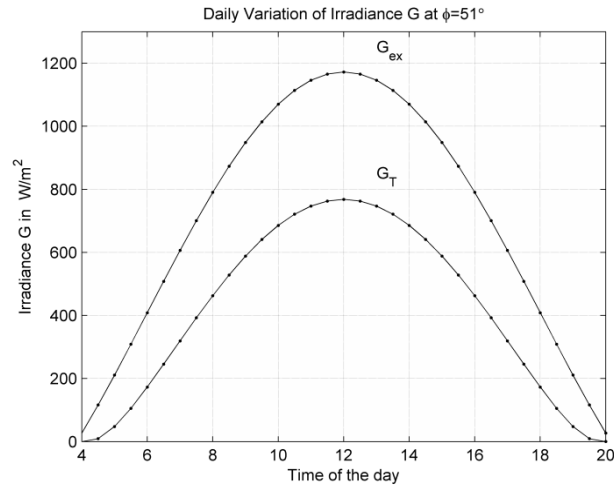
$$A = 1160 + 75 \sin \left[ \frac{360}{365} (N - 275) \right] \quad (9)$$

$$K = 0.174 + 0.035 \sin \left[ \frac{360}{365} (N - 100) \right] \quad (10)$$

Diffuse component of the solar radiation means that radiation is being scattered by clouds and other particles in the atmosphere. It can be calculated from equation (11).

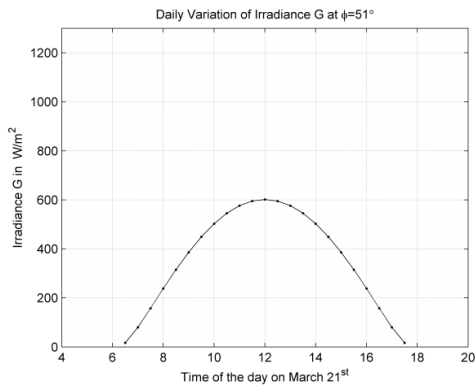
$$G_D = 0.095 + 0.04 \sin \left[ \frac{360}{365} (N - 100) \right] \cdot G_{B,norm} \quad (11)$$

Figure 4 shows the difference between *extraterrestrial radiation*  $G_{ex}$  and *terrestrial solar radiation*  $G_T$  defined as a sum of direct  $G_B$  and diffuse  $G_D$  component of the radiation. Calculations have been carried out for the latitude of Poland equals  $51^\circ$ .

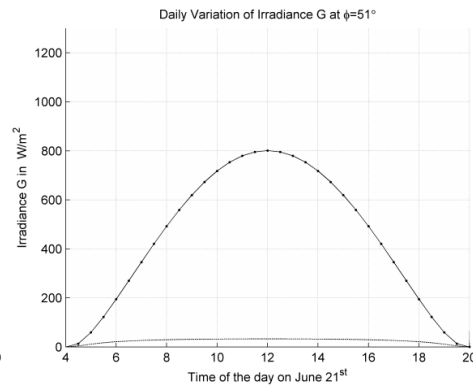


**Figure 4. Comparison of extraterrestrial irradiance  $G_{ex}$  and terrestrial irradiance  $G_T$  on the horizontal plane of Earth's surface in  $W/m^2$  calculated at  $\phi=51^\circ$**

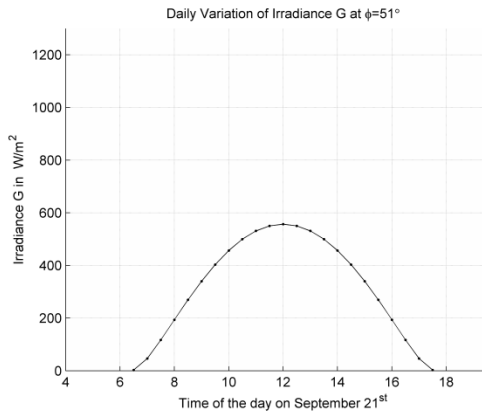
Figures 5–8 show calculation results of daily variation of clear sky irradiance  $G_T$  on horizontal plane for four different months at latitude of Poland equals  $51^\circ$ . It can be seen that for 21<sup>st</sup> of September and March irradiance seems to be similar. The highest value of irradiance have been shown in Figure 6 in June, and the worst in December (Figure 8).



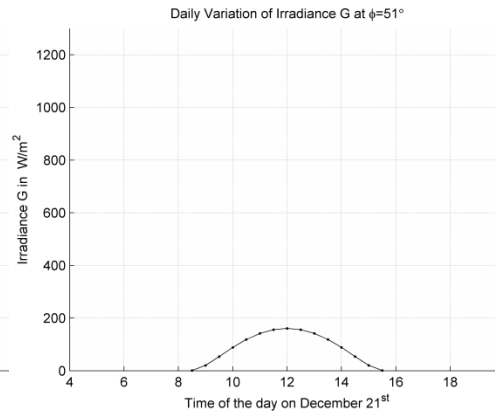
**Figure 5. Daily variation of clear sky irradiance  $G_T$  on horizontal plane at  $\phi=51^\circ$  (Poland) on 21<sup>st</sup> of March**



**Figure 6. Daily variation of clear sky irradiance  $G_T$  on horizontal plane at  $\phi=51^\circ$  (Poland) on 21<sup>st</sup> of June**



**Figure 7. Daily variation of clear sky irradiance  $G_T$  on horizontal plane at  $\varphi=51^\circ$  (Poland) on 21<sup>st</sup> of September**



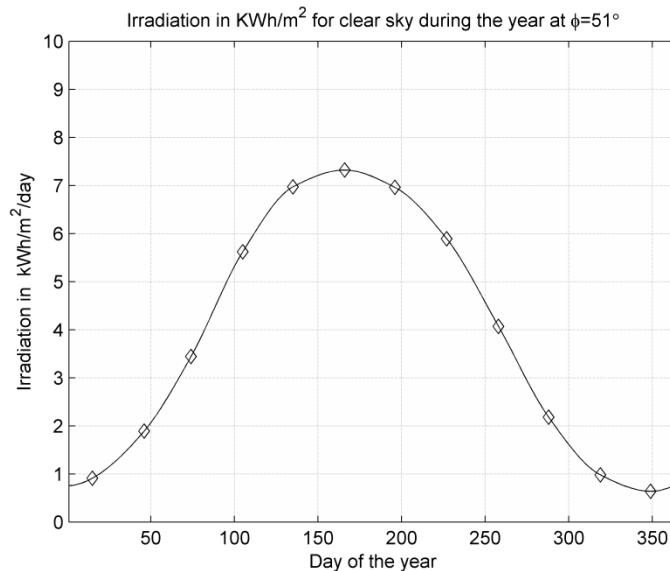
**Figure 8. Daily variation of clear sky irradiance  $G_T$  on horizontal plane at  $\varphi=51^\circ$  (Poland) on 21<sup>st</sup> of December**

Calculated values of energy stored during the whole day as a sum of irradiance  $G_T$  have been presented in Table 4. It can be seen that amount of energy available from the Sun on Earth's surface strongly depends on the shape of the irradiance plot. The highest value of energy  $H$  can be obtained in June and the smallest one in December.

**Table 4. Daily global irradiation on the horizontal plane of the Earth's surface calculated at  $\varphi=51^\circ$**

Date	Day number $N$	$H$ [kWh/m <sup>2</sup> ]
21 <sup>st</sup> of March	80	3.89
21 <sup>st</sup> of June	172	7.22
21 <sup>st</sup> of September	264	3.69
21 <sup>st</sup> of December	355	0.66

Figure 9 shows results of calculations of daily global irradiation expressed in kWh/m<sup>2</sup>/d on the horizontal plane of Earth's surface at  $\varphi=51^\circ$  for 15<sup>th</sup> day of each month. On the basis of this calculations energy for other days have been calculated with use of cubic interpolation method in Matlab environment. It leads to the possibility of calculation total annual energy of irradiation for clear sky as a sum of energy calculated for each day of the year. The total annual energy at given location  $\varphi=51^\circ$  for clear sky is equal 1428 kWh/m<sup>2</sup>/a. On the other hand annual mean of irradiation in Poland is equal 950 kWh/m<sup>2</sup>/a. However it should be emphasized that calculations have been done without including weather condition.



**Figure 9. Mean daily irradiation energy on horizontal plane at  $\phi=51^\circ$  (Poland) for clear sky obtained with use of cubic interpolation method**

#### 4. Modeling of solar module operation

As it has been mentioned before in order to be able to compare cells or PV modules of various technology (and producer) uniform conditions are specified for determining the characteristic electrical data. These Standard Test Conditions (STC) are defined as follows:

- Irradiance  $G^*=1000 \text{ W/m}^2$ ,
- Cell/Module temperature  $25^\circ\text{C}$ ,
- AM 1.5 spectrum

As a result of the module tests under STC graphic plot of current as a function of voltage is being prepared. Figure 10 shows characteristic curve  $I=f(V)$  for a solar cell. Determining the power for each point along the characteristic curve  $I-V$  results in the curve  $P=f(V)$ , that also has been shown in Figure 10 [5]. Basically, the  $I-V$  curve is characterized by the following three points [16,17]:

- The Maximum Power Point (MPP) is the point on the  $I-V$  curve at which the solar cell or module works with maximum power across the load. For this point, the maximum current  $I_m$  and maximum voltage  $V_m$  has to be found,
- The short-circuit current  $I_{sc}$  is the current corresponds to the short circuit condition when voltage is equal to 0,
- The open-circuit voltage  $V_{oc}$  is the voltage when the open circuit occurs and there is no current in the cel.



On the basis of these points it is possible to obtain efficiency of the tested module as a ratio between the maximum power and the incident light power (equation 12).

$$\eta = \frac{I_m \cdot V_m \cdot FF}{S \cdot G_T} \quad (12)$$

Where:  $S$  is the area of the module,  $G_T$  is the irradiance and  $FF$  is the fill factor coefficient expressed by equation (13):

$$FF = \frac{I_m \cdot V_m}{I_{sc} \cdot V_{oc}} \quad (13)$$

In practice  $FF$  is a useful coefficient that gives information about quality of the solar module and it is always less than 1.

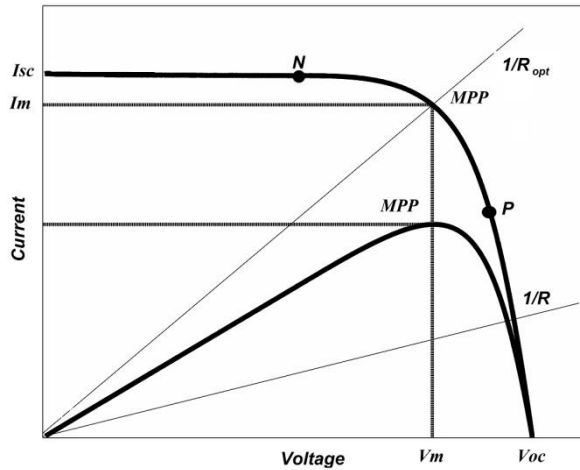


Figure 10. The I-V and P-V characteristics of the solar module [11]

In open-circuit or short-circuit solar module produces no power. Maximum power can be reached at MPP. This point depends on manufacturing tolerance and ageing of the cell as well as irradiance and temperature. With low voltages (small load) solar cell operates as an ideal source of current (point N in Figure 10). Closer to open-circuit voltage (large load) current drops off very fast. In order to use the solar module optimally, it should operate close to MPP for a given condition [5,9]. Modeling the I-V curve of the solar module allows to track the curve and find the maximum power point for different environmental condition [10].

Solar module's I-V curve can be modeled by an equivalent electrical circuit which consists of ideal current source  $I_{ph}$  in parallel with two diodes. First diode represents the recombination current in the quasi-neutral regions, while second diode represents recombination in the depletion region. For simplicity of the calculations the second diode can be neglected. Simplified diagram for one-diode model of the solar cell has been shown in Figure 11. As it can be seen, diagram consists also two resistances: series ( $R_s$ ) and shunt resistance ( $R_{SH}$ ). However, only series resistance has been taken into account for calculations.

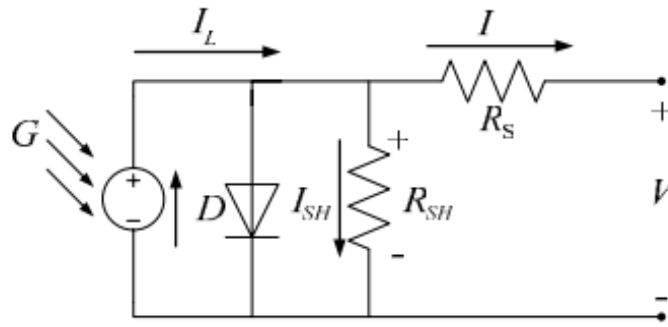


Figure 11. Equivalent electrical circuit of the solar cell [11]

In order to obtain results of I-V curve modeling under various environmental conditions, simplified one-diode model has been implemented in Matlab/Simulink environment following the studies developed by F.M. Gonzalez-Longatt [11]. This model has been tested many times before [12,13] and it is suitable especially for silicon crystalline solar cells [14]. According to the model the net current of the PV cell is the difference between photocurrent  $I_L$  and the normal diode current, which is given by equation (14).

$$I = I_L - I_0 \cdot \left( e^{\frac{q(V+IR_s)}{nkT}} - 1 \right) \quad (14)$$

Where:

$I_0$  – saturation current of the diode,

$q$  – electron charge  $1.6 \cdot 10^{-19}$  C,

$k$  – Boltzmann constant  $1.381 \cdot 10^{-23}$  J/K,

$T$  – temperature of the cell,

$R_s$  – series resistance of the cell,

$n$  – diode quality factor (1.2 for Si-mono, 1.3 for Si-poly, see Table 5 for more details).

Governing equations (15)-(19) that allow to calculate photocurrent  $I_L$  and the saturation current of the diode,  $I_0$ , have been presented below. The photocurrent mainly depends on the solar insolation and temperature of the cell.

$$I_L = I_L(T_1) + K_0(T - T_1) \quad (15)$$

$$I_L(T_1) = I_{sc}(T_1^*) \frac{G}{G^*} \quad (16)$$

Where:

$G, G^*$  – irradiance actual and at reference condition (1000 W/m<sup>2</sup> under STC)

$T_1^*$  – cell temperature at reference condition (25°C for STC)

$$K_0 = \frac{I_{sc}(T_2) - I_{sc}(T_1)}{T_2 - T_1} \quad (17)$$

Saturation current of the diode  $I_0$  depends on the cell temperature, which can be expressed by equation (18):

$$I_0 = I_0(T_1) \cdot \left(\frac{T}{T_1}\right)^{\frac{3}{n}} \cdot e^{-\frac{qV_g}{nk}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_1}\right)} \quad (18)$$

Where:  $V_g$  – material bandgap energy ( $V_g=1.12$  for Si)

$$I_0(T_1) = \frac{I_{sc}(T_1)}{e^{\frac{qV_{oc}(T_1)}{nkT_1} - 1}} \quad (19)$$

Table 5 shows diode quality factors dependent on PV technology.

**Table 5. Factor  $n$  for various PV technology [15]**

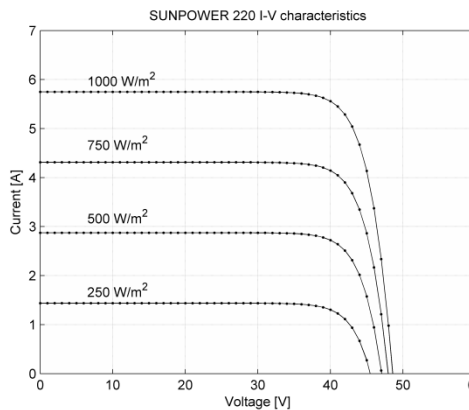
<b>Technology</b>	<b><math>\eta</math></b>
Si-mono	1.2
Si-poly	1.3
A-Si:H	1.8
A-Si:H tandem	3.3
A-Si:H triple	5.0
CdTe	1.5
CIGS	1.5
AsGa	1.3

The SunPower 220 PV module has been chosen for I–V curve modeling. The key specification of the module under STC that has been implemented in the model is shown in Table 6. Figures 12–15 show results of I–V curve calculations for SunPower module under different irradiance and temperature conditions.

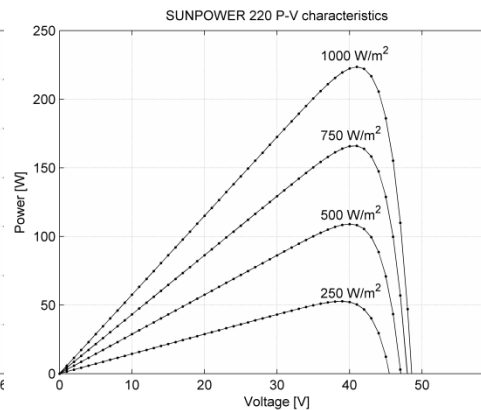
**Table 6. Specification of the SUNPOWER 220 solar module under STC**

Parameter	Variable	Value
Peak Power	$P_{max}$	220 W
Short-circuit current	$I_{sc}$	5.75 A
Open-circuit current	$V_{oc}$	48.6 V
Voltage at MPP	$V_m$	41.0 V
Current at MPP	$I_m$	5.37 A
Temp. coefficient of $I_{sc}$	$\mu_{isc}$	3.5 mA/°C
Temp. coefficient of $V_{oc}$	$\mu_{voc}$	-132.5 mV/°C

Figure 12 shows results of the module response to different irradiance. Temperature of the module was set as in the STC conditions. Output current increases with increase of irradiance. For example, increasing irradiance from 0.5 Sun ( $500 \text{ W/m}^2$ ) to 1 Sun ( $1000 \text{ W/m}^2$ ) results in increasing output power about 50%. It can be seen from the P–V characteristic presented in Figure 13.

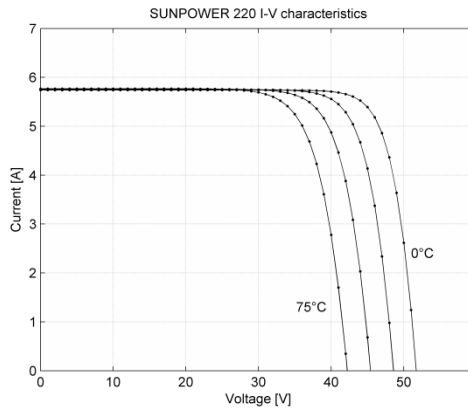


**Figure 12. Results of Matlab simulations of module's I–V characteristic dependency on irradiance**

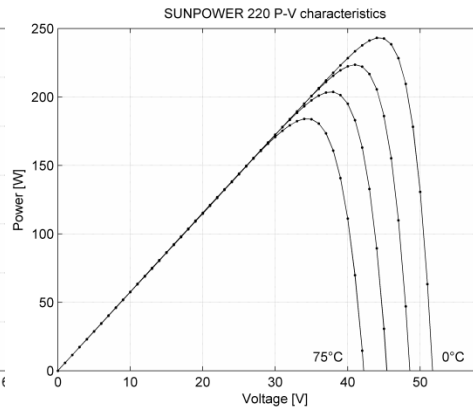


**Figure 13. Results of Matlab simulations of module's P–V characteristic dependency on irradiance**

Figures 14 and 15 show the influence of the module temperature  $T$  on the I–V and P–V characteristics. In order to find the temperature dependence four different temperature values have been chosen:  $0^\circ\text{C}$ ,  $25^\circ\text{C}$ ,  $50^\circ\text{C}$  and  $75^\circ\text{C}$ . Irradiance was equal  $1000 \text{ W/m}^2$ .



**Figure 14. Results of Matlab simulations of SunPower module's I-V curve for various temperature**



**Figure 15. Results of Matlab simulations of module's P-V curve for various temperature**

As it can be seen, increasing temperature causes voltage drop in the area of high voltages (near  $V_{oc}$ ). It leads to significant reduction of power at high temperatures and to decrease total amount of energy produce by the photovoltaic system.

## 5. Conclusions

Solar energy has a great potential as a source of energy for human's demand. In the light of the results presented in this paper it should be clear that computer simulation technique allows modeling the dynamic behavior of the PV system under different weather conditions. It has been proved that computer modeling can be consider as a useful tool for prediction of available solar energy on the Earth's surface for clear sky at various location and time of a day or year. With use of one-diode computer model of PV module the I-V characteristic can be modeled under different environmental conditions. It has been shown from the results of simulations that changing solar radiation or temperature of the module results in changes of the shape of I-V curve and output power of the system. It can be significant in a location where ambient temperature can be changed a lot throughout the year. *With use of computer model and data delivered by the producer of a PV module it is possible to carried out useful calculations that give information about module behavior without complicated, time-consuming and expensive measurement equipment.*

## References

- [1] Mohtasham J., *Renewable Energies*, Energy Procedia, vol. 74/2015, p. 1289–1297.
- [2] *BP Statistical Review of World Energy June 2016*, London, 2016. Available on-line <https://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/energy-economics/statistical-review-2016/bp-statistical-review-of-world-energy-2016-full-report.pdf> (October 2016)
- [3] Sari A., Akkaya M., *Contribution of Renewable Energy Potential to Sustainable Employment*, Procedia – Social and Behavioral Sciences, vol. 229, 2016, p. 316–325.
- [4] Erdogan Ceylan D., Sezgin, B., and Demirbilek, R., Yildiz Teknik University, *OFM Physics Teaching, Research Project in Field Education*, Renewable Energy Research Project, 2008, p. 3–17.
- [5] Häberlin H., *Photovoltaics System Design and Practice*, John Wiley & Sons, Chichester, UK, 2012.
- [6] Alshayeb M., Chang J. D., *Photovoltaic Energy Variations Due to Roofing Choice*, Procedia Engineering, vol. 145/2016, p. 1104–1109.
- [7] Pogson M., Hastings A., Smith P., *How does bioenergy compare with other land-based renewable energy sources globally*, GCB Bioenergy, vol. 5, 5/2013, p. 513–524.
- [8] Bayrakci M., Choi Y., Brownson J. R. S., *Temperature Dependent Power Modeling of Photovoltaics*, Energy Procedia, vol. 57/2014, p. 745–754.
- [9] Khatib T., Elmenreich W., *Modeling of photovoltaic systems using Matlab*, John Wiley & Sons, New Jersey, USA 2016.
- [10] Lokhande M., Kachhiya K., Patel M., *Matalb/Simulink Model of Solar PV Module and MPPT Algorithm*, Proceedings of National Conference on Recent Trends in Engineering & Technology, Gujarat, India, 13–14 May 2011.
- [11] González-Longatt Francisco M., *Model of Photovoltaic Module in Matlab™*, Proc. of 2nd Latin-American Congress of Electrical, Electronics and Computer Engineering Students, Merida, Venezuela 2005, p. 1–5.
- [12] Balachander K., *Modeling and simulation of PV module for different irradiation levels*, Elixir Elec. Eng., vol. 43/2012, p. 6798–6802.
- [13] Selmi T., *Analysis and Investigation of a Two – Diode Solar Cell Using MATLAB/Simulink*, Int. Journal of Renewable Energy Research, vol. 4/2014, p. 99–102.
- [14] Hernanz R., *Modelling of Photovoltaic Module*, International Conference on Renewable Energies and Power Quality ICREPQ'10 Granada, Spain, 23–25 March, 2010.
- [15] Said S., *A matlab/simulink based photovoltaic array model employing simpower systems toolbox*, Journal of Energy and Power Engineering vol. 6/2012, p. 1965–1975.

- [16] Sheik M., *Modeling and Simulation of Photovoltaic module using Matlab/Simulink*, International Journal of Chemical and Environmental Engineering, vol. 2, 5/2011, p. 350–355.
- [17] Deutsche Gesellschaft Für Sonnenenergie (Dgs). *Planning and Installing Photovoltaic Systems, A Guide for Installers, Architects and Engineers*. Taylor & Francis Group, 2008.

## MODELING AND SIMULATION OF PHOTOVOLTAIC SYSTEM USING MATLAB/SIMULINK ENVIRONMENT

### Abstract

Fossil fuels like oil, natural gas and coal which are in majority percentage used as a source of energy in most countries are running out very fast. In the nearest future they become too expensive or too environmentally damaging to use them for energy needs. Governments of many countries try to find alternative solutions in the sector of producing energy. Many of them focuses on renewable resources like wind, solar, geothermal or biomass energy. New, more environmentally friendly technologies have a high potential to become alternative technique for producing energy from coal, petroleum or gas. Among them Sun is a very promising source of energy that can be used. Non-polluting, and quiet photovoltaic systems with low maintenance costs have one of the highest growth potential method of producing energy from renewable sources. However, today's prices of PV modules are still quite high. For this reason many researches focus on different technologies of producing solar cells, look for a cheaper solutions. All of commercial modules has to be tested under Standard Test Conditions to give precise information about energy production. What is more, it could be profitable to know the dynamic behavior of the module during dynamic changes of the environmental conditions like irradiance or temperature which still change because of the weather conditions. In order to better understand the dynamic behavior of the solar cell modeling of I–V curve of the cell can be used.

This paper presents results of simulation and modeling of the solar photovoltaic system operating principles. Sun's paths in the function of location (latitude) and time of the day and year have been calculated. On the basis of these calculations available daily Sun energy for clear sky has been estimated. Modeling of I–V and P–V characteristics of the solar module with use of one-diode equivalent circuit has been carried out. Simulations have been carried out in Matlab/Simulink environment. Simulations results presented in this paper have shown possibility of prediction of total amount of energy for a given localization as well as dynamic behavior of solar module in different weather condition, especially for varying cell temperature and solar radiation.

**Keywords:** *photovoltaics, I–V characteristics, computer simulation, modeling*

## MODELOWANIE I SYMULACJE KOMPUTEROWE SYSTEMÓW FOTOWOLTAICZNYCH W ŚRODOWISKU MATLAB/SIMULINK

### Streszczenie

Paliwa kopalne takie jak ropa naftowa, gaz ziemny i węgiel będące w większości krajów źródłem energii wyczerpują się bardzo szybko. W najbliższej przyszłości staną się zbyt drogie lub zbyt szkodliwe dla środowiska, aby mogły być wykorzystywane do potrzeb energetycznych. Rządy wielu krajów starają się znaleźć alternatywne rozwiązania w sektorze produkcji energii. Wiele z nich koncentruje się na odnawialnych zasobach, takich jak energia wiatrowa, słoneczna, geotermalna lub biomasa. Nowe, bardziej przyjazne dla środowiska technologie mają duży potencjał, aby stać się alternatywną metodą wytwarzania energii z węgla, ropy naftowej lub gazu. Wśród nich bardzo

obiecującym źródłem energii jest Słońce. Systemy fotowoltaiczne o niskich kosztach utrzymania są jedną z największych możliwości wytwarzania energii ze źródeł odnawialnych. Jednakże dzisiejsze ceny modułów PV są wciąż wysokie. Z tego powodu wielu badaczy skupia swoją uwagę na różnych technologiach wytwarzania ogniw słonecznych szukając tańszych rozwiązań. Aby uzyskać dokładne informacje na temat produkcji energii komercyjne moduły fotowoltaiczne muszą być testowane w tzw. standardowych warunkach testowych. Istotne jest także zachowanie modułu podczas dynamicznych zmian warunków atmosferycznych, takich jak nasłonecznienie czy temperatura. Modelowanie krzywej charakterystyki I-V dla różnych parametrów nasłonecznienia i temperatury pozwala lepiej zrozumieć zachowanie się modułu w zmiennych warunkach meteorologicznych.

W artykule przedstawiono wyniki symulacji i modelowania systemu fotowoltaicznego. Obliczono położenie Słońca w funkcji lokalizacji (szerokości geograficznej) dla określonego dnia w roku. Obliczono ilość energii słonecznej padającej na m<sup>2</sup> powierzchni. Przeprowadzono modelowanie charakterystyk I-V i P-V modułu słonecznego z wykorzystaniem jednodiodowego schematu zastępczego. Przedstawione w niniejszym artykule wyniki symulacji wykazały możliwość przewidywania całkowitej ilości energii dla danej lokalizacji, a także dynamicznego zachowania modułu słonecznego w różnych warunkach pogodowych, szczególnie w przypadku zmiennej temperatury otoczenia i promieniowania słonecznego.

**Słowa kluczowe:** fotowoltaika, charakterystyki I-V, symulacje komputerowe, modelowanie



*Robert Jasionowski<sup>1</sup>*

## **CAMSS 2016 – MATERIALS ENGINEERING DATABASE AS A SUPPORT IN ACADEMIC EDUCATION PROCESS**

### **1. Introduction**

Materials science and engineering is an interdisciplinary field of science including issues related to a well-established technology-structure-properties-application approach for using structural materials. Information regarding structural materials are widely available in academic books [1–10], scientific papers, internet websites [11–14] or various databases [15]. These databases include a large data quantities allow receiving information on: chemical compositions, physical and mechanical properties (also at low and elevated temperature), conditions of heat and plastic deformation treatments or relevant applications. However, the bases are commonly limited to provide strictly qualitative information, but there is a problem to find a proper description of materials or processing symbols.

Computer Aided Materials Selection Software 2016 (CAMSS 2016), is a new author's database including, beside of a wide useful information pack for each material, also exemplary microstructure images, a description of common symbols and markings, binary phase diagrams and various editable comparative diagrams (for a single material or whole materials groups). The educational resources of CAMSS 2016 give it a versatile nature and may be easily adopted to needs of an industry, research entities or technical universities.

In the further part of the paper, a CAMSS 2016 specification will be shown in terms of its application upon an academic training.

### **2. CAMSS 2016 Description**

Computer Aided Materials Selection Software 2016 (CAMSS 2016) may be shortly described as an interactive materials database, in Polish language. CAMSS 2016 including five materials group (carbon steels, alloyed steels, cast steels, cast irons, non-ferrous alloys) that are organized in a treeview. Each main node in the tree includes also sub-nodes that allows distinguishing various materials applications. The user interface is shown in figure 1.

---

<sup>1</sup> Maritime University of Szczecin, Faculty of Marine Engineering, Wały Chrobrego 1/2, 70-500 Szczecin, Poland, email: r.jasionowski@am.szczecin.pl

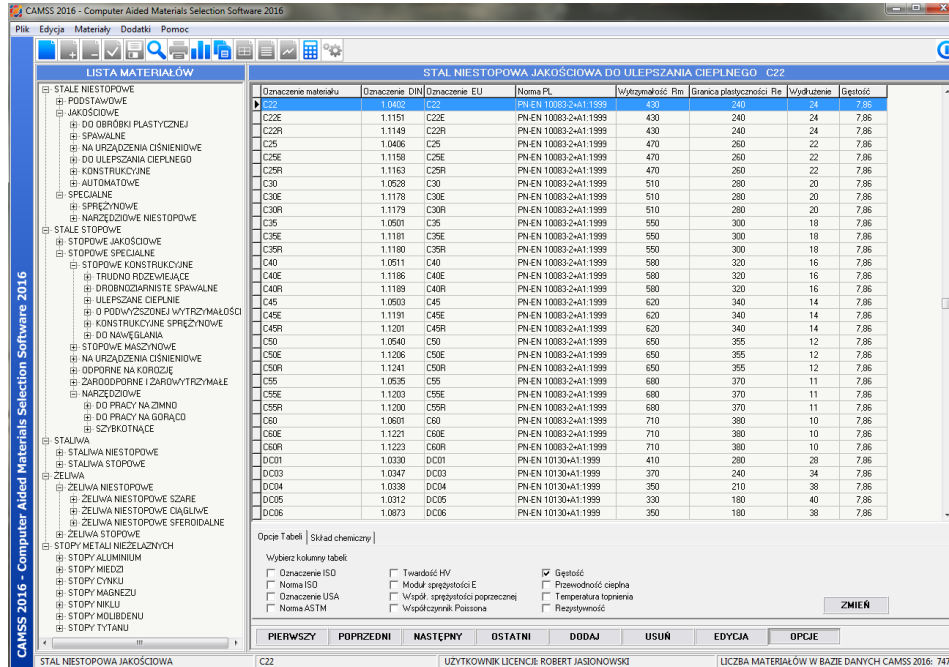


Fig. 1. User interface of Computer Aided Materials Selection Software 2016

The CAMSS 2016 user interface is made of 4 basic components: the main menu, the quick start icons, a list of materials sorted according to their use; and the main table. Depending on the user preferences, the main table may include beside of symbols and standards for each material, also data showing its mechanical and physical properties or chemical composition. Buttons allowing to move between table's rows, add/remove or edit a material are located below the main table. After clicking on the Edit button a screen showing data regarding e.g. a chemical composition, a microstructure, physical and mechanical properties, relevant applications that are based on PN-EN, ISO or ASTM standards, appears.

Depending on an application of particular material, some additional information are also included e.g. a temperature of hot working processing or heat treatment, low or elevated temperature properties, a hardness after various heat treatment steps. These additional data are mostly listed in Tables or graphs. Figure 2 shows information for HS10-4-3-10 high speed steel.

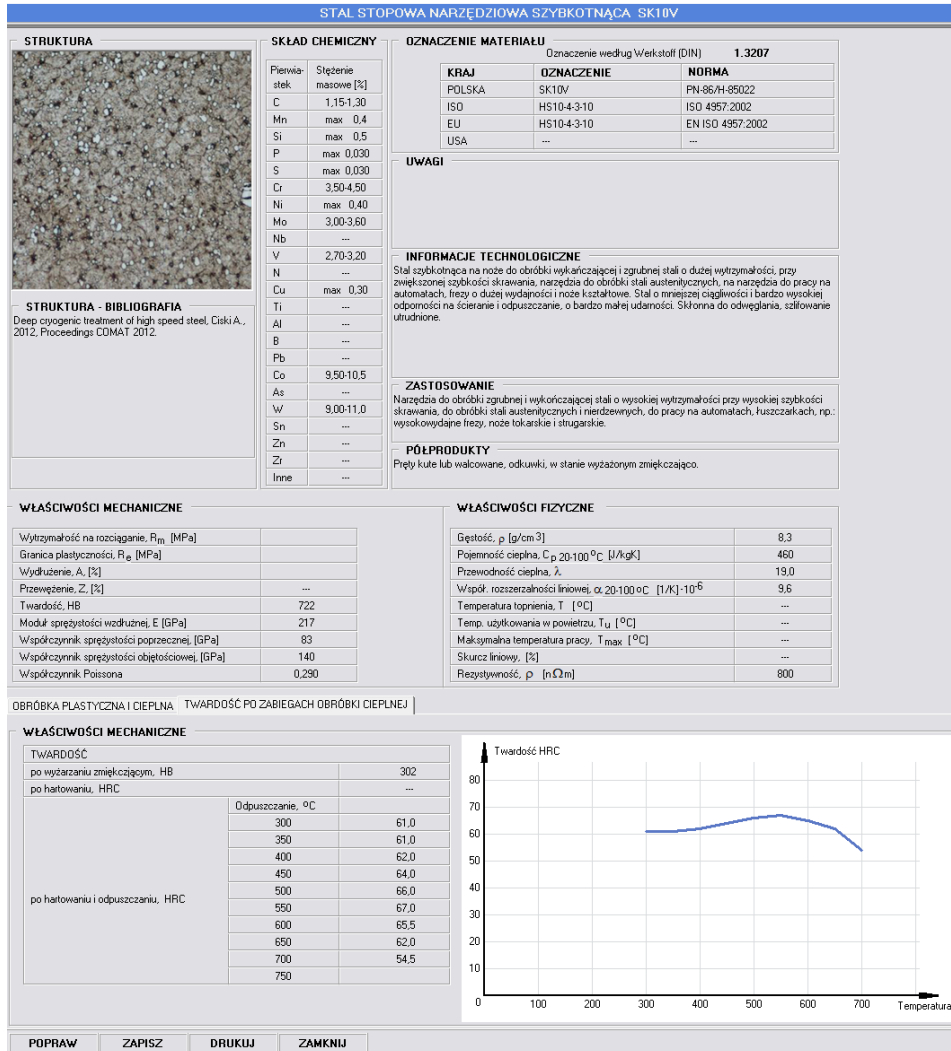
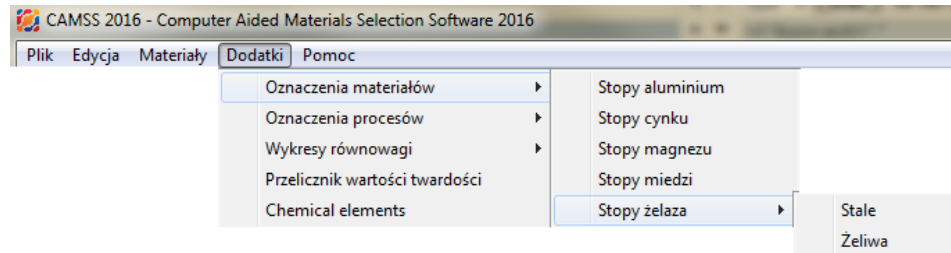


Fig. 2. Data included in the CAMSS 2016 database for HS10-4-3-10 high speed steel

### 3. CAMSS 2016 Educational content

The whole educational content of the CAMMS software is placed in “Adds (Dodatki)” menu (Fig. 3).



**Fig. 3. Content of „Adds (Dodatki)” card and its submenu**

The card “Adds (Dodatki)” includes following submenu:

- Materials symbols (Oznaczenia materiałów)
- Processing symbols (Oznaczenia procesów),
- Phase diagrams (Wykresy równowagi),
- Hardness units calculator (Przelicznik wartości twardości),
- Chemical elements.

Symbol descriptions are limited to aluminium, zinc, magnesium, copper and iron based alloys. The used symbols are taken from Polish or European standards and are consistent with European Standardization Committee. Additionally, materials markings in accordance to other organizations (e.g. French ANFOR, German DIN or Japanese JISC) are also included in the software.

Fig. 4 presents a module showing data regarding a marking system of aluminum alloys in accordance to EN 573-1:2004 standard.

OZNACZENIA MATERIAŁÓW - STOPY ALUMINIUM																																																				
Stopy aluminium																																																				
Europejski system oznaczeń	System oznaczeń stopów aluminium na podstawie symboli chemicznych	Inne systemy oznaczeń stopów aluminium	Zestawienie oznaczeń numerycznych i z symboli chemicznych																																																	
<p>System oznaczeń aluminium i stopów aluminium obrabionych plastycznie (na podstawie EN 573-1:2004) utworzone jest kolejno z:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- przedrostka EN, po którym następuje spacja;</li> <li>- litery A oznaczającej aluminium;</li> <li>- litery W oznaczającej wyrobki przerobione plastycznie;</li> <li>- łącznika;</li> <li>- międzynarodowego oznaczenia składającego się z czterech cyfr oznaczających skład chemiczny i - w razie potrzeby - litery identyfikującej odmianę krajową.</li> </ul> <p>PRZYKŁADY OZNACZEŃ: EN AW-5052, EN AW-5154A</p> <p>Czterocyfrowy system numeryczny składa się z czterech cyfr w oznaczeniu, gdzie pierwsza cyfra wskazuje grupę stopu. Grupy stopów zamieszczone poniżej:</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Materiał</th> <th>Seria</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Aluminium 99,00% i więcej</td> <td>1xxx (seria 1000)</td> </tr> <tr> <td>Stopy aluminium z miedzią</td> <td>2xxx (seria 2000)</td> </tr> <tr> <td>Stopy aluminium z manganem</td> <td>3xxx (seria 3000)</td> </tr> <tr> <td>Stopy aluminium z krzemem</td> <td>4xxx (seria 4000)</td> </tr> <tr> <td>Stopy aluminium z magnezem</td> <td>5xxx (seria 5000)</td> </tr> <tr> <td>Stopy aluminium z magnezem i krzemem</td> <td>6xxx (seria 6000)</td> </tr> <tr> <td>Stopy aluminium z cynkiem</td> <td>7xxx (seria 7000)</td> </tr> <tr> <td>Stopy aluminium z innymi pierwiastkami</td> <td>8xxx (seria 8000)</td> </tr> <tr> <td>Seria niestopowana</td> <td>9xxx (seria 9000)</td> </tr> </tbody> </table> <p>Seria 1xxx W oznaczeniu z serii 1xxx dwie ostatnie cyfry - z czterech w oznaczeniu - wskazują na minimalną zawartość procentową aluminium. Cyfry te odpowiadają dwu miejscom dziesiętnym - na prawo od przecinka - określającym minimalną zawartość procentową aluminium, wyrażoną z dokładnością do 0,01%. Druga cyfra w oznaczeniu stopu wskazuje modyfikację stopu w zakresie zanieczyszczeń lub dodatków stopowych. Jeżeli druga cyfra w oznaczeniu jest zerem, to wskazuje ona aluminium niesłupowe z naturalnymi granicznymi zawartościami zanieczyszczeń. Liczby całkowite od 1 do 9, przydzielone kolejno w miarę potrzeb, wskazują one szczególną kontrolę jednego lub więcej, pojedynczych zanieczyszczeń lub dodatków stopowych.</p> <p>Serie od 2xxx do 8xxx Oznaczenie stopu w seriach od 2xxx do 8xxx jest determinowane dodatkami stopowymi o największej średniej zawartości procentowej (w stopach serii 6xxx - Mg2Si). Jeżeli największa średnia zawartość jest wspólna dla więcej niż jednego dodatku stopowego, to wybór serii będzie określony kolejnością grupy: Cu, Mn, Si, Mg, Mg2Si, Zn lub inne. W seriach od 2xxx do 8xxx, dwie ostatnie cyfry - z czterech cyfr w oznaczeniu - nie mają specjalnego znaczenia i służą wyłącznie do identyfikacji różnych stopów aluminium w danej serii. Druga cyfra w oznaczeniu stopu wskazuje stop oryginalny lub wariant stopu, jeżeli druga cyfra w oznaczeniu jest zerem, to wskazuje ona stop oryginalny. Liczby od 1 do 9 wyłącznie, przydzielone kolejno, wskazują warianty stopu.</p> <p>System oznaczeń odlewów, gątek, do przetapiania z aluminium stopowego i stopów wtórnych aluminium (na podstawie PN-EN 1780-1:2004) utworzone jest kolejno z:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- przedrostka EN, po którym następuje spacja;</li> <li>- litery A oznaczającej aluminium;</li> <li>- litery:</li> </ul> <ul style="list-style-type: none"> <li>B - gąski do przetapiania;</li> <li>C - odlewy;</li> <li>M - stopy wstępne;</li> </ul> <ul style="list-style-type: none"> <li>- łącznika;</li> <li>- międzynarodowego oznaczenia składającego się z pięciu cyfr oznaczających skład chemiczny, gdzie:</li> </ul> <p>dla gąsek i odlewów:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1 - pozycja określa główny dodatek stopowy;</li> <li>2 - grupę stopu;</li> <li>3 - dowolna liczba;</li> <li>4 - liczba 0;</li> <li>5 - liczba 0, poza zastosowaniami w lotnictwie i kosmonautyce;</li> </ol> <p>dla stopów wtórnych:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1 - liczba 9;</li> <li>2, 3 - liczba atomowa głównego dodatku stopowego;</li> <li>4, 5 - numery chronologiczne, gdzie piąta cyfra parzysta jest zarezerwowana dla stopów o niskim poziomie zanieczyszczeń, nieparzysta dla stopów o wysokim poziomie zanieczyszczeń.</li> </ol> <table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Oznaczenie postaci produktu</th> <th colspan="5">5 cyfrowe oznaczenie</th> </tr> <tr> <th>1</th> <th>2</th> <th>3</th> <th>4</th> <th>5</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>B - gąski do przetapiania</td> <td>główny dodatek stopowy 2xxx: miedź 4xxx: krzem 5xxx: magnez 7xxx: cynk</td> <td>grupa stopów 21xxx Al Cu 41xxx Al SiMgTi 44xxx Al Si 51xxx Al Mg 71xxx Al ZnMg</td> <td>dowolna cyfra</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>C - odlewy</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>poza zastosowaniami w lotnictwie i kosmonautyce</td> </tr> <tr> <td>M - stopy wstępne</td> <td>9</td> <td>liczba atomowa głównego pierwiastka stopowego, np.: 05 dla boru; 14 dla krzemu; 29 dla miedzi;</td> <td></td> <td></td> <td>numery chronologiczne, gdzie piąta cyfra parzysta jest zarezerwowana dla stopów o niskim poziomie zanieczyszczeń, nieparzysta dla stopów o wysokim poziomie zanieczyszczeń.</td> </tr> </tbody> </table> <p>PRZYKŁADY: EN AC-21100, EN AB-45400, EN AB-71000, EN AM-90500</p>				Materiał	Seria	Aluminium 99,00% i więcej	1xxx (seria 1000)	Stopy aluminium z miedzią	2xxx (seria 2000)	Stopy aluminium z manganem	3xxx (seria 3000)	Stopy aluminium z krzemem	4xxx (seria 4000)	Stopy aluminium z magnezem	5xxx (seria 5000)	Stopy aluminium z magnezem i krzemem	6xxx (seria 6000)	Stopy aluminium z cynkiem	7xxx (seria 7000)	Stopy aluminium z innymi pierwiastkami	8xxx (seria 8000)	Seria niestopowana	9xxx (seria 9000)	Oznaczenie postaci produktu	5 cyfrowe oznaczenie					1	2	3	4	5	B - gąski do przetapiania	główny dodatek stopowy 2xxx: miedź 4xxx: krzem 5xxx: magnez 7xxx: cynk	grupa stopów 21xxx Al Cu 41xxx Al SiMgTi 44xxx Al Si 51xxx Al Mg 71xxx Al ZnMg	dowolna cyfra	0	0	C - odlewy					poza zastosowaniami w lotnictwie i kosmonautyce	M - stopy wstępne	9	liczba atomowa głównego pierwiastka stopowego, np.: 05 dla boru; 14 dla krzemu; 29 dla miedzi;			numery chronologiczne, gdzie piąta cyfra parzysta jest zarezerwowana dla stopów o niskim poziomie zanieczyszczeń, nieparzysta dla stopów o wysokim poziomie zanieczyszczeń.
Materiał	Seria																																																			
Aluminium 99,00% i więcej	1xxx (seria 1000)																																																			
Stopy aluminium z miedzią	2xxx (seria 2000)																																																			
Stopy aluminium z manganem	3xxx (seria 3000)																																																			
Stopy aluminium z krzemem	4xxx (seria 4000)																																																			
Stopy aluminium z magnezem	5xxx (seria 5000)																																																			
Stopy aluminium z magnezem i krzemem	6xxx (seria 6000)																																																			
Stopy aluminium z cynkiem	7xxx (seria 7000)																																																			
Stopy aluminium z innymi pierwiastkami	8xxx (seria 8000)																																																			
Seria niestopowana	9xxx (seria 9000)																																																			
Oznaczenie postaci produktu	5 cyfrowe oznaczenie																																																			
	1	2	3	4	5																																															
B - gąski do przetapiania	główny dodatek stopowy 2xxx: miedź 4xxx: krzem 5xxx: magnez 7xxx: cynk	grupa stopów 21xxx Al Cu 41xxx Al SiMgTi 44xxx Al Si 51xxx Al Mg 71xxx Al ZnMg	dowolna cyfra	0	0																																															
C - odlewy					poza zastosowaniami w lotnictwie i kosmonautyce																																															
M - stopy wstępne	9	liczba atomowa głównego pierwiastka stopowego, np.: 05 dla boru; 14 dla krzemu; 29 dla miedzi;			numery chronologiczne, gdzie piąta cyfra parzysta jest zarezerwowana dla stopów o niskim poziomie zanieczyszczeń, nieparzysta dla stopów o wysokim poziomie zanieczyszczeń.																																															

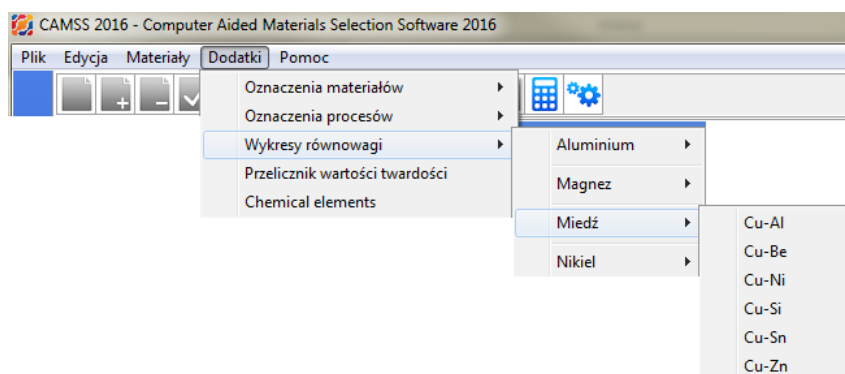
Fig. 4. Description of aluminium alloys markings

Another educational option of CAMSS 2016 software is a clarification of heat treatment and plastic working processing markings. The description is presented in 2-column table, where the first column includes a material condition symbol, and the second column shows its detailed description. An exemplary appearance of this module is shown in figure 5.

OZNACZENIA PROCESÓW OBRÓBKI PŁASTYCZNEJ I CIEPLNEJ	
Oznaczenia procesów obróbki plastycznej i cieplnej	
Stopy aluminium	
Objaśnienia stanów wyrobów ze stopów aluminium po procesach obróbki plastycznej i cieplnej na podstawie PN-EN 515:1996 przedstawiono w tabeli poniżej:	
STAN	OBJAŚNIENIE
1. Wykazano stanów wyrobów ze stopów aluminium po procesach obróbki plastycznej i cieplnej na podstawie PN-EN 515:1996 przedstawiono w tabeli poniżej:	
0	Wykazano produkty, które osiągnęły w wyniku formowania na gorąco właściwości takie, jakie są wymagane po wstążaniu.
01	Obróbione cieplnie w podobnej temperaturze i przez podobny czas, jak wymagane dla obróbki w kąpieli, i powoli schłodzone do temperatury pokojowej, jednorodnie.
02	Przeobrobione plastycznie na gorąco w celu polepszenia odkształcalności do takiej wartości, jak wymagana dla formowania superplastycznego (SPF).
03	Ujednorodnione.
H12	Umocnione przez walcowanie - 1/4 twardości.
H14	Umocnione przez walcowanie - 1/2 twardości.
H16	Umocnione przez walcowanie - 3/4 twardości.
H18	Umocnione przez walcowanie - 4/4 twardości (całkowicie utwardzone).
H19	Umocnione przez walcowanie - efektu twardości.
Hw4	Stosunek do arkuszy lub taśm deseniowych lub wygiętych, wyprodukowanych z odpowiednich materiałów o stanie utwardzenia Hxx.
Hw5	Umocnione przez walcowanie - stosunek na rury spawane.
H111	Wykazano i nieznacznie umocnione przez walcowanie (mniej, niż H11) podczas kolejnych operacji, takich jak wyprężanie lub prostowanie.
H112	Nieznacznie umocnione przez walcowanie po formowaniu na ciepło i/lub lekkim formowaniu na zimno (podane graniczne wartości parametrów mechanicznych).
H116	Stosuje się do stopów aluminiowo-magnezowych o zawartości magnezu 4% lub więcej i dla których podane są graniczne wartości parametrów mechanicznych oraz odporność na korozję warstwową.
H22	Umocnione przez walcowanie i częściowo wystrzone - 1/4 twardości.
H24	Umocnione przez walcowanie i częściowo wystrzone - 1/2 twardości.
H26	Umocnione przez walcowanie i częściowo wystrzone - 3/4 twardości.
H28	Umocnione przez walcowanie i częściowo wystrzone - 4/4 twardości (całkowicie utwardzone).
H32	Umocnione przez walcowanie i ustabilizowane - 1/4 twardości.
H34	Umocnione przez walcowanie i ustabilizowane - 1/2 twardości.
H36	Umocnione przez walcowanie i ustabilizowane - 3/4 twardości.
H38	Umocnione przez walcowanie i ustabilizowane - 4/4 twardości (całkowicie utwardzone).
H42	Umocnione przez walcowanie i malowane lub lakierowane - 1/4 twardości.
H44	Umocnione przez walcowanie i malowane lub lakierowane - 1/2 twardości.
H46	Umocnione przez walcowanie i malowane lub lakierowane - 3/4 twardości.
H48	Umocnione przez walcowanie i malowane lub lakierowane - 4/4 twardości (całkowicie utwardzone).
W	Obróbione cieplnie w kąpieli (niestabilny stan utwardzenia).
W51	Obróbione cieplnie w kąpieli (niestabilny stan utwardzenia) i odprężone przez wyprężanie o kontrolowaną wielkość (twałe odkształcenie 0,5% do 3% dla arkuszy, 1,5% do 3% dla płyt, 1% do 3% dla kucia ręcznego lub kucia pierścieniowego).
W510	Obróbione cieplnie w kąpieli (niestabilny stan utwardzenia) i odprężone przez wyprężanie o kontrolowaną wielkość (twałe odkształcenie 1% do 3% dla wyciskanych walcówki, prętów niepokrywanych i rur, 0,5% do 3% dla rur ciągniętych).
W511	Tak samo, jak W510, z wyjątkiem: po wyprężaniu dozwolone jest lekkie prostowanie w celu uzyskania zgodności ze standardowymi tolerancjami.
W52	Obróbione cieplnie w kąpieli (niestabilny stan utwardzenia) i odprężone przez dogrzanie w celu wytworzenia stałego odkształcenia 1% do 5%.
T1	Studzone po procesie formowania na gorąco i starzone w naturalny sposób.
T2	Studzone po procesie formowania na gorąco, przeobrobione plastycznie na zimno i starzone w naturalny sposób.
T3	Obróbione cieplnie w kąpieli, przeobrobione plastycznie na zimno i starzone w naturalny sposób.
T31	Obróbione cieplnie w kąpieli, przeobrobione plastycznie na zimno o około 1% i starzone w naturalny sposób.
T351	Obróbione cieplnie w kąpieli, odprężone przez wyprężanie o kontrolowaną wielkość (twałe odkształcenie 0,5% do 3% dla arkuszy, 1,5% do 3% dla płyt, 1% do 3% dla walcówkowych, 1% do 5% dla kucia ręcznego) i starzone w naturalny sposób.

**Fig. 5. Description of symbols used for a marking of heat treatment and plastic working processing of aluminum alloys**

Implemented phase diagrams are the additional interesting educational option of CAMSS 2016. The software includes binary diagrams of aluminum, magnesium, copper and nickel alloys. The number of available diagrams depends on a number of alloys for each particular element. In the case of copper, the software includes 6 binary phase diagrams that may be found in “Copper (Miedź)” submenu.



**Fig. 6. Submenu including a list of six available binary diagrams for copper alloys**

Binary diagrams (or their parts) are also supplemented with a description of particular phases and color fields distinguishing cast and wrought alloys. A part of Cu-Sn binary diagram is shown in figure 7.

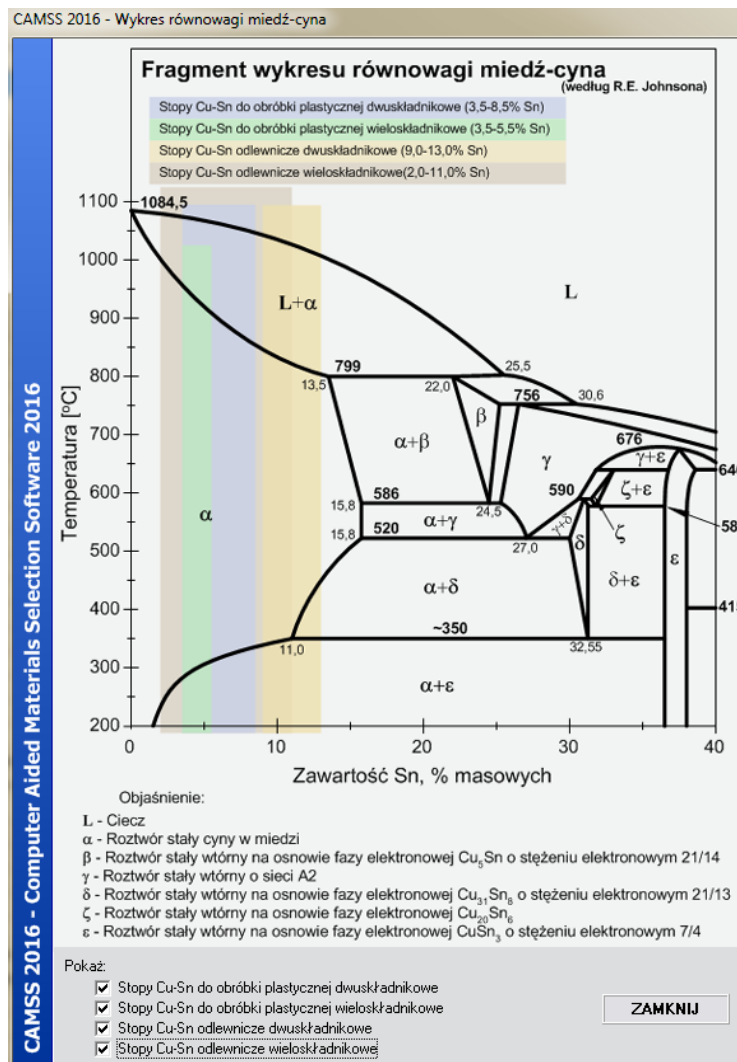


Fig. 7. Part of Cu-Sn phase diagram

“Hardness units calculator (Przelicznik wartości twardości)” and „Chemical elements” are also included in the „ Adds (Dodatki)” menu. The hardness units calculator allows comparing a hardness values obtained from various testing methods. Exemplary results are shown in figure 8.

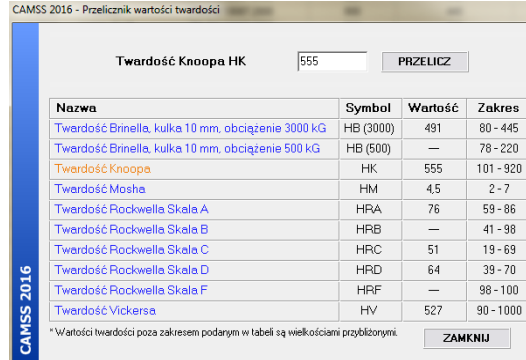


Fig. 8. The hardness units calculator window

The „Chemical elements” submenu is a program for conversion of mass percent to atomic percent contents (and reversely) in metallic alloys.

Furthermore, a direct graphical comparison of selected properties (e.g. yield strength, tensile strength, elongation, hardness, density etc.) for whole groups of materials is an additional interesting function of CAMSS 2016. Fig. 9 shows an example of such comparative graph plotted for the tensile strength.

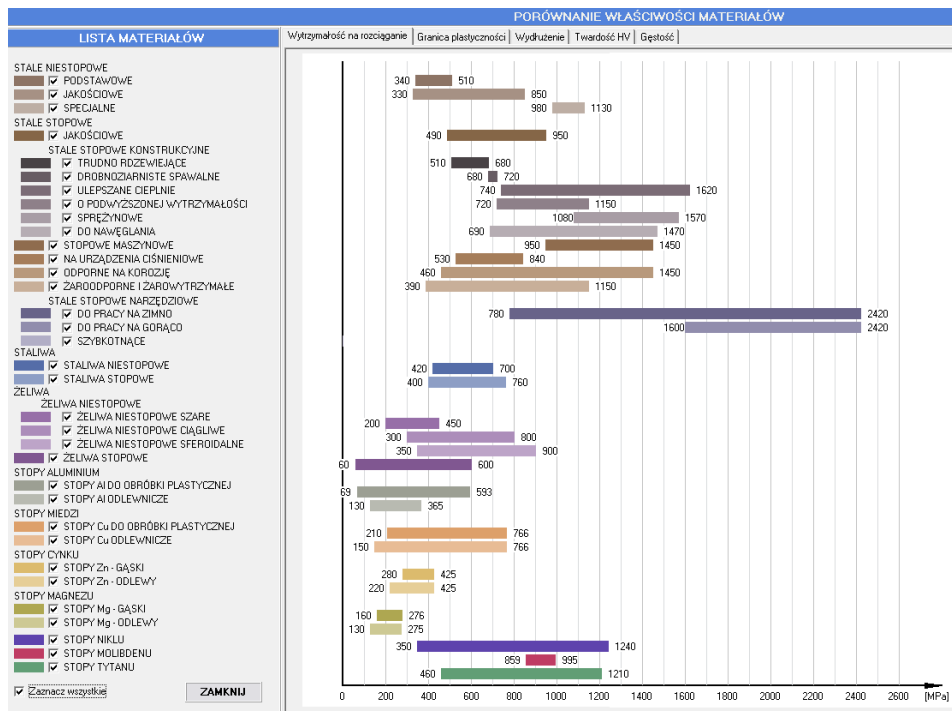
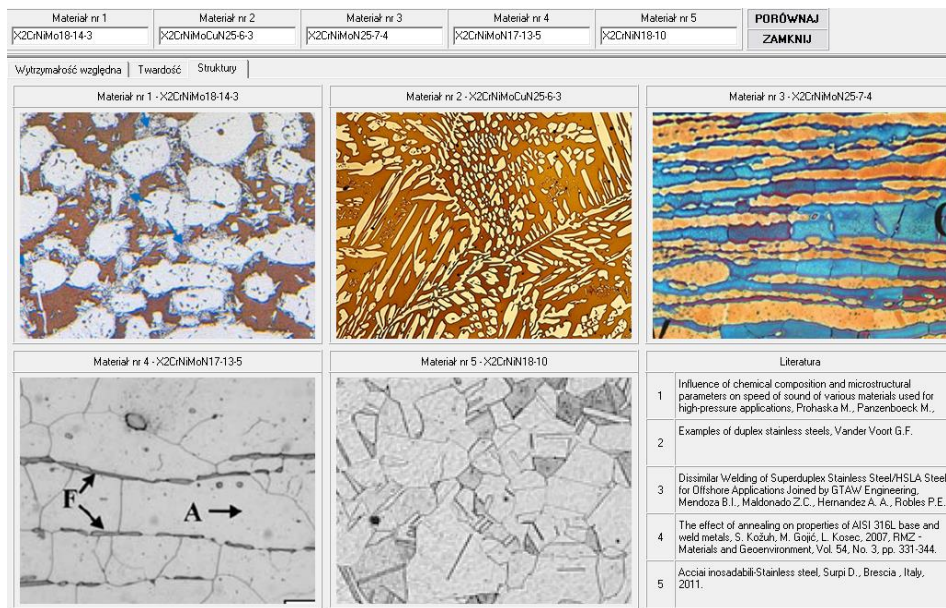


Fig. 9. Comparative graph showing the ultimate tensile strength for various materials groups



Moreover, arbitrarily selected five materials may be quickly compared in terms of their specific strength, hardness and microstructure. This comparison is presented in the form of columnar plots and compact sets of microstructure images. Fig. 10 shows a set of microstructure images compared for X2CrNiMo18-14-3, X2CrNiMoCuN25-6-3, X2CrNiMoN25-7-4, X2CrNiMoN17-13-5, X2CrNiN18-10 steels.



**Fig. 10. Comparison of microstructures of five arbitrarily selected materials**

#### 4. CAMSS 2016 Conclusions

CAMSS 2016 is a computer software having two basic functions: engineering and educational. Engineers working for industrial companies may use the software upon designing production processes, as well as for a selection of proper materials substitutes. Academic teachers or researchers may find CAMSS 2016 useful in a material identification procedure based on its chemical composition or mechanical and physical properties, as well as successfully use this software for lectures and training purposes.

## References

- [1] Berns H., Theisen W., Scheibelein G., *Ferrous Materials. Steels and Cast Iron*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany, 2008.
- [2] Bringas J.E., *Handbook of Comparative World Steel Standards*, ASTM, USA, 2004.
- [3] Dobrzański L.A., *The principles of selection of engineering materials from cards of profiles*, Gliwice, Poland, 2001.
- [4] Friedrich H.E, Mordike B.L, *Magnesium Technology*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany, 2006.
- [5] Gale W.F., Totemeier T.C., *Smithells Metals Reference Book*, ASTM, USA, 2004.
- [6] Krauss G., *Steels: Processing, Structure, and Performance*, ASM International, USA, 2015.
- [7] Michna S., Lukac I., Louda P., Ocenasek V., *Aluminium Materials and Technologies*, Presov, Czech Republic, 2007.
- [8] H. Okamoto H., *Desk Handbook: Phase Diagram for Binary Alloys*, ASM International, USA, 2010.
- [9] Spittel M., Spittel T., *Materials. Part 1 Ferrous Alloys*, Springer-Verlag Heidelberg, Germany, 2009.
- [10] Spittel M., Spittel T., *Materials. Part 2 Non-Ferrous Alloys – Light Metals*, Springer-Verlag Heidelberg, Germany, 2011.
- [11] <http://www.matweb.com/> (20.02.2017).
- [12] <http://www.azom.com/> (20.02.2017).
- [13] <http://www.kupferinstitut.de/> (20.02.2017).
- [14] <http://www.totalmateria.com/> (20.02.2017).
- [15] <http://www.grantadesign.com/> (20.02.2017).

## **CAMSS 2016 – MATERIAŁOWA BAZA DANYCH JAKO POMOC EDUKACYJA W PROCESIE KSZTAŁCENIA AKADEMICKIEGO**

### **Streszczenie**

Computer Aided Materials Selection Software 2016 (CAMSS 2016) to autorski program komputerowy, który może służyć m.in. do: identyfikacji materiałów na podstawie składu chemicznego lub właściwości mechanicznych i fizycznych, doboru materiału do konkretnych zastosowań, doboru zamiennika danego materiału. CAMSS 2016 zawiera: informacje dotyczące składu chemicznego właściwości fizycznych i mechanicznych, w tym właściwości wytrzymałościowych w niskiej i wysokiej temperaturze, warunków obróbki cieplej i plastycznej i bardzo dużą ilość materiałów edukacyjnych co czyni go oprogramowaniem uniwersalnym, które może być wykorzystywane w kształceniu przyszłych inżynierów. W niniejszym artykule przedstawiono i omówiono zawartość edukacyjną CAMSS 2016, w skład której wchodzi m.in.: objaśnienia oznaczeń stopów, objaśnienia symboli procesów cieplnych i plastycznych, wykresy układów równowagi fazowej stopów metali.

**Słowa kluczowe:** bazy danych materiałów inżynierskich, CAMS, stopy metali, właściwości mechaniczne

## **CAMSS 2016 – MATERIALS ENGINEERING DATABASE AS A SUPPORT IN ACADEMIC EDUCATION PROCESS**

### **Abstract**

Computer Aided Materials Selection Software 2016 (CAMSS 2016) is an authors computer software that may be used to the identification of materials based on their chemical composition or mechanical and physical properties; to a selection of material for a pre assumed engineering application or indicating a proper substitutes. CAMSS 2016 includes information regarding chemical composition, physical and mechanical properties (at low and elevated temperature), and required conditions for thermomechanical processing and a large number of educational information what gives it a versatile nature, particularly useful upon a training for engineer candidates. In the present paper, a content of CAMSS 2016 software including a description of alloys denotations, heat treatment and plastic working processing symbols, binary phase diagrams, is shown and analyzed.

**Keywords:** *materials and engineering databases, CAMS, metallic alloys, mechanical properties*

*Jerzy Lipski<sup>1</sup>, Jakub Pizon<sup>2</sup>*

## **DECISION PROCESS SUPPORT WITH USE OF A MOBILE SYSTEM**

### **1. The introduction to MatLab mobile application calculation technology**

General purpose of programming languages such as C, C #, or C ++ allow programmer to create applications that are able to perform any computing tasks. However, the development of such programs and their optimization is usually a very time-consuming activity. Especially when functional and aesthetic user interface is required.

An alternative to that is to use prepared calculation package with all needed functions and adequate interface. Specific features, in this respect, has MATLAB package. MATLAB package contains a very rich library of optimized computing functions that are very useful to support problem solving process in many areas of science and technology. In this way, by using the package it is possible to rapidly construct applications that run in interpreter's mode or that are compiled [1].

In addition to high efficiency of numerical procedures MATLAB is characterized by its extensibility. It involves the possibility of joining own pieces of source code to the core of the MATLAB program. Those pieces are in the form of so-called m-files or mex-files compiled in C. The names of the stored files, from the point of view of the interpreter MATLAB automatically become the names of the commands. The features included in the libraries of MATLAB can also be used as a piece of code in executable applications outside the MATLAB environment.

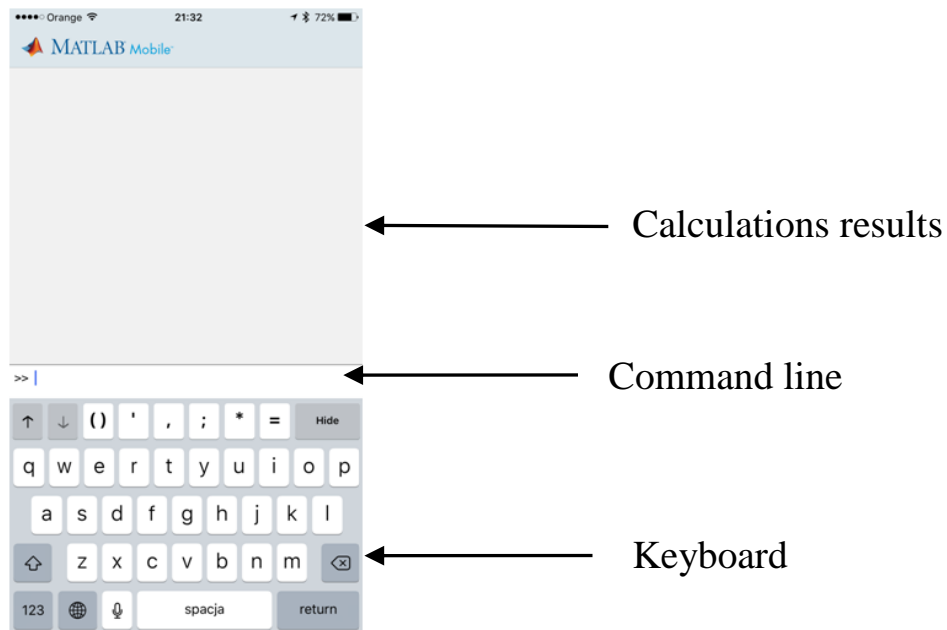
Based on brought MATLAB characteristics conclusion arise that this tool is particularly useful for fast development of decision support applications in industrial environments than constructing them from scratch in C or C#. Nevertheless, good knowledge of the problem being solved and methods that may need to be applied to solve it are crucial conditions for application success..

With the advent of Cloud Computing technology, MATLAB has gained new opportunities. Now, you can place prepared MatWorks's scripts and data for the calculation in Cloud Computing infrastructure and remotely by using mobile devices, run programs and receive results. MATLAB Mobile application that powers a described solution is available both on Android and Apple iOS mobile operating system platforms.

---

<sup>1</sup> Lublin University of Technology, Management Faculty, Department of Enterprise Organization, email: j.lipski@pollub.pl

<sup>2</sup> Lublin University of Technology, PhD student at Doctoral Studies conducted by Mechanical Engineering Faculty of Lublin University of Technology, email: jakub.pizon@pollub.edu.pl

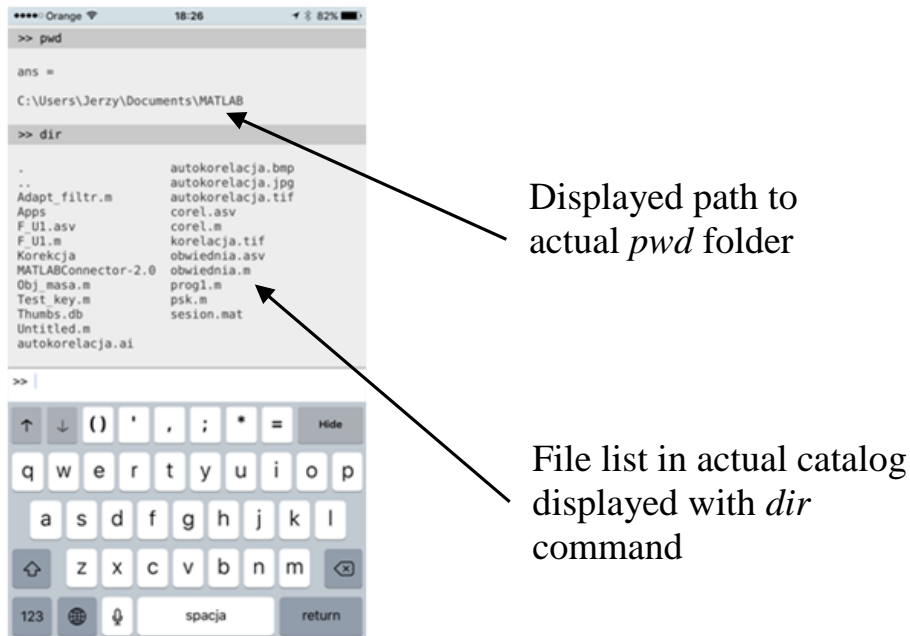


**Fig. 1. User interface of MATLAB Mobile application on iPhone**

MATLAB Mobile user interface (Fig. 1) is very simple, however, it allows to efficiently find required program files on the server in the cloud and runs it with desired set of parameters and to display the results of the calculations.

If the mobile device is connected via the network to MATLAB instance running in Cloud Computing infrastructure mobile user gets access to the command line interface and to all data files. Thanks to that, the user can run any file with a program that is on the path to MATLAB computational cloud. What is more, the user may also delegate file operations (Fig. 2) by performing standard MATLAB commands such as:

- *cd* (change directory) and *pwd* (view current directory),
- write data to a file and access them with *save* and *load* commands,
- view the contents of text files that contain software MATLAB with command type.



**Fig. 2. Examples of operations on files located on Cloud Computing server performed with MATLAB Mobile application user interface**

Graphs and variables generated during the execution of the program will be available after its run completion. In order to list the variables available in remote MATLAB session, use the command *whos*.

There are few limitations of MATLAB mobile application and they are caused by specific nature and constraints of mobile devices.

MATLAB Mobile does not run applications for matching function (Curve Fitting) and signal analysis (Signal Analysis). What is more, there is no option of building a graphical user interface using a specially designed environment in MATLAB's GUIDE (Graphical User Interface Design Environment) or possibility to run Simulink module – graphical environment for simulation.

And there is no option to run m-files on a mobile device editor. Moreover, MATLAB Mobile does not provide interaction mode for 3D charts and *doc* command is unavailable to present MATLAB documentation. This command is replaced by a link to the MathWorks® containing full documentation: <http://www.mathworks.com/help>. However, these limitations are not essential to the applications described in this article.

## 2. Application areas of described technology in production engineering

Analyzing the area of problems which engineer needs to solve at stage of production preparation and production control phase it is observed that a number of activities which require advanced calculations to support decisions are needed.

Often, due to the nature of production, decisions should be preceded by a process modeling and optimization of relevant parameters [2].

Such tasks require the development of applications to gather and store data and perform calculations using significant computational power. A convenient method to this is to extract the data and their registration with the help of mobile devices such as tablets and smartphones and microcontrollers embedded in machinery and technological equipment. However, in most cases, their insight computing power in the phase calculation is insufficient. Another problem is the development of applications processing collected data. This task requires the ability to write programs in high-level programming language in dedicated environments. This is a laborious and expensive process because of the costs of the software engineering process that is connected with software creation, debugging, testing and code optimization.

MATLAB environment has a number of features that allow to solve complex mathematical problems by engineers representing various fields of engineering. The design of programs in the form of scripts and built-in functions optimized by MATLAB developers and users from multiple research centers allow engineers to quickly develop their own applications.

A special feature of these applications is the close adaptation to the problem being solved with the use of advanced mathematical methods contained in the libraries (toolboxes). These features can now be used in Production Engineering to build a library of domain applications that run remotely from mobile devices.

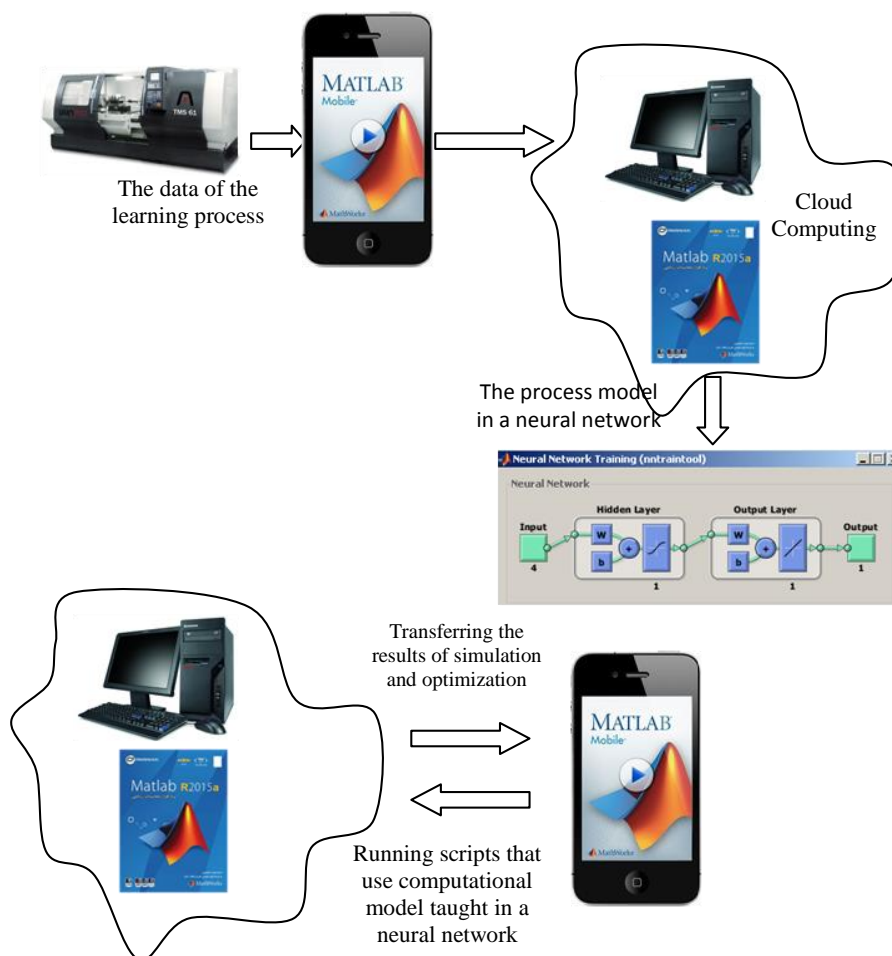
Problems that can be addressed to MATLAB suite are:

- mathematical modeling of technological processes and logistics, in particular with the use of artificial intelligence methods,
- optimization of multi-criteria decision-making processes and activities in the field of production control,
- diagnostic signals analysis,
- dynamic modification of the production schedule based on the data entered on mobile devices.

An effective solution in the construction and use of mathematical modeling of nonlinear and multi-parameter processes is to use neural networks. Neural networks allow the detection and registration of the relationship between the important parameters of the modeled processes and their results. This effect can be achieved only if the training data, in a form of results corresponding with data of output, is provided. MATLAB has a rich library of ready-optimized features to create virtual (within computer memory) single and multi-layer structures of the neural network with multiple inputs and outputs.

Learning data can be delivered via mobile devices but learning process is carried out on high-performance Cloud Computing computers. Trained neural networks representing a virtual model of the process is stored in the form of a variable and can be used in field of the script called from MATLAB Mobile application. In other words, it is possible to use a mobile device to initiate and to perform analyzes of a modeled object. It is also possible to search for optimal solutions using scripts from the Optimization Tool library functions.

Described scenario of modeling with neural networks in the production process is illustrated in figure 3.



**Fig. 3. Use of MATLAB Mobile system to model processes using neural networks for modeling and optimization. Source: Own study**



The figure 3 shows system construction phase using cooperation between a mobile device and a computer on Cloud Computing with the use of a universal computing environment composed of MATLAB Mobile and stationary MATLAB. The system operates in two phases:

- network learning and process virtual model building phase,
- model use phase – is aimed to predict the behavior of the output parameters for given input values and choice of input parameters for a defined minimum or maximum output parameters of the model [3].

### 3. Example of the support in decision-making processes within production processes

Procedures, described (procedures) in previous part of this article are implemented to assist solve real case problems occurring in the decision making processes. One of those problems is the optimal choice of parameters for cutting steel bars, toughened using automated abrasive cutting metal with an adjustable feed rate. The machine operator has the ability to regulate the feed within certain limits. This decision greatly affects the cost of cutting operation. Increasing the feed rate increases consumption of the grinding wheel and the associated tool costs. Reducing feed a drop in the performance position by the prolonged cutting operation [4].

The problem is to find the optimum value of the feed used for the grinding wheel and the work piece. The functional relationship between the feed rate and the cost of cutting is unknown, and because of the nature phenomena in the process of cutting – relationship is non-linear. This is due to the fact that the reduction in diameter of the abrasive tool is a result of consumption by a decrease in the rate of removal (assuming constant spindle speed machine). This results in a change in intensity of the wheel.

It is needed to assume that there is significant and functional relationship  $K = f(p)$ , where  $K$  is the cost of operation and the intersection  $p$  feed. Relationship has a different character for pairs of wheel and object crossed. Therefore, it must be determined experimentally. For this purpose a process of learning within neural network is used. This process depends on the following stages:

- query MATLAB Cloud Computing whether the analyzed position, tool and work piece is already a model registered in the database, by calling: `m = jest_model(nr_st, kod_narz, kod_PO)`,
- if the logical variable returned by this function is set to True, there is no need to build a model – because it was already developed for the specified parameters. You can proceed to the analysis of the model and the optimization phase of the process. If, however, the function returns False model needs to be developed. It is done by performing the cutting operation for at least 8 of the feed selected from the permissible range of

technologically and carried to the limit consumption of the grinding wheel,

- achieved efficiency registering (the number of intersections of a grinding wheel to its consumption). This phase requires submission by the operator via the smartphone application and MATLAB Mobile two-dimensional array containing the feed value and the corresponding performance in the form of the amount of cuts and variable representing the path of tool (the thickness of cut rod),
- next phase is to call and run calculation script model(.m) from the smartphone. This script contains a function that calculates the cost of one intersection, taking into account the cost of the machine and tool costs on the basis of data provided by the operator and the data contained in the local database (the cost of buying the wheel of the declared symbol, cutting the cost of operating the specified symbol in relation to the unit of time),
- the result is a learning string in the form of a table containing pairs of numbers feed – the unit cost of the operation ( $p$ ,  $K_j$ ). Learning string is used to start the process of learning neural network by calling a number of features included in the Neural Toolbox MATLAB Cloud Computing instance, for example:

```

% Define the number of neurons in the hidden layer;
hiddenLayerSize = 4;
% Construction of the network structure
net = fitnet (hiddenLayerSize);
% Determine the parameters of the learning network
net.divideParam.trainRatio = 70/100;
net.divideParam.valRatio = 15/100;
net.divideParam.testRatio = 15/100;
% Learning Network
net = train (net, p, Kj);

```

- Structure variable called net includes a model of observed cutting process. The operator of the machine can use MATLAB Mobile application to inquire about the unit cost of operations for each of the feed in the range of permissible technology by calling:

$$K_j = net(p) \quad (1)$$

In addition, it can start the optimization procedure of finding a feed for which it will intersect at minimal cost, by running on cloud MATLAB Mobile

application script: `optymalizuj.m`. The result of the script reads in a variable `pmin` and the value of the unit cost in the variable `Kjmin`.

The value of structural variable `net` is stored in the local table on the computer performing the calculations under the name correlated with the symbol position, symbol of a tool and a symbol of the material being cut. The result is a collection of models of the cutting process.

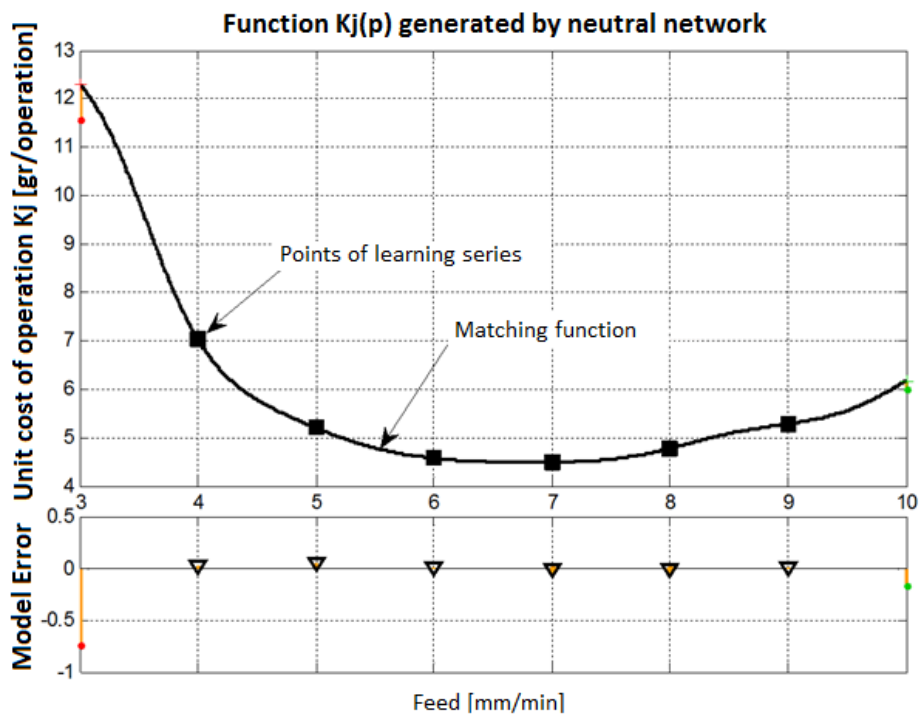


Fig. 4. An exemplary graph of the function  $K_j(p)$  generated from the model in a neural network. Source: Own study

Score of an exemplary model in the form of a model generated based on  $K_i = f(p)$  shown in Fig. 4. The optimization is to find the minimum value of the function  $K_i$  within the acceptable range of feed rates. To do this table version of  $K_j$  function in the range from  $p_{min}$  to  $p_{max}$  with the assumed step in the independent variable and call the function is:

$$[K_{jmin} i] = \min (K_j) \quad (2)$$

As a result, you get a value for the minimum unit cost cutting operation  $K_{jmin}$  and an index vector and  $K_j$  pointing on the feed value in the vector  $p$ , for which

achieved this result, for example,  $p_{min} = p(i)$ . For the present example  $K_{jmin} = 4.48$  gr/operation and the corresponding feed  $p_{min} = 6.8$  mm/min [5–6].

#### 4. Results

It should be noted that the solution, containing controlled remotely from the application MTLAB Mobile algorithm to build a model of the production process, may be also used in other situations with uncorrelated parameters. In this situation the script needs to be modified.

Presented solution which shows how to execute remote controlled advanced calculation gives real opportunities to support operational decisions. An important advantage is the implementation of advanced computing MATLAB environment with the optimized ready to use functions. The user can focus his attention on solving problem without writing code from scratch with use of advanced mathematical functions. If, however, some required features are missing, there is the possibility of writing them in the C language, and then joining the existing scripts.

Described use of information technology, used for the rapid construction of model and possible optimization of the manufacturing process, makes sense for practical exploration of models of production processes performed periodically or in long series. Neural network model is the more accurate the more data contains a sequence of learning. Therefore, experimenting in order to gather data for this sequence must be economically justified.

#### References

- [1] Lipski J., Santarek K., Świć A., Piekarski W., Dudziak A., Stoma M., Paszek A., Wittbrodt P., *Innowacyjne technologie w inżynierii produkcji*, Politechnika Lubelska, 2016.
- [2] Pizoń J., Lipski J., *Manufacturing Process Support Using Artificial Intelligence*, Theory and Practice of Industrial and Production Engineering Edited by Antoni Świć and Arkadiusz Gola, Lublin, 2015.
- [3] Pratap R., *MATLAB 7 dla naukowców i inżynierów*, PWN, Warszawa, 2007.
- [4] Ramirez W.F., *Computational Methods for Process Simulation*, Butterworth-Heinemann, 1997.
- [5] [http://www.mathworks.com/products/matlab-mobile/?s\\_tid=srchtitle](http://www.mathworks.com/products/matlab-mobile/?s_tid=srchtitle)
- [6] <http://www.mathworks.com/products/neural-network/>

## **WSPOMAGANIE PROCESÓW DECYZYJNYCH W PRZEDSIĘBIORSTWIE Z ZASTOSOWANIEM SYSTEMU MOBILNEGO**

### **Streszczenie**

W artykule zaproponowano wykorzystanie technologii informatycznych zapewniających zdalny dostęp do wysokowydajnych komputerów pracujących w Chmurze Obliczeniowej. Rozwiązanie to zastosowano do wspomaganie decyzji technologicznych wymagających obliczeń optymalizacyjnych. Dostęp użytkownika do aplikacji, napisanych z wykorzystaniem zaawansowanych funkcji i bibliotek środowiska MATLAB, został zapewniony zdalnie z urządzenia mobilnego. Pozwoliło to na elastyczne wykorzystanie biblioteki zaawansowanego oprogramowania przez wielu pracowników.

*Słowa kluczowe: chmura obliczeniowa, MATLAB, optymalizacja, systemy mobilne*

## **DECISION PROCESS SUPPORT WITH USE OF A MOBILE SYSTEM**

### **Abstract**

This article proposes the use of information technology solution that provides remote access to high-performance architecture provided by Cloud Computing infrastructure. Proposed solution is used to support the decision optimization. It is available remotely to the users (remotely) from a mobile device. This allows a flexible use of the advanced software libraries for many employees.

*Keywords: cloud computing, MATLAB, optimization, mobile systems*

Daniel Łukasik<sup>1</sup>, Mirosław Szala<sup>2</sup>

## **METODYKA ROZWIĄZYWANIA ZAGADNIEN PROBLEMOWYCH TRIZ**

### 1. Wprowadzenie

TRIZ – czyli teoria rozwiązywania innowacyjnych zadań, z rosyjskiego *teorâ rešencâ izobratatel'skih zadač*, tłumaczona jest zarówno jako teoria rozwiązywania problemów wynalazczych. W nomenklaturze anglosaskiej występuje pod nazwą oryginalną TRIZ lub TIPS – theory of inventive problem solving. Metoda ta opracowana została ponad pół wieku temu przez zespół kierowany przez H. S. Altszullera (1926–1998). Znajduje coraz więcej entuzjastów nie tylko wśród inżynierów i konstruktorów lecz także przez przedstawicieli nauk społecznych i ekonomicznych. Początkowo metodologia TRIZ była rozpatrywana pod kątem rozwiązywania problemów technicznych, wynalazczych, obecnie jednak stosuje się ją również do rozwiązywania problemów organizacyjnych, edukacyjnych, społecznych oraz biznesowych. TRIZ rozwija się nieustannie, czego skutkiem jest m.in. powstanie pięciu podstawowych odmian: TRIZ-technika, TRIZ-management, TRIZ-science, TRIZ-design, TRIZ-pedagogika [1,2].

Metodologia TRIZ oparta jest na analizie dziesiątek tysięcy patentów i tak zaprojektowana, by pokonać inercję psychiczną wynikającą z przyzwyczajień i edukacji. Dzięki redukcji niedoskonałej metody prób i błędów eliminuje błędne rozwiązania i skuteczniej prowadzi do optymalnych w danych warunkach rozwiązań.

Teoria TRIZ jest stosowana przez przedsiębiorstwa, naukowców i inżynierów z całego świata. Jako pierwsze po ZSRR metodą tą zainteresowały się kraje skandynawskie, w raz z końcem zimnej wojny także USA i Japonia.

W latach 1946–1948 głównym celem pracy H. S. Altszullera było opracowanie teorii rozwiązywania innowacyjnych zadań. Głównym postulatem TRIZ było twierdzenie: „skoro systemy techniczne rozwijają się według określonych prawideł i zasad, to zasady te można odkryć i wykorzystać do rozwiązywania problemów wynalazczych” [1].

Problematyce TRIZ H. S. Altszuller poświęcił 50 lat. Pracę nad dziełem życia przypłacił zesłaniem do łagru, gdy w 1948 roku (wraz ze swym współpracownikiem R. B. Szapirem) skierował list do Stalina mocno krytykujący

---

<sup>1</sup> Politechnika Lubelska, Wydział Mechaniczny, Katedra Inżynierii Materiałowej,  
ul. Nadbystrzycka 38 D, 20-618 Lublin, email: d.lukasik@pollub.pl

<sup>2</sup> Politechnika Lubelska, Wydział Mechaniczny, Katedra Inżynierii Materiałowej,  
ul. Nadbystrzycka 38 D, 20-618 Lublin, email: m.szala@pollub.pl

sytuację radzieckiej wynalazczości. Został za to aresztowany i skazany na 25 lat za antysowiecką propagandę natomiast dnia 22 października 1954 roku, po śmierci Stalina, został zrehabilitowany. Jako były łagiernik, chociaż zrehabilitowany przez oficjalne władze, nie miał szansy na znalezienie legalnego zatrudnienia. H. S. Altszuller rozwiązał swój życiowy problem w duchu TRIZ „trzeba pracować, żeby żyć”, a jednocześnie „nie można pracować” co jest przykładem sprzeczności technologicznej, zagadnienia szerzej rozwiniętego w dalszej części tekstu [1,2].

Teoria rozwiązywania problemów wynalazczych została opracowana na podstawie statystycznej analizy ponad 40000 rozwiązań patentowych. Jej zarys powstał już w 1956 roku, a w latach 1961–1965 powstało w Związku Radzieckim wiele prac poświęconych teorii wynalazczości inspirowanych pracami H. S. Altszullera. W 1958 roku H.S. Altszuller przeprowadził pierwszy kurs podstaw TRIZ, rok później pierwsze szkolenie wykładowców TRIZ. W 1971 roku w Baku założył Azerbejdżański Społeczny Instytut Twórczości Wynalazczej – pierwszy na świecie tego rodzaju ośrodek. Jednocześnie na terenie całego ZSRR organizował kursy, szkoły i punkty konsultacyjne TRIZ. W latach osiemdziesiątych ogólna liczba placówek takich jak szkoły, punkty konsultacyjne i filie Instytutu przekroczyła 500 [2]. W 1973 roku H. S. Altszuller wprowadził do TRIZ tzw. analizę wepolową, a w 1975 roku standardy rozwiązywania zadań wynalazczych. W 1974 roku w Centralnym Studiu Popularno-Naukowych i Szkoleniowych Filmów w Moskwie nakręcono film pt. *Algorytm wynalazku*, prezentujący zarówno sylwetkę twórcy TRIZ, jak i samą metodykę. Od 1989 roku do końca życia H. S. Altszuller pełnił obowiązki prezesa Asocjacji TRIZ, specjalnie powołanej do szerzenia idei wynalazczości i metodyki TRIZ.

Celem rozdziału jest scharakteryzowanie istoty metody rozwiązywania zagadnień problemowych TRIZ.

## 2. Istota TRIZ

Na przestrzeni lat, osoby zajmujące się rozwojem TRIZ wprowadziły szereg różnych technik i narzędzi, które wspierają różne fazy procesu rozwiązywania problemów innowacyjnych i innowacji tworzenia planów. Na ogół, bez względu na szeroki obszar zastosowań, metody i techniki TRIZ mogą być wykorzystane w następujących sytuacjach:

1. W celu rozwiązania konkretnego problemu, który sformułowany jest jako wada lub efekt nieporządany (np.: produkt rozkłada się zbyt szybko, praca silnik zostanie przerwana, projekt się nie powiedzie itd.) lub braku potrzebnej wydajności lub cechy (np.: prędkość jest zbyt niska, niewystarczająca sprzedaż, słabe zarządzanie łańcuchem dostaw).

2. W celu zbadania modelu (biznesowego lub technologicznego), odkryć istniejących przeszkód i barier, które mogą być usunięte przez innowacyjne rozwiązania znalezione przy użyciu narzędzi i technik TRIZ.

3. Aby przeanalizować ewolucyjny potencjał układu technologicznego lub biznesowego oraz w celu zaproponowania strategii rozwoju kolejnej generacji określonego systemu.

4. Aby przewidzieć potencjalne błędy w nowych produktach i procesach oraz pomóc w ich zapobieganiu.

Współczesny TRIZ jest ogromnym zasobem wiedzy, który jest połączeniem teorii rozwiązywania problemów wynalazczych i rozwój systemów informatycznych, narzędzi analitycznych i metod rozwiązywania problemów i analizy zbiorów wzorców rozwiązań, baz danych konkretnych efektów i technologii oraz techniki twórczego rozwoju wyobraźni.

Obszary zastosowania metodologii TRIZ zobrazowano na rysunku 1. Najważniejsze elementy w metodologii innowacyjnej TRIZ można podsumować w tabeli 1. Ukazuje ona strukturę TRIZ i ścieżki między poszczególnymi metodami z uwzględnieniem różnych sposobów rozwiązywania problemów technicznych. Prostsze sposoby, na przykład 40 zasad wynalazczości mogą być zintegrowane, łatwiej stosować jako aktywne narzędzia. Posiadają jednak pewne ograniczenia co do efektywności w rozwiązywaniu skomplikowanych problemów.



Rys. 1. Dziedziny w których stosowana jest metoda TRIZ [3]



**Tabela 1. Główne narzędzia i obszar zastosowania TRIZ**

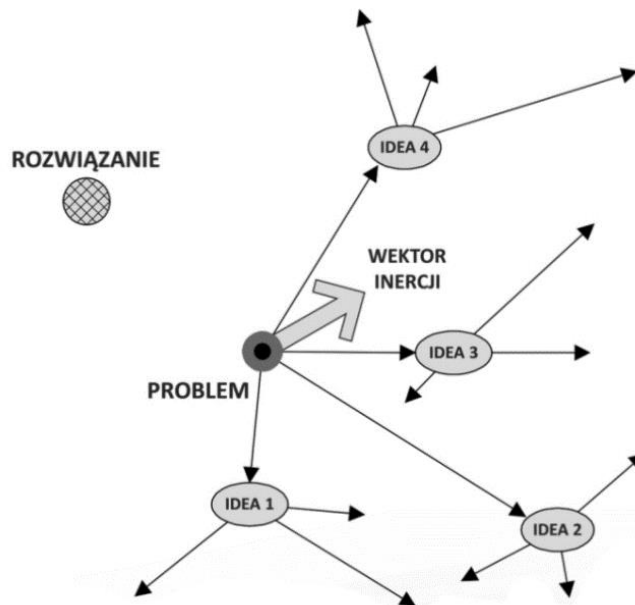
Lp.	TRIZ – narzędzia i metody	Obszary zastosowania
1.	40 zasad wynalazczości dla wyeliminowania sprzeczności technicznych; system ich stosowania w postaci tabeli sprzeczności.	Zadania proste do umiarkowanie trudnych, zalecane dla nowicjuszy TRIZ.
2.	System 76 standardów do rozwiązywania problemów technicznych: 5 klas / 76 standardów.	Zadania proste do skomplikowanych.
3.	Technika krok po kroku lub algorytmy rozwiązywania problemów wynalazczych (skr.: ARIZ). Uniwersalne narzędzie do rozwiązywania różnego rodzaju problemów.	Niezwykle trudne problemy, wszechstronne wyszukiwanie rozwiązań.
4.	Analiza wopolowa systemów technicznych.	Narzędzia dla metod 2 i 3.
5.	Zasady separacji dla wyeliminowania sprzeczności fizycznych.	Narzędzie ARIZ (metoda 3).
6.	Metody analizy zasobów systemowych.	Narzędzia dla metod 2 i 3.
7.	Baza danych fizycznych, chemicznych, geometrycznych i innych efektów oraz ich zastosowań technicznych.	Baza wiedzy TRIZ. Narzędzia dla komponentów 1 do 5.
8.	Sposoby zwiększenia twórczego myślenia, aby zmniejszyć psychologiczną inercji. Operator DTC (wymiar-czas-koszt)	Pomoce psychologiczne dla wszystkich komponentów TRIZ.
9.	Metoda AFI dla systemów technicznych.	Analiza i przewidywanie potencjalnych źródeł awarii.
10.	Schematy ewolucji systemów technicznych (TS).	Prognozowanie rozwoju systemów technicznych, tworzenie ogrodzeń patentowych.

### 1.1. Wektor inercji

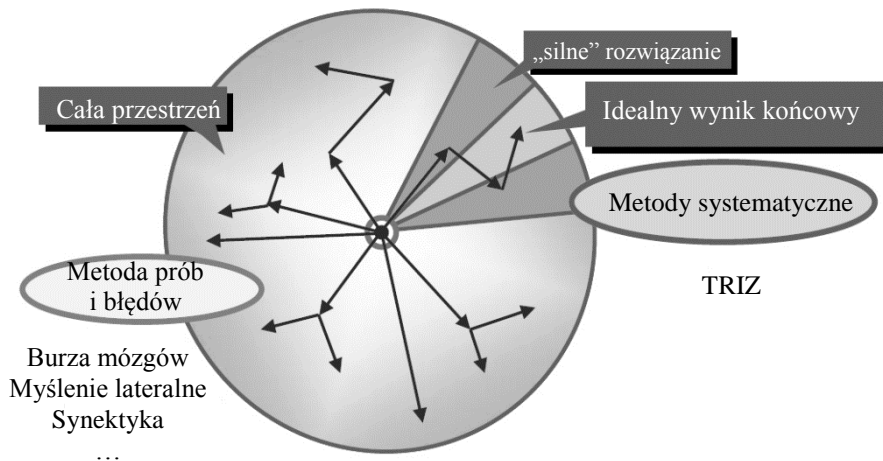
Przeszkodą w oderwaniu się od znanych rozwiązań jest rutyna, do której opisania H. S. Altszuller użył pojęcia wektora inercji (rys. 2). Wychodząc od punktu zwanego „zadanie”, wynalazca winien trafić do punktu „rozwiązanie”. Położenie tego drugiego punktu nie jest oczywiste. Niektóre pomysły wydają się perspektywiczne, tworzą się wtórne punkty poszukiwań; model jest budowany i rozwijany, prowadzone są próby z modelem rozwiązań, po czym trzeba wracać do punktu wyjścia. Oznacza to, że większość specjalistów w starciu z nowym zadaniem próbuje je rozwiązać w granicach obszaru posiadanych wiadomości teoretycznych oraz doświadczeń zawodowych. Powstaje pytanie dlaczego mimo że działamy „po omacku” metodą prób i błędów, strzałki na rysunku 2 gęściej

układają się w innym kierunku niż „rozwiązanie”. Nie jest to jednak działanie przypadkowe – próby nie są bowiem chaotyczne, tak jak mogłoby się wydawać. Eksperymentator, projektant, pracownik naukowy, wynalazca, każdy twórca opiera się na swoim dotychczasowym doświadczeniu i wiedzy wyniesionej z wcześniejszej edukacji. Tak właśnie definiowany jest przez H. S. Altszullera wektor inercji. Bez „innego myślenia”, bez pokonania wektora inercji, nie da się rozwiązać znanego z psychologii zadania, polegającego na zbudowaniu z sześciu zapaleczek czterech trójkątów równobocznych. Konieczność myślenia „inaczej”, myślenia twórczego, nie jest zatem czymś nowym, ale dopiero H.S. Altszuller stworzył precyzyjne ramy – teorię inwentyczną. Twórcy inwentyki dobrze znali zjawisko inercji i do walki z nim stworzyli wiele różnych metod, np. burzę mózgów (brainstorming) A. Osborna. Metody inwentyczne próbują zniwelować wpływ wektora inercji, działając na płaszczyźnie psychologii. Nie można jednak powiedzieć, że metoda prób i błędnie odnosiła sukcesów i niekiedy jest dobrym sposobem rozwiązywania zagadnień problemowych. Regułą poszukiwań metodą prób i błędów jest poruszanie się w ciasnym obszarze niewielkiego wycinka wiedzy. Wektor inercji (umysłowej!) uparcie prowadzi badacza w dobrze znane rejony wiedzy i doświadczenia zawodowego. Jednak w obecnych czasach nie ekonomiczne jest przeprowadzenie tysięcy prób eksperymentu [4,5].

W skrócie *wektor inercji* można określić, jako psychologiczne zjawisko polegające na szukaniu rozwiązania w wąskim „klinie” znanej problematyki, podczas gdy dobrego rozwiązania trzeba szukać w zupełnie innym kierunku, rys. 3.



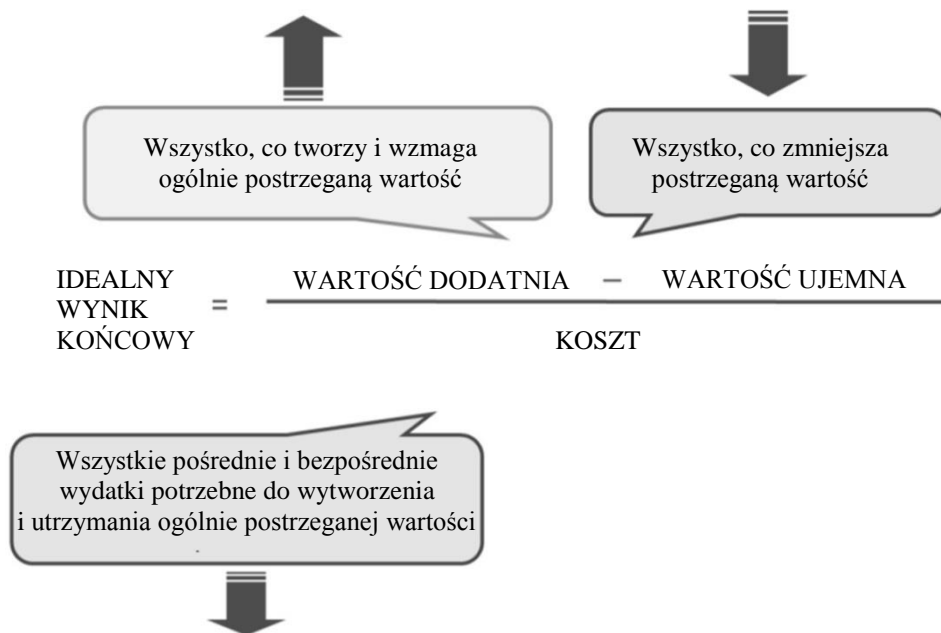
Rys. 2. Zilustrowanie wektora inercji [6]



Rys. 3. Orientacja rozwiązań w przestrzeni [7]

## 1.2. Pojęcie maszyny idealnej

Obserwacja rozwoju konstrukcji maszyn skłoniła Altszullera do postawienia tezy, w myśl której konstruowanie określonych urządzeń zmierza do określonego ideału, według pewnej linii rozwoju tj. „maszyna idealna to umowny wzorzec” [1]. Określenie idealnego obrazu maszyny w początkowej fazie wynalazczości tworzy właściwy kierunek poszukiwań, zmniejsza czynnik losowości oraz zawęża ramy poszukiwań. Planowe poszukiwanie ukierunkowuje proces myślenia i czyni go bardziej efektywnym, powodując wzrost prawdopodobieństwa znalezienia rozwiązania, którego efektem będzie wynalazek. Idealna maszyna nazywana jest w tej teorii jako: IFR (ang. Ideal Final Result) – idealny wynik końcowy. Do najważniejszych cech IFR należą: eliminacja wad oryginalnego systemu, zachowanie zalet oryginalnego systemu, nie komplikowanie systemu, nie wprowadzanie nowych wad. Podejście takie przeciwdziała psychicznej inercji i zachęca do tworzenia z użyciem wyobraźni, a nie wiedzy. IWK zobrazować można w postaci schematu przedstawionego na rysunku 4.



**Rys. 4. Graficzna interpretacja IWK [7]**

Reguły formułowania IWK:

- Nie wolno z góry myśleć o tym, czy możliwe lub niemożliwe jest uzyskanie wyniku idealnego,
- Nie wolno z góry myśleć o tym, jaką drogą można osiągnąć wynik idealny,
- Sformułowanie IWK nie powinno być wyrażone językiem fachowym; należy użyć słów potocznych, prostych, ogólnie znanych,
- IWK należy formułować, posługując się minimalną, konieczną ilością słów.

### 1.3. Sprzeczności technologiczne

Obiekty techniczne można scharakteryzować przy pomocy kilku podstawowych wzajemnie zależnych od siebie parametrów określających stopień ich doskonałości: wielkość, moc, niezawodność i inne. Udoskonalenie pewnych właściwości obiektu wchodzi w konflikt z inną jej właściwością. W trakcie konstruowania należy poszukiwać najbardziej optymalnego połączenia tych cech uwzględniając możliwość znalezienia kompromisu. Twórczość wynalazcza wymaga znalezienia takiego rozwiązania, w którym zyski są maksymalne a straty parametrów minimalne. Z tej perspektywy, wynalazek można sprecyzować jako: *wyeliminowanie sprzeczności technologicznej*. Należy wyszukać w zadaniu sprzeczności, a następnie dostępnymi środkami dążyć do ich eliminacji [1,8,9].

Stosowanie tych zasad ma miejsce w macyrycy zwanej Matrycą Sprzeczność składającej się z 39 wierszy i 39 kolumn (rys. 3). 39 parametrów wejściowych stanowią najważniejsze charakterystyki fizyczne i chemiczne. Parametry te ukazują się w tabeli 2 właściwości techniczne i sprzeczności pomóc sformułować sprzeczności technicznej w systemie, w standardowych warunkach, na przykład:

- szybkość a niezawodność,
- masa a siła,
- temperatura w porównaniu do dokładność pomiaru itd.

W wyniku analizy wielu tysięcy patentów tabela pokazuje zasady wynalazcze, które są najbardziej sprzyjające rozwiązaniu sformułowanegosprzeczność techniczne. Mimo, że nie wszystkie komórki tabeli są wypełnione, to wciąż daje rozpoznanie dla ponad 1200 rodzajów sprzeczności technicznych,znacznie zmniejszając zakres wyszukiwania tylko do najbardziej odpowiedniego rozwiązaniakoncepcje.

**Tabela 2. Parametry definiujące obiekt [1]**

<b>Lp.</b>	<b>Parametr</b>	<b>Lp.</b>	<b>Parametr</b>
1.	Waga poruszającego się obiektu	21	Moc
2.	Waga obiektu stacjonarnego	22	Strata energii
3.	Długość poruszającego się obiektu	23	Strata substancji
4.	Długość obiektu stacjonarnego	24	Strata informacji
5.	Obszar poruszającego się obiektu	25	Strata czasu
6.	Obszar obiektu stacjonarnego	26	Jakość substancji/materii
7.	Objętość poruszającego się obiektu	27	Niezawodność
8.	Objętość obiektu stacjonarnego	28	Dokładność pomiaru
9.	Prędkość	29	Dokładność wytwarzania
10.	Siła	30	Czynniki szkodliwe dla obiektu
11.	Naprężenia lub ciśnienie	31	Czynniki szkodliwe generowane przez obiekt
12.	Kształt	32	Łatwość produkcji
13.	Stabilność kompozycji obiektu	33	Łatwość eksploatacji
14.	Wytrzymałość	34	Łatwość naprawy
15.	Okres działania ruchomego obiektu	35	Adaptacyjność lub wszechstronność
16.	Okres działania obiektu stacjonarnego	36	Złożoność urządzenia
17.	Temperatura	37	Trudności w wykrywaniu i pomiarze
18.	Intensywność iluminacji	38	Stopień automatyzacji
19.	Wykorzystanie energii przez poruszający obiekt	39	Produktywność
20.	Wykorzystanie energii przez obiekt stacjonarny		

<b>Parametry, które się pogorszają</b>		<b>1</b>	...	<b>27</b>	<b>28</b>	...	<b>39</b>
		Masa poruszającego się obiektu	...	Niezawodność	Dokładność pomiaru	...	Produktywność
<b>1</b>	Masa poruszającego się obiektu			3, 11, 1, 27	28, 27, 35, 26		35, 3, 24, 37
...	...						
<b>9</b>	Prędkość	2, 28, 13, 38		<b>11, 35, 27, 28</b>	28,32, 1,24		
<b>10</b>	Siła	8, 1, 37,18		3, 35, 13,21	35,10, 23,24		3, 28, 35,37
...	...						
<b>39</b>	Produktywność	35,26, 24,37		1, 35, 10,38	1, 10 34,28		

**Rys. 5. Matryca sprzeczności [3]**

W celu rozwiązywania zagadnień z wykorzystaniem macierzy sprzeczności należy wykorzystać tabelę 40 zasad innowacyjności. Jako że metodologia TRIZ jest w ciągłym rozwoju, znaleźć można opracowania, gdzie zamiast 40 zasad jest ich 50 (tab. 3). Przyrost ten jest osiągnięty dzięki ciągłemu rozwojowi techniki i nauki.

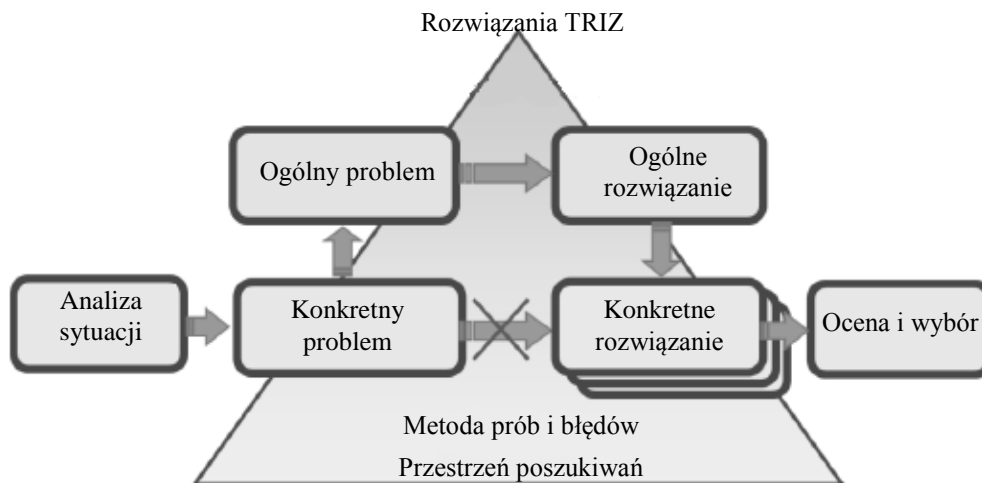
**Tabela 3. Zasady innowacyjności [6]**

Lp.	Zasada	Znana również jako
1.	Segmentacja	Zasada rozdrobnienia
2.	Wydzielanie	Zasada wyodrębniania
3.	Lokalna jakość	Zasada miejscowej jakości
4.	Asymetria	Zasada asymetrii
5.	Łączenie	Zasada jednoczenia
6.	Uniwersalność	Zasada uniwersalności
7.	„Matrioszka”	Zasada a matrioszki
8.	Przeciwcieżar	Zasada antycieżaru
9.	Przeciwdziałanie zapobiegawcze	Zasada wstępnego naprężenia
10.	Zapobieganie	Zasada wstępnej aranżacji
11.	Wcześniejsze wytłumienie	Zasada „zawczasu podłożonej poduszki”
12.	Ekwipotencjalność	Zasada ekwipotencjalności
13.	Wykonanie w „na odwrót”	Zasada „na odwrót”
14.	Sferoidalność	Zasada sferoidalności
15.	Dynamika	Zasada dynamiki
16.	Częściowe lub nadmierne działanie	Zasada częściowego lub nadmiernego działania

17.	Inny wymiar	Zasada przejścia w inny pomiar
18.	Wibracje/drgania	Zasada wykorzystania drgań mechanicznych
19.	Działanie impulsowe	Zasada periodycznego działania
20.	Ciągłość	Zasada nieprzerwanego dodatniego działania
21.	Przeskok	Zasada „przeskoku”
22.	Straty na korzyść	Zasada przekształcić „stratę w zysk”
23.	Sprzężenie zwrotne	Zasada relacji odwrotnej
24.	Pośrednik	Zasada „pośrednika”
25.	Samoobsługa	Zasada samoobsługi
26.	Kopiowanie	Zasada kopiowania
27.	Trwałość	Zasada taniej nietrwałości w zamian za drogą długowieczność
28.	Zastąpienie mechaniki	Zasada zmiany mechanicznego schematu
29.	Pneumatyka i hydraulika	Zasada wykorzystania konstrukcji pneumo i hydrodynamicznych
30.	Elastyczne powłoki i błony	Zasada wykorzystania elastycznych powłok i cienkich błon
31.	Materiały porowate	Zasada zastosowania porowatych materiałów
32.	Zmiana kolorów	Zasada zmiany zabarwienia
33.	Homogeniczność	Zasada jednorodności
34.	Odrzucenie i regeneracja	Zasada odrzucania i regeneracji części
35.	Zmiana parametrów	Zasada zmiany fizykochemicznych parametrów obiektu
36.	Fazy przejściowe	Zasada zastosowania fazowych przejść
37.	Rozszerzanie cieplne	Zasada zastosowania termicznego rozszerzenia
38.	Utleniacze	Zasada zastosowania silnych utleniaczy
39.	Naturalne środowisko	Zasada zastosowania inercyjnego środowiska
40.	Materiały kompozytowe	Zasada zastosowania materiałów kompozytowych
41.	Wykorzystanie pauz	Zasada wykorzystania pauz
42.	Działanie wielostopniowe	Zasada wykorzystania wielostopniowego
43.	Stosowanie piany	Zasada stosowania piany
44.	Stosowanie wstawek	Zasada stosowania wstawek
45.	Bi – zasada	Bi – zasada
46.	Zastosowanie substancji wybuchowych i prochów	Zasada zastosowania substancji wybuchowych i prochów
47.	Manipulacja w wodzie	Zasada manipulacji w wodzie
48.	Wykorzystanie próżni	Zasada wykorzystania próżni
49.	Dysocjacja – asocjacja	Zasada dysocjacji – asocjacji
50.	Samoorganizacja	Zasada samoorganizacji

## 2. Algorytm rozwiązywania problemów wynalazczych

W algorytmie ARIZ (Algorytm Rozwiązywania Problemów Wynalazczych) wykorzystuje się drogę abstrahowania rozwiązywanego problemu do pewnego problemu uogólnionego, a następnie eliminację sprzeczności na podstawie matrycy analogii (rys. 6).



Rys. 6. Algorytm ARIZ [7]

ARIZ to planowo ukierunkowane czynności lub programy sekwencyjnego opracowywania zadania wynalazczego. Wykorzystywane zasoby twórcze, aktywują, wyobrażają a jednocześnie chronią przed błędami i niską efektywnością. Stosowanie ich wymaga jednak pewnej wiedzy i umiejętności, które powinny być uprzednio ćwiczone. TRIZ oferuje wiele metod i procedur oraz cztery odmiany algorytmów ARIZ. TRIZ mimo że jego twórca nie żyje od wielu lat, ciągle się rozwija i zwiększa swoje możliwości twórczego oddziaływania w wielu dziedzinach. W 2009 r. opracowano nowy algorytm ARIP-2009 – algorytm rozwiązywania inżynierskich problemów. Szczegółowy przebieg algorytmu ARIZ [1,5]:

### Część 1. Wybór zadania

- 1.1. Określić końcowy cel związany z rozwiązaniem zadania.
- 1.2. Sprawdzić czy można osiągnąć ten sam cel *okrężną drogą*. Zakładając, że zadanie jest zasadniczo nierozwiązywalne: jakie inne zadanie należy rozwiązać aby osiągnąć wymagany wynik?
- 1.3. Ustalić, które rozwiązanie jest bardziej celowe – czy rozwiązanie zadania pierwotnego czy jednego z zadań *nie wprost*. Dokona wyboru.
- 1.4. Ustali wymagane wskaźniki ilościowe.



- 1.5. Powiększyć wymagane wskaźniki ilościowe, biorąc pod uwagę konieczny dla realizacji wynalazku czas.
- 1.6. Uściślić wymagania biorąc pod uwagę konkretne warunki, w których wynalazek ma być realizowany.
- 1.7. Sprawdzić, czy nie daje się rozwiązać zadania poprzez zastosowanie standardów rozwiązań zadań wynalazczych. Jeżeli rozwiązanie zostanie otrzymane, to przejdź do kroku 5.1.
- 1.8. Uściślić zadanie wykorzystując informację patentową.

#### *Część 2. Budowa modelu zadania*

- 2.1. Sformułować warunki zadania, nie posługując się terminologią specjalistyczną.
- 2.2. Wydzielić i zapisać będącą w konflikcie parę elementów. Jeśli zgodnie z warunkami zadania jest dany tylko jeden element, to przejść do kroku 4.2.
- 2.3. Zapisać dwa oddziaływania wzajemne (oddziaływania, właściwości) elementów pary: to, które istnieje, i to, które należy wprowadzić; pozytywne i szkodliwe.
- 2.4. Zapisać standardowe sformułowanie modelu zadania, wskazując będącą w konflikcie parę i sprzeczność techniczną.

#### *Część 3. Analiza modelu zadania*

- 3.1. Spośród elementów wchodzących do modelu zadania wybrać ten, który można łatwo zmienić, zamienić itd.
- 3.2. Zapisać standardowe sformułowanie IWK (idealnego wyniku końcowego).
- 3.3. Wydzielić ten obszar elementu (wskazanego w kroku 3.2), który nie jest w stanie uporać się z żądanym przez IWK kompleksem dwóch działań.
- 3.4. Sformułować przeciwstawne sobie wymagania fizyczne, wysuwane przez będące w konflikcie oddziaływania (działania, właściwości) w stosunku do stanu wydzielonego obszaru elementu.
- 3.5. Zapisać standardowe sformułowania sprzeczności fizycznej.

#### *Część 4. Przewycięzenie sprzeczności fizycznej*

- 4.1. Należy rozpatrzyć proste przekształcenia wydzielonego obszaru elementu, tj. rozdzielić sprzeczne z sobą właściwości. Jeśli znaleziono rozwiązanie fizykalne (tzn. jeśli znaleziono niezbędne działanie fizyczne), należy przejść do kroku 4.5. W przypadku przeciwnym należy kontynuować pracę, tzn. przejść do kroku 4.2.
- 4.2. Należy zastosować tablicę typowych modeli zadań i przekształceń wepolowych. Jeśli otrzymano rozwiązanie fizykalne, należy przejść do kroku 4.4. W przypadku przeciwnym – do kroku 4.3.
- 4.3. Należy wykorzystać tablicę zastosowania efektów i zjawisk fizycznych. Jeśli otrzymano rozwiązanie fizykalne, należy przejść do kroku 4.5. W przypadku przeciwnym – do kroku 4.4.

4.4. Należy zastosować tablicę zasadniczych sposobów przewycięzania sprzeczności technicznych (chwytów wynalazczych). Jeśli otrzymano już rozwiązanie fizykalne, to należy wykorzystać tablicę dla jego sprawdzenia.

4.5. Należy przejść od rozwiązania fizykalnego do rozwiązania technicznego: sformułować sposób i podać schemat urządzenia, realizującego ten sposób.

#### *Część 5. Wstępna ocena otrzymanego rozwiązania*

5.1. Przeprowadzić wstępną ocenę otrzymanego rozwiązania. *Pytania kontrolne:*

1. Czy otrzymane rozwiązanie zapewnia spełnienie głównego wymagania IWK?  
2. Jaką sprzeczność fizyczną przewycięza (i czy przewycięza) otrzymane rozwiązanie?

3. Czy otrzymany system zawiera co najmniej jeden dobrze sterowalny element? Jaki mianowicie? Jak realizuje się sterowanie?

4. Czy rozwiązanie, znalezione dla *monocyklicznego* modelu zadania, ma zastosowanie do rzeczywistych warunków o wielu „cyklach”? Jeśli otrzymane rozwiązanie nie spełnia choćby jednego warunku wymienionego w pytaniach kontrolnych, należy powrócić do kroku 2.1.

5.2. Należy sprawdzić (odnosząc się do danych patentowych) formalną odkrywczość otrzymanego wyniku.

5.3. Jakie zadania składowe mogą pojawić się przy opracowywaniu technicznym otrzymanej idei? Należy zapisać możliwe zadania składowe – wynalazcze, konstrukcyjne, obliczeniowe, organizacyjne.

#### *Część 6. Rozwinięcie otrzymanego rozwiązania*

6.1. Należy określić, jak powinien zostać zmieniony nadsystem, którego częścią jest system zmieniony.

6.2. Należy sprawdzić, czy możliwe są nowe zastosowania zmienionego systemu.

6.3. Należy wykorzystać otrzymane rozwiązanie dla rozwiązywania innych zadań technicznych.

#### *Część 7. Analiza toku rozwiązywania*

7.1. Należy porównać rzeczywisty tok rozwiązywania z teoretycznym (przewidywanym przez ARIZ). Jeśli wystąpiły różnice, to należy je zanotować.

7.2. Należy porównać otrzymane rozwiązanie z danymi tablicowymi (tablica przekształceń wepolowych, tablica efektów fizycznych, tablica zasadniczych chwytów). Jeśli wystąpiły różnice, to należy je zanotować.

### 3. Relacja marketing – inżynieria

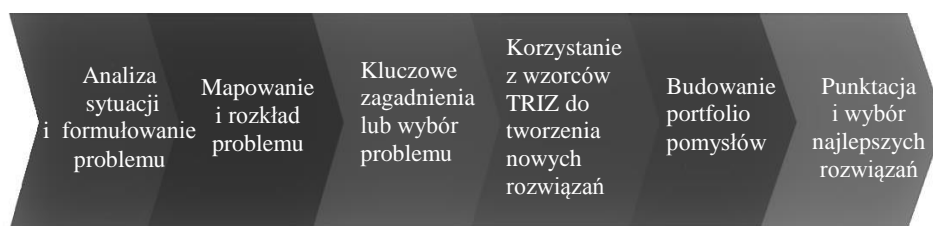
Obecnie przed firmami stawiane są wysokie wymagania produkcyjne. Konieczny jest rozwój nowych produktów i usługi, aby wzmocnić swoją pozycję na rynku oraz dokonać ekspansji na nowe. W tym celu potrzebne są ciągle

innowacje i nietuzinkowe pomysły. Klienci chcą być „podekscytowani” nowym produktem i przytłoczeni mnogością możliwości użytkowych. Tylko te firmy, które spełniają te wysokie wymagania będą w stanie utrzymać swoich klientów w dłuższej perspektywie [10,11].

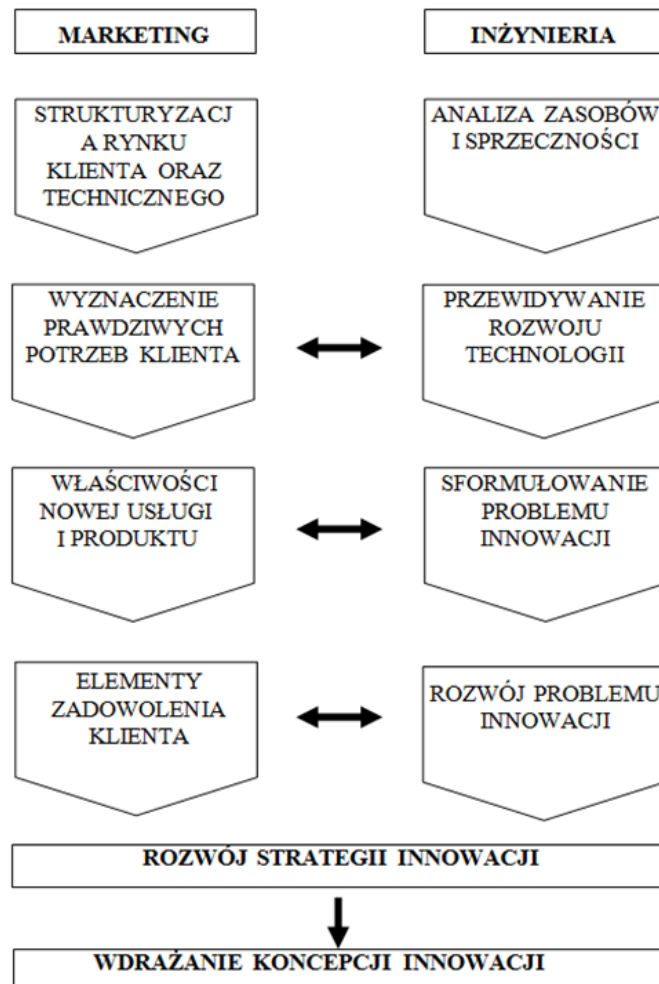
Te tak zwane „elementy ekscytujące” i nowe funkcje produktu mogą być dokładnie i szybko przewidziane przy pomocy wzorców ewolucji systemów technicznych jako najważniejszym składnikiem TRIZ. Tradycyjne i nowoczesne metody badaniarynku są skutecznie wspomagane przez TRIZ w odniesieniu do przyszłości kierunku rynku[10,11].

Z dalszym rozwojem metody QFD (Quality Function Deployment – Rozlokowanie Funkcji Jakości), prawdziwe, często ukryte oczekiwania klientów mogą być ustalone, a najbardziej efektywne funkcje produktu zdefiniowane. Po zakończeniu tej fazy, narzędzia TRIZ przyczyniają się do wdrożenia wymaganych cech do nowego technicznie rozwiązania i innowacyjnych produktów [12,13].

TRIZ ułatwia komunikację pomiędzy działaniami marketingowymi a inżynierskimi, gdzie oba zespoły mogą przy pomocy narzędzi TRIZ osiągnąć zarówno efekt marketingowy jak i wykorzystać adekwatne rozwiązania technologiczne. Relację między tymi komurkami organizacyjnymi przedstawiają rysunek 6. oraz rysunek 7.



**Rys. 7. Schemat postępowania przy tworzeniu produktu/usługi [7]**



Rys. 8. Relacja międzykomórkowa w przedsiębiorstwie [7]

#### 4. Podsumowanie

TRIZ jest teorią metodyczną, w której problemy mogą być, klasyfikowane i rozwiązywane poprzez konkretne narzędzia. TRIZ w odróżnieniu od wielu innych technik takich, takich jak burza mózgów synektyka, myślenie lateralne, programowanie neurolingwistyczne czy mapy myślowe nie sugeruje rozwiązań intuicyjnych, lecz daje możliwość rozwiązywania problemów w oparciu o stały, powtarzalny algorytm [10–12,14]. Ważnym czynnikiem jest uniwersalność tego podejścia. Działa ono z każdym rodzajem problemów, również w sferze pozatechnicznej. Eliminuje czasochłonne rozwiązywanie zagadnień metodą prób i błędów, zwiększając jednocześnie ilość trafnych rozwiązań, co wpływa na oszczędność

pieniędzy i ogranicza ryzyko. TRIZ jest metodą ewoluującą i adaptywną, stąd też umożliwia indywidualne podejście do wyboru i modyfikacji użytych technik. Najważniejsze zalety metodologii TRIZ:

- Umożliwia prognozowanie ewolucji systemów technologicznych, produktów, procesów,
- Usprawnia rozwiązywanie problemów wynalazczy i technicznych. Wspomaga kompleksowe poszukiwanie rozwiązań i ochronę własności intelektualnej przedsiębiorstw,
- Wspomaga ocenę ukrytych potrzeb i pragnień klienta; segmentacja rynku nakierowana na klienta,
- Umożliwia wcześniejszą identyfikację awarii oraz rozwój nowych i istniejących produktów,
- Ilustruje zaawansowane rozwiązania dla koncepcji oraz wspomaga zarządzanie wiedzą.

#### Literatura

- [1] Altshuller G. S., *The Innovation Algorithm TRIZ, systematic Innovation and Technical Creativity*, Technical Innovation Center, INC., Worcester, 2007.
- [2] Boratyński J., *Co to jest TRIZ?*, [www.innowacyjni.mazovia.pl/pobierz/700/](http://www.innowacyjni.mazovia.pl/pobierz/700/) (16.12.2016).
- [3] TRIZ and Innovation Management, [http://www.triz.it/triz\\_papers/2008%20TRIZ%20and%20Innovation%20Management.pdf](http://www.triz.it/triz_papers/2008%20TRIZ%20and%20Innovation%20Management.pdf) (16.12.2016).
- [4] Gajewski A., *TRIZ – inwencyjna metoda rozwiązywania problemów*, Zeszyty Naukowe Towaroznawstwo, Uniwersytet Ekonomiczny w Krakowie, 924/2013, s. 7–19.
- [5] Andrzejewski G., Jadkowski K., *TRIZ – metoda interdyscyplinarna*, II Konferencja Naukowa KNWS'05 Informatyka – sztuka czy rzemiosło, Złotniki Lubańskie, 15–18.06.2005.
- [6] *TRIZ – Teoria Rozwiązywania Zagadnień*, <https://www.mindmeister.com/418504021/triz-pl-teoria-rozwi-zywania-innowacyjnych-zagadnie> (16.12.2016).
- [7] *Breakthrough thinking with TRIZ for business and management: an overview*, <http://www.xtriz.com/TRIZforBusinessAndManagement.pdf>, (16.12.2016).
- [8] *TRIZ 40 DESIGN Principles*, <http://www.southampton.ac.uk/~jps7/Lecture%20notes/TRIZ%2040%20Principles.pdf> (16.12.2016).
- [9] *TRIZ Power Tools*, [http://www.opensourcetriz.com/attachments/Resolving\\_Contradictions.pdf](http://www.opensourcetriz.com/attachments/Resolving_Contradictions.pdf) (16.12.2016).

- [10] Deimel M., *Relationships between TRIZ and classical design methodology*, Procedia Engineering, vol. 9, 2011, s. 512–527.
- [11] Schöfer M., Maranzana N., Aoussat A., Gazo C., Bersano G., *The value of TRIZ and its derivatives for interdisciplinary group problem solving*, Procedia Engineering, vol. 131, 2015, s. 672–681.
- [12] Ilevbere I. M., Probert D., Phaal., *A review of TRIZ, and its benefits and challenges in practice*, Technovation, vol. 33, 2–3/2013, s. 30–37.
- [13] Tiuc D., Draghici G., *TRIZ model used for complaint management in the automotive product development process*, Procedia – Social and Behavioral Sciences, vol. 221, 2016, s. 414–422.
- [14] Chechurin. L., Borgianni Y.: *Understanding TRIZ through the review of top cited publications*, Computers in Industry, vol. 82, 2016, s. 119–134.

## METODYKA ROZWIĄZYWANIA ZAGADNIENÍ PROBLEMOWYCH TRIZ

### Streszczenie

W pracy przedstawiono Teorię Rozwiązywania Innowacyjnych Zadań TRIZ opracowaną przez G. S. Artshullera. Metodyka ta pozwala na rozwiązywanie skomplikowanych zagadnień problemowych. Początkowo przeznaczona dla inżynierów, wynalazców i naukowców, z czasem rozrosła się do miana metodologii interdyscyplinarnej, wspomagając prace nad modelami biznesowymi, marketingiem i edukacją. Metodologia pozwala na rozwiązywanie szerokiego wachlarza zagadnień o różnym stopniu skomplikowania. W odróżnieniu od metody „prób i błędów”, TRIZ prowadzi do jak najszybszego i efektywnego znalezienia najbardziej optymalnego rozwiązania. W celu usprawnienia pracy nad innowacjami G. S. Artshuller opracował algorytmy i narzędzia oparte na tysiącach patentów, co sprawia, że metodologia przynosi oczekiwane efekty. Metodologia wykorzystywana jest obecnie na całym świecie i pomimo śmierci autora jest ciągle rozwijana i modyfikowana. O skuteczności metodologii świadczy nauczanie jej na wielu uniwersytetach oraz w oficjalnych ośrodkach TRIZ.

**Słowa kluczowe:** TRIZ, ARIZ, inwentyka

## METHODOLOGY OF PROBLEMATIC TASKS SOLVING TRIZ

### Abstract

The paper presents the Theory of Solving Innovative Tasks TRIZ developed by G. S. Artshuller. The methodology allows for solving complicated issues. Initially designed for engineers, inventors and scientists, with time grew to become the interdisciplinary methodology, supporting the work on business models, marketing and education. The methodology allows for solving a wide range of issues of varying degrees of complexity. In contrast to the method of "trial and error", TRIZ results in quick, effective and the most optimal solution. In order to streamline the work on innovation Artshuller developed algorithms and tools based on thousands of patents, which makes the methodology provides desired results. The methodology is used around the world and despite the author's death is still being developed and modified. The effectiveness of the methodology is proved by fact that it is taught at multiple universities and in official TRIZ centers.

**Keywords:** TRIZ, TIPS, ARIZ

*Lukasz Woźniak<sup>1</sup>, Paweł Surdacki<sup>2</sup>, Leszek Jaroszyński<sup>3</sup>*

## **NUMERYCZNY MODEL TAŚMY NADPRZEWODNIKOWEJ YBCO 2G W UZWOJENIACH TRANSFORMATORA**

### **1. Wstęp**

W przewodach nadprzewodnikowych występuje połączenie właściwości magnetycznych i elektrycznych materiału objawiających się zanikiem rezystancji elektrycznej w określonych warunkach. Przewody te znajdują się w stanie nadprzewodzącym, gdy punkt ich pracy wyznaczony przez temperaturę, gęstość prądu oraz natężenie pola magnetycznego leży poniżej charakterystycznej dla danego materiału nadprzewodnikowego powierzchni krytycznej.

Ze względu na wartość temperatury krytycznej  $T_c$  wprowadzono umowny podział przewodów nadprzewodnikowych na:

- niskotemperaturowe (LTS – Low Temperature Superconductor),
- wysokotemperaturowe (HTS – High Temperature Superconductor).

Granica rozdzielającą nadprzewodniki LTS i HTS jest temperatura krytyczna  $T_c = 25$  K.

### **2. Taśma nadprzewodnikowa YBCO 2G**

#### **2.1. Struktura taśmy nadprzewodnikowej YBCO 2G**

Wysokotemperaturowe taśmy nadprzewodnikowe HTS drugiej generacji (2G) nazywane są przewodami warstwowymi lub powlekanymi. Taśmy te zazwyczaj bazują na wysokotemperaturowym nadprzewodniku itrowym YBCO. Taśmy drugiej generacji zaczynają zastępować taśmy pierwszej generacji, które bazowały na nadprzewodniku bizmutowym BSCCO. W stanie nadprzewodzącym taśmy drugiej generacji charakteryzują się tym, że przewodzą prądy o wartości setek amperów przy bardzo małych stratach. Natomiast po przejściu nadprzewodnika drugiej generacji w stan rezystywny posiadają one stosunkowo dużą wartość rezystancji. Wysokotemperaturowe taśmy nadprzewodnikowe drugiej generacji zbudowane są z kilku warstw. Warstwa podłoża odpowiada za parametry elektryczne oraz mechaniczne, składa się ze stopu niemagnetycznego Hastelloy (Ni – 57,00%, Mo – 16,00%, Cr – 15,50%, Fe – 5,50%, W – 4,00%, Co – 2,50%), grubość tej warstwy to około 50  $\mu\text{m}$ . Opcjonalna warstwa stabilizatora

---

<sup>1</sup> Politechnika Lubelska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Instytut Elektrotechniki i Elektrotechnologii, ul. Nadbystrzycka 38A, 20-618 Lublin, woźniak.lukasz1988@gmail.com

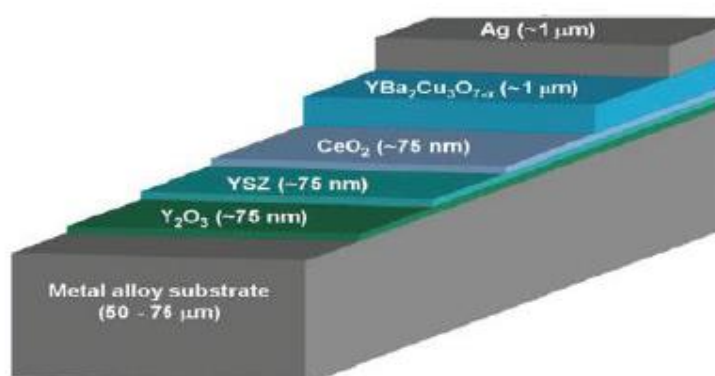
<sup>2</sup> Politechnika Lubelska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Instytut Elektrotechniki i Elektrotechnologii, ul. Nadbystrzycka 38A, 20-618 Lublin, email: p.surdacki@pollub.pl

<sup>3</sup> Politechnika Lubelska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Instytut Elektrotechniki i Elektrotechnologii, ul. Nadbystrzycka 38A, 20-618 Lublin, email: l.jaroszynski@pollub.pl

decyduje o parametrach termicznych i mechanicznych taśmy, znajduje się na górze oraz na dole taśmy, ma grubość około 20  $\mu\text{m}$ . Ponadto taśma nadprzewodnikowa drugiej generacji składa się z warstwy srebra o grubości 2  $\mu\text{m}$ , warstwy nadprzewodnika YBCO o grubości 1  $\mu\text{m}$ , warstwy bufora  $\text{LaMnO}_3$  (LMO) o grubości 30 nm, warstwy homoepitaksjalnej  $\text{MgO}$  o grubości 30 nm oraz warstwy podłoża  $\text{MgO}$  o grubości 10 nm. Firma AMSC (American Superconductors) wytwarzane taśmy pokrywa powłoką laminatu ze stali nierdzewnej lub z miedzi. Z kolei firma SuperPower produkuje taśmy bez stabilizatora (seria SF) oraz taśmy z miedzianym stabilizatorem (seria SCS). Porównując te dwa rodzaje taśm nadprzewodnikowych drugiej generacji można zauważyć, że taśmy bez stabilizatora w tej samej temperaturze  $T_C$  posiadają dziesięciokrotnie większą rezystancję niż taśmy ze stabilizatorem [1, 2].

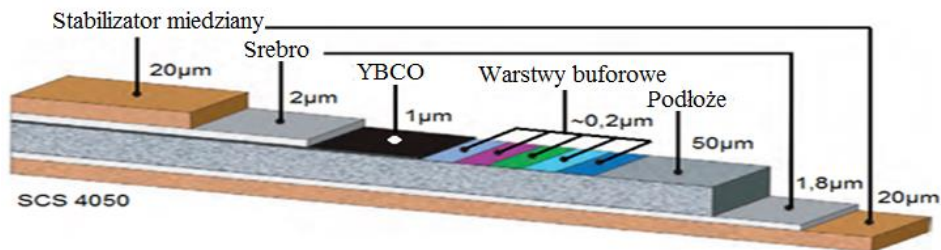
Tabela 4. Parametry taśmy nadprzewodnikowej SCS4050 firmy SuperPower [11]

Typ taśmy	SCS 4050
Grubość	~ 0,1 mm
Szerokość	4 mm
Min. promień gięcia	25 mm
Prąd krytyczny (przy $T = 77$ K)	80–100 A
Maks. długość taśmy pojedynczego odcinka	> 600 m
Grubość warstwy Ag	2 $\mu\text{m}$
Grubość warstwy Cu	40 $\mu\text{m}$
Grubość warstwy YBCO	1 $\mu\text{m}$
Grubość warstwy podłoża Hastelloy C276	50 $\mu\text{m}$
Rezystywność podłoża	$1,24 \cdot 10^{-6} \Omega\text{m}$



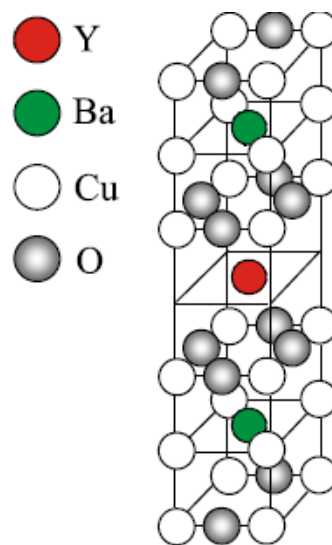
Rys. 1. Struktura taśmy nadprzewodnikowej drugiej generacji oferowanej przez firmę AMSC [10]





Rys. 2. Struktura taśmy nadprzewodnikowej drugiej generacji firmy SuperPower [11]

Taśmy nadprzewodnikowe drugiej generacji wytwarzane są najczęściej z materiału YBCO. Materiał ten jest związkiem chemicznym składającym się z tlenku itru, baru oraz miedzi. Ogólny wzór chemiczny tego materiału ma postać  $YBa_2Cu_3O_{6+x}$  ( $0 < x < 1$ ). Schemat struktury krystalicznej pojedynczej komórki proszku nadprzewodnikowego przedstawiono na rysunku 3.

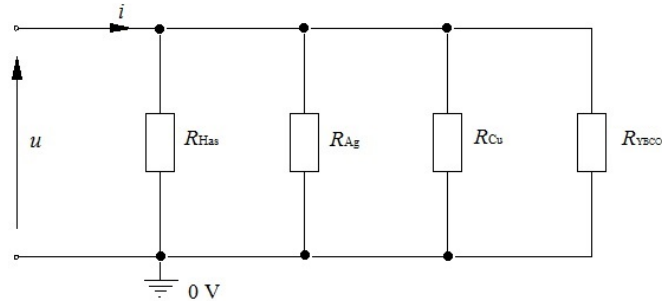


Rys. 3. Schemat struktury pojedynczej komórki proszku nadprzewodnikowego  $YBa_2Cu_3O_7$  [3]

### 3. Model numeryczny taśmy nadprzewodnikowej YBCO 2G

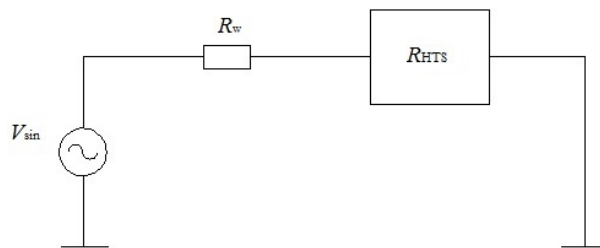
#### 3.1. Schemat zastępczy taśmy nadprzewodnikowej YBCO 2G

Obiektem modelowania jest taśma nadprzewodnikowa 2G YBCO. Schemat zastępczy taśmy został przedstawiony na rys. 4. Model matematyczny taśmy nadprzewodnikowej składa się z czterech rezystancji połączonych równolegle. Są to rezystancje: warstwy Hastelloyu, warstwy srebra, warstwy miedzi oraz warstwy nadprzewodnika [8, 9].



Rys. 4. Schemat zastępczy taśmy nadprzewodnikowej YBCO 2G

Schemat zastępczy układu symulacyjnego został przedstawiony na rysunku 5. Układ ten składa się z sinusoidalnego źródła napięcia, rezystancji wewnętrznej źródła zasilania oraz rezystancji wypadkowej taśmy nadprzewodnikowej.



Rys. 5. Schemat zastępczy układu symulacyjnego

### 3.2. Narzędzie modelowania

Model taśmy nadprzewodnikowej 2G YBCO został wykonany w programie PSpice. Program ten jest znanym symulatorem obwodów elektrycznych.

Pakiet Orcad PSpice umożliwia:

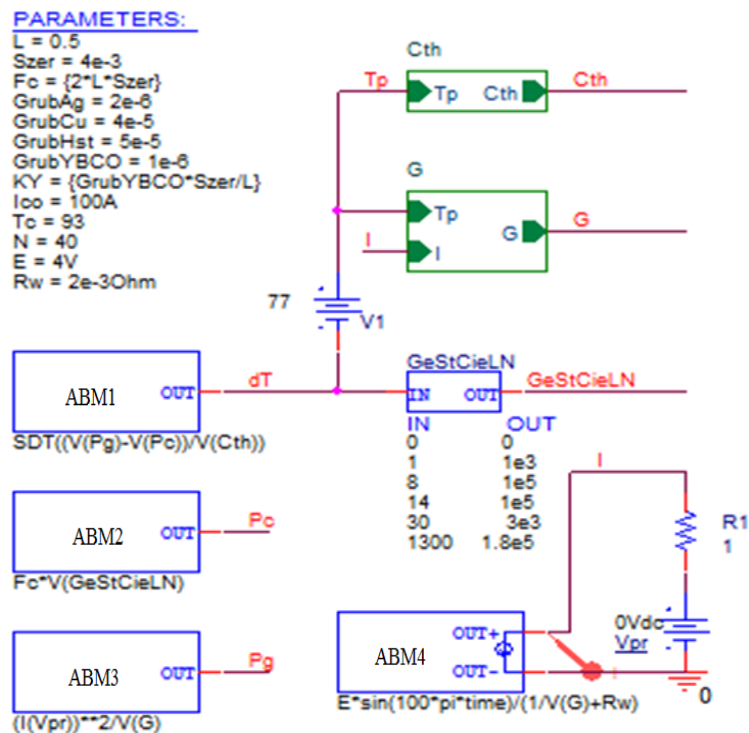
- rysowanie schematów analizowanego układu,
- wybór typu i wartości elementów,
- przeprowadzenie symulacji oraz wyświetlenie wyników w postaci graficznej,
- definiowanie bloków użytkownika ABM (analog behavioral modelling).

Do wykonania modelu wykorzystano modelowanie obwodowe w programie PSpice, ponieważ analiza FEM (finite element method) charakteryzuje się wielokrotnie większą złożonością obliczeń, gdyż oparta jest na modelowaniu polowym metodą elementów skończonych [8, 9]. W programie PSpice można badać układ pod kątem zmian takich wielkości jak:

- napięcie,
- prąd,
- temperatura,
- parametry geometryczne modelu.

### 3.3. Schemat symulacyjny taśmy nadprzewodnikowej YBCO 2G

Model obwodowy taśmy nadprzewodnikowej YBCO 2G zrealizowano w programie PSpice. Pokazany na rys. 6 model składa się z bloku pasywnego PARAM, w którym zawarte są parametry elektryczne, cieplne i geometryczne taśmy oraz z aktywnych bloków użytkownika ABM. Bloki napięciowe obliczają temperaturę względną (ABM1) w odniesieniu do temperatury ciekłego azotu, moc chłodzenia (ABM2) oraz moc nagrzewania taśmy nadprzewodnikowej (ABM3), zaś blok prądowy oblicza prąd taśmy nadprzewodnikowej (ABM4). Do określenia wartości prądu w obwodzie zastosowano pomocnicze źródło napięcia stałego (Vpr) o zerowej sile elektromotorycznej (SEM). W modelu zastosowano tablice z wartościami gęstości mocy cieplnej oddawanej ciekłemu azotowi w funkcji temperatury (GeStCieLN) oraz dwa bloki hierarchiczne. Pierwszy blok hierarchiczny reprezentuje pojemność cieplną (Cth), która jest sumą pojemności cieplnych warstw: miedzi, srebra, Hastelloyu oraz nadprzewodnika YBCO. Drugi blok hierarchiczny oblicza wypadkową konduktancję taśmy (G). W bloku tym uwzględnione jest płynne przechodzenie warstwy nadprzewodnika YBCO do stanu rezystywnego opisane potęgowym prawem Rhynera (1) [8, 9].



Rys. 6. Schemat elektryczny modelu taśmy nadprzewodnikowej YBCO 2G w programie PSpice

Nadprzewodniki wysokotemperaturowe posiadają nieliniową zależność pomiędzy gęstością prądu i natężeniem pola elektrycznego. Blok GYBCO (rys. 7) oblicza zmianę rezystancji (zjawisko przechodzenia do stanu rezystywnego) warstwy nadprzewodnika w taśmie nadprzewodnikowej drugiej generacji. Zależność, która opisuje prąd płynący w obwodzie nadprzewodnika opisana jest prawem potęgowym.



Rys. 7. Blok napięciowy ABM obliczający konduktancję warstwy nadprzewodnika YBCO

Zależność potęgowa (1) przedstawia relację pomiędzy gęstością prądu  $J$  i natężeniem pola elektrycznego  $E$

$$\frac{E}{E_c} = \left( \frac{J}{J_c(T)} \right)^{n(T)} \quad (1)$$

gdzie:

$E$  – natężenie pola elektrycznego, V/m,

$E_c$  – natężenie krytyczne pola elektrycznego,  $10^{-4}$  V/m,

$J$  – gęstość prądu, A/m<sup>2</sup>,

$J_c$  – gęstość krytyczna prądu, A/m<sup>2</sup>,

$n$  – wykładnik potęgowy zależny od temperatury.

Zależność pomiędzy natężeniem pola elektrycznego i gęstością prądu w prawie potęgowym zależy od aktualnej temperatury. Temperatura wpływa na wartość krytyczną prądu oraz wartość wykładnika  $n$ . Wykładnik ten wpływa na stromość narastania charakterystyki prądowo-napięciowej i definiowany jest na potrzeby symulacji obwodowej jako:

$$n(T) = n_0 \frac{T_0}{T} \quad (2)$$

gdzie:

$T_0$  – temperatura odniesienia, K,

$T$  – temperatura taśmy, K,

$n_0$  – wykładnik potęgowy w temperaturze  $T_0$  (dla YBCO  $n_0 = 15 \div 40$ ,  $T_0 = 77$  K).

Zakładając homogeniczny rozkład gęstości prądu i natężenia pola elektrycznego, równanie (1) można zapisać w postaci:

$$\frac{U}{U_c} = \left( \frac{I}{I_c(T)} \right)^{n_0 \frac{T_0}{T}} \quad (3)$$

gdzie:

$U$  – napięcie,  $V$ ,

$U_c$  – napięcie krytyczne,  $V$ ,

$I$  – prąd,  $A$ .

$I_c$  – prąd krytyczny,  $A$ .

Po przemnożeniu stronami równania (3) otrzymamy następującą zależność:

$$\frac{U}{I} = \frac{U_c}{I_c(T)} \left( \frac{I}{I_c(T)} \right)^{n_0 \frac{T_0}{T} - 1} \quad (4)$$

Zależność (4) można przepisać do postaci rezystancyjnej:

$$R_{YBCO} = \frac{U_c}{I_c(T)} \left( \frac{I}{I_c(T)} \right)^{n_0 \frac{T_0}{T} - 1} \quad (5)$$

gdzie:

$R_{YBCO}$  – rezystancja warstwy YBCO,  $\Omega$ .

Prąd krytyczny  $I_c(T)$  w równaniu (5) można wyrazić za pomocą liniowej relacji:

$$I_c(T) = I_{c0} \frac{T_c - T}{T_c - T_0} \quad (6)$$

gdzie:

$T_c$  – temperatura krytyczna,  $K$ ,

$I_{c0}$  – prąd krytyczny w temperaturze  $T_0$ ,  $A$ .

Po podstawieniu do równania (5) zależności (6) prądu krytycznego  $I_c(T)$  otrzymamy:

$$R_{YBCO} = \frac{U_c}{I_c} \left( \frac{I}{I_{c0} \frac{T_c - T}{T_c - T_0}} \right)^{n_0 \frac{T_0}{T} - 1} \quad (7)$$

Uwzględniając krytyczną wartość natężenia pola elektrycznego otrzymamy równanie:

$$R_{YBCO} = \frac{E_c \cdot L}{I_c} \left( \frac{I}{I_{c0} \frac{T_c - T}{T_c - T_0}} \right)^{n_0 \frac{T_0}{T} - 1} \quad (8)$$

gdzie:

$L$  – długość taśmy, m.

Konduktancja taśmy jest odwrotnością rezystancji

$$G_{YBCO} = \frac{1}{R_{rez} + R_{YBCO}} \quad (9)$$

gdzie:

$G_{YBCO}$  – konduktancja warstwy YBCO, S,

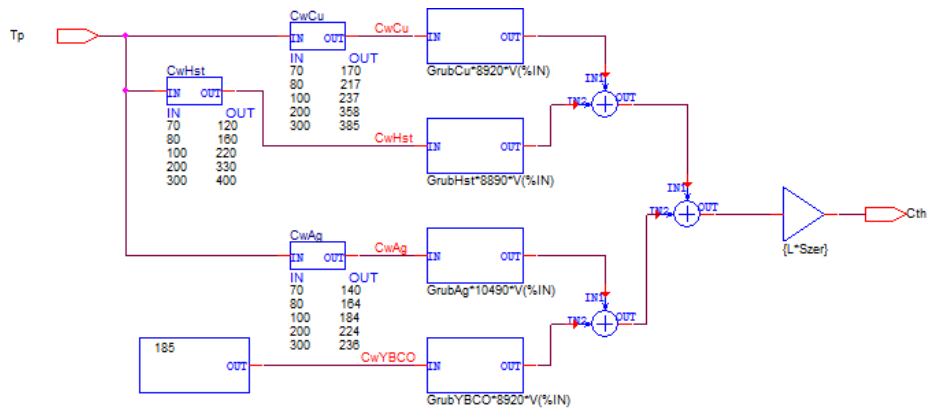
$R_{rez}$  – rezystancja szcztkowa (pewna wartość rezystancji różna od zera konieczna do przeprowadzenia poprawnych obliczeń numerycznych – w programie przyjęto jej wartość równą  $10^{-15} \Omega$ ).

### 3.4. Wyniki symulacji

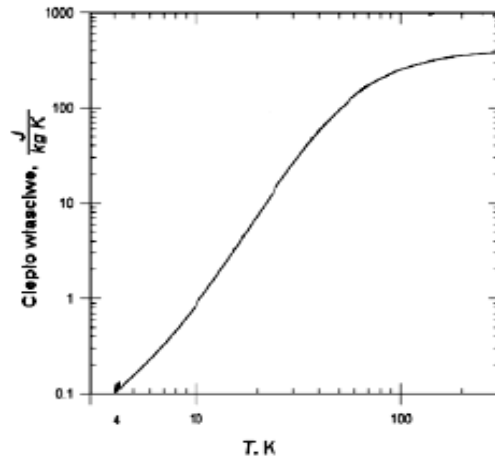
Do przeprowadzenia symulacji wzięto pod uwagę zasilanie z rzeczywistego źródła napięcia o amplitudzie 4 V, częstotliwości 50 Hz i rezystancji wewnętrznej źródła  $2 \cdot 10^{-3} \Omega$ . Przyjęto długość taśmy 0,5 m, szerokość taśmy  $4 \cdot 10^{-3}$  m, grubość warstwy srebra  $2 \cdot 10^{-6}$  m, grubość warstwy miedzi  $4 \cdot 10^{-5}$  m, grubość warstwy Hastelloyu  $5 \cdot 10^{-5} \Omega$ , grubość warstwy YBCO  $10^{-6}$  m, prąd krytyczny taśmy  $I_c = 100$  A, temperatura krytyczna taśmy  $T_c = 93$  K, temperatura ciekłego azotu  $T_0 = 77$  K, wykładnik  $n_0 = 40$ .

#### 3.4.1. Pojemność cieplna taśmy YBCO 2G

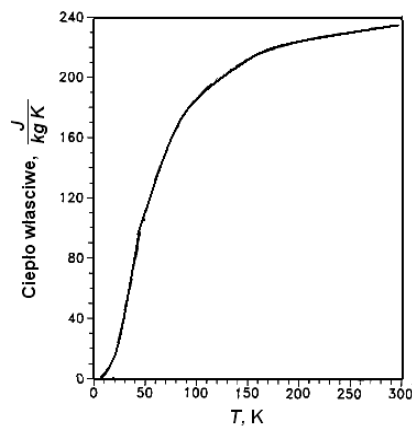
W modelu pojemność cieplna taśmy YBCO 2G obliczana jest za pomocą bloku hierarchicznego Cth (rys. 8). W bloku tym znajdują się pojemności cieplne warstwy miedzi  $C_{thCu}$ , srebra  $C_{thAg}$ , Hastelloyu  $C_{thHST}$ , nadprzewodnika YBCO  $C_{thYBCO}$ . Do obliczeń wykorzystywane są zależności zmiany ciepła właściwego poszczególnych warstw taśmy w funkcji temperatury, które zostały przedstawione na rys. 9, rys. 10, rys. 11. Na podstawie tych danych utworzono tablice z wartościami ciepła właściwego warstwy miedzi  $C_{wCu}$ , srebra  $C_{wAg}$ , Hastelloyu  $C_{wHST}$ . Natomiast jako ciepło właściwe warstwy nadprzewodnika  $C_{wYBCO}$  przyjęto stałą wartość  $185 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ . Do obliczeń wzięto również pod uwagę gęstość  $\gamma$  materiałów poszczególnych warstw taśmy nadprzewodnikowej, które zastawiono w tabeli 2.



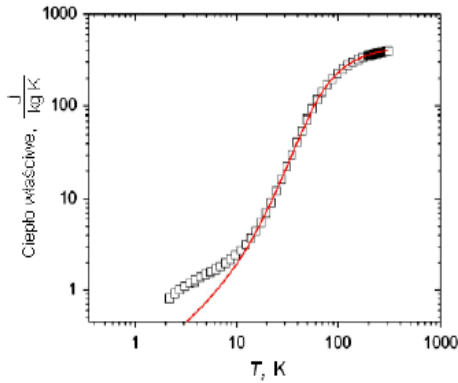
Rys. 8. Schemat pojemności cieplnej taśmy YBCO 2G



Rys. 9. Zmiana ciepła właściwego miedzi w funkcji temperatury [4]



Rys. 10. Zmiana ciepła właściwego srebra w funkcji temperatury [5]



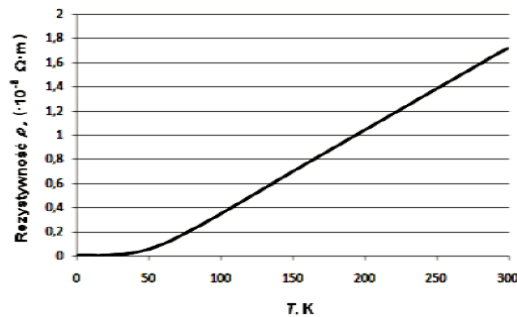
Rys. 11. Zmiana ciepła właściwego Hastelloy w funkcji temperatury [6]

Tabela 2. Gęstość materiałów poszczególnych warstw taśmy nadprzewodnikowej [7]

$\gamma_{Cu}$	8920 kg/m <sup>3</sup>
$\gamma_{Ag}$	10490 kg/m <sup>3</sup>
$\gamma_{YBCO}$	6300 kg/m <sup>3</sup>
$\gamma_{HST}$	8890 kg/m <sup>3</sup>

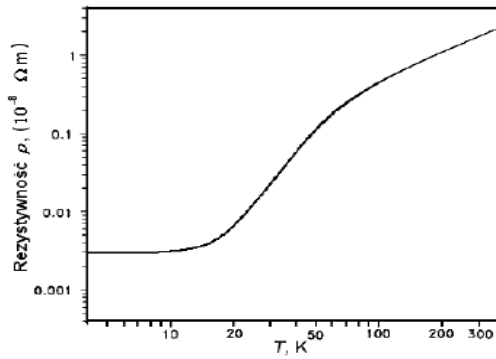
### 3.4.2. Konduktancja warstwy miedzi, srebra, Hastelloyu i YBCO

W modelu konduktancja taśmy YBCO 2G obliczana jest za pomocą bloku hierarchicznego G (rys. 6). Do obliczeń wykorzystywane są zależności zmiany rezystywności  $\rho$  warstw miedzi i srebra w funkcji temperatury, które zostały przedstawione na rys. 12, rys. 13. Natomiast dla warstwy Hastelloyu przyjęto, że rezystywność jest stała i wynosi  $1,24 \cdot 10^{-6} \Omega m$ . Do obliczeń wzięto również pod uwagę grubość poszczególnej warstwy oraz długość i szerokość taśmy nadprzewodnikowej. Korzystając z opracowanego modelu konduktancji taśmy YBCO 2G wygenerowano przebiegi konduktancji warstwy miedzi  $G_{Cu}$ , srebra  $G_{Ag}$ , Hastelloyu  $G_{HST}$  w funkcji czasu (rys. 14).

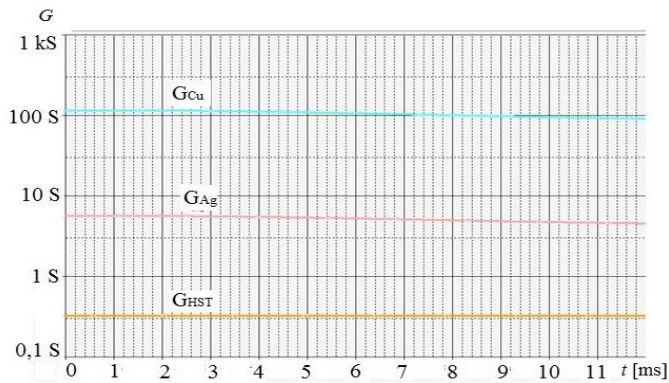


Rys. 12. Zmiana rezystywności miedzi w funkcji temperatury [4]





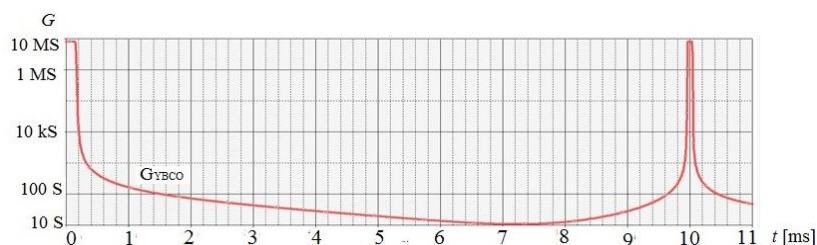
Rys. 13. Zmiana rezystywności srebra w funkcji temperatury [5]



Rys. 14. Przebieg konduktancji warstw miedzi  $G_{Cu}$ , srebra  $G_{Ag}$ , Hastelloyu  $G_{HST}$  w funkcji czasu

Ze względu na duże różnice konduktancji poszczególnych warstw taśmy nadprzewodnikowej, przebiegi zostały opracowane w skali logarytmicznej. Wartości konduktancji warstwy miedzi  $G_{Cu}$ , srebra  $G_{Ag}$ , Hastelloyu  $G_{HST}$  są w analizowanym przedziale czasu stałe i przyjmują wartości odpowiednio 100 S, 8 S, 0,5 S.

Przebieg konduktancji warstwy nadprzewodnika YBCO w funkcji czasu przedstawia rysunek 15.

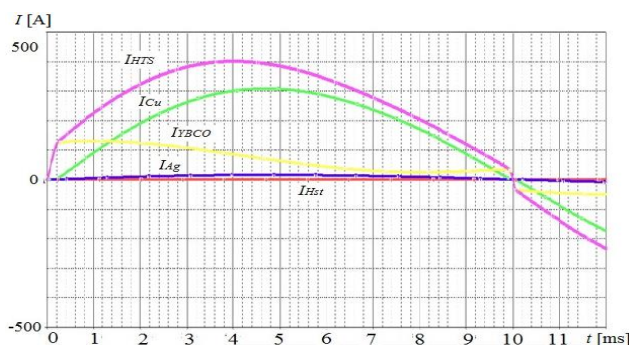


Rys. 15. Przebieg konduktancji warstwy nadprzewodnika  $G_{YBCO}$

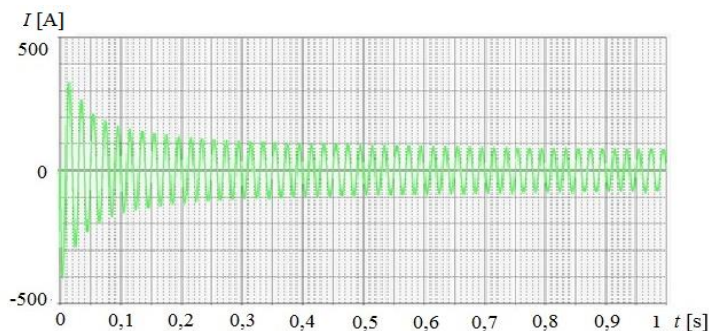
Konduktancja warstwy nadprzewodnika  $G_{YBCO}$  osiąga wartość maksymalną około 8 MS w czasie gdy wartość prądu w obwodzie dąży do zera.

### 3.4.3. Prąd warstwy miedzi, srebra, Hastelloyu i YBCO

Dla każdej warstwy taśmy nadprzewodnikowej użyto bloku sterowanego źródła prądu obliczającego prąd chwilowy danej warstwy. Do pomiaru prądu w danym obwodzie zastosowano pomocnicze źródło napięcia stałego o zerowej sile elektromotorycznej. Na rys. 16 przedstawiono przebiegi prąd warstwy miedzi  $I_{Cu}$ , srebra  $I_{Ag}$ , Hastelloyu  $I_{HST}$ , YBCO  $I_{YBCO}$  oraz prąd całkowity taśmy nadprzewodnikowej  $I_{HTS}$  w funkcji czasu (rys. 17).



Rys. 16. Przebieg prądu warstwy miedzi  $I_{Cu}$ , srebra  $I_{Ag}$ , Hastelloyu  $I_{HST}$ , nadprzewodnika  $I_{YBCO}$  oraz prądu całkowitego taśmy nadprzewodnikowej  $I_{HTS}$  w funkcji czasu



Rys. 17. Przebieg całkowitego prądu taśmy nadprzewodnikowej  $I_{HTS}$

Maksymalna wartość prądu taśmy nadprzewodnikowej  $I_{HTS}$  wynosi 400 A. Wartość ta osiągnięta jest po czasie 4 ms. Po czasie 30 ms prąd  $I_{HTS}$  przechodzi do stanu ustalonego, jego amplituda wynosi około 100 A. Warstwa miedzi przewodzi prąd o wartości maksymalnej 300 A. Podczas włączenia taśmy pod

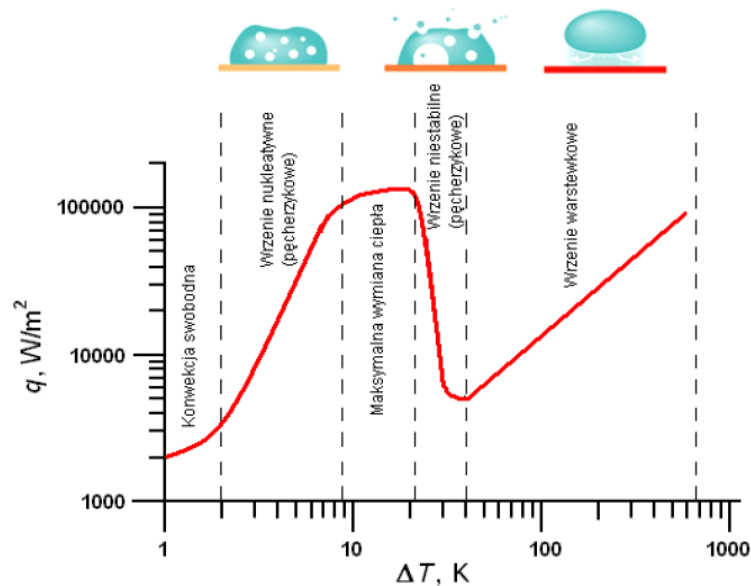
napięcie w przedziale czasu (0–0,2 ms) prąd płynie jedynie przez warstwę YBCO. Amplituda prądu  $I_{YBCO}$  osiąga w tym czasie wartość około 100 A po czym zaczyna maleć z powodu nagrzewania taśmy. Warstwy srebra oraz Hastelloyu, przewodzą względnie małe prądy rzędu kilku amperów.

### 3.4.4. Temperatura, moc grzania i chłodzenia taśmy nadprzewodnikowej

Sześcioelementowa tablica GeStCieLN z wartościami gęstości mocy ( $W/m^2$ ) oddawanej ciekłemu azotowi w funkcji różnicy temperatur  $\Delta T$ , przedstawiona jest na rysunku 18. Tablica ta została wykonana na podstawie zależności gęstość strumienia ciepła przepływającego pomiędzy powierzchnią metalową, a ciekłym azotem w funkcji różnicy temperatur  $\Delta T$  (rys. 19).

GeStCieLN		GeStCieLN
IN	OUT	
0	0	
1	1e3	
8	1e5	
14	1e5	
30	3e3	
1300	1.8e5	

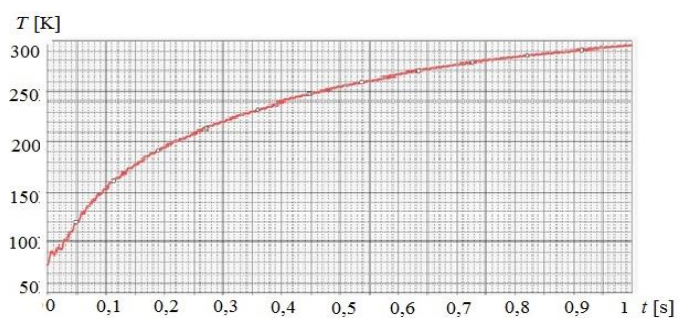
Rys. 18. Tablica 6-cio elementowa z wartościami gęstości mocy oddawanej ciekłemu azotowi w funkcji różnicy temperatur  $\Delta T$



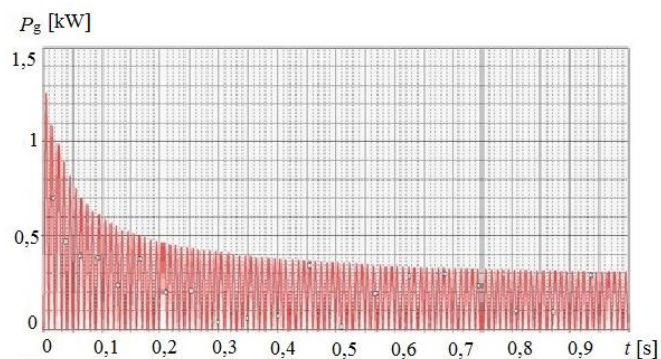
Rys. 19. Gęstość strumienia ciepła przepływająca pomiędzy powierzchnią metalową, a ciekłym azotem w funkcji różnicy temperatur  $\Delta T$  pomiędzy tą powierzchnią a ciekłym azotem [6]

Na rysunku 6. przedstawiono bloki napięciowe obliczające temperaturę względną (ABM1) w odniesieniu do temperatury ciekłego azotu, moc chłodzenia (ABM2) i moc nagrzewania taśmy nadprzewodnikowej (ABM3).

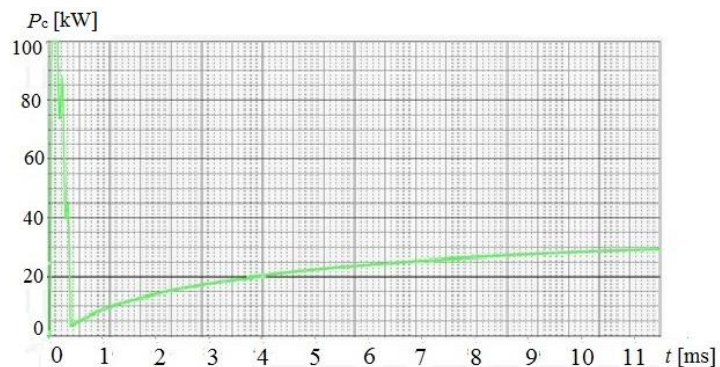
Zmiana temperatury, mocy chłodzenia oraz mocy grzania taśmy nadprzewodnikowej w funkcji czasu zostały przedstawione odpowiednio na rysunkach 20÷22.



Rys. 20. Temperatura taśmy nadprzewodnikowej w funkcji czasu



Rys. 21. Moc grzania taśmy nadprzewodnikowej w funkcji czasu



Rys. 22. Moc chłodzenia taśmy nadprzewodnikowej w funkcji czasu

Temperatura taśmy nadprzewodnikowej rośnie i największą wartość  $T = 293 \text{ K}$  osiąga po czasie 1 s. Maksymalna moc chłodzenia taśmy nadprzewodnikowej wynosi 100 kW. Moc grzania taśmy osiąga wartość 1,4 kW, po czym maleje do około 0,4 kW.

#### 4. Wnioski

Program PSpice pozwala na komputerowe modelowanie elementów nadprzewodnikowych.

Zastosowanie bloków modelowania behawioralnego (ABM) w symulacji obwodów elektrycznych umożliwia analizę stanów przejściowych taśmy nadprzewodnikowej stosowanej w uzwojeniach transformatorów nadprzewodnikowych.

Za pomocą programu PSpice i zastosowanych bloków modelowania behawioralnego (ABM) symulacja obwodów elektrycznych wydaje się być wiarygodnym narzędziem analizy materiałów nadprzewodnikowych.

#### Literatura

- [1] Adamczyk Ł., *Analiza procesu ograniczania udarowych prądów zwarciovych przez nadprzewodnikowe ograniczniki prądu z uwzględnieniem wpływu zmian ich impedancji*, Rozprawa doktorska, Politechnika Lubelska, 2012.
- [2] Majka M., Kozak S., *Zastosowanie taśm I i II generacji do budowy nadprzewodnikowych ograniczników prądu*, Przegląd Elektrotechniczny, vol. 87, 5/2009, s. 183–185.
- [3] Parida B., *DC electric al resistivity studies in bulk YBCO/Ag composites*, A report submitted to Department of Physics National Institute of Technology, Rourkela.
- [4] Matula R. A., *Electrical resistivity of cooper, gold, palladium and silver*, J. Phys. Chem. Ref. Data., vol. 8, 4/1979, s. 1147–1298.
- [5] Smith D. R., Fickett F. R., *Low-Temperature Properties of Silver*, J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol. vol. 100, 2/1995, s. 119.
- [6] Lu J., Choi E. S., Zhou H. D., *Physical properties of Hastelloy C-276TM at cryogenic temperatures*, J. Appl. Phys., vol. 103, 64908/2008.
- [7] Surdacki P., *Stabilność termiczna silnopiędowych urządzeń nadprzewodnikowych*, Monografie, Politechnika Lubelska, Lublin 2012.
- [8] Jaroszyński L., Janowski T., *YBCO coated conductors for superconducting transformer windings*, Przegląd Elektrotechniczny, vol. 90, 1/2014, s. 164–166.
- [9] Czerwinski D., Jaroszynski L., Majka M., Kozak J., Charnas B., *Comparison of overcurrent responses of 2G HTS Tapes*, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 26, 3/2016.
- [10] <http://www.superpower-inc.com/content/2g-YBCO-wire> (02.10.2016).
- [11] [http://www.amsc.com/solutions-products/YBCO\\_wire](http://www.amsc.com/solutions-products/YBCO_wire) (02.10.2016).

## NUMERYCZNY MODEL TAŚMY NADPRZEWODNIKOWEJ YBCO 2G W UZWOJENIACH TRANSFORMATORA

### Streszczenie

W pracy zaproponowano model obwodowy taśmy nadprzewodnikowej YBCO 2G zrealizowany w programie PSpice. Model składa się z bloku pasywnego, w którym zawarte są parametry elektryczne, ciepłne i geometryczne taśmy oraz z aktywnych bloków użytkownika ABM (analogue behavioral model). Bloki napięciowe obliczają temperaturę względną w odniesieniu do temperatury ciekłego azotu, moc chłodzenia oraz moc nagrzewania taśmy nadprzewodnikowej, zaś blok prądowy oblicza prąd taśmy nadprzewodnikowej. Do wykrywania prądu w obwodzie zastosowano pomocnicze źródło napięcia stałego o zerowym napięciu. W modelu zastosowano tablice z wartościami gęstości mocy oddawanej ciekłemu azotowi w funkcji temperatury oraz dwa bloki hierarchiczne. Pierwszy blok reprezentuje pojemność cieplną, która jest sumą pojemności cieplnej warstwy miedzi, srebra, Hastelloyu oraz nadprzewodnika YBCO w taśmie. Drugi blok hierarchiczny oblicza wypadkową konduktancję taśmy. W bloku tym uwzględnione jest płynne przechodzenie warstwy nadprzewodnika YBCO do stanu rezystywnego opisane potęgowym prawem Rhynera. Korzystając z opracowanego modelu wygenerowano przebiegi mocy nagrzewania i chłodzenia taśmy nadprzewodnikowej oraz konduktancji i prądów poszczególnych warstw taśmy nadprzewodnikowej w funkcji czasu.

**Słowa kluczowe:** taśma nadprzewodnikowa YBCO 2G, transformator nadprzewodnikowy, ograniczanie prądu, model numeryczny

## NUMERICAL MODEL OF THE TRANSFORMER WINDING'S YBCO 2G SUPERCONDUCTING TAPE

### Abstract

The paper proposes a circuit model of 2G YBCO superconducting tape created in the PSpice program. The model consists of a passive block containing the tape's electrical, thermal and geometric parameters and active user blocks of the ABM (analogue behavioural modelling) user. Voltage blocks calculate the relative temperature in relation to the temperature of liquid nitrogen, the cooling and heating power of superconducting tape, and the current block calculates the tape's current. For the purpose of current detection in the circuit a secondary source of DC was used with zero voltage. The model uses tables with values of power density passed to the liquid nitrogen as a function of temperature and two hierarchical blocks. The first block represents thermal capacity, which is the sum of the thermal capacity of the layer of copper, silver, Hastelloy and the YBCO superconductor in the tape. The second hierarchical block calculates the resultant conductance of the tape. This block allows for a smooth transition of the YBCO superconductor layer into the resistive state in which the current is described by Rhyner's power law. The developed model was used for generating waveforms of the heating and cooling power of superconducting tape as well as of the conductance and the currents of individual layers of superconducting tape as a function of time.

**Keywords:** YBCO 2G tape, superconducting transformer, current limitation, numerical model

*Robert Jarosz<sup>1</sup>, Łukasz Poloczek<sup>2</sup>, Bartłomiej Dybowski<sup>3</sup>, Andrzej Kielbus<sup>4</sup>*

## **PROCES PRODUKCJI MONOLITYCZNYCH WIELKOGABARYTOWYCH ODLEWÓW DLA PRZEMYSŁU ENERGETYCZNEGO**

### **1. Wstęp**

Nieustanny rozwój branży energetycznej zmusza producentów elementów układów elektroenergetycznych do spełniania coraz wyższych wymagań nie tylko konstrukcyjnych, ale także ekonomicznych [1]. Jeden z tego typu elementów stanowią wewnętrzne rozdzielnie wysokiego napięcia, które izolowane są gazem SF<sub>6</sub>. Podstawową konstrukcją tego typu rozdzielni są korpusy odlewane ze stopów aluminium, których głównym zadaniem jest zapewnienie wymaganej szczelności komór. Korpusy te jednocześnie stanowią nośny element konstrukcyjny, do którego montowane są kolejne elementy całego układu [2].

Ze względu na swój duży gabaryt oraz skomplikowany kształt, odlewy te odlewane są grawitacyjnie do form piaskowych. Surowiec do produkcji tego typu odlewów stanowią stopy aluminium z krzemem. Stopy Al-Si znajdują szerokie zastosowanie nie tylko w przemyśle energetycznym, ale także w przemyśle motoryzacyjnym czy też w przemyśle medyczo-optycznym. Tak szerokie zastosowanie tych stopów determinowane jest ich bardzo dobrymi właściwościami fizycznymi i technicznymi. Siluminy te charakteryzują się małą gęstością, stosunkowo niską temperaturą topnienia, dobrym przewodnictwem cieplnym i elektrycznym, dobrymi właściwościami mechanicznymi. Ponadto stopy Al-Si cechują się dobrymi właściwościami odlewniczymi (dobra lejność, mały skurecz) oraz dobrą obrabialnością i znaczną odpornością korozyjną [3÷6].

#### **1.1. Proces technologiczny wykonania odlewów**

Proces technologiczny wykonania odlewów jest procesem złożonym, na który składa się wiele etapów, w wyniku których otrzymuje się w pełni wartościowy produkt w postaci odlewu. W trakcie uruchamiania nowego projektu procesu technologicznego, którego efektem jest uzyskanie odlewu o wymaganych parametrach użytkowych i jakościowych, przeprowadzana jest analiza

---

<sup>1</sup> Zakład Metalurgiczny „WSK Rzeszów”, Hetmańska 120, 35-078 Rzeszów

<sup>2</sup> Politechnika Śląska, Katedra Inżynierii Produkcji, Krasińskiego 8, 40-019 Katowice, email: lukasz.poloczek@polsl.pl

<sup>3</sup> Politechnika Śląska, Katedra Inżynierii Produkcji, Krasińskiego 8, 40-019 Katowice, email: bartlomiej.dybowski@polsl.pl

<sup>4</sup> Politechnika Śląska, Katedra Inżynierii Produkcji, Krasińskiego 8, 40-019 Katowice, email: andrzej.kielbus@polsl.pl

i późniejsza weryfikacja optymalnych parametrów założeń technologicznych. Założenia technologiczne są ściśle powiązane z wymaganiami technicznymi, które przedstawione są we wszelkich dokumentach przesłanych przez klienta tj. rysunków odlewów, rysunków części obrabianych, warunków technicznych odbioru oraz w innych dokumentach towarzyszących. Dokładna znajomość wymagań klienta, umożliwia zaprojektowanie technologii w sposób, który pozwoli na zminimalizowanie problemów podczas seryjnej produkcji. Analiza wymagań oparta jest przede wszystkim o aspekty związane z:

- dopuszczalnymi tolerancjami kształtu (geometrii) i wymiarów,
- jakością struktury wewnętrznej i powierzchni surowych odlewów,
- wymagań właściwości mechanicznych odlewów,
- wymagań właściwości użytkowych odlewów.

Wymienione wymagania muszą uwzględniać wszystkie etapy procesu produkcji odlewów począwszy od strony metalurgicznej poprzez technologię formy, obróbkę poodlewniczą, system kontroli aż po gotowy półwyrob.

## 1.2. Zapewnienie jakości gotowym odlewom

Podstawowym aspektem wpływającym na wysoką jakość, a tym samym na konkurencyjność odlewu jest stwierdzenie iż odlew jest wolny od wad [7,8]. Wadą odlewu zgodnie z normą PN-85/H-83105 "Odlewy – Podział i terminologia wad" jest zmiana kształtu, jakości powierzchni surowej, naruszenie ciągłości oraz nieprawidłowość struktury wewnętrznej odlewu [9]. Wadliwy odlew zostaje odrzucony bądź poddany dodatkowym zabiegom, umożliwiającym tym samym jego dalszą eksploatację w cyklu produkcyjnym. Poprzez warunki techniczne określamy dalsze postępowanie z wadliwym odlewem.

Wady odlewnicze występujące w procesie produkcyjnym można podzielić na:

- wady dopuszczalne,
- wady naprawialne,
- wady dyskwalifikujące odlew.

Stworzenie procesu produkcyjnego który zapewniłby całkowitą eliminację wystąpienia wad jest praktycznie nie możliwe. Dlatego też odlewnie w swoich analizach techniczno-ekonomicznych zakładają pewien dopuszczalny procent wystąpienia wadliwych odlewów, który nie obniża ich rentowności. W zależności od asortymentu produkcji (materiału, stopnia jego skomplikowania, warunków technicznych odbioru, wyposażenia technologicznego i wielkości wytwarzanych serii) dopuszczalna ilość wadliwych odlewów nie powinna przekraczać 2–5% całkowitej produkcji. Wyjątkami dla dolnej granicy wadliwych odlewów są pozycje bezrzdzeniowe produkowane na liniach automatycznych, gdzie wskaźnik ten nie powinien przekraczać 1% oraz średnie i duże odlewy jednostkowe lub małoseryjne, gdzie dla konkretnych pozycji zadawalający jest poziom nieprzekraczający 7–10% braków [10, 11]. Jednakże niezależnie od



poziomu wadliwości produkowanych odlewów, odlewy zabrakowane zawsze powodują zwiększanie kosztów produkcji, stąd dążenie do obniżenia ilości wad występujących w odlewach.

Do głównych etapów wpływających na jakość odlewów podczas procesu produkcji zalicza się:

- dobór składu chemicznego,
- właściwy dobór technologii formy i rdzenia,
- przygotowanie, topienie i uszlachetnianie ciekłego stopu (modyfikatory),
- przeprowadzenie obróbki poodlewniczej tj. obróbka cieplna, obróbka wykańczająca (zaczyszczanie, polerowanie, śrutownie) powierzchni surowej odlewów, operacje kontrolne i odbiorcze,
- kontrola jakości gotowego produktu.

### 1.3. Symulacje komputerowe

W celu minimalizacji wad odlewniczych, w procesie opracowywania technologii odlewania stosuje się wspomaganie komputerowymi metodami projektowania [10]. Jednakże zawsze należy mieć na uwadze to, że jak sama nazwa wskazuje wszystkie istniejące programy komputerowe służą jedynie wspomaganie projektowania wszystkich etapów wytwarzania odlewu i nie zastąpią w pełni konstruktora, technologa, czy metalurga. Nawet niewielkie odchylenia od założonych (rzeczywistych) parametrów technologicznych mogą wprowadzić przekłamanie w wynikach symulacji komputerowej poszczególnych etapów wytwarzania. Stwierdza się, że 1/4 przyczyn powstawania braków wpływa na 2/3 skutków ich powstawania, czyli jedna przyczyna może wywołać kilka różnych braków [7]. Jednak, że coraz częstsze stosowanie symulacji komputerowych, nie tylko w przemyśle odlewniczym, wynika z ich coraz to większej skuteczności. Symulacje komputerowe nie tylko ułatwiają projektowanie odlewów i ograniczają konieczność stosowania prób technologicznych ale również pozwalają na wykonanie symulacji zdarzeń dyskretnych, które umożliwiają szybkie i intuicyjne tworzenie realistycznych modeli logistycznych. Zastosowanie zaawansowanych narzędzi statystycznych umożliwia wykonywanie wysokiej klasy analiz produkcyjnych. Tym samym zastosowanie komputerowych rozwiązań przyczynia się do zmniejszenia kosztów przedsiębiorstwa wynikających z błędnych decyzji podejmowanych podczas planowania i modernizacji linii produkcyjnych.

## 2. Technologia wytwarzania skomplikowanych wielkogabarytowych odlewów monolitycznych

W przypadku odlewów wielkogabarytowych o dużej masie własnej proces opracowania optymalnej technologii jest dość skomplikowany i pracochłonny. Odlewy te charakteryzują się rozwiniętymi powierzchniami i zmienną grubością ścianek odlewu w obszarach występowania węzłów cieplnych (kołnierze, żebra), które utrudniają lub całkowicie uniemożliwiają stworzenie warunków jednoczesnego krzepnięcia (objętościowego). W takich przypadkach głównym celem jest dążenie do kierunkowego krzepnięcia odlewów, polegającego na przebiegu frontu krystalizacji od ścian cienkich poprzez węzły cieplne odlewu do elementów zasilających (nadlewów).

### 2.1. Materiał stosowany na monolityczne odlewy wielkogabarytowe

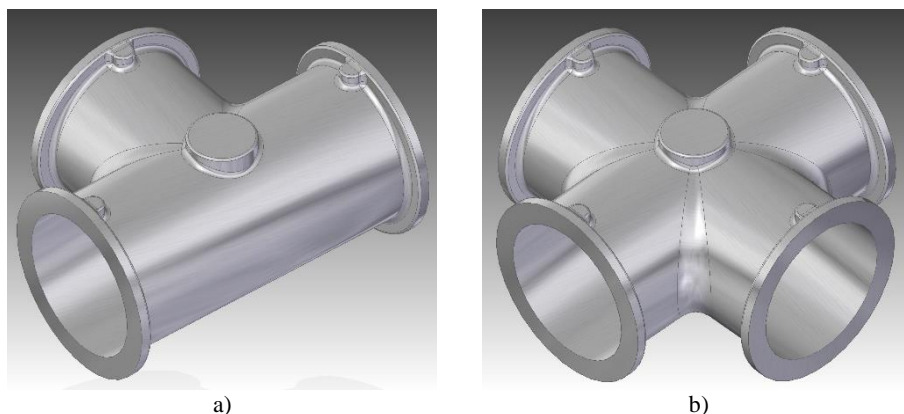
Głównym materiałem odlewniczym stosowanym dla odlewów wielkogabarytowych dla przemysłu energetycznego jest stop  $AlSi7Mg0,3$ , który należy do podeutektycznych stopów z grupy Al-Si. Stopy aluminium-krzem charakteryzują się bardzo dobrymi właściwościami technologicznymi, dobrą odpornością korozyjną i dobrymi właściwościami trybologicznymi. Jednak największą ich wadą jest obecność dużych, kruchych, kryształów krzemu w strukturze stopu, które znacznie obniżają właściwości mechaniczne oraz plastyczne oraz skłonność do tworzenia porowatości gazowo-skurczowej (między-dendrytycznej), w przypadku nieodpowiedniego procesu technologicznego. Dodatkowym utrudnieniem w technologii stopów Al-Si jest duże powinowactwo do tlenu i skłonności do tworzenia tlenków pochodzenia pierwotnego (proces metalurgiczny) i wtórnego w formie podczas odlewania. Kluczem do sukcesu jest odpowiednie zaprojektowanie systemu poszczególnych przekrojów układu wlewowego, układu filtrującego, systemu odpowietrzenia oraz wspólnego systemu zasilanie-chłodzenie realizowanego poprzez nadlewy zasilające i elementy chłodzące – ochładzalniki (żeliwne, aluminiowe).

### 2.2. Monolityczne odlewy wielkogabarytowe, a klasyczna technologia odlewania

Wymagania stawiane odlewom dla przemysłu energetycznego są nakierowane na wysoką zwartość struktury wewnętrznej (niedopuszczalne wady skurczowe i intensywna mikroporowatość), stabilność i powtarzalność wymiarową, dobre właściwości mechaniczne, szczelność i wytrzymałość postaciową.

### 2.2.1. Klasyczna technologia odlewania

Dotychczasowe konstrukcje odlewów opierały się na niewielkiej ilości brył elementarnych łączonych ze sobą w jedną całość jako spójnego elementu monolitycznego (rys. 1).

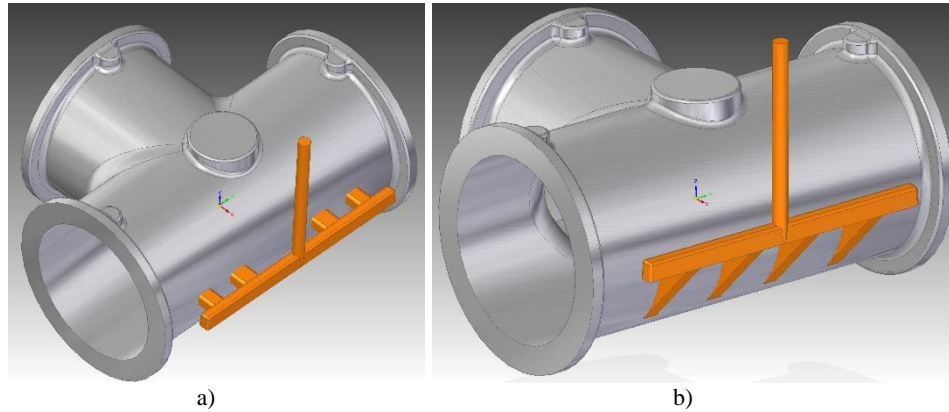


**Rys. 1. Przykładowe konstrukcje odlewów: a) korpus potrójnego łącznika, b) korpus poczwórnego łącznika**

Rozwiązania technologii odlewniczej dla tych odlewów musiały spełniać warunki spokojnego wypełniania wnętrza formy odlewniczej z późniejszym poprawnym przebiegiem procesu krzepnięcia.

Układy wlewowe stosowane w odlewnictwie stopów aluminium są układami otwartymi tzn. każdy następny przekrój w układzie jest większy od swojego poprzednika. Takie rozwiązanie umożliwia stopniowe zmniejszanie szybkości płynięcia strugi ciekłego stopu, a dodatkowe zabiegi związane z filtracją (filtry ceramiczne, siatki stalowe) i „łamaniem” poszczególnych belek rozpraszających pod różnymi kątami skutecznie wyhamowuje szybkość do wartości poniżej krytycznej 0,5 m/s.

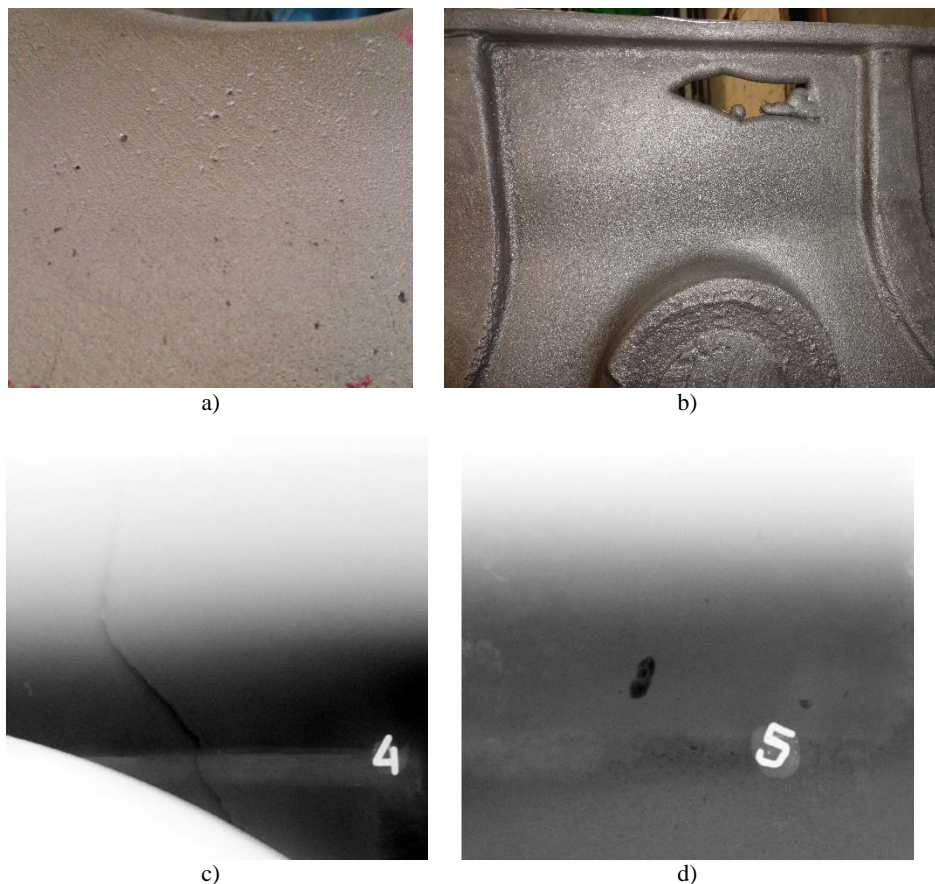
Parametr szybkości wypełniania wnętrza formy jest bardzo istotny gdyż nadmierna szybkość strugi ciekłego stopu powoduje różnego rodzaju turbulencje i zawirowania, które w efekcie końcowym powodują powstawanie wtrąceń pochodzenia wtórnego. Przekroczenie krytycznej szybkości prowadzi również do zjawiska rozbijania głównej (zwartej, jednolitej) strugi ciekłego stopu na mniejsze („języki”, krople), które są znacznie bardziej podatne na zjawisko utleniania. Sama konstrukcja układu wlewowego nie jest gwarantem otrzymania dobrych wyników jakościowych, równie ważnym jest miejsce i sposób doprowadzenia ciekłego stopu do odlewu (rys. 2).



**Rys. 2. Przykładowe rozwiązania układów wlewowych: a) doprowadzenie ciekłego stopu na podziale formy, b) doprowadzenie ciekłego stopu wlewami szczelinowymi w obszary dolne odlewu**

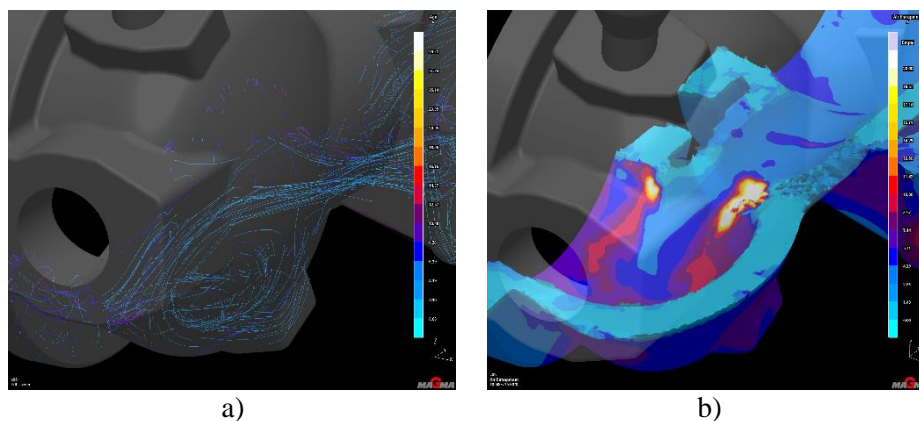
Na rysunku 2 przedstawiono przykładowe sposoby konstruowania układów wlewowych. Dla pierwszego rozwiązania pokazanego na rysunku 2a widać, że wlewy doprowadzające są usytuowane w podziale odlewu. Sposób ten w przypadku odlewów o dużych gabarytach, gdzie wysokość od podziału może wynosić do 500 mm jest niewskazany z uwagi na spadek strugi ciekłego stopu z dużej wysokości i tworzenia zjawiska „wodospadu”. W drugim przypadku przedstawionym na rysunku 2b, front zalewania doprowadzony jest w dolne obszary odlewu. Zapewnia to spokojniejsze wpływanie ciekłego stopu do wnętrza odlewniczej. Podczas wypełniania formy, czoło strugi sukcesywnie wynosi powietrze na zewnątrz formy poprzez inne elementy układów technologicznych (odpowietrzenia, wnęki odlewów).

Efekt ten zapobiega zamykaniu w „pułapki” porcji powietrza w wyniku czego mogą występować wady takie jak: pęcherze, niespawy, niedolewy, porowatości gazowe, wtrącenia tlenkowe, rys. 3.



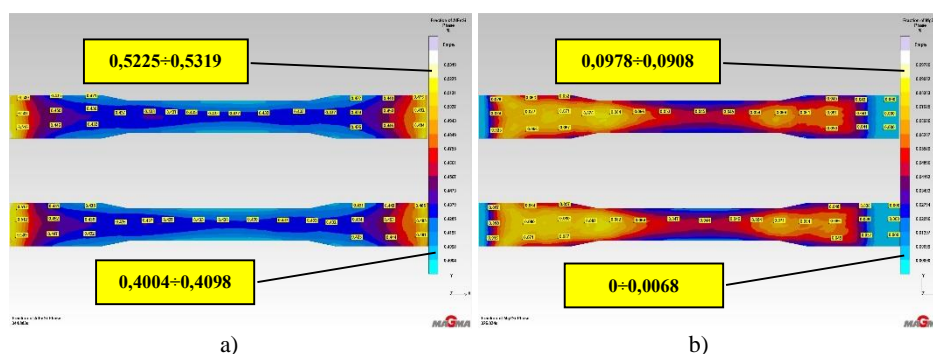
**Rys. 3. Przykładowe wady odlewnicze: a) nakłucia na powierzchni surowej odlewu powstałe poprzez usunięcie wtrąceń tlenkowych w operacji śrutowania, b) niedolew na ściance odlewu, c) zdjęcie RTG z niespawem, d) zdjęcie RTG z pęcherzem**

Nawet w przypadku poprawnej geometrii i przeliczonych przekrojów układu wlewowego, może dochodzić do takiej sytuacji, w której nieodpowiednie miejsce doprowadzenia strugi ciekłego stopu do odlewu spowoduje zaburzenie przepływu laminarnego. Zdarzają się przypadki, w których pomimo optymalnego doprowadzenia ciekłego stopu z prędkością niższą od krytycznej, sama konstrukcja odlewu np. zmienna grubość ścianek, węzły cieplne, żebra, mogą powodować lokalne przyśpieszenie strugi ciekłego stopu i być powodem powstawania wad odlewniczych. Dlatego analizując możliwe rozwiązania układów technologicznych, które będą odpowiednim wyborem dla konkretnej geometrii odlewu, należy brać pod uwagę kombinację wleatów rozprowadzających i doprowadzających z elementami filtracji wraz z odpowiednim miejscem ich doprowadzania do wnętrza odlewu, rysunek 4.



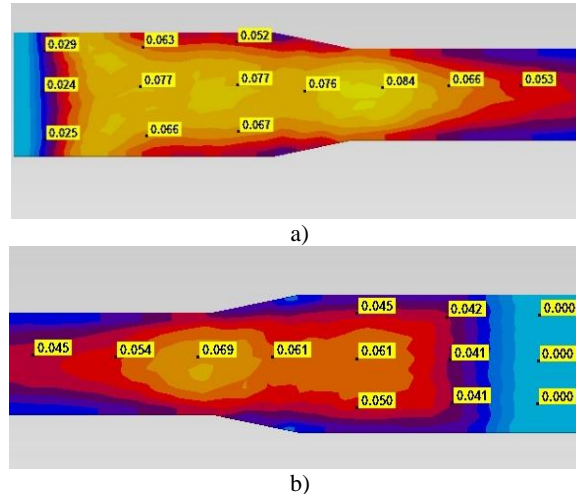
Rys. 4. Przykładowa symulacja wypełniania przykładowej wnęki odlew w programie MAGMASOFT: a) wektory zalewania z widocznymi obszarami turbulencji strugi ciekłego, b) zawartość powietrza w ciekłym stopie związana z zasysaniem przez elementy układu wlewowego

Kształtowanie się mikrostruktury podczas krystalizacji stopu uwarunkowanego założonym składem chemicznym jest sterowane szybkością krzepnięcia, która z kolei zależy od wartości współczynnika przewodności cieplnej zastosowanego materiału np. masy formierskiej. Temperatura początkowa etapu krystalizacji stopu, jak również czas przebywania w danym zakresie temperatur krzepnięcia umożliwia powstawanie konkretnych faz międzymetalicznych, eutektyki itp., które są charakterystyczne dla danego stopu odlewniczego. Reasumując ilość rozpatrywanej fazy międzymetalicznej może być inna w obszarze doprowadzenia ciekłego stopu w stosunku do obszaru odległego od układu wlewowego a np. zasilanego przez nadlew. Wyniki symulacji (rys. 5) potwierdzają to zjawisko, ponieważ analiza otrzymanych danych na przekroju poprzecznym próbki jasno wskazuje na zróżnicowaną mikrostrukturę w obszarze doprowadzenia ciekłego stopu do obszaru gdzie wpływ temperatury przepływającego stopu jest znacznie mniejszy, rysunek 6.



Rys. 5. Przykładowe wyniki udziałów objętościowych poszczególnych faz międzymetalicznych na przekroju próbki wytrzymałościowej: a) fazy AlFeSi; b) faza Mg<sub>2</sub>Si



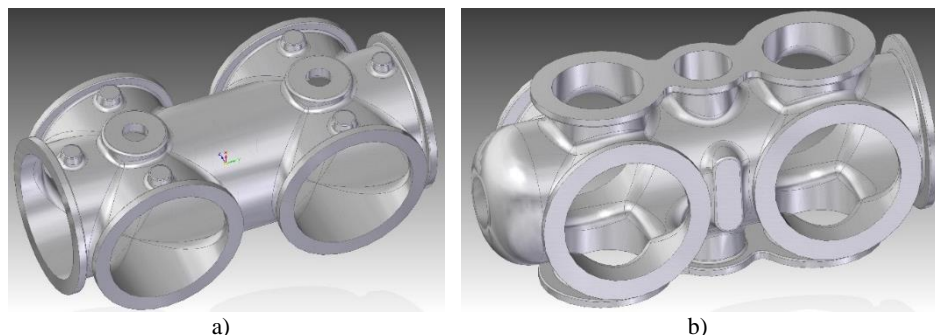


**Rys. 6. Rozkład fazy Mg<sub>2</sub>Si: a) obszar próbki z doprowadzeniem ciepłego stopu do formy, b) obszar próbki oddalonej od doprowadzenia ciepłego stopu ale zasilanego przez nadlew boczny**

Wartość rozbieżności nie jest znacząca, ale udział powierzchniowy ilości danej fazy różni się pomiędzy rozpatrywanymi miejscami w dużym stopniu. Jak widać wydłużony proces krzepnięcia w przypadku przedstawionym na rysunku 6, sprzyja tworzeniu się obszarów bogatszych w fazę Mg<sub>2</sub>Si, która wydzieliła się przy doprowadzeniu ciepłego stopu i dodatkowo zasilanego przez nadlew układu wlewowego. Kierunek takiej analizy w pierwszej kolejności pozwala na określenie gradacji występowania poszczególnych faz w zależności od temperatury, a w drugiej wartości procentowej pierwiastków stopowych, zanieczyszczeń kształtujących morfologię krystalograficzną odlewów próbek wykonanych ze stopów Al-Si.

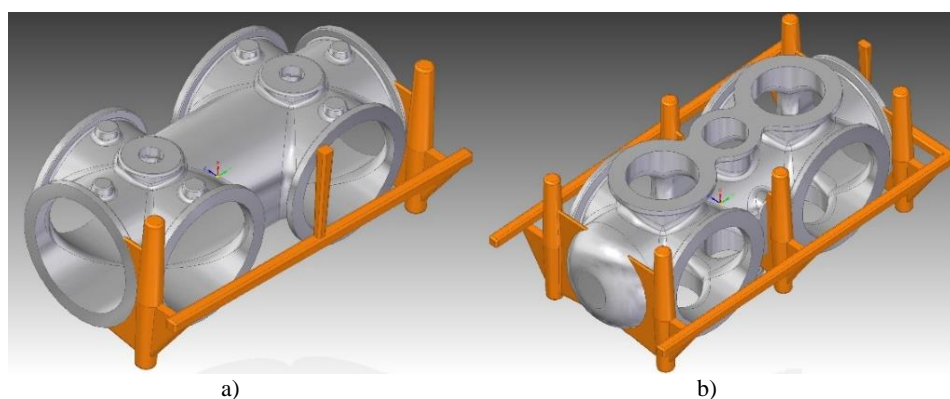
### 2.2.2. Technologia odlewania monolitycznych odlewów wielkogabarytowych

Oprócz laminarnego rozprowadzania ciepłego stopu, układy wlewowe powinny zapewniać jak najmniejszy gradient temperatury ciepłego stopu w różnych obszarach formy. Lokalne przegrzania wywołane nieodpowiednim przekrojem wlewów, punktowym doprowadzaniem, sprzyjają powstawaniu mikroporowości skurczowej, rozrostowi ziarna w procesie krzepnięcia a to z kolei prowadzi do obniżenia właściwości mechanicznych i użytkowych. W przypadku nadmiernego przechłodzenia strugi z powodu długich dróg płynięcia ciepłego stopu występują problemy z niedolewami, niespawami porowatością skurczową wynikającą z niskiej temperatury wpływania ciepłego stopu do wnętrza zasilaczy. Zagrożenia te powiązane są z odlewami monolitycznymi dużych rozmiarów złożonych z wielu brył elementarnych, których długości sięgają nawet powyżej 2000 mm, rysunek 7.



**Rys. 7. Przykładowe konstrukcje złożonych odlewów monolitycznych:  
a) korpus podwójnego czwórnika łącznika, b) korpus podwójnego czwórnika łącznika  
z dodatkowymi wylotami środkowymi**

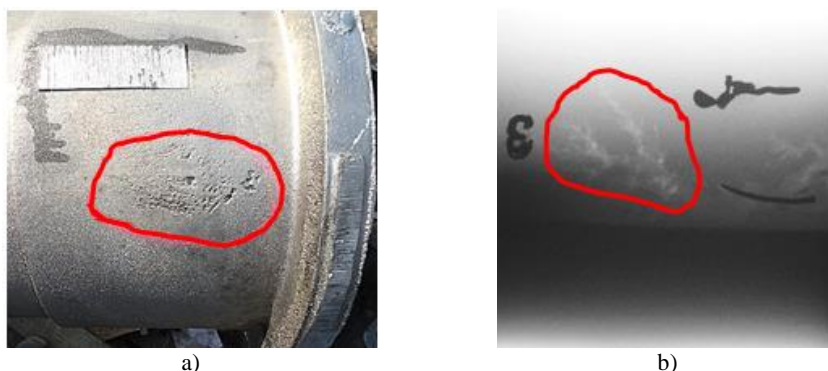
Układy technologiczne w takich przypadkach składają się z wielu elementów dodatkowych, które będą mogły w sposób powtarzalny zapewniać prawidłowe procesy wypełniania i krzepnięcia odlewów w formach piaskowych. Konstrukcje układów technologicznych muszą zapewniać laminarne wypełnianie wnęki formy w miejscach doprowadzenia ciekłego stopu, niejednokrotnie wielopunktowego w celu uzyskania równomiernego rozkładu temperatury. Układy te charakteryzują się dużą innowacyjnością w zakresie rozwiązań kształtu i przekrojów poszczególnych elementów wchodzących w system doprowadzania ciekłego stopu do właściwej wnęki formy (wnęki odlewu). Otrzymanie optymalnego rozwiązania jest bardzo często związane z wieloma próbami na etapie symulacji komputerowej, a następnie zabiegów modyfikujących w procesie właściwej produkcji odlewów (rys. 8).



**Rys. 8. Przykładowe rozwiązania układów wlewowych: a) doprowadzenia szczelinowe w dwa kolnierze boczne odlewu, b) doprowadzenia szczelinowe dwustronne w kolnierze boczne i w ścianki odlewu**

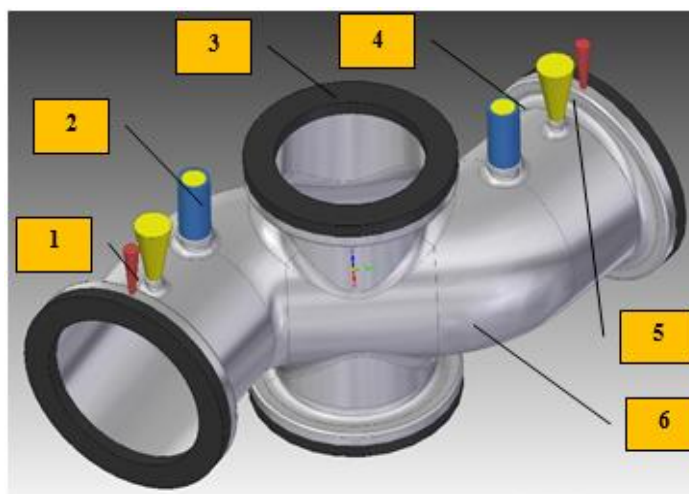


Nieodpowiedni dobór materiałów np. otulin, ochładzalników i ich niewłaściwe umiejscowienie prowadzi do powstawania porowatości skurczowej, a w skrajnych przypadkach skupionych rozrzedzeń oraz jam skurczowych, rysunek 9.

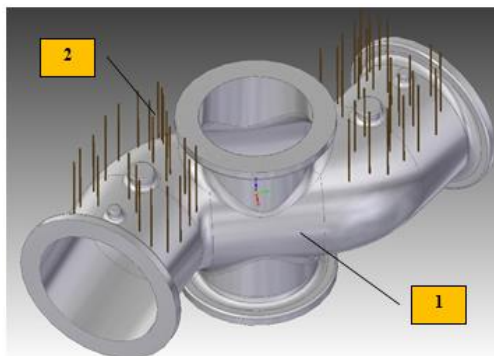


**Rys. 9. Wady odlewnicze typu skurczowego: a) odlew z widocznym rozległym powierzchniowym rozrzedzeniem, b) zdjęcie RTG z rzadziwą wewnątrz ścianki odlewu**

Proces krzepnięcia odlewów wielkogabarytowych o zmiennej grubości ścianek jest procesem złożonym, dlatego na etapie tworzenia technologii należy uwzględnić zjawiska związane z ewentualnym formowaniem się obszarów odlewu charakteryzujących się nadmiernym przegrzaniem lub nadmiernym przechłodzeniem ciekłego stopu. Przykładową ideę odpowiedniego rozmieszczenia elementów chłodzących, zasilających i odpowietrzających przedstawiono na rysunkach 10 oraz 11.



**Rys. 10. Przykładowy system zasilanie chłodzenie odlewu monolitycznego: 1 – odlew monolityczny; 2 – ochładzalniki żeliwne; 3 – otuliny izotermiczne; 4 – nadlewy w otulinie izotermicznej; 5 – nadlewy standardowe; 6 – przelewy**



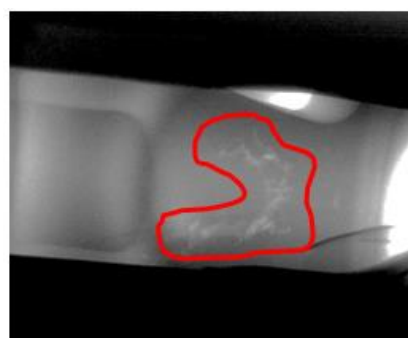
**Rys. 11. Przykładowy system odpowietrzenia formy odlewu monolitycznego:  
1 – odlew monolityczny; 2 – siatka odpowietrzenia wykonana w formie piaskowej**

Obszary węzłów ciepłych o dużych powierzchniach (kołnierze), które trudno zasilić lub ich zasilenie może powodować powstawanie porowatości skurczowej (odkrywanej w późniejszej obróbce mechanicznej), efektywniej jest mocno przechładzać stosując ochładzalniki o odpowiedniej grubości i z zastosowaniem odpowiedniego materiału (żeliwo, aluminium, stal). W przypadku mniejszych węzłów ciepłych (lokalne pogrubienia ścian, żebra) poprawnie przebiegający proces krzepnięcia zapewnia się poprzez umieszczenie nadlewów zasilających standardowych (w masie formierskiej) lub nadlewów w specjalnych otulinach izotermicznych.

Ważnym elementem każdej formy piaskowej jest system odpowietrzenia, który odpowiada za poprawną ewakuację powietrza z formy. Dodatkowo system ten spełnia rolę kanałów wylotowych wszystkich gazów poreakcyjnych masy formierskiej wynikających ze zgazowania przez ciekły stop jej składników (rys. 12).



a)



b)

**Rys. 12. Przykładowy wycinek odlewu z penetracją gazów poreakcyjnych:  
a) przełom w miejscu występowania wady, b) RTG miejsca z wadą**

Równie ważnym elementem wpływającym na jakość wykonywanych odlewów jest rodzaj i skład chemiczny masy formierskiej. Właściwości masy formierskiej wpływają na opór formy, wytrzymałość, gazotwórczość, przepuszczalność. Również sposób przygotowania formy w zakresie odpowiedniego zagęszczania masy formierskiej ma odzwierciedlenie w jakości wykonywanych odlewów. W przypadku dużego stopnia zagęszczenia formy zmniejsza się współczynnik przepuszczalności własnej masy formierskiej, z równoczesną poprawą szybkości odprowadzenia ciepła z jednostki powierzchni (mała ilość pustek i kanałów pomiędzy strukturą masy formierskiej). Natomiast lokalne niedogęszczenia z jednej strony mogą powodować bardzo dobry naturalny system kanałów odpowietrzających (polepszenie przepuszczalności masy formierskiej), jednakże z drugiej strony mogą powodować drastyczne spowolnienie szybkości odprowadzania ciepła w czasie krzepnięcia odlewu. Odpowiednia technologia wykonania mas i formy, wiąże się z wyeliminowaniem innego typu wad odlewniczych takich jak np. przypalenia, przywarcia, naderwania, erozja materiału formy, które powiązane są z powstawaniem wad powierzchniowych (rys. 13).

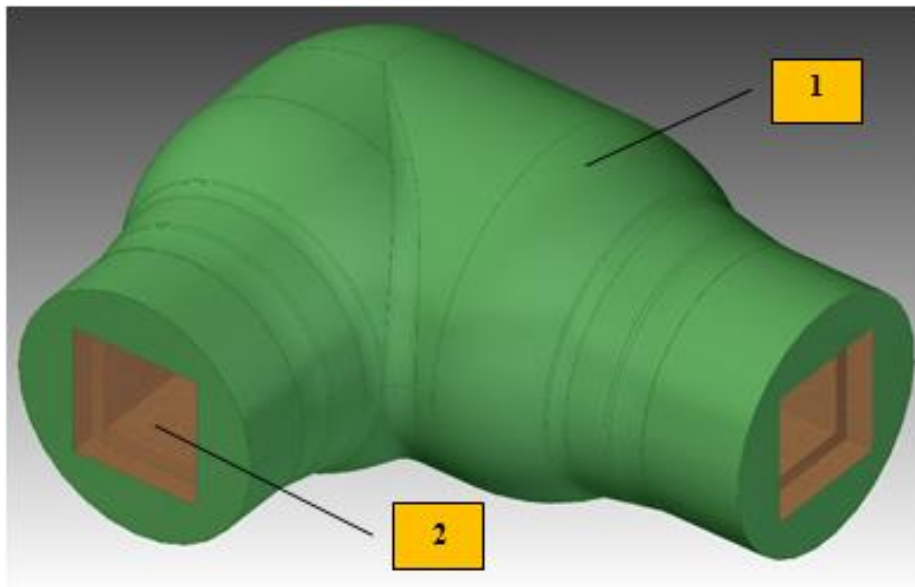


**Rys. 13. Przykładowe wady powierzchniowe: a) przywarcia masy formierskiej do powierzchni surowej odlewu, b) zaprószenie masą formierską powierzchni surowej odlewu**

Oprócz zabiegów dotyczących konstrukcji układów wlewowych, wady pochodzące od masy formierskiej są minimalizowane poprzez stosowanie dodatkowych materiałów pokrycia powierzchni wnek formy (pokrycia wodne, alkoholowe). Wpływają one na poprawę jakości powierzchni zewnętrznej odlewów, ograniczają emisyjność gazów poreakcyjnych w procesie zalewania i krzepnięcia odlewu (ograniczenie bezpośredniego styku ciekłego stopu ze składnikami zawartymi w masie formierskiej). Dodatkowo pokrycia te stanowią barierę dla powstających gazów.

W procesie krzepnięcia i późniejszego stygnięcia zachodzi zjawisko powstawania naprężeń wewnętrznych odlewu. Naprężenia wynikające z procesu krystalizacji, przy której z roztworu ciekłego w zakresie temperatury krzepnięcia wydzielają się różne fazy, mogą powodować poważne deformacje, odkształcenia odlewu prowadzące niekiedy do propagacji pęknięć naprężeniowych. Dlatego w technologii formy wymagane jest stosowanie różnego typu rozwiązań, zabezpieczeń, które w jakimś stopniu będą zmniejszać efekty skurczu hamowanego.

Obecnie stosowane masy formierskie (chemoutwardzalne), są po utwardzeniu dość sztywne, mało podatne w procesie kurczenia się odlewu (krzepnięcie, stygnięcie), ale z drugiej strony charakteryzują się bardzo dobrym odwzorowaniem kształtu i jakością powierzchni. Zwiększenie podatności formy uzyskuje się poprzez wprowadzenie różnego rodzaju „wyszczuplenia” wewnątrz rdzeni, części formy (rys. 14.).



**Rys. 14. Rdzeń piaskowy z wyszczupleniem wewnętrznym: 1 – rdzeń; 2 – przestrzeń „wyszczuplenia” polepszająca podatność rdzenia, zmniejszająca masę, wykorzystywana do transportu i składania formy**

Większość tego typu naprężeń uwalnianych jest po wybiciu odlewu z formy oraz po odcięciu układów technologicznych. Dodatkowo wprowadza się naprężenia i tym samym deformacje kształtu podczas procesu obróbki cieplnej odlewu. W tym jednak przypadku można to minimalizować specjalną obróbką odprężającą, stosowanie specjalnych przyrządów lub stosując mechaniczny proces prostowania.

### 3. Podsumowanie

Z przedstawionej analizy specyfiki kreowania układów technologicznych dla odlewów złożonych z wielu brył elementarnych, powiązanych ze sobą geometrią o zmiennej grubości ścianki i wieloma węzłami cieplnymi najczęściej odseparowanymi od siebie w dość dużych odległościach, wynika że proces ten składa się z wielu etapów, w których niezbędne jest uwzględnienie kilku ważnych aspektów metalurgiczno-odlewniczych. Pomijając proces metalurgiczny topienia i uszlachetniania ciekłego stopu (gdzie założone jest że proces jest prowadzony zgodnie z wszelkimi zaleceniami i wymaganiami stosowanymi dla stopów Al-Si), można uznać, że przy projektowaniu technologii dla wielkogabarytowych odlewów należy:

- dobrać odpowiednią masę formierską, jakość i ilość poszczególnych składników, które umożliwią otrzymanie optymalnych parametrów (wytrzymałości, przepuszczalności, niskiej gazotwórczości),
- zaprojektować odpowiednią technologię formy: usytuowanie odlewu, podziały formy, rdzeni pozwalające w sposób spokojny na doprowadzenie ciekłego stopu i uzyskanie poprawnego efektu zasilania w procesie krzepnięcia oraz minimalizacji efektów naprężeniowych,
- zaprojektować odpowiednie układy wlewowe rozbudowane w zakresie wlewów rozprowadzających, wlewów doprowadzających i elementów filtrujących zapewniających:
  - eliminację możliwości zasysania powietrza w układzie i wtórnego utleniania ciekłego stopu (powstawanie tlenków wtórnych)
  - równomierny i nieburzliwy przepływ ciekłego stopu we wnęce formy (zapobiega zamykaniu powietrza, tworzeniu tlenków, wtrąceń masy itp.)
  - doprowadzenie ciekłego stopu w kilka punktów formy, (takie rozwiązanie eliminuje powstawanie obszarów odlewu charakteryzujących się nadmiernym przegrzaniem lub nadmiernym przechłodzeniem), zapewnia to uzyskanie równomiernego rozkładu temperatury (bilans cieplny),
  - doprowadzenie ciekłego stopu w obszary dolne wnęk formy w celu eliminacji powstawania efektu „wodospadu” (spadanie strugi ciekłego stopu z dużej wysokości),
  - minimalizację zjawiska spotykania się odrębnych strug ciekłego stopu we wnęce formy (powodujące lokalne zaburzenia i spowolnienia ustabilizowanego procesu wypełniania),
  - efektywny proces filtrowania ciekłego stopu z wszelkich wtrąceń niemetalicznych, powiązany ze zmniejszeniem prędkości strugi w układzie wlewowym,

- współpracę z elementami odpowietrzającymi i przelewowymi w celu wyprowadzania powietrza z wnętrza formy oraz zimnej, utlenionej czołówki ciekłego stopu,
- dostarczenie ciekłego stopu o odpowiedniej temperaturze do systemów zasilających (nadlewy), w celu uzyskania efektywnie długiej żywotności ich pracy w procesie krzepnięcia odlewu,
- zaprojektować układy zasilające wyposażone w odpowiednią konstrukcję nadlewów, materiałów izolacyjnych zapewniających efektywny proces zasilania węzłów cieplnych odlewu. Rozmieszczone w odpowiedniej odległości od siebie stwarzające możliwość poprawnego „zazębienia” się poszczególnych obszarów działania nadlewów w strefie występowania węzłów cieplnych odlewu,
- zaprojektować układy chłodzące w postaci ochładzalników wykonanych z materiałów o dużym współczynniku odprowadzania i kumulacji ciepła (żeliwo, aluminium). Posiadające wymaganą grubość i kształt (z dodatkowym rozwinięciem powierzchni tzw. „relief” strefy mającej wpływ na szybkość przechłodzenia danego obszaru odlewu). Współpracujące w zespole z elementami zasilającymi w celu stworzenia stabilnie przebiegającego procesu krzepnięcia tzw. krzepnięcia kierunkowego.

W całościowym ujęciu zaprojektowanie technologii odlewniczej dla wielkogabarytowego monolitycznego odlewu, wymaga umiejętności powiązania ze sobą wielu zjawisk metalurgicznych i ich wpływu na późniejszy efekt jakościowy odlewu. Dlatego poszczególne etapy realizacji projektu uruchamiania nowego produktu, wymuszają dokładną analizę zagrożeń na poszczególnych etapach procesu technologicznego. Sposób takiego podejścia do opracowania technologii na etapie wdrażania pozwala na wyeliminowanie wielu problemów w późniejszej seryjnej produkcji odlewów.

#### Literatura

- [1] Łucki Z., Misiak W., *Energetyka a społeczeństwo*, Wydawnictwo Naukowe PWN, 2012.
- [2] H. Markiewicz, *Instalacje elektryczne*, Wydawnictwo WNT, Warszawa 2009.
- [3] Poloczek Ł., Kielbus A., *Wpływ czynników technologicznych na jakość odlewów ze stopów aluminium*, Zarządzanie Przedsiębiorstwem, Polskie Towarzystwo Zarządzania Produkcją, vol. 2, 2016.
- [4] Davis J.R., *ASM handbook*. ASM, Metals Park, 1990, s. 123–151, s. 166–168.
- [5] Cais, J., Weiss V., Svobodova J., *Relation between porosity and mechanical properties of Al-Si alloys produced by low-pressure casting*, Archives of Foundry Engineering, vol. 14, 1/2014, s. 97–102.

- [6] Conserva M., Bonollo F., Donzelli G., *Alluminio, manuale degli impieghi, Edimet*, Brescia, Italy, 2004.
- [7] Fałęcki Z., *Analiza wad odlewów*, WNT, Warszawa, 1997.
- [8] Górny Z., Lech Z., *Odlewanie kokilowe stopów metali nieżelaznych*, WNT, Warszawa, 1975.
- [9] PN-85/H-83105, *Odlewy – podział i terminologia wad*.
- [10] S. Kluska-Nawarecka, *Metody komputerowe wspomaganie diagnostyki wad odlewów*, Instytut Odlewnictwa, Kraków, 1999.
- [11] C. Władysław, *Poradnik Inżyniera. Odlewnictwo*, WNT, Warszawa, 1972.

## **PROCES PRODUKCJI MONOLITYCZNYCH WIELKOGABARYTOWYCH ODLEWÓW DLA PRZEMYSŁU ENERGETYCZNEGO**

### **Streszczenie**

Proces technologiczny wykonania odlewów jest procesem złożonym, na który składa się wiele etapów, w wyniku których otrzymuje się w pełni wartościowy produkt w postaci odlewu. W trakcie uruchamiania nowego projektu procesu technologicznego, którego efektem jest uzyskanie odlewu o wymaganych parametrach użytkowych i jakościowych, przeprowadzana jest analiza i późniejsza weryfikacja optymalnych parametrów założeń technologicznych.

*Słowa kluczowe: odlew wielkogabarytowy, stopy Al-Si, wady odlewnicze*

## **PRODUCTION PROCESS OF MONOLITHIC LARGE-SIZE CASTINGS FOR THE ENERGY INDUSTRY**

### **Abstract**

Technological process of the implementation of the castings is a complex process, which consists of many stages, as a result of which we receive a fully valuable cast. During startup, a new design of technological process, whose effect is to obtain the required casting performance and qualitative analysis is carried out, and subsequent verification of optimal parameters of technological assumptions.

*Keywords: high quality casting, Al-Si foundry alloys, casting defects*



*Andrzej Maruszczuk<sup>1</sup>, Katarzyna Mordal<sup>2</sup>*

## **GALWANOTECHNIKA– PRZEGLĄD AKTUALNEGO STANU WIEDZY**

### **1. Wstęp**

Powłoki galwaniczne ze względu na swoje unikatowe własności antykorozyjne są bardzo szeroko stosowane w wielu gałęziach przemysłu m.in. motoryzacyjnego, narzędziowego czy medycznego. Przykładowe elementy ocynkowane galwanicznie przedstawiono na rysunku 1. Osadzanie powłok galwanicznych, inaczej elektrolitycznych, w najprostszym ujęciu polega na wydzieleniu metali na powierzchni innych metali za pomocą prądu elektrycznego z roztworu soli. Początki galwanotechniki sięgają XVIII wieku, kiedy to po raz pierwszy wydzielono elektrolitycznie miedź, srebro i ołów. W ostatnich latach zauważa się bardzo znaczące postępy w technologii galwanizowania względem ochrony środowiska oraz wydajności procesów. Powtarzalność przemysłowa w procesach galwanizowania jest bardzo trudna do otrzymania, gdyż składa się na nią wiele czynników m.in. skład kąpiel, zawartość zanieczyszczeń, jakość anod, gęstość prądu [1, 2, 12].



**Rys. 2. Przykładowe elementy ocynkowane galwanicznie.**

**Źródło: [3], dostęp: 05.02.2017**

---

<sup>1</sup> Politechnika Częstochowska, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Informatyki,  
Instytut Technologii Mechanicznych, Aleja Armii Krajowej 19, 42-201 Częstochowa,  
email: amaruszczuk@gmail.com

<sup>2</sup> Politechnika Częstochowska, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Informatyki,  
Instytut Technologii Mechanicznych, Aleja Armii Krajowej 21, 42-201 Częstochowa,  
email: katarzyna.199212@gmail.com



## 2. Podstawowe parametry procesów galwanicznych

Galwanotechnika jest dziedziną skupiającą zagadnienia z pogranicza chemii oraz fizyki. Dla właściwego poruszania się w nomenklaturze galwanotechnicznej konieczne jest poznanie podstawowych praw oraz pojęć [4].

### 2.1. Wydajność prądu

W praktyce ilość metalu wydzielonego na katodzie lub roztworzonego na anodzie nigdy nie jest równa obliczonej teoretycznie z prawa Faradaya. Jest to spowodowane złożonością tego procesu oraz wpływem procesów ubocznych m.in. wydzielania wodoru i tlenu [1, 4–5, 16].

Wydajność prądu katody można określić jako procentowy stosunek ilości faktycznie wydzielonego na katodzie metalu do wartości wyznaczonej teoretycznie. Z kolei wydajność prądu anody to wyrażony w procentach stosunek ilości faktycznie wydzielonego na anodzie metalu do wartości wyznaczonej teoretycznie [1, 4–5, 13, 16].

### 2.2. Gęstość prądu

Jednym z najważniejszych parametrów procesu nanoszenia powłok elektrolitycznych jest gęstość prądu, która w dużej mierze warunkuje przebieg konstytuowania się warstwy powierzchniowej [1, 4–5].

Gęstość prądu  $d$  określa wzór (1):

$$d = \frac{I}{p} \left[ \frac{A}{dm^2} \right] \quad (1)$$

gdzie:

$I$  [A] natężenie prądu przypadającym na jednostkę powierzchni  $p$  [dm<sup>2</sup>].

Należy uwzględnić, iż wartość gęstości prądu wyznaczona obliczeniowo ma charakter orientacyjny i szczególnie nie znajduje odniesienia dla przedmiotów o skomplikowanych kształtach, gdzie parametr ten nie jest jednakowy na całej powierzchni detalu. Dla prawidłowego przeprowadzenia procesu galwanizowania konieczna jest znajomość rzeczywistej powierzchni obrabianych detali, co jest szczególnie trudne w przypadku detali drobnych np. gwoździ, śrub, nakrętek [1, 4–5]. W przypadku dobrania zbyt małej gęstości prądu w okolicach dodatnio naładowanego kryształu, następuje nieznaczny spadek stężenia jonów w roztworze, ponieważ spadek ilości kationów spowodowany jest ich wyladowaniem. Otrzymuje się wtedy powłokę złożoną z pojedynczych dużych kryształów. Z kolei zbyt duża gęstość prądu prowadzi do lokalnego zubożenia elektrolitu w pobliżu kryształu, wskutek czego wzrost kryształu zostaje zahamowany i powstają nowe ośrodki krystalizacji [1, 4–5].

### 2.3. Napięcie na wannie

Obok gęstości prądu duże znaczenie ma także wartość napięcia. Parametr ten nie rzutuje bezpośrednio na szybkość procesu, ale wskazuje jego poprawność. Na wartość napięcia składają się: różnica potencjałów elektrod, spadek napięcia wywołany pokonywaniem oporu elektrolitu oraz spadek napięcia na stykach. Wynikiem tego jest proporcjonalność napięcia do natężenia prądu. Dobieranie warunków elektrolizy w oparciu o pomiar napięcia jest niewłaściwie, gdyż słaby kontakt lub spadek przewodnictwa roztworu może spowodować obniżenie natężenia i gęstości prądu, co wpływa bezpośrednio na zmniejszenie grubości powłoki [1, 4–5].

### 2.4. Stężenie elektrolitu

Zarówno stężenie elektrolitu jak i gęstość prądu oraz mieszanie znacząco uzupełniają się, umożliwiając stosowanie większych gęstości prądu bez ryzyka konstytuowania struktury gruboziarnistej oraz wydzielania się wodoru. Kąpiele o dużym stężeniu elektrolitu warunkują powstawanie zwartych, dobrze przyczepnych powłok, a sam wzrost stężenia elektrolitu przyczynia się jednocześnie do poprawy wgłębności powierzchni [1, 4–5, 13].

### 2.5. Temperatura kąpeli galwanicznej

Wzrost temperatury kąpeli wpływa sprzyjająco na procesy dyfuzji, co zapobiega powstawaniu struktury gruboziarnistej oraz jednocześnie sprzyja wzrostowi kryształów. W wyższych temperaturach powstają powłoki gorszej jakości, ale sam wzrost temperatury przyczynia się do poprawy przewodności kąpeli, powodując tym samym spadek napięcia na kąpeli [1, 4–5, 13].

## 3. Proces technologiczny cynkowania galwanicznego

Galwaniczne powłoki metalowe stosuje się w celu ochrony przedmiotów metalowych przed korozją, co przedłuża trwałość tych wyrobów oraz zmniejsza koszty ich produkcji. Poza tym pełnią one również funkcje dekoracyjne, związane z poprawą wyglądu zewnętrznego powierzchni. Dodatkowo zadaniem powłok galwanicznych jest uzyskanie bądź poprawa własności mechanicznych i technologicznych powierzchni, w tym np. odporności na ścieranie, własności elektrycznych czy wymiarów [1, 4–6].

Z kolei sam proces nakładania powłok galwanicznych, niezależnie od rodzaju stosowanego metalu, zwykle poprzedza obróbka wstępna, przygotowująca powierzchnię do galwanizowania. Natomiast końcowym etapem jest niekiedy dodatkowa obróbka chemiczna lub elektrochemiczna, zwiększająca odporność korozyjną powłok [1, 4–7].

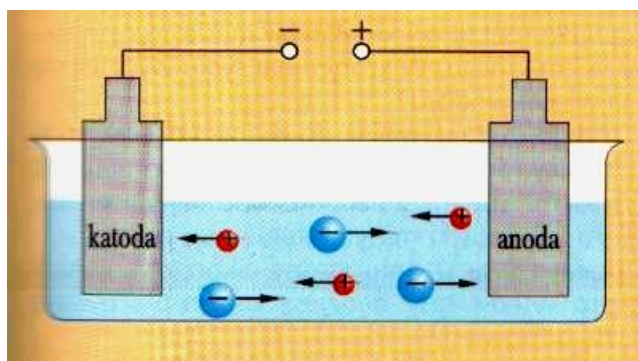
### 3.1. Technologia nakładania powłok galwanicznych

Na proces galwanizowania, niezależnie od nakładanego metalu, składają się następujące operacje:

1. obróbka wstępna powierzchni,
2. nanoszenie powłoki galwanicznej,
3. obróbka wykańczająca powłoki.

Obróbka wstępna, czyli procesy przygotowawcze, mają za zadanie oczyścić powierzchnię z wszelkich zanieczyszczeń. Dodatkowo dużą rolę spełniają w tej fazie operacje pomocnicze, m.in.: płukanie i suszenie [1, 4–7].

Nanoszenie powłoki galwanicznej wiąże się z zanurzeniem wcześniej przygotowanego przedmiotu w kąpeli (elektrolicie), w której skład wchodzi odpowiednia sól metalu, z jakiego wytworzone ma zostać pokrycie. Wówczas katodę, połączoną z ujemnym biegunem źródła prądu, stanowi ten przedmiot, natomiast anoda, połączona z dodatnim biegunem, jest wykonana z metalu, z jakiego zostanie wykonana powłoka. Przyłożone napięcie powoduje, że kationy (jony dodatnie) przechodzą do katody, gdzie się dochodzi do ich rozładowania, co powoduje wytworzenie powłoki. Najczęściej proces nanoszenia pokryć ma miejsce w warunkach stacjonarnych – w bębnach, kielichach lub wannach, zaś sam przedmiot zostaje umieszczony na specjalnych uchwytych, tzw. wieszakach [1, 4–7,10]. Na rysunku 2 przedstawiono uproszczony schemat nakładania powłok galwanicznych.



Rys. 3. Uproszczony schemat nakładania powłok galwanicznych.  
Źródło: [8], dostęp: 05.02.2017

Po naniesieniu powłoki przedmiot poddaje się obróbce wykańczającej, której podstawowym celem jest nadanie połysku, stąd najczęściej jest to proces polerowania na polerkach lub w kielichach czy bębnach (przy drobnych przedmiotach). Dodatkowo przy nakładaniu powłok cynkowych, cynowych czy kadmowych wykorzystuje się procesy pasywacji, dzięki którym dochodzi do polepszenia odporności na korozję [1, 4–7].

### 3.2. Obróbka wstępna – procesy przygotowawcze

Obróbka wstępna wyrobów metalowych stosowana przed procesem galwanizowania ma na celu usunięcie zanieczyszczeń różnego rodzaju oraz pozostałości po wcześniejszych procesach (np. zgorzelin, wypływek, tłuszczu, kurzu, warstewek tlenu i innych związków) z powierzchni, które pozostawione, pogorszyłyby jakość nałożonych powłok. Poza tym zadaniem tej obróbki jest również usunięcie nierówności powierzchni – musi ona być wystarczająco gładka i czysta [1, 4–7].

Obróbka wstępna powierzchni wyrobów metalowych przeprowadza się w sposób mechaniczny, chemiczny bądź elektrochemiczny, przy czym zastosowana metoda zależy od typu i ilości zanieczyszczeń, rodzaju powłoki i jej przeznaczenia [1,4–7]. Klasyfikacja metod obróbki wstępnej została przedstawiona poniżej, w tabeli 1.

**Tabela 5. Klasyfikacja metod obróbki wstępnej**

Metody obróbki mechanicznej	Metody obróbki chemicznej i elektrochemicznej
szlifowanie	odtłuszczanie
polerowanie	trawienie
szcztokowanie	dotrawianie
piaskowanie	polerowanie elektrolityczne
	polerowanie chemiczne

**Źródło:** opracowanie własne przy wykorzystaniu [1, 4–7]

### 3.3. Metody obróbki mechanicznej

Szlifowanie wiąże się z usunięciem cienkiej warstewki metalu przy użyciu ostrych narzędzi ściernych, np. tarczy szlifierskiej, zwanej ściernicą. Celem jest wygładzenie oraz wyrównanie powierzchni przedmiotu, zaś sam proces składa się z kilku kolejnych operacji (3÷5), podczas których stosuje się tarcze z coraz mniejszymi rozmiarami ziaren ściernych [1, 4–7].

Polerowanie ma za zadanie, obok usunięcia nierówności powierzchni, także nadanie jej błyszczącego, lustrzanego wyglądu, przy czym powierzchnia musi zostać przygotowana wcześniej w wyniku szlifowania. Proces ten przeprowadza się za pomocą narzędzi i materiałów polerujących, m.in.: wirujących tarcz polerskich, past polerskich, gładzików (kamieni polerowniczych) czy bębnow lub kielichów, w których oczyszczane są drobne przedmioty [1, 4–7].

Szczotkowanie, zwykle wykonywane na mokro, wiąże się z oczyszczeniem powierzchni ze zgorzelin i rdzy oraz jej polerowaniem przy użyciu wirujących szczotek prostych lub rotacyjnych.

Piaskowanie stosuje się zarówno do oczyszczania wyrobów o małej (odlewy, odkuwki) jak i dużej powierzchni (np. arkusze blach). Jego celem – podobnie jak szczotkowania – jest wygładzenie powierzchni przedmiotów i jej oczyszczenie ze zgorzeliny, rdzy, które prowadzi się za pomocą strumienia suchego piasku podawanego przy użyciu sprężonego powietrza [1, 4–7].

### 3.3.1. Metody obróbki chemicznej i elektrochemicznej

Odtłuszczanie wiąże się z usunięciem z powierzchni tłustych warstewek (oleje, tłuszcze) i innych zanieczyszczeń, np. resztki past polerskich, kurz, brud, wazelina itp.. Proces ten przeprowadza się w zależności od typu zanieczyszczeń (zmydlające się/ nie zmydlające się):

- w rozpuszczalnikach organicznych,
- w sposób chemiczny w alkaliach lub emulsjach,
- metodą elektrolityczną,
- metodą ultradźwiękową.

Najprostszym rodzajem jest odtłuszczanie w rozpuszczalnikach organicznych, usuwające zanieczyszczenia zmydlające się, jak i nie zmydlające za pomocą substancji palnych (benzyna, nafta, toluen) bądź częściej niepalnych (zazwyczaj trichloroetylen, czasami trójchlorek węgla, tetrachloroetylen). Proces ten prowadzi się metodą zanurzeniową, natryskową lub w parach [1, 4–7].

Z kolei odtłuszczanie chemiczne w alkaliach wiąże się z reakcją zmydlania tłuszczów pochodzenia zwierzęcego i roślinnego oraz emulgowania pozostałych. Wówczas w roztworach alkalicznych dochodzi do wystąpienia trzech procesów:

- chemicznego, w którym estry wyższych kwasów tłuszczowych rozkładają się pod wpływem wodorotlenku sodu na sól sodową tego kwasu, czyli mydło, i glicerynę, łatwo rozpuszczalne w wodzie,
- fizykochemicznego, w którym dochodzi do emulgacji tłustych zanieczyszczeń, czyli do połączenia cieczy nierozpuszczalnych,
- mechanicznego, w którym za pomocą przepływu roztworu lub jego natrysku przeprowadza się oczyszczenie powierzchni z nietłustych zanieczyszczeń.

Odtłuszczanie w kąpielach alkalicznych (metodą zanurzeniową lub natryskową) prowadzi się w podwyższonej temperaturze ( $70\div 90^{\circ}\text{C}$ ) w celu przyspieszenia reakcji chemicznych. W procesie tym wykorzystuje się takie substancje jak np.  $\text{NaOH}$ ,  $\text{KOH}$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{Na}_3\text{PO}_4$ ,  $\text{K}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ , zwiłzaczce czy środki emulgujące. Z kolei odtłuszczanie elektrochemiczne jest stosowane po chemicznym odtłuszczeniu i prowadzi się je w roztworze alkalicznym katodowo lub anodowo [1, 4–7].

Trawienie chemiczne lub elektrochemiczne, ma na celu oczyszczenie powierzchni metali z tlenków za pomocą roztworów kwasów, kwaśnych soli czy alkaliów. Na typ substancji trawiącej wpływa jednak rodzaj metalu i grubość warstwy tlenków. Proces ten przeprowadza się po odtłuszczeniu metodą zanurzeniową (w kąpeli), natryskową lub w obrotowym bębnie [1, 4–7].

Trawienie chemiczne wiąże się z reakcją chemiczną, w której roztwory kwasów lub alkaliów działają na warstwę tlenków na powierzchni, w wyniku czego dochodzi do powstania związków rozpuszczalnych w roztworze trawiącym i w wodzie. Niekiedy substancje trawiące rozpuszczają również czysty metal, stąd aby zapobiec takiemu szkodliwemu działaniu, stosuje się tzw. inhibitory. Proces trawienia chemicznego prowadzi się zwykle metodą zanurzeniową, przy czym jest on poprzedzony etapem odtłuszczenia i opłukania przedmiotu w strumieniu wody cieplej i zimnej. Z kolei po procesie trawienia przedmiot również opłukuje się wodą, aby pozbyć się resztek kwasów z powierzchni [1, 4–7].

Trawienie elektrochemiczne, w zależności od tego czy trawiony metal jest katodą czy anodą, dzieli się na katodowe i anodowe. W pierwszym przypadku warstwy tlenków są usuwane dzięki reakcji wydzielania się wodoru na metalu, przy czym sam proces przeprowadzany jest zazwyczaj w roztworze kwasu siarkowego z wykorzystaniem elektrod ołowianych lub cynowych. Drugi przypadek trawienia elektrochemicznego ma miejsce, gdy jony metalu przechodzą z roztworu, co prowadzi do usunięcia warstewki tlenków. Wykorzystuje się w tym celu wodne roztwory kwasu siarkowego o różnym stężeniu, w zależności od początkowego stanu powierzchni (grubości warstwy tlenkowej) i wymaganej jakości powierzchni, a sam proces ma miejsce w zbiornikach stalowych wyłożonych ołowiem z prętami, zwykle miedzianymi, na których zawieszają się elektrody. Niekiedy stosuje się ogrzewanie roztworu parą wodną [1, 4–7].

Dotrawianie, zwane również dekapowaniem, polega na usunięciu cienkich, niewidocznych błonek tlenowych, jakie powstają na powierzchni metalowych przedmiotów, nawet po dokładnym wytrawieniu. Proces ten także przeprowadza się metodą chemiczną poprzez zanurzenie w kąpeli lub elektrochemiczną. Niekiedy dotrawianie ma miejsce podczas wstępnego nakładania warstwy galwanicznej, kiedy to dochodzi do jednoczesnego usunięcia błonek tlenowych i nałożenia warstwy galwanicznej [1, 4–7].

Polerowanie elektrolityczne to proces, w którym dochodzi do anodowego rozpuszczenia metalu, co wiąże się z wygładzeniem mikro- i makro nierówności, dzięki czemu otrzymuje się gładką i błyszczącą powierzchnię. Przed tym procesem należy jednak wstępnie oczyścić przedmiot poprzez odtłuszczenie, trawienie, a później dokładnie wypłukać i wysuszyć. Z kolei po procesie elektropolerowania następuje płukanie wodą poprzedzone niekiedy zanurzeniem przedmiotu w kąpielach alkalicznych lub kwaśnych w celu neutralizacji szkodliwych zanieczyszczeń z kąpeli polerującej oraz zapobiegnięcia powstawaniu na nim mlecznych lub matowych błonek [1, 4–7].

Polerowanie chemiczne polega na chemicznym rozpuszczeniu metalu w roztworze elektrolitu, w wyniku czego dochodzi do wyrównania mikro- i makronierówności, co prowadzi do otrzymania gładkiej, błyszczącej powierzchni przedmiotu [1, 4–7].

### 3.3.2. Nanoszenie powłok galwanicznych – cynkowanie

Jednym z metali, z jakich wykonywane są powłoki galwaniczne jest cynk, który jest powszechnie stosowany ze względu na jego właściwości, m.in.: na odporność na działanie wilgoci i powietrza, ochrona stali przed korozją oraz małe koszty [1, 4–7, 11].

Cynkowanie zachodzi z użyciem kąpeli kwaśnych i alkalicznych oraz amonowych, przy czym drugi rodzaj jest zwykle stosowany w przypadku wyrobów o bardziej skomplikowanych kształtach [1, 4–7, 11]. Rodzaje kąpeli przedstawia tabela 2.

**Tabela 2. Rodzaje kąpeli stosowanych do cynkowania**

Kąpiele kwaśne	Kąpiele alkaliczne
kąpiele siarczanowe	kąpiele cyjankowe
kąpiele chlorkowe	kąpiele cynka nowe
kąpiele fluoroboranowe	
kąpiele pirofosforanowe	

Źródło: Opracowanie własne przy wykorzystaniu [1, 4–7]

### 3.3.3. Schemat procesu cynkowania

Proces cynkowania, tak jak każdy proces galwanizowania, składa się z trzech etapów, tj. obróbki wstępnej, właściwego nanoszenia powłoki (cynkowania) i obróbki wykańczającej. Te etapy obejmują następujące operacje [1, 4–7, 14]:

1. odtłuszczenie chemiczne w rozpuszczalnikach,
2. trawienie (zwykle w roztworze 4÷10% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> lub 5÷25% HCl),
3. płukanie w zimnej wodzie bieżącej,
4. odtłuszczenie elektrolityczne,
5. płukanie w gorącej wodzie bieżącej,
6. płukanie w zimnej wodzie bieżącej,
7. cynkowanie w kąpeli kwaśnej, cyjankowej lub amonowej,
8. płukanie w zimnej wodzie bieżącej,
9. rozjaśnianie w rozcieńczonym kwasie azotowym (0,5÷2%),
10. płukanie w gorącej wodzie bieżącej,
11. kontrola,
12. pasywowanie w roztworze z dwuchromianem sodowym lub bezwodnikiem kwasu chromowego (Na<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 200 g/l + H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 10 ml/l),
13. płukanie w zimnej wodzie bieżącej,
14. suszenie.

Proces cynkowania jest zazwyczaj prowadzony w stacjonarnych wannach, kielichach, bębnach oraz z wykorzystaniem zmechanizowanych linii i automatów galwanizerskich. Obecnie na skalę przemysłową powłoki galwaniczne nakłada się z wykorzystaniem automatów galwanizerskich, które w pełni automatycznie dobierają parametry procesu oraz czuwają nad jego powtarzalnością [1, 4–7, 14]. Przykładowy automat galwanizerski przedstawiono na rys. 3.



**Rys. 4. Przykładowy aparat galwanizerski.**  
Źródło: [9], dostęp: 05.02.2017

Jako materiał na anody stosuje się zazwyczaj cynk elektrolityczny, gdyż zapewnia on najwyższą ich czystość [1, 4–7].

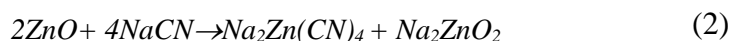
#### 3.3.4. Kąpiele stosowane podczas cynkowania

Kąpiele alkaliczno-cyjankowe są stosowane ze względu na łatwe usuwanie zanieczyszczeń, dużą równomierność krycia oraz dobrą zwartość i drobnokrystaliczność wykonanych pokryć. Dodatkowo wykorzystywane są w przypadku części o skomplikowanych kształtach. Jednak kąpiele te są bardzo toksyczne i nietrwałe (cyjanki się rozkładają, a ług karbonizuje). Poza tym charakteryzują się mniejszą wydajnością prądową niż kąpiele kwaśne, a metal podłoża ulega nawodorowaniu. Mimo tego są one współcześnie najczęściej stosowane [1, 4–7, 11, 14–15]. Podstawowy skład kąpeli cyjankowych to:

- cyjanocynkan sodowy  $\text{Na}_2\text{Zn}(\text{CN})_4$ ,
- cynkan sodowy  $\text{Na}_2\text{ZnO}_2$ .



Przy czym oba związki powstają podczas reakcji (2) rozpuszczania tlenku cynku ZnO w roztworze cyjanku sodowego NaCN i ługu sodowym:



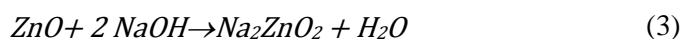
Dodatkowo w kąpeli cyjankowej występuje wolny cyjanek sodowy i wodorotlenek sodowy NaOH. Poza tym czasami stosuje się różne dodatki nieorganiczne lub organiczne, np. Na<sub>2</sub>S, Na<sub>2</sub>SO<sub>2</sub>, gliceryna, kumaryna, których zadaniem jest przede wszystkim polepszenie własności powłok cynkowych, m.in. ich wyglądu. Czasami pocynkowane przedmioty rozjaśnia się, zanurzając je na 2÷3 sekundy w kwasie azotowym o stężeniu 3% [1, 4–7, 14–15].

Kąpiele cynkanowe są stosowane zamiast cyjankowych w przypadku, gdy nie ma instalacji wentylacyjnej. Jednak jakość powłok uzyskanych w tych kąpielach jest znacznie niższa niż otrzymanych w kąpielach cyjankowych. Poza tym ich wadą jest mniejsza wydajność [1, 4–7, 14–15].

W składzie kąpeli cynkanowych można wyróżnić następujące substancje:

- tlenek cynkowy ZnO,
- ług sodowy NaOH,
- cynian sodowy Na<sub>2</sub>SnO<sub>3</sub>, dodawany w niewielkich ilościach, aby zapewnić stabilność kąpeli i wytworzenie powłok jasnych bez dendrytów.

W tych kąpielach ług sodowy i tlenek cynkowy reagują ze sobą (3), tworząc cynkan sodu Na<sub>2</sub>ZnO<sub>2</sub>:



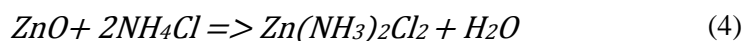
Kąpiele kwaśne, w tym siarczanowe, stosuje się w przypadku prostych wyrobów, elementów o nieskomplikowanych kształtach, które w wyniku cynkowania otrzymują jasne i matowe powłoki. Kąpiele te wykorzystuje się ze względu na ich liczne zalety, m.in.: na ich większą trwałość, mniejszą toksyczność niż kąpeli cyjankowych, dużą wydajność. Jednakże powłoki te są bardziej gruboziarniste, a cynk może się nierównomiernie osadzić przy braku dodatków blaskotwórczych [1, 4–7, 14–15].

Główne składniki kąpeli siarczanowych to:

- siarczan cynkowy ZnSO<sub>4</sub> • 7H<sub>2</sub>O,
- siarczan sodowy Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> • 10H<sub>2</sub>O lub siarczan magnezowy MgSO<sub>4</sub> • 10H<sub>2</sub>O, dodawane w celu zwiększenia przewodnictwa.

Czasami dla poprawy własności powłok cynkowych wykorzystuje się substancje głównie organiczne (dekstryna, glukoza, gliceryna, skrobia, pirydyna), zaś dla zapewnienia odpowiedniego pH stosuje się substancje buforujące, np. siarczan glinowy Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>•18H<sub>2</sub>O. Dodatkowo dla rozjaśnienia powłok stosuje roztwór złożony z bezwodnika kwasu chromowego CrO<sub>3</sub> i kwasu siarkowego H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> roztwór kwasu azotowego HNO<sub>3</sub> [1, 4–7, 14–15].

Kąpiele amonowe wykorzystuje się z kolei zamiast kąpeli cyjankowych do cynkowania elementów profilowanych o bardziej złożonych kształtach. W porównaniu do cyjankowych kąpeli nie są one toksyczne oraz nie skutkują nawodnieniem pokrycia. Podstawowym składnikiem jest sól kompleksowa  $Zn(NH_3)_2Cl_2$ , która powstaje w reakcji (4) tlenku cynku  $ZnO$  i chlorku amonu  $NH_4Cl$ :



Dodatkowo wprowadza się składniki buforujące typu kwas borowy  $H_3BO_3$  czy octan sodu  $CH_3COONa$  i związki aktywne powierzchniowo, np. klej lub żelatynę [1, 4–7, 14–15].

#### 3.4. Obróbka wykańczająca powłok cynkowych

Po naniesieniu właściwej powłoki galwanicznej na przedmiot, jest on poddawany procesom obróbki wykańczającej. W przypadku pokryć cynkowych stosuje się pasywowanie, przede wszystkim chromianowanie, którego celem jest polepszenie odporności powłok na korozję. Podczas tego procesu dochodzi do wytworzenia cienkiej, pasywnej warstewki (o grubości ok.  $0,5 \mu m$ ) o strukturze porowatej na powierzchni powłoki, przez co zmienia ono barwę na tęczową, złocistą (żółto-złocistą) lub oliwkowo-zieloną. Chromianowanie związkami chromu III charakteryzuje się srebrzystym błyszczącym kolorem, natomiast chromianowanie chromem VI charakteryzuje się złotym połyskiem. Dodatkowo grubość powłoki cynkowej ulega zmniejszeniu o  $1 \div 2 \mu m$ . Później należy ją wypłukać w zimnej wodzie, a następnie wysuszyć w temperaturze do  $50^\circ C$ . Sprawia to, że powłoki stają się twarde i elastyczne, a samo chromianowanie zapewnia większą przyczepność innych powłok, np.: farb malarskich [1, 4–7, 17, 19–20].

Dodatkowo w czasie obróbki wykańczającej powłok cynkowych można zastosować uszczelnienia nieorganiczne, lakier, woski czy inne środki poślizgowe. Po wysuszeniu środki te wytwarzają na powierzchni powłoki przejrzysty film, którego zadaniem jest polepszenie jej właściwości, np.: ściernych czy wyglądu [1, 4].

#### 4. Podsumowanie

Powłoki galwaniczne, w tym m.in. cynkowe, nakłada się na metalowe przedmioty w celu zwiększenia ich odporności na korozję, trwałości, zmniejszenia kosztów czy poprawy wyglądu zewnętrznego. Dodatkowo zadaniem może być zapewnienie innych własności mechanicznych czy technologicznych (np. elektrycznych, wymiarów, zdolności do lutowania czy spawania). Aby jednak dane pokrycie mogło wypełnić powyższe zadania,

powierzchnia przedmiotu powinna być odpowiednio przygotowana przed nałożeniem powłoki. Ma to miejsce podczas procesów obróbki wstępnej. Dzięki nim usuwane są różne zanieczyszczenia i nierówności powierzchni, które mogłyby pogorszyć jakość uzyskanego później pokrycia. Potem, po etapie galwanizacji, powłokę poddaje się obróbce wykańczającej, której celem jest polepszenie jej własności (np. zwiększenie przyczepności farb malarskich). Dzięki tak usystematyzowanej technologii nakładania różnych powłok galwanicznych, znajduje ona zastosowanie w różnych dziedzinach przemysłu, np. maszynowego, samochodowego, medycznego i innych [5–7, 12–14, 20–21].

## Literatura

- [1] Biestek T., Rudzki J., Socha J., Szmidt K., Żak T., *Galwanotechnika. Zagadnienia Podstawowe*. WNT, Warszawa, 1973.
- [2] Dobrzański L. A., *Kształtowanie struktury i własności powierzchniowych materiałów inżynierskich i biomedycznych*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2009.
- [1] <http://konrad.waw.pl/cynkowanie-galwaniczne> (dostęp 05.02.2017).
- [2] Żak T., *Poradnik galwanotechnika*, WNT, Warszawa, 1985.
- [3] Zdanukiewicz A., *Technologia Powłok Galwanicznych*, Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne, Warszawa, 1974.
- [4] Reksć W., *Galwanotechnika*. Wyd. Politechniki Poznańskiej, Poznań, 1992.
- [5] Nawrocka A., *Podstawy technik galwanicznych i ochrony przed korozją*, Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 1979.
- [6] <http://www.eioba.pl/files/user1578/elek5.jpg> (05.02.2017).
- [7] <http://www.zugilprojekt.pl/galeria.html> (05.02.2017).
- [8] Burakowski T., Wierchoń T., *Technologia nakładania metali*, Wydawnictwo Naukowo–Techniczne, Warszawa, 2009.
- [9] [http://www.chemia.odlew.agh.edu.pl/dydaktyka/Dokumenty/Powloki/powloki\\_antykorozyjne\\_1.pdf](http://www.chemia.odlew.agh.edu.pl/dydaktyka/Dokumenty/Powloki/powloki_antykorozyjne_1.pdf) (01.02.2017).
- [10] Szłapa I., Jędrzejczyk, D., *Analiza przyczyn uszkodzeń części złącznych cynkowanych galwanicznie*, Ochrona przed korozją, vol. 7/2016, s. 238–242.
- [11] Butryło B., Zaniewski Ł., *Charakterystyka metod wymuszenia przepływu cieczy w wannie elektrolitycznej*, Elektronika: konstrukcje, technologie, zastosowania, vol. 47, 4/2006, s. 44–47.
- [12] Szłapa I., Hajduga M., Jędrzejczyk, D., Węgrzynkiewicz S., Sołek D., *Ocena odporności korozyjnej powłok cynkowych na elementach konstrukcyjnych ambulansu sanitarnego*, Ochrona przed Korozją, vol. 6/2013, s. 166–173.
- [13] Podolski P., Liberski P., *Porównanie odporności korozyjnej powłok cynkowych otrzymanych różnymi metodami*, Inżynieria Materiałowa, vol. 10, 5/2013, s. 515–518.
- [14] Butryło B., Zaniewski Ł., *Podstawowe pojęcia galwanotechniczne. Szybkość procesu elektrodowego i katodowa wydajność prądowa*, vol. 3/2004, s. 20–28.

- [15] Młynarczak A., Borecki P., Bartkowski D., *Microstructure and corrosion resistance of chromed diffusion layers and chrome plated galvanic coatings, before and after CO<sub>2</sub> laser modification*, Inżynieria Materiałowa, vol. 3-4, 3/2013, s. 185–187.
- [16] Dybiec C., Nakonieczny A., Buczko Z., Włodarczyk S., *Nieniszczący pomiar przewodności elektrycznej właściwej cienkich warstw na małych powierzchniach*, Inżynieria Powierzchni, vol. 3/2004, s. 38–43.
- [17] Lipińska D., Buczko Z., Okurowski W., Osuchowska E., *Pasywacja cynkowych powłok galwanicznych w oparciu o sole chromu trójwartościowego*, Inżynieria Powierzchnia, vol. 1/2012, s. 12–18.
- [18] [http://www.imp.edu.pl/pdf/buczko\\_cel.pdf](http://www.imp.edu.pl/pdf/buczko_cel.pdf) (01.02.2017).
- [19] <http://www.pg.gda.pl/~kkrzyszt/Instrukcja%20do%20cw%20nr%207%20%20Powloki.pdf> (01.02.2017).

## **GALWANOTECHNIKA – PRZEGLĄD AKTUALNEGO STANU WIEDZY**

### **Streszczenie**

W pracy opisano podstawy procesów galwanotechnicznych. Poruszone zagadnienia obejmują m.in. podstawy elektrochemii, zagadnienia związane z chemią konstytuowania galwanicznych warstw powierzchniowych. W pracy opisano proces technologiczny nakładania elektrolitycznych powłok cynkowych m.in. czyszczenie mechaniczne, odtłuszczenie, trawienie, cynkowanie, chromianowanie, uszczelnianie. W początkowych rozdziałach pracy scharakteryzowano podstawowe parametry fizykochemiczne rzutujące bezpośrednio na uzyskane powłoki. Problematyka poruszona w pracy obejmuje podstawowe treści, pozwalające na swobodne poruszanie się w obrębie elektrochemii oraz galwanotechniki. Celem pracy było przedstawienie kompleksowego przeglądu literaturowego w przedmiocie elektrochemicznego nakładania warstw powierzchniowych.

**Słowa kluczowe:** galwanotechnika, elektrochemia, powłoki galwaniczne

## **ELECTROPLATING – AN OVERVIEW OF THE CURRENT STATE OF KNOWLEDGE**

### **Abstract**

This paper describes the basics of an electroplating process. The topics include, among others, the basics of electrochemistry and issues related to the constitution of electroplating chemistry of the surface layers. The paper also describes the technological process of applying electrolytic zinc coatings, among others, mechanical cleaning, degreasing, pickling, galvanizing, chromodizing and sealing. The initial chapters characterize basic physicochemical parameters directly affecting on the obtaining of coatings. The issues raised in the work include basic contents, allowing to move freely within the electrochemistry and electroplating. The aim of the study was to present a comprehensive literature overview concerning electrochemical layering surface.

**Keywords:** electroplating, electrochemistry, shell plating

*Tadeusz Hejwowski<sup>1</sup>, Daniel Łukasik<sup>2</sup>*

## **MATERIAŁY NA POWŁOKI ZWIĘKSZAJĄCE TRWAŁOŚĆ MASZYN I URZĄDZEŃ PRZEMYSŁU CEMENTOWEGO**

### **1. Wstęp**

Przemysł cementowy w Polsce stanowi 11 sprywatyzowanych cementowni pracujących w pełnym cyklu produkcyjnym, 1 przemiałownia cementu i 1 zakład produkujący cement glinowy. Obecnie przemysł eksploatuje 17 pieców metody suchej i 5 pieców metody mokrej [1]. Podobnie jak w innych gałęziach przemysłu główną przyczyną strat materialnych i energetycznych jest zużycie ściernie – najczęściej spotykane oraz najlepiej poznane, stanowiące nawet do 90% przypadków zużycia tribologicznego [2]. Nieodpowiednio dobrane parametry pracy urządzeń przetwórczych mają bezpośredni wpływ na rozmiar strat energetycznych i zużycia elementów roboczych co w efekcie wpływa na jakość produktów tj. kształt i wielkość ziaren, generując dodatkowe koszty [3, 4]. Rozpatrując skalę zjawiska i rozmiar przemysłu cementowego, kluczowa jest identyfikacja czynników powodujących straty eksploatacyjne oraz zaproponowanie konkretnych rozwiązań prowadzących do ich niwelacji lub całkowitej eliminacji.

### **2. Charakterystyka cementu**

Cement pod względem technologicznym można zdefiniować, jako hydrauliczny materiał wiążący, otrzymywany z surowców mineralnych poprzez wypalanie i następne zmielenie otrzymanego spieku. W nomenklaturze chemicznej – są to złożone mieszaniny (roztwory stałe, kryształy mieszane) krzemianów, tlenków prostych, podwójnych i potrójnych oraz innych związków, głównie wapnia, glinu, krzemu i żelaza [5]. Stosowany jest do przygotowywania zapraw cementowych, cementowo-wapiennych i betonów, wykorzystywanych w celu łączenia materiałów budowlanych.

Surowce (wapień, glina, piasek i ruda żelaza) pozyskiwane są w kamieniołomach. Surowce rozdrabniane są za pomocą kruszarek, a następnie transportowane do cementowni, gdzie zostają przemielone w młynach a następnie wysuszone. Otrzymana surowa mączka wypalana jest w piecach obrotowych w temperaturze ok. 1450°C. W procesie tym powstaje tzw. klinkier. Kolejnym procesem jest schładzanie klinkieru do temperatury poniżej 200°C. Większe kawałki klinkieru rozdrabniane są przed przetransportowaniem ich do

---

<sup>1</sup> Politechnika Lubelska, Wydział Mechaniczny, Katedra Inżynierii Materiałowej, Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin, email: t.hejwowski@pollub.pl

<sup>2</sup> Politechnika Lubelska, Wydział Mechaniczny, Katedra Inżynierii Materiałowej, Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin, email: d.lukasik@pollub.pl

młyna. Proces rozdrabniania odbywa się w kruszarkach, a otrzymany granulak mielony jest w młynie kulowym razem z gipsem lub anhydrytem. W ten sposób otrzymywany jest gotowy produkt w postaci cementu.

Składniki cementu [5]:

- alit –  $\text{Ca}_3\text{SiO}_5$  ( $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2 - \text{C}_3\text{S}$ ), decyduje o szybkim wzroście wytrzymałości początkowej i stopniowym wzroście wytrzymałości po upływie czasu – najważniejszy składnik (zaw. >50%)
- belit –  $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$  ( $2\text{CaO}\ \text{SiO}_2 - \text{C}_2\text{S}$ ),
- celit –  $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$  ( $3\text{CaO}\ \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{C}_3\text{A}$ ) najszybciej reaguje z wodą
- brownmilleryt – ( $\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{Fe}_2\text{O}_{10} - \text{C}_4\text{AF}$ )
- inne:  $\text{C}_3\text{S}_2$  (rankinit), CS (wollastonit),  $\text{C}_5\text{A}_3$ , CA,  $\text{C}_3\text{A}_5$ ,  $\text{C}_2\text{F}$ .

Podział cementu:

- Cement portlandzki czysty (bez dodatków) (CEM I), złożony w 95–100% z klinkieru portlandzkiego, stosowanego do wykonywania betonów wykorzystywanych przy konstrukcjach zbrojonych stropów, nadproży czy słupów. Charakteryzuje się wysokim ciepłem hydratacji, przez co może być wykorzystywany w niskich temperaturach. W okresie twardnienia wymaga częstego polewania wodą w celu utrzymania właściwej wilgotności.
- Cement portlandzki z dodatkami (CEM II), zawierający oprócz klinkieru portlandzkiego inne składniki przekraczające 5% masy cementu. Cement ten głównie stosuje się przy przygotowaniu zapraw murarskich i tynkarskich, oraz betonów podkładowych. Do wytwarzania zapraw i betonów barwionych wykorzystuje się cement portlandzki z dodatkami wapiennymi (L) lub (LL) o jasnej barwie.
- Cement hutniczy (CEM III), jest materiałem otrzymywanym poprzez drobne zmielenie klinkieru portlandzkiego oraz granulowanego żużla wielkopieczowego (nie mniej niż 36%), z dodatkiem siarczanu wapniowego. Z wyglądu przypomina cement portlandzki. Cement hutniczy stosuje się w szczególności do betonów narażonych na działanie siarczanów, gdyż wykazuje wysoką odporność na korozję siarczanową. Betony wykonane z cementu hutniczego w okresie twardnienia wymagają starannej pielęgnacji. Minimum przez 14 dni należy często i obficie polewać je wodą, aby nie dopuścić do wyschnięcia. Zbyt szybkie wysychanie może doprowadzić do znacznego obniżenia wytrzymałości cementu. Nie należy go używać, w temperaturach poniżej  $+5^\circ\text{C}$
- Cement pucolanowy (CEM IV), dzięki swojemu składowi charakteryzuje się wysoką odpornością na niepożądany wpływ agresywnych środowisk (np. wody siarczanowe). Cement pucolanowy ze względu na podobne właściwości do cementu hutniczego znajduje zastosowanie w środowisku agresywnym oraz do produkcji zapraw i tynków stosowanych w dolnych partiach domu.

- Cement wieloskładnikowy (CEM V), składa się z 20–64% klinkieru i 18–50% granulowanego żużla wielkopieczowego, resztę stanowią inne dodatki. Ma szeroki zakres zastosowań. Wykorzystuje się go do produkcji betonu, różnego rodzaju zapraw, zaczynu i innych mieszanek dla budownictwa, oraz w produkcji wyrobów budowlanych.

Wymagania i właściwości cementu określają normy:

- PN-EN 197-1: 2002 „Cement – Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku”
- PN-B-19707: 2003 „Cement. Cement specjalny. Skład, wymagania i kryteria zgodności”.

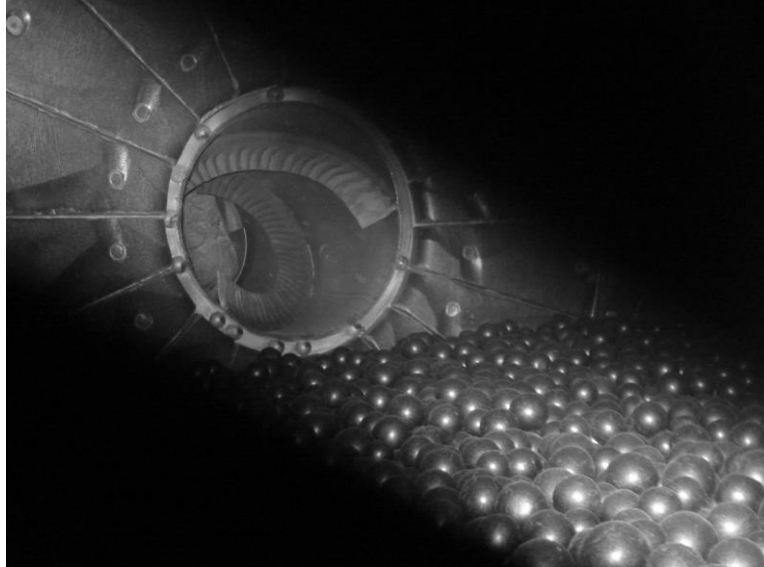
### 3. Procesy eksploatacyjne maszyn do produkcji cementu

W trakcie produkcji cementu większość elementów maszyn ulega procesom zużycia. Są to takie podzespoły jak: młoty, szczęki i kowadła kruszarek, płyty pancerne młynów, czopy walców zespołów napędowych, pióra i wały ślimaków, ogniwa i koła zębate przenośników, wentylatory, suwnice itd. Zużywanie zachodzi głównie poprzez występowanie mechanizmów ściernych. O wiele mniejszy wpływ mają zjawiska zużycia cieplnego, łuszczenia i korozyjne [6].

Ze względu na różnorodny skład i właściwości fizyko-chemiczne surowców mineralnych, proces rozdrabniania i mielenia są najbardziej energochłonne i generują największe koszty w procesie przetwórczym w cementowniach [6–8]. Składniki o różnej twardości stanowią wyzwanie dla doboru odpowiednich urządzeń, w tym materiałów na powierzchnie robocze i metod przetwórczych w celu uzyskania jednolitego wysokiego stopnia rozdrobnienia wyrobu, przy zachowaniu szerokiego rozdrobnienia frakcyjnego ziaren.

#### 3.1. Młyny kulowe

W warunkach pracy młynów kulowych stosowanych w przemyśle cementowym wykładziny oraz mielniki poddawane są oddziaływaniu nie tylko mechanicznemu zużyciu, ale również korozji i obciążeniom dynamicznym. Zarówno wykładziny jak i kule (najczęściej w postaci odlewów) narażone są na złożone oddziaływania zużycia ściernego i naprężeń dynamicznych. Stopień zużycia tych elementów zależy od ich rozmieszczenia w bębnie młyna, konstrukcji młyna, warunków pracy (rozdrobnionego materiału, temperatury, ciężaru kul itp.). Wyniki badań eksploatacyjnych w przemyśle cementowym wskazują że zużycie ściernie, zwłaszcza wykładzin i kul zachodzi w warunkach ścierania przy wysokich naprężeniach [9].



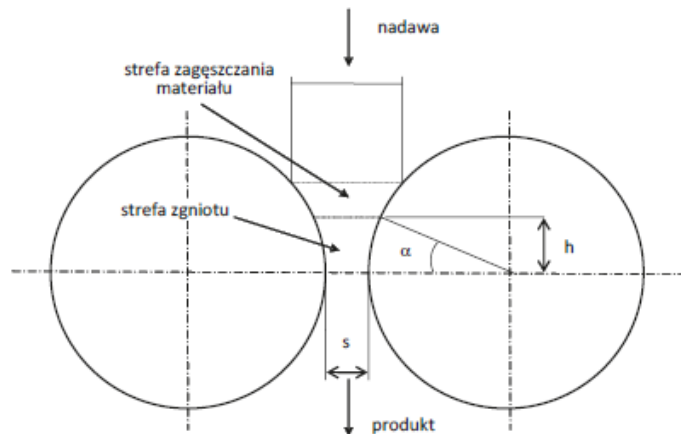
**Rys. 1. Wnętrze młyna kulowego [7]**

Wnętrza młynów pokryte są okładzinami pancernymi ze stopów o podwyższonej odporności na zużycie oraz udarności (Rys. 1). Okładziny te mają za zadanie ochronę płaszcza młynów przed ścieraniem powodowanym pracą mielników wypełniających komory.

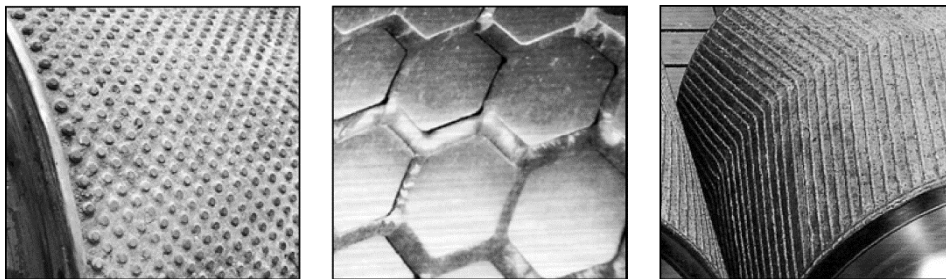
### 3.2. Prasy walcowe

Największą wadą pras walcowych jest ich wrażliwość na obecność metalu w nadawie. Zabezpieczenie prasy przed przedostaniem się do niej kawałków metalu jest podstawowym wymogiem zapewniającym sprawność układu zasilania [10]. Nierównomierne zasilanie nadawą wywołuje w łożu wysokie naciski na pojedyncze duże ziarna surowca, dochodzące do 1200 MPa, które są niebezpieczne dla okładziny [11]. Odpowiednio dobrane powierzchnie walców eliminują poślizg, dzięki czemu unika się strat energii (zamiany na ciepło), a zwłaszcza ograniczenia zużycia okładzin walców. Optymalny układ powierzchni walców pozwala utrzymać wskaźnik zużycia okładziny na poziomie niższym od 0,15 g/Mg przerobionego klinkieru cementowego [10]. Schemat budowy prasy walcowej przedstawiono na rysunku 2, z kolei warianty pokrycia powierzchni walców na rysunku 3.





Rys. 2. Schemat budowy i działania prasy walcowej [10]

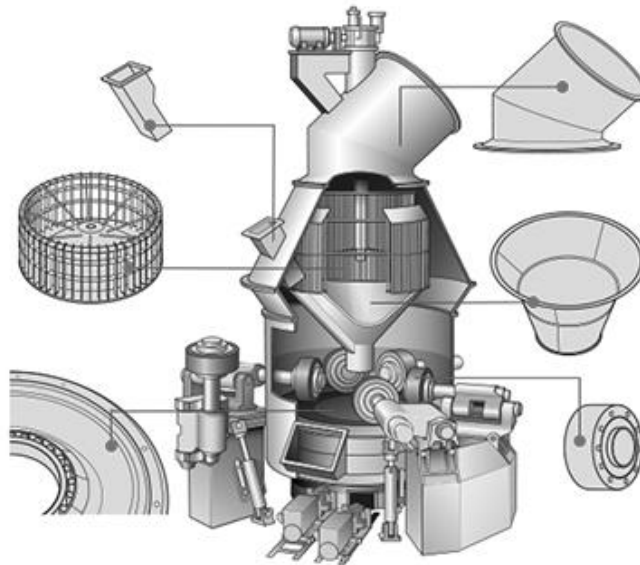


Rys. 3. Różne typy powierzchni walcowych w prasach walcowych [6]

### 3.3. Młyny pionowe

Młyny pionowe (Rys. 4) przeznaczone do rozdrobnienia wykorzystują mechanizm zgniatania oraz miażdżenia materiału między ruchomą misą, a toczącymi się po niej rolkami, walcami lub kulami dociskanymi hydraulicznie lub mechanicznie za pomocą sprężyn do obracającej się misy. Podawany na obracającą się misę materiał poprzez siłę odśrodkową przemieszczany jest do krawędzi misy, pod element zgniatający gdzie poddawany jest zgnieceniu i rozcieraniu do momentu uzyskania wielkości ziaren mających zdolność uniesienia się w strudze gazów przepływających przez specjalnej konstrukcji dysze w kierunku separatora. Dysze te zabudowane są po obwodzie pomiędzy obracającą się misą a obudową młyna i możliwość regulacji siły docisku rolek umożliwiają szybko i precyzyjnie uzyskać wymagany stopień rozdrobnienia mielonego materiału. Największą wadą tych młynów jest duże zużycie elementów mielących przy materiałach o dużych własnościach ściernych lub zawierających domieszki np. w postaci związków krzemu. Z tego względu młyny te nie znalazły dotychczas

zastosowania do przemiału cementu lub żużli. Poprzez rozwinięcie konstrukcje młynów pionowych a zwłaszcza rolek lub walców oraz opracowanie nowych materiałów o podwyższonej odporności na ścieranie możliwe jest przetwórstwo wcześniej nieprzeznaczonych do tego materiałów [6].



Rys. 4. Schemat młyna pionowego [12]

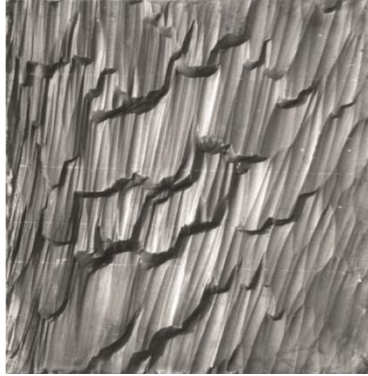
### 3.4. Wentylatory i wyciągi

Produkcja cementu generuje olbrzymie ilości pyłu, powstającego we wszystkich stadiach produkcyjnych. Rozpatrując problem powstawania pyłów należy wyróżnić następujące ich rodzaje:

- pyły powstałe z surowców: wapnia, marglu, gliny, dodatków żelazonośnych, żużla i innych,
- pyły powstające w piecach obrotowych przy wypalaniu klinkieru,
- pyły cementowe.

Wszystkie powyższe pyły zawierają drobne ziarna surowców, produktów i półproduktów. Wentylatory i wyciągi, transportujące gazy zapyłone o różnym składzie i wielkości ziaren pyłu, dodatkowo przy podwyższonej temperaturze są szczególnie narażone na procesy zużycia.

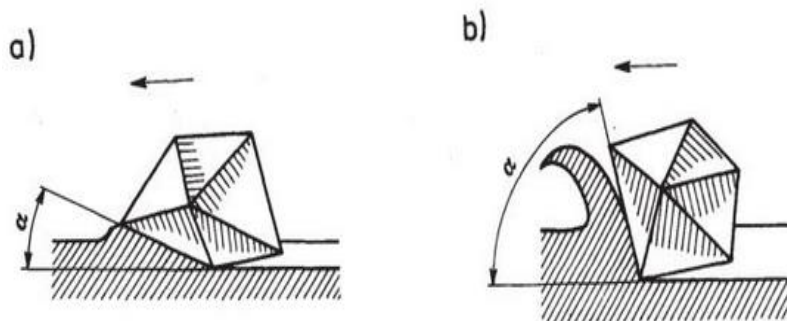
Zużycie wentylatorów to proces złożony z wielu nakładających się zjawisk. Pierwsze stadium zużycia to erozja objawiająca się mikroskrawaniem, powstałym na skutek uderzenia ziaren ścierniwa w powierzchnię łopat wirnika. Drugim zaś jest występowanie zużycia ściernego powodującego dekohezję materiału. Ponadto zaobserwowano obecność dwóch rodzajów korozji: naprężeniowej oraz wżerowej [13]. Zużyta powierzchnię łopaty wirnika przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5. Fragment powierzchni zużytej łopaty wirnika [13]

#### 4. Mechanizm zużycia ściernego

Zużycie ściernie spowodowane jest interakcją ostrych cząsteczek lub wypukłości z inną powierzchnią poprzez poślizg. Podstawowymi procesami zużycia ściernego jest bruzdowanie i mikroskrawanie. Wystąpienie jednego lub drugiego procesu jest zależne od kształtu wypukłości lub ziarna ścierniwa, a ogólnie od wartości kąta spływu wióra (rys. 6).

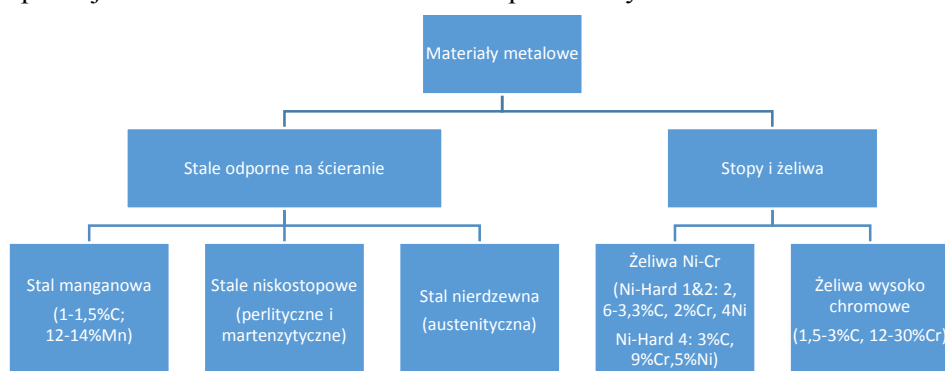


Rys. 6. Schematy przebiegu zużywania ściernego w zależności od kąta spływu wióra:  
a) mały kąt – bruzdowanie, b) duży kąt – mikroskrawanie [14]

Mikroskrawanie stanowi intensywniejszy proces zużycia ściernego, gdyż powoduje ubytek materiału już po pierwszym przejściu elementu ściernego. Bruzdowanie po pojedynczym przejściu elementu ściernego prowadzi do odkształcenia plastycznego materiału wokół tworzącej się bruzdy. Wielokrotne przejście elementu ściernego i związane z tym wielokrotne odkształcenie prowadzące do zmęczenia materiału powoduje oddzielenie się materiału poprzez wykruszenie. Odporność na zużycie ściernie czystych metali i ceramiki jest wprost proporcjonalna do ich twardości. Zwiększenie twardości np. przy pomocy obróbki cieplnej, wpływa na poprawę odporności na ten rodzaj zużycia [14].

## 5. Materiały wykorzystywane na elementy maszyn w przemyśle cementowym

W celu ochrony przed nadmiernym zużyciem w procesach rozdrabniania stosowane jest szerokie spektrum materiałów – stale odporne na ścieranie, żeliwa i stopy (Rys. 7). Sprzeczne wymagane cechy tj. wysoka twardość w celu uzyskania maksymalnej odporności na ścieranie i odpowiednia plastyczność w celu uniknięcia kruchości komplikują dobór odpowiedniego materiału do aplikacji. Ponadto materiał musi również spełniać kryteria ekonomiczne.



**Rys. 7. Podział materiałów używanych na powierzchnie narażone na zużycie ścierne w przemyśle cementowym [11]**

Stal manganowa (Hadfielda) zawierająca dodatkowe pierwiastki stopowe, takie jak Cr, Ni i Mo, utwardzana do 60–65 HRC, jest jednym z najbardziej odpowiednich materiałów na kule mielące [11, 15]. Stale niskostopowe o niskiej zawartości węgla są najmniej kosztownym rozwiązaniem, jednak zalecane są tylko do mielenia zgrubnego. Z kolei stale nierdzewne austenityczne, ze względu na ich wysokie koszty są zazwyczaj stosowane tylko w środowisku kwasowym oraz gdzie w aplikacjach wymagających kul niemagnetycznych [8].

Żeliwa o wysokiej zawartości chromu, dzięki występowaniu węglików chromu są odporne na ścieranie. Ponadto żeliwa te dzięki odpowiedniej obróbce cieplnej uzyskują zwiększoną o 50% udarność przy zachowaniu wejściowej odporności na zużycie [15, 16].

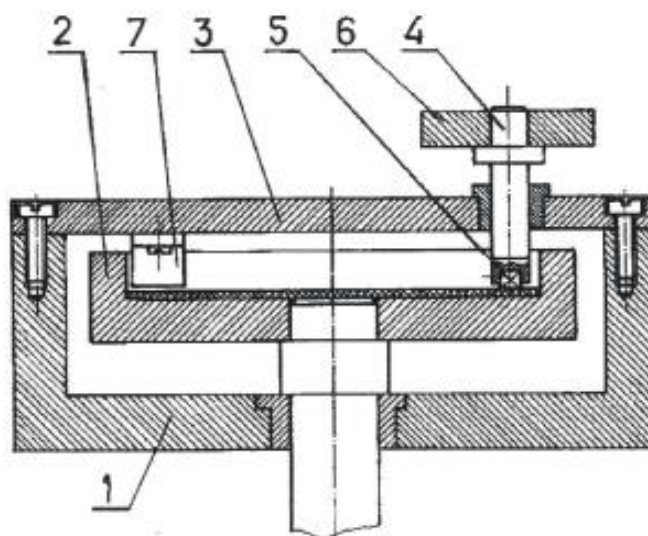
## 6. Część badawcza

### 6.1. Cel badań

Celem pracy było wyznaczenie charakterystyk zużycia materiałów o podwyższonej odporności na ścieranie w środowisku cementu portlandzkiego. Przeprowadzone badania pozwolą stwierdzić, w jakim stopniu badane materiały będą odpowiednie do aplikacji w przemyśle cementowym.

## 6.2. Metodyka badań

Do realizacji celu badań wykorzystano metodę badania odporności na zużycie ściernie w masie ścierniej. Testy przeprowadzono przy użyciu tribotestera, którego schemat przedstawiono poniżej (Rys. 8).



**Rys. 8. Schemat urządzenia 1 – obudowa, 2 – tarcza, 3 – pokrywa, 4 – uchwyt, 5 – próbka, 6 – obciążnik, 7 – łopatką kierującą [13]**

Na poziomej tarczy o średnicy 250 mm, pokrytej warstwą gumy o twardości 65<sup>o</sup> Sh, znajduje się porcja nasypanego ścierniwa w postaci klinkieru portlandzkiego. Tarcza wykonuje 106 obrotów na minutę. Trzy próbki w kształcie sześciangu o boku 10 mm są mocowane w uchwytach. Obciążniki dociskają każdą z próbek siłą 15 N. Ścierniwo jest podawane w miejsce styku próbek z tarczą za pomocą łopatek kierujących. W badaniach określano zależność ubytku masy próbki w stosunku od drogi tarcia. Podczas testu uzupełniano ścierniwo. Względna odpornością na zużycie nazywa się stosunek odporności na zużycie badanego materiału do odporności na zużycie materiału porównawczego.

## 6.3. Materiały badane

Jako materiały poddane ocenie zużycia wybrano powłoki na bazie niklu, napawane metodą płomieniowo-proszkową materiałami o handlowych nazwach COLMONOY 43 oraz COLMONOY 237. Jako materiał porównawczy wybrano stal S235, która stanowiła również bazę pod napawane powłoki. Skład chemiczny zestawiono w tabeli 1.

**Tabela 1. Skład chemiczny badanych materiałów [17–19]**

Pierwiastek	COLMONOY 43 [%]	COLMONOY 237 [%]	S235 [%]
B	2,1	1,3	
C	0,4	–	0,22
Cr	10,0	4,0	0,30
Cu	–	–	0,30
Fe	–	–	–
Mn	–	–	1,10
Ni	reszta	reszta	0,30
P	–	–	0,050
S	3,0	–	0,050
Si	2,3	2,8	0,10
Pozostałe	–	5,1	0,02

COLMONOY 43 jest stopem na bazie niklu, w jego mikrostrukturze występują również kryształy boru chromu. Materiał przeznaczony jest do zastosowań na elementy narażone na zużycie, wysoką temperaturę oraz środowisko korozyjne. Dodatkowo jest łatwo obrabialny oraz posiada podwyższoną udarność [17].

COLMONOY 237, materiał na osnowie niklu o podwyższonej odporności na zużycie, przeznaczony jest do regeneracji elementów maszyn [18].

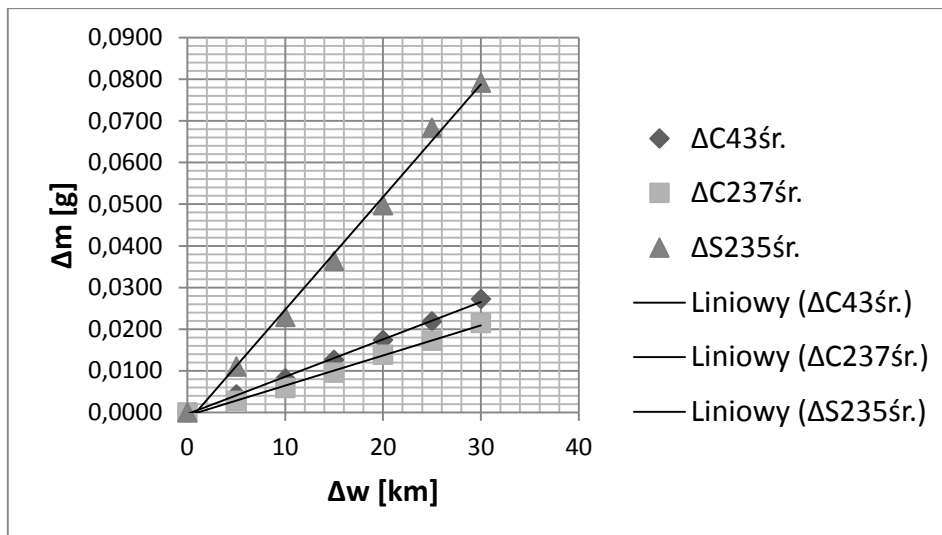
Stal S235 (St3S) stosowana jest na konstrukcje spawane, nośne i obciążone dynamicznie, elementy maszyn i urządzeń jak korpusy, koła i pomosty, elementy nośne urządzeń dźwigowych jak belki nośne, dźwigary główne [19].

## 6.4. Wyniki badań

### 6.4.1. Intensywność zużycia

Jako miarę zużycia wyznaczono tangens kąta nachylenia krzywej zależności ubytku masy od drogi tarcia. Po każdej serii pomiarów (co 5 km) wszystkie próbki były poddawane oczyszczeniu przy użyciu szczotki z miękkim włosiem, a następnie myjki ultradźwiękowej (w benzynie ekstrakcyjnej). Kolejnym etapem było suszenie i ważenie przy użyciu wagi Radwag WAS 220X. W sumie badanie ścieralności przeprowadzono na drodze 30 km.

Przebieg zależności średniego ubytku masy  $\Delta m$  od przebytej drogi tarcia  $\Delta w$  przedstawia rysunek 9. Pokazano również proste wpisane metodą najmniejszych kwadratów.



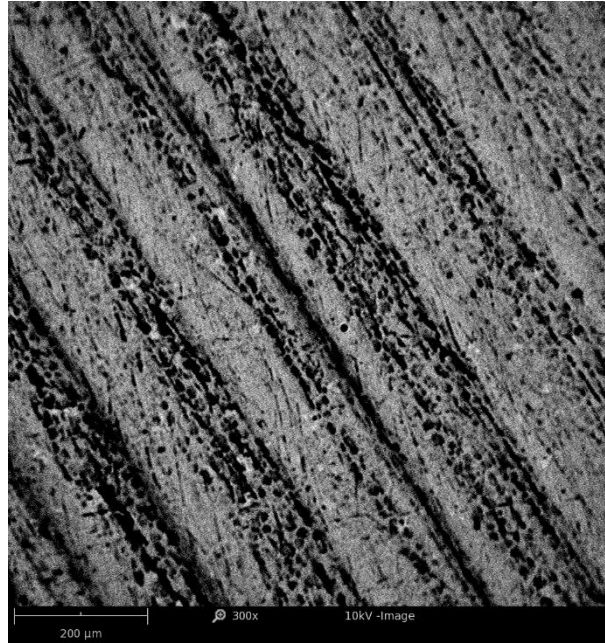
Rys. 9. Średni ubytek masy próbek na drodze tarcia

Tabela 2. Intensywność zużycia badanych materiałów

Intensywność zużycia	COLMONOY 43	COLMONOY 237	S235
[g/km]	0,0009	0,0007	0,0027

#### 6.4.2. Analiza SEM śladów zużycia

Obserwacje śladów zużycia wykonano przy pomocy skaningowego mikroskopu elektronowego Phenom ProX. Analizując uzyskane obrazy (rys. 10–12) zauważono charakterystyczne dla zużycia ściernego mikroskrawanie oraz bruzdowanie. Ponadto zaobserwowano nieciągłości w powstałych rysach, będące konsekwencją natrafienia ścierniwa na twarde składniki mikrostruktur badanych materiałów.

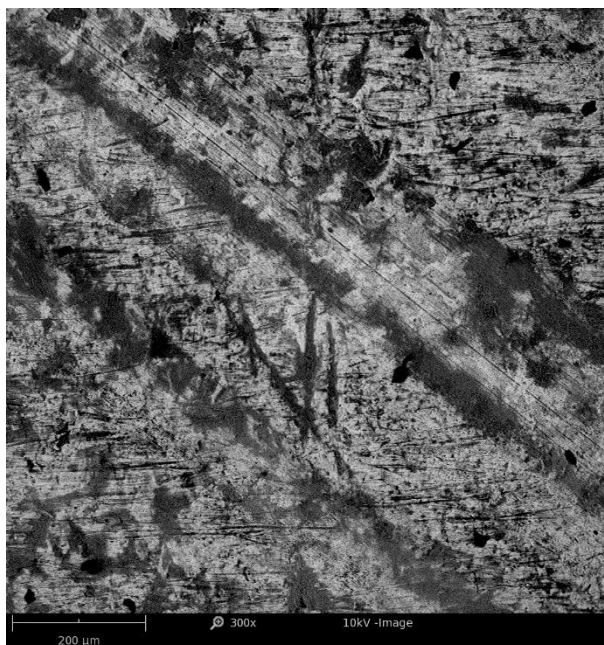


**Rys. 10. Obraz SEM śladu zużycia stopu COLMONOY 43**



**Rys. 11. Obraz SEM śladu zużycia stopu COLMONOY 237**



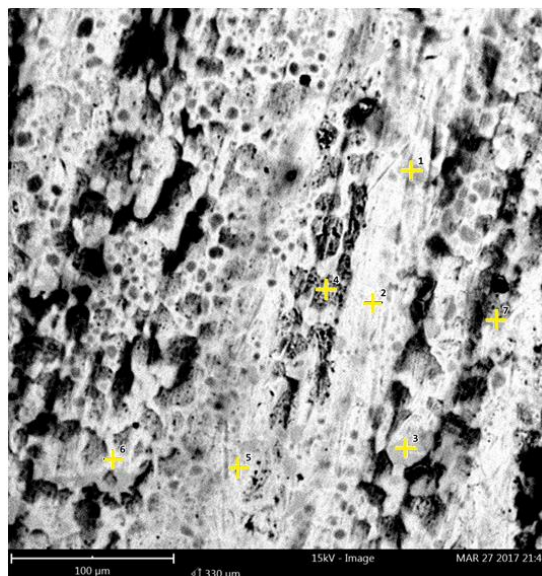


**Rys. 12. Obraz SEM śladu zużycia stali S235**

#### 6.4.3. Analiza EDS

Obserwowane ślady zużycia poddano analizie EDS na mikroskopie Phenom ProX. Miejsca pomiaru (rys. 13, 14) oraz otrzymane wyniki składu chemicznego w poszczególnych punktach zestawiono w tabelach 3 oraz 4. Na podstawie przeprowadzonej analizy oraz źródeł literaturowych [17, 18, 20] można przypuszczać występowanie w powłokach Colmonoy następujących faz  $\text{Ni}_3\text{Fe}$ ,  $\text{Ni}_3\text{Si}$ ,  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  and  $(\text{Fe}\cdot\text{Ni})_{23}\text{C}_6$ .

Na powierzchniach tarcia stwierdzono występowanie drobnych cząstek tlenku, co było skutkiem lokalnie podwyższonej temperatury spowodowanej procesem tarcia.



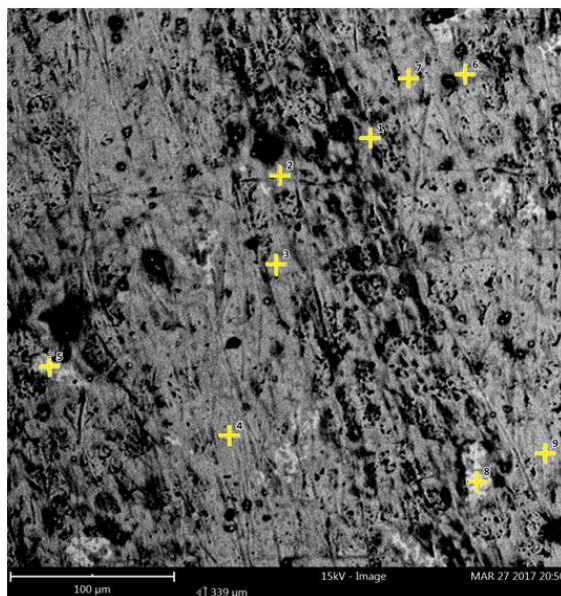
**Rys. 13. Rozmieszczenie punktów pomiarowych dla próbki COLMONOY 237**

W próbce COLMONOY 237 w badaniu EDS zaobserwowano: węglkoborki w punktach 1, 3; tlenki w punktach 4, 7;  $Ni_3Si$  w punktach 2, 5; roztwór stały w punkcie 6.

**Tabela 3. Pomiary z badania EDS powłoki COLMONOY 237**

Punkt pomiaru	Pierwiastek	Zawartość [% mas.]	Błąd pomiaru [%]
1	Cr	40.5	1.2
	O	43.0	2.3
	Ni	12.4	3.2
	Si	1.6	7.0
	C	1.8	8.1
	Fe	0.7	17.7
2	Ni	44.6	1.6
	O	39.9	2.9
	Si	7.5	3.3
	Cr	4.8	3.7
	Fe	1.5	9.0
	C	1.8	10.5
3	Cr	45.6	1.2

Punkt pomiaru	Pierwiastek	Zawartość [% mas.]	Błąd pomiaru [%]
	O	36.9	2.7
	Ni	13.1	3.4
	Si	1.7	7.6
	C	1.7	9.1
	Fe	1.0	15.6
4	Ni	38.7	1.7
	O	50.8	2.3
	Cr	4.4	3.7
	Si	2.8	5.2
	Fe	1.5	8.7
	C	1.8	8.4
5	Ni	46.6	1.7
	O	37.1	3.1
	Si	8.0	3.3
	Cr	4.8	3.9
	Fe	1.4	10.4
	C	2.1	9.3
6	Ni	57.0	1.6
	O	33.8	3.6
	Cr	4.7	4.3
	Si	1.9	9.0
	Fe	1.1	13.9
	C	1.5	13.9
7	Ni	31.4	1.8
	O	56.8	2.0
	Si	5.3	3.5
	Cr	3.6	4.0
	Fe	1.3	8.9
	C	1.7	8.4



Rys. 14. Rozmieszczenie punktów pomiarowych dla próbki COLMONOY 43

Dla materiału COLMONOY 43 stwierdzono niewielkie zanieczyszczenie powierzchni ścierniwem (punkty 1–3). Chrom występuje głównie w roztworze stałym co zwiększa odporność na korozję ale obniża odporność na zużycie ścierne materiału. Ponadto w punktach 7, 9 zaobserwowano prawdopodobnie występowanie  $\text{Ni}_3\text{Si}$  oraz węglkoborek w punkcie 8. W punktach 1, 2, 4, 6 stwierdzono wysoki udział tlenków.

Tabela 4 Pomiary z badania EDS Colmonoy 43

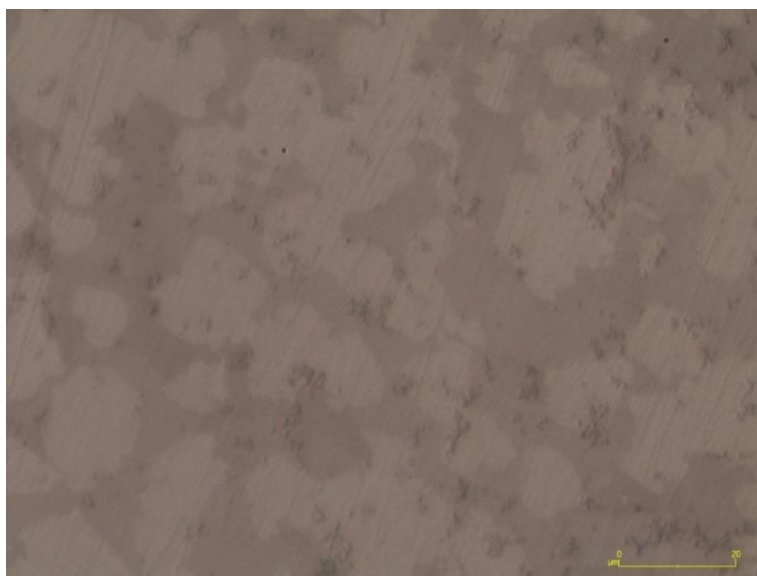
Punkt pomiaru	Pierwiastek	Zawartość [% mas.]	Błąd pomiaru [%]
1	Ni	58.5	1.5
	Si	7.4	3.6
	O	27.2	3.9
	Cr	1.2	9.6
	Ca	0.8	10.1
	Al	2.0	9.5
	S	1.0	9.7
	C	1.5	11.9
2	Fe	0.4	30.4
	Ni	64.3	1.5
	O	27.6	4.0
	Cr	2.2	6.8
	Si	1.9	9.2

<b>Punkt pomiaru</b>	<b>Pierwiastek</b>	<b>Zawartość [% mas.]</b>	<b>Błąd pomiaru [%]</b>
	Ca	0.7	14.3
	C	1.8	11.8
	Al	1.1	18.4
	Fe	0.6	22.0
3	Ni	58.0	1.5
	O	35.1	3.2
	Cr	2.1	6.1
	Si	1.9	7.7
	Ca	0.9	9.0
	Al	1.4	11.9
	Fe	0.5	23.2
4	Ni	51.6	1.5
	O	34.8	3.2
	Cr	4.5	4.0
	Si	4.5	4.6
	Al	1.9	10.5
	C	1.6	12.0
	Ca	0.5	16.4
	Fe	0.7	16.1
5	Ni	58.3	1.5
	O	35.1	3.3
	Cr	2.4	6.5
	Si	1.9	8.5
	C	1.7	11.9
	Fe	0.7	17.7
6	Ni	59.7	1.4
	O	33.9	3.2
	Cr	2.2	6.3
	Si	1.9	7.9
	C	1.6	11.3
	Fe	0.8	16.2
7	Ni	51.9	1.5
	Si	9.7	2.8
	Zr	5.5	3.1
	O	29.6	4.0
	Cr	0.8	12.5
	C	1.8	11.8
	Fe	0.6	19.7

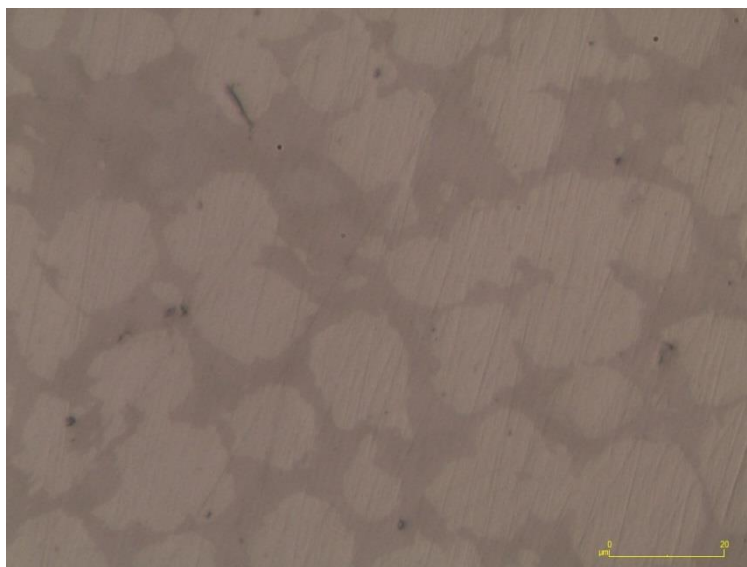
Punkt pomiaru	Pierwiastek	Zawartość [% mas.]	Błąd pomiaru [%]
8	Mo	11.3	2.1
	Ni	32.5	2.1
	Cr	12.7	2.4
	Si	7.2	3.7
	O	33.8	4.5
	C	1.8	13.2
	Fe	0.6	23.3
9	Ni	64.0	1.5
	Si	8.7	3.5
	O	20.1	4.8
	Cr	1.6	8.2
	Al	2.8	8.6
	Fe	0.9	14.1
	C	1.9	11.9

#### 6.4.4. Analiza mikrostruktury

Obrazy mikrostruktury badanych powłok (rys. 15–16) pozyskano przy pomocy mikroskopu Nikon M100 wyposażonego w kamerę cyfrową. Próbki trawiono wodą królewską. W przypadku obu powłok zaobserwowano jasne pola osnowy niklowej oraz ciemne zawierające eutektyki oraz węglkoborki.



Rys. 15. Mikrostruktura powłoki COLMONOY 43



Rys. 16. Mikrostruktura powłoki COLMONOY 237

#### 6.4.5. Badanie mikrotwardość

Badanie mikrotwardości przeprowadzono przy użyciu mikrotwardościomierza FN 800 pod obciążeniem 50 g w czasie 10 s. Wyniki badań zamieszczono w tabeli 5.

Tabela 5. Średnia wartość mikrotwardości badanych materiałów

Materiał	Osnowa [HV <sub>0,05</sub> ]		Faza [HV <sub>0,05</sub> ]	
	Zakres	Średnia	Zakres	Średnia
COLMONOY 43	336,8÷384,2	355,0	1099,5÷1284,6	1182,7
COLMONOY 237	409,2÷482,5	434,9	986,5÷1228,0	1076,1
S235	Zakres: 194,2÷243,2			
	Średnia: 218,6			

## 7. Wnioski i podsumowanie

W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono, że badane powłoki na bazie niklu mają wielokrotnie lepszą odporność na zużycie niż stal S235. Największą odpornością na zużycie cechował się materiał COLMONOY 237, który również posiada najwyższą mikrotwardość osnowy. Z kolei najwyższą mikrotwardość wydzielen znotowano w materiale COLMONOY 43. Analizując wyniki badań można założyć, że pomimo większej zawartości pierwiastków węglotwórczych w materiale COLMONOY 43, to mikrotwardość materiału COLMONOY 237

osnowy miała największy wpływ na odporność na zużycie. Dzięki obserwacji śladów zużycia potwierdzono charakter zużycia jako zużycie ściernie. Podsumowując badane powłoki na osnowie niklu zapewniają podwyższoną odporność na zużycie ściernie w środowisku cementu portlandzkiego. Powłoki te mogą zostać użyte między innymi na powierzchni urządzeń mielących i rozdrabniających, a także do ich regeneracji.

#### Literatura

- [1] *Przemysł cementowy w Polsce*, [http://www.polskicement.pl/files/Pages/104/uploaded/10\\_66.pdf](http://www.polskicement.pl/files/Pages/104/uploaded/10_66.pdf). (12.02.2017)
- [2] Napiórkowski J., Drożyner P., Mikołaczak P., Rychlik A., Szczygałak P., Ligier K., *Podstawy budowy i eksploatacji pojazdów i maszyn*, EXPOL, P. Rybiński, J. Dąbek, Sp.j., Olsztyn, 2013.
- [3] Gawenda T., *Problematyka doboru maszyn kruszących w instalacjach produkcji kruszyw mineralnych*, *Górnictwo i Geoinżynieria*, vol. 34, 4/2010.
- [4] Madlool N. A., Saidur R., Rahim N. A., Kamalisarvestani M., *An overview of energy savings measures for cement industries*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 19/2013, s. 18–29.
- [5] Kurdowski W., *Poradnik technologa przemysłu cementowego*, Wydawnictwo Arkady, Warszawa, 1981.
- [6] Gawenda T., *Główne aspekty rozdrabniania twardych surowców mineralnych w wysokociśnieniowych prasach walcowych*, *Górnictwo i Geoinżynieria*, vol. 33, 4/2009.
- [7] Sitkowska J., Duda J., Duczkowska-Kądziel A., Wasilewski M., *Optymalizacja procesu przemiatu cementu na przykładzie Cementowni Odra S.A.*, [http://www.ptzp.org.pl/files/konferencje/kzz/artyk\\_pdf\\_2015/T1/t1\\_0752.pdf](http://www.ptzp.org.pl/files/konferencje/kzz/artyk_pdf_2015/T1/t1_0752.pdf). (12.02.2017).
- [8] Naziemiec Z., *Prasy walcowe w przeróbce surowców mineralnych*, *Prace ICiMB*, Warszawa – Opole, vol. 14, 2013, s. 7–16.
- [9] Gawenda T., *Innowacyjne technologie produkcji kruszyw o ziarnach foremnych*, *Mining Science – Mineral Aggregates*, vol. 22, 1/2015, s. 45–59.
- [10] Grzesiak S., *Materiały odporne na zużycie ściernie stosowane na wykładziny młynów kulowych oraz mielniki*, *Krzepnięcie Metali i Stopów*, PAN- Oddział Katowice, vol. 3–4, 1997.
- [11] Aldrich C., *Consumption of steel grinding media in mills – A review*, *Minerals Engineering*, vol. 49/2013, s. 77–91.
- [12] Vertical Mill, [https://gwm.en.alibaba.com/product/60251499652-801548718/Low\\_consumption\\_cement\\_industry\\_vertical\\_raw\\_mill.html](https://gwm.en.alibaba.com/product/60251499652-801548718/Low_consumption_cement_industry_vertical_raw_mill.html). (12.02.2017)
- [13] Hejwowski T., *Nowoczesne powłoki nakładane cieplnie odporne na zużycie ściernie i erozyjne*, Politechnika Lubelska, 2013.



- [14] Lawrowski Z., *Tarcie, zużycie i smarowanie*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2008.
- [15] Wills B. A., Napier-Munn T., *Wills' mineral processing technology: An introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery*, Elsevier Ltd, 2016.
- [16] Kosowski A., Tyrała E., *Wybrane właściwości mechaniczne i użytkowe żeliwa Ni-Hard 4 obrabianego cieplnie*, Archiwum Odlewnictwa, PAN, Katowice, vol. 4, 11/2004.
- [17] Colmonoy 43 data sheet – technical catalogue.
- [18] Colmonoy 237 data sheet – technical catalogue.
- [19] Structural Steel – S235, <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6022> (12.02.2017).
- [20] Conde A., Zubin F., Damborenea J., *Cladding of Ni–Cr–B–Si coatings with a high power diode laser*, Materials Science and Engineering: A, vol. 334, 1–2, 1/2002, s. 233–238.

## MATERIAŁY NA POWŁOKI ZWIĘKSZAJĄCE TRWAŁOŚĆ MASZYN I URZĄDZEŃ PRZEMYSŁU CEMENTOWEGO

### Streszczenie

Przemysł cementowy to znacząca część światowego przemysłu przetwórstwa materiałów mineralnych. W czasie wieloetapowej produkcji najbardziej rozpowszechnionego materiału wiążącego – budownictwie dochodzi do dużych strat energii oraz przede wszystkim generowania kosztów związanych ze zużyciem elementów maszyn i urządzeń. Głównym czynnikiem wpływającym na powstawanie strat eksploatacyjnych jest przede wszystkim zużycie ściernie, a także w mniejszym stopniu erozja, korozja i zużycie cieplne. Ze względu na powszechność występowania zjawiska, w pracy podjęto próbę określenia przydatności dwóch komercyjnych materiałów na bazie niklu do aplikacji w rozpatrywanej gałęzi przemysłu. Badane materiały zostały poddane testom zużycia w masie ścierniej, gdzie miarę zużycia stanowi stosunek ubytek masy do przebytej drogi tarcia. Następnie zbadana została mikrostruktura i mikrotwardość materiałów oraz wykonano badania SEM i EDS śladów zużycia.

**Słowa kluczowe:** *zużycie, cement, stopy niklu, powłoki*

## COATING MATERIALS USED FOR DURABILITY INCREASE OF CEMENT INDUSTRY EQUIPMENT

### Abstract

The cement industry is a significant part of the world's mineral processing industry. During the multi-stage production of the most common binding material for construction works, there is a great deal of energy loss and, above all, generation of costs associated with the wear of machine elements. The main factor affecting operating loss is primarily abrasive wear and, to a lesser degree, erosion, corrosion and heat consumption. Due to the prevalence of this phenomenon, an attempt was made to determine the suitability of two commercial nickel-based materials for application in the industry concerned. The tested materials have been subjected to abrasive wear tests, where the wear intensity is the ratio of weight loss to the path of friction. Microstructure and microhardness of materials were examined and SEM and EDS tests for wear patterns were performed.

**Keywords:** *wear, cement, nickel alloys, coatings*

*Tadeusz Hejwowski<sup>1</sup>, Daniel Majewski<sup>2</sup>*

## **MIKROSTRUKTURA POWŁOK NATRYSKIWANYCH METODĄ PŁOMIENIOWO – PROSZKOWĄ**

### **1. Wprowadzenie**

Współczesny przemysł stawia wysokie wymagania dotyczące najwyższej jakości powłok ochronnych natryskiwanych cieplnie. Metodę tę wyróżnia fakt, iż przy odpowiednim doborze parametrów natryskiwania nie dochodzi do nadtopienia podłoża podczas tworzenia się powłoki. Wiązanie między materiałem natrykiwanym a materiałem podłoża ma charakter połączenia mechaniczno – adhezyjnego z częściowym udziałem dyfuzji [1]. Wyróżniamy szereg metod natryskiwania cieplnego: metody płomieniowe (poddźwiękowe i naddźwiękowe), łukową, plazmową czy metodę *cold spray* (natrykiwanie zimnym gazem, gdzie nie występują procesy wysokotemperaturowe) [2]. Powłoki wykonywane są z ceramiki, metali, polimerów oraz z mieszanin wymienionych materiałów [3].

W pracy podjęto próbę scharakteryzowania mikrostruktury powłok natrykiwanych metodą płomieniowo – proszkową i określenia obszarów możliwych zastosowań.

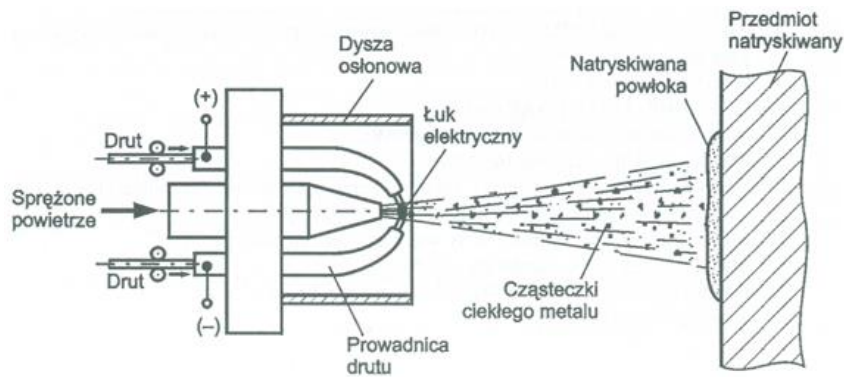
### **2. Charakterystyka i podział metod natryskiwania cieplnego**

Metoda łukowa polega na stapianiu w wysokiej temperaturze łuku (4200–5000°C) dwóch drutów litych metalowych lub proszkowych. Podczas procesu drut podawany ze stałą prędkością stapia się i stopiony metal odrywa się, a następnie jest rozpylany przez sprężone powietrze podawane z wydajnością od 2 do 5 m<sup>3</sup>/min. Zasadniczymi elementami budowy urządzenia do natryskiwania łukowego (rys. 1) są układ sterowania oraz podawania drutu umieszczonego na dwóch szpulach, a także zasilacz łuku (prąd stały) i układ podawania sprężonego powietrza (zakres ciśnienia 0,2–0,7 MPa). Prędkość natrykiwanej cząstki wynosi 150–200 m/s) [4].

---

<sup>1</sup> Politechnika Lubelska, Wydział Mechaniczny, Katedra Inżynierii Materiałowej, Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin, email: t.hejwowski@pollub.pl

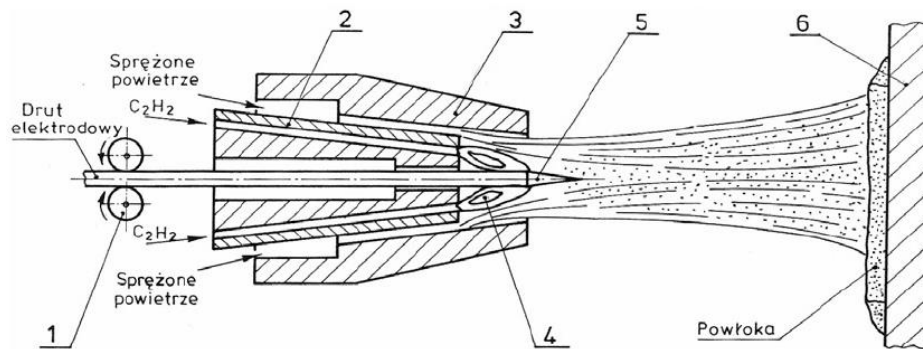
<sup>2</sup> Politechnika Lubelska, Wydział Mechaniczny, Katedra Inżynierii Materiałowej, Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin, email: d.majewski@pollub.pl



**Rys. 1. Proces natryskiwania łukowego [5]**

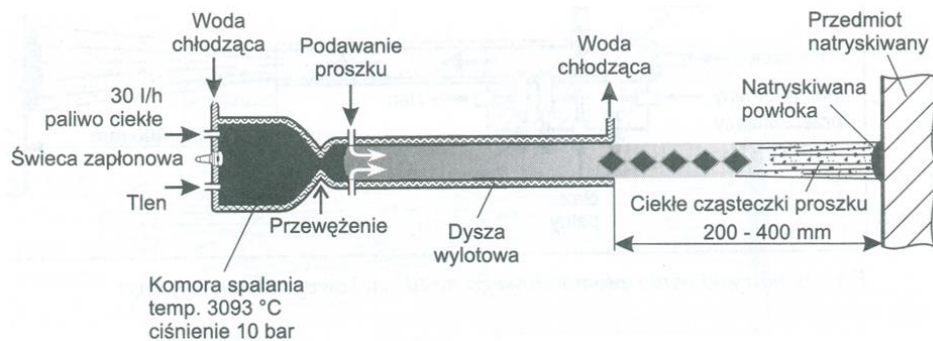
W metodzie płomieniowej poddźwiękowej powłoki można uzyskiwać z metali i ich stopów, jak i związków ceramicznych oraz polimerów. Materiałem podłoża są zarówno metale jak i niemetale [6]. Schemat urządzenia przedstawiono na rysunku 2. Źródłem ciepła topiącym cząstki jest płomień gazowy uzyskiwany ze spalania gazów roboczych takich jak propan – butan, wodór czy acetylen (najczęściej stosowany – temperatura płomienia wynosi  $3100^{\circ}\text{C}$ ). Materiał można podawać grawitacyjnie lub w strumieniu gazu nośnego (np. argonu) z zewnętrznego podajnika. Materiał powłokowy ulega stopieniu w płomieniu palnika i jest przyspieszany w strumieniu gazów. Metoda poddźwiękowa charakteryzuje się tym, że powłoki wykonuje się kilkoma sposobami – na zimno, na gorąco oraz z proszku, drutu lub pręta:

- powłoki otrzymywane metodą na zimno stosowane są dla elementów narażonych na zużycie ściernie, korozję, erozję czy kawitacje. Temperatura materiału rdzenia dla podanej metody podczas procesu nie przekracza  $350^{\circ}\text{C}$  (dla aluminium  $200^{\circ}\text{C}$ ),
- natryskiwanie poddźwiękowe na gorąco charakteryzuje się tym, że natryskowaną powłokę metalową lub cermetalową przetapia się wraz z częścią podłoża. Materiał podłoża jest wstępnie nagrzewany, następnie nakłada się cienkie warstwy, które w dalszym procesie poddaje się przetopieniu. Metoda ta może być stosowana na przykład w celu podniesienia odporności elementu na korozję,
- urządzenia do natryskiwania z drutu: materiał powłokowy umieszczony jest na szpuli i transportowany do palnika za pomocą napędzanych turbiną powietrzną rolek. Drut ulega stopieniu w płomieniu a następnie stopione cząstki są atomizowane i transportowane za pomocą sprężonego powietrza [1].



**Rys. 2. Budowa palnika i schemat procesu natryskiwania płomieniowego poddźwiękowego z drutu [7]**

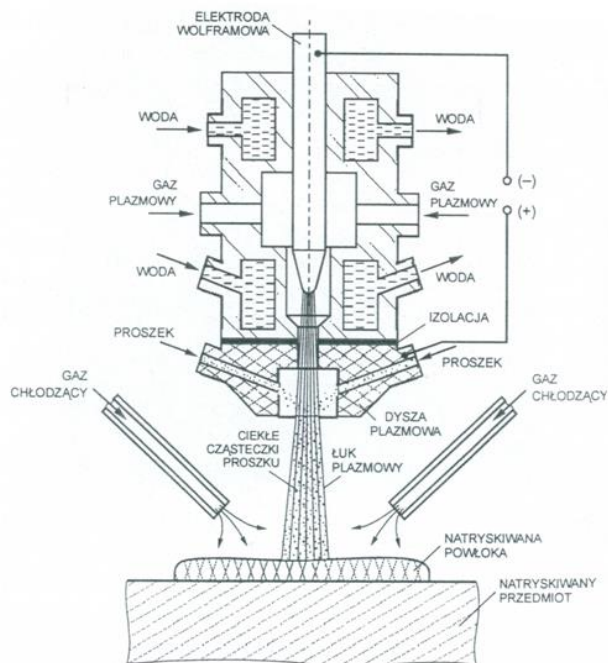
Natryskiwanie płomieniowo – proszkowe naddźwiękowe zostało prowadzone dla potrzeb przemysłu ponad 50 lat temu. Technologię wprowadziła na rynek firma Union Carbide Corp. tworząc palniki do natryskiwania detonacyjnego [12]. W roku 1982 wprowadzono nową technologię zwaną HVOF, w której palnik jest zasilany w sposób ciągły gazem palnym. Szybki rozwój technologii pozwolił na powstanie nowej generacji palników i natryskiwania z udziałem wysokiego ciśnienia (z ang. High Pressure/High Velocity Oxy Fuel). W palnikach do natryskiwania detonacyjnego oraz metodą HVOF źródło ciepła stanowi paliwo gazowe stosowane również w metodach poddźwiękowych, zaś w metodzie HP/HVOF (rys. 3) stosuje się paliwo ciekłe, co pozwala na uzyskanie większych prędkości cząstek niż w metodzie HVOF. W podanej metodzie wysokociśnieniowej proszek podaje się do strefy niskiego ciśnienia zaś wydajność procesu wynosi od 3 do 15 kg/h. Mieszanekę palną stanowi nafta lotnicza i tlen, zaś temperatura spalania wynosi około 2760°C. Ważnym aspektem natryskiwania HP/HVOF jest również cena procesu, która jest znacznie niższa od pozostałych metod naddźwiękowych, ponieważ cena nafty stanowi jedynie 15% ceny wodoru oraz 50% propylenu. Ponadto w obecnych czasach coraz częściej stosuje się palniki, w których zamiast tlenu stosowane jest powietrze [13].



**Rys. 3. Schemat palnika i procesu natryskiwania metodą HP/HVOF z wykorzystaniem paliwa ciekłego [13]**

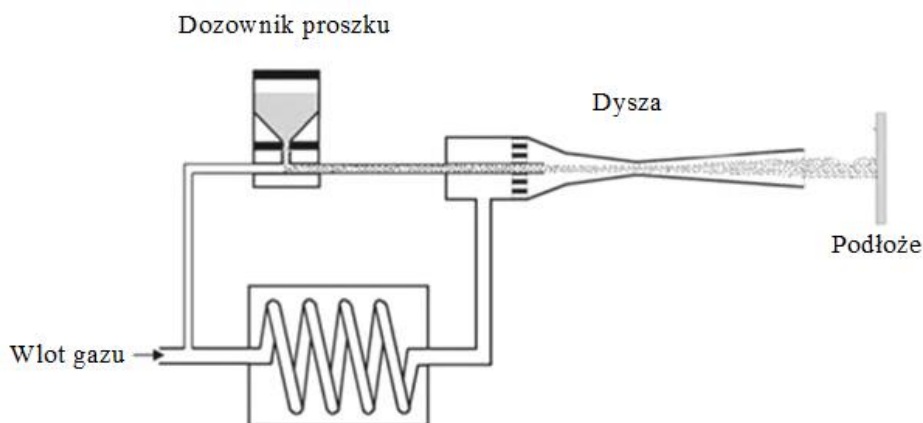
Natryskiwanie plazmowe (rys. 4) polega na topieniu proszku powłokowego metalicznego lub niemetalicznego w strumieniu plazmy. Łuk plazmowy charakteryzuje się wysoką temperaturą rzędu 16000°C. Zajarzenie łuku następuje między anodą miedzianą a katodą wolframową. Palnik ze względu na występujące procesy wysokotemperaturowe mogące stopić katodę lub anodę chłodzony jest intensywnie wodą. Do natryskiwania plazmowego jako gaz roboczy najczęściej wykorzystywany jest azot lub argon, zaś do najczęściej stosowanych gazów pomocniczych należą hel lub wodór.

Opisywaną metodę stosuje się powszechnie w przemyśle chemicznym, lotniczym, energetyce jądrowej, elektronice. Powłoki natryskiwane plazmowo cechują się odpornością na ścieranie, korozję, obciążenia dynamiczne, procesy temperaturowe, a także stosuje się je jako izolacje elektryczne. Schemat oraz zasadnicze elementy budowy urządzenia do natryskiwania plazmowego przedstawiono na rysunku 4 [1,8].



Rys. 4. Schemat procesu natryskiwania plazmowego [9]

Do procesów natryskiwania cieplnego zaliczamy również jedną z najnowszych technologii natryskiwania tak zwaną metodę *cold spray*. Początkowo metoda nosiła nazwę *Cold Gas Dynamic Method* jednak dziś zgodnie z obowiązującą normą EN 657:2005 używa się nazwy *Cold Spraying* [9]. Metodę tą wyróżnia fakt, iż można otrzymać powłoki zarówno z metali, kompozytów jak i stopów. Najważniejszymi elementami procesu są temperatura i prędkość cząstek, które znacznie różnią się względem pozostałych metod natryskiwania cieplnego. Dodatkowo metoda ta umożliwia tworzenie powłok polimerowych zarówno na metalach jak i tworzywach sztucznych. Natryskiwanie zimnym gazem dzielimy na niskociśnieniowe i wysokociśnieniowe [10]. Metoda niskociśnieniowa jak i wysokociśnieniowa charakteryzuje się niską temperaturą procesu i wysoką prędkością nadawaną cząstkom natryskiwanym. W metodzie niskociśnieniowej prędkość wylotowa gazu wynosi około 700 m/s, zaś średnica cząstek natryskiwanych nie przekracza 50  $\mu\text{m}$ . Metoda wysokociśnieniowa charakteryzuje się większymi prędkościami wylotowymi gazu (1200 m/s), większą mocą układu podgrzewania gazu, a także tym, że średnica cząstek materiału powłokowego przekracza 50  $\mu\text{m}$  [9]. Schemat urządzenia do natryskiwania zimnym gazem przedstawiono na rys. 5.



Rys. 5. Schemat procesu natryskiwania zimnym gazem [11]

### 3. Wybrane właściwości, zastosowanie i budowa warstwy natryskiwanej

Zakres badań warstw wierzchnich zależy głównie od przewidywanych warunków eksploatacji. W związku z tym aspektem najczęściej wykonuje się badania dotyczące twardości, odporności na zużycie, wytrzymałości zmęczeniowej. Bardzo ważne jest również połączenie powłoki z podłożem, co jest jednym z najczęstszych przedmiotów badań. W tym celu wykonuje się próbę przyczepności, która polega na odrywaniu natryskiwanej warstwy od podłoża wykorzystując siłę działającą w sposób prostopadły do powłoki. Próby sprawdzające przyczepność powłoki stosowane są głównie do oceny jakości połączenia powłoki z materiałem podłoża, które określa właściwości eksploatacyjne elementu pokrytego powłoką. Wpływ na wytrzymałość połączenia powłoki z materiałem podłoża ma między innymi proces natryskiwania i jego parametry oraz materiał podłoża i powłoki [14].

Powłoki natryskiwane posiadają szereg zalet i właściwości wykorzystywanych w przemyśle. Na przykład wykorzystanie powłok natryskiwanych łukowo z drutów cynkowych lub ze stopów na bazie aluminium i cynku zapewnia ochronę konstrukcji stalowych przed korozją atmosferyczną. Powłoki ceramiczne (na przykład  $ZrO_2+Y_2O_3$ ) otrzymywane metodą naddźwiękową lub plazmową chronią przed korozją wysokotemperaturową. Te oraz inne przykładowe właściwości dla głównych metod natryskiwania cieplnego z udziałem wysokich temperatur przedstawiono w tabeli 1 [15].

**Tabela 1. Wybrane materiały powłokowe i właściwości powłok otrzymanych metodami natryskiwania płomieniowego, łukowego, plazmowego i HVOF [15]**

Lp.	Rodzaj zużycia	Metoda natryskiwania	Grupa materiałów
1	Korozja atmosferyczna	Płomieniowa	Druty z Zn, stopy Zn–Al, Al, Al–Mg Proszki: Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> –TiO <sub>2</sub> , CrO <sub>2</sub>
2		Łukowa	Jak wyżej + stale nierdzewne, stopy na bazie NiCr
3	Korozja wysoko-temperaturowa	Płomieniowa	Druty: Al, stopy z dużą zaw. Cr na osnowie Ni lub Fe, Proszki: ZrO <sub>2</sub> , ZrO <sub>2</sub> +Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
4		Plazmowa	ZrO <sub>2</sub> , ZrO <sub>2</sub> +modyfikacje Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> i inne
5		Łukowa	Al, stopy z dużą zawartością Cr na osnowie Ni lub Fe
6	Zużycie ścierne	Płomieniowa	Proszki typu self-fluxing z przetopieniem
7		Łukowa	Druty na osnowie Fe lub Ni modyfikowane fazami węglików, borków, krzemków itd.
8		HVOF	Kompozytowe proszki typu: WC–Co, WC–Co–Cr, Ni–Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> , WC–CrC–Ni
9	Zużycie ściernokorozyjne	Łukowa	Druty na osnowie Ni modyfikowane węglnikami, borkami, krzemkami itd.
10	w podwyższonych temperaturach	HVOF	Proszki typu NiCr–Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> , NiCr–Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> z dodatkowymi modyfikacjami np. Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> –TiC–NiCr, WC–Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> –NiCr lub Ni

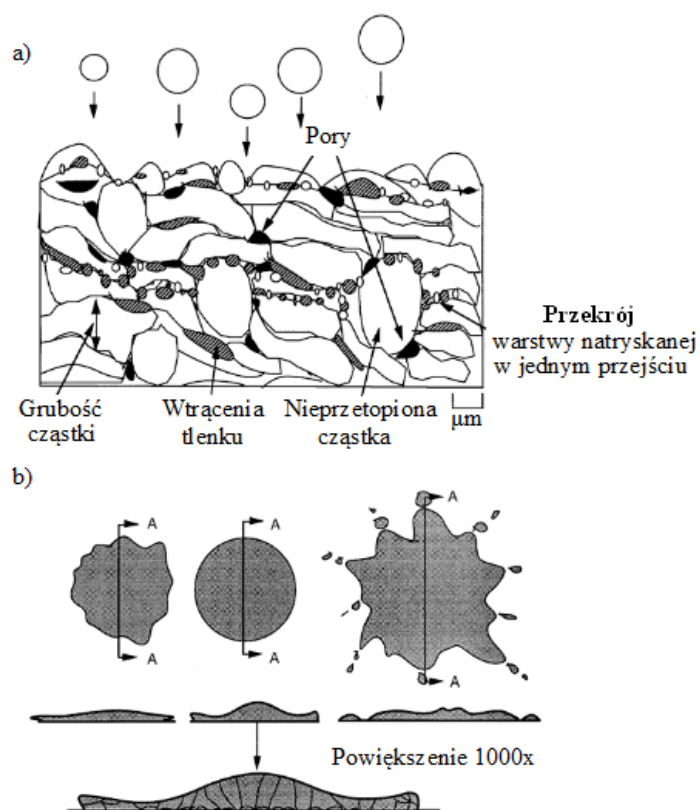
Proces natryskiwania jest dość złożony, zaś na jego przebieg ma wpływ wiele czynników. W trakcie procesu natryskiwania można wyróżnić cztery etapy, mianowicie:

1. Podawanie materiału w postaci drutu, proszku lub pręta do przestrzeni, w której materiał powłokowy ulega stopieniu.
2. Proces ciągłego topienia materiału, rozpylanie, przyspieszanie. Cały ten etap trwa około 10<sup>-3</sup> s.
3. Lot cząstek z dyszy w stronę podłoża natryskiwanego. Podczas tego etapu na cząstkach metalowych powstają otoczki z tlenków.



4. Powstawanie powłoki – trwa od momentu zetknięcia się cząstek z pokrywającą powierzchnią do czasu ostygnięcia powłoki do temperatury otoczenia.

W trakcie uderzenia kulistej cząstki natryskiwanej (rys. 6–b) powierzchnię, dochodzi do spłaszczenia cząstki, zaś krucha warstewka tlenków pęka odkrywając tym samym czystą powierzchnię metalu [8]. Można wyróżnić kilka rodzajów cząstek. Cząstki (lamelle) w kształcie dysku powstają wtedy gdy średnica cząstki jest niewielka lub gdy energia kinetyczna lub cieplna są stosunkowo małe. Należy jednak zaznaczyć, że podczas procesu natryskiwania prawdopodobieństwo powstania cząstki o budowie nieregularnej jest dużo większe [16]. Na rysunku 6a pokazano również budowę w przekroju powłoki natryskiwanej (rys. 6–a). W czasie tworzenia się powłoki powstają pory i często przedostają się wtrącenia w postaci tlenków. Zdarza się również, że jeśli cząstka jest zbyt duża może nie dojść do jej pełnego przetopienia w całym przekroju. W zależności od doboru metody porowatość powłoki może sięgać do 10%. W zależności od technologii, osprzętu czy parametrów można uzyskać powłoki o grubości od 0,01 mm do 0,5 mm podczas jednego przejścia [8].



Rys. 6. Mikrostruktura powłoki natryskiwanej cieplnie – a); kształt cząstki powłoki – b) [16]

#### 4. Badania własne

##### 4.1. Materiał i metody

Przedmiotem badań były powłoki natryskiwane metodą gazowo – proszkową. Powłoki o różnym składzie chemicznym natryskano na pięciu płytkach próbnych, z których wycięto mechanicznie po trzy próbki. Materiały następnie zainkludowano w żywicy chemoutwardzalnej ze względu na brak stosowanego ciśnienia podczas utwardzania, które mogłoby uszkodzić powłokę natryskaną. W celu identyfikacji mikroskopowej oraz badań mikrotwardości zgłady metalograficzne poddano procesom szlifowania i polerowania (ostatni etap polerowania wykonano przy użyciu zawiesiny diamentowej o wielkości cząstek 3 µm). W tabeli numer 2 przedstawiono dane dotyczące materiału powłoki, zaś tabeli nr 3 podano warunki natryskiwania powłok. Aby zidentyfikować granice ziaren oraz określić ich dokładne położenie, próbki poddano trawieniu wodą królewską.

**Tabela 2. Informacje dotyczące przedmiotu badań**

Powłoka	1	2	3	4	5
Symbol materiału	AMI 3602	AMI 3401	UTP EB-2002	AMI 3413	Deloro 50
Skład chemiczny proszku	Cr=18%; Ni=10%; Mo=2%; Fe-reszta	4.5% Al; 0.35% Si; Ni-reszta	C=0.2%; Si=2.7%; Cr=9.3%; Fe=1.9%; B=1.2%; Al=0.4%; Ni-reszta	Al=21.1%; Fe=0.3%; Si=0.2%; Mn=0.8%; C=0.7%; Ni-reszta	C=0.45%; Si=3.9%; B=2.3%; Fe=2.9%; Cr=11%; Ni-reszta
Wielkość ziaren [µm]	32–106	45–90	36–106	45–90	10–75
Materiał podłoża	Stal 235JR				

**Tabela 3. Warunki natryskiwania powłok**

Powłoka	AMI 3602	AMI 3401	UTP EB-2002	AMI 3413	Deloro 50
Odległość palnika od powierzchni [mm]	180	200	180	180	180
Wydatek proszku	Wysoki (H)	Niski (L)	Wysoki (H)	Niski (L)	Wysoki (H)
Ciśnienie tlenu	0,3 MPa				
Ciśnienie acetylenu	0,07 MPa				
Typ dyszy	N				
Nazwa palnika	UNI – SPRAY – JET				

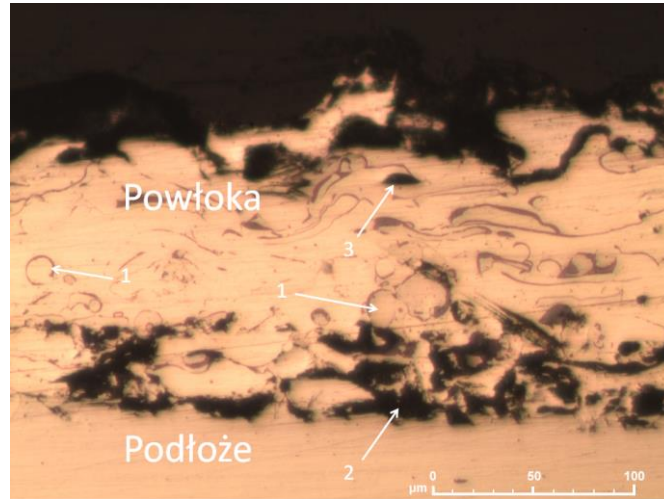
#### 4.2. Analiza mikrostrukturalna materiałów nietrawionych

Analizę mikrostrukturalną przeprowadzono przy użyciu mikroskopu metalograficznego świetlnego Nikon Eclipse MA 100. Mikrostruktura przedstawiona na fotografii 7 dotyczy materiału AMI 3602. Strzałkami o symbolu 1 oznaczono przykładowe cząstki, które nie uległy przetopieniu podczas procesu natryskiwania. Strzałka numer 2 przedstawia trwały brak połączenia między powłoką a podłożem na długości przekraczającej 200  $\mu\text{m}$ , zaś grubość defektu szacowana jest na 50  $\mu\text{m}$ . Brak tego typu połączenia występuje przypadkowo i nieregularnie. Ponadto w mikrostrukturze występują pory (strzałka nr 3), a także cząstki odkształcone o widocznych granicach ziaren.

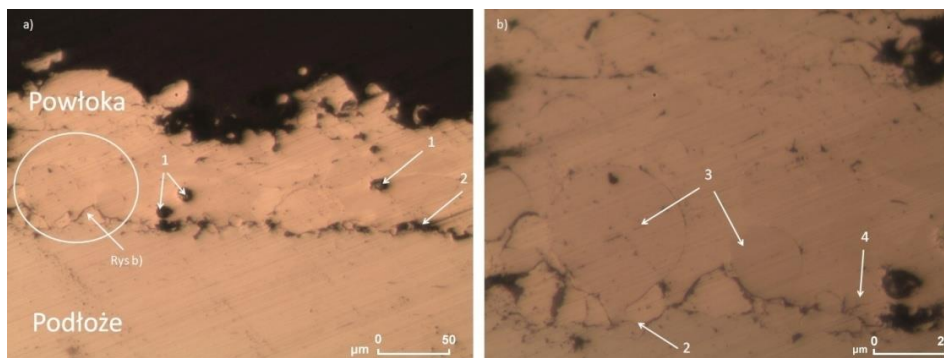
Na rysunku 8 przedstawiono wyniki obserwacji mikrostrukturalnej materiału Deloro 50. Strzałkami 1 oznaczono większe pory, które są zbliżone do siebie wielkością i kształtem, zaś ich rozkład jest nieregularny. Strzałki o symbolu 2 zarówno na rys. 8-a jak i rys. 8-b obrazują miejsce połączenia powłoki z podłożem. Mikrostruktura rys. 8-a przedstawia defekty charakteryzujące się brakiem połączenia powłoki z podłożem. Występują nieregularnie zaś ich szerokość oscyluje maksymalnie w granicach 10  $\mu\text{m}$ . Strzałka 2 na mikrofotografii rys. 8-b przedstawia również obszar połączenia powłoki z podłożem. Granica połączenia powłoki z podłożem jest widoczna, jednak w tym przypadku nie występują defekty w postaci pustej przestrzeni między podłożem a powłoką. Ponadto na rys. 8-b oznaczono strzałką 3 nieprzetopione cząstki o wyraźnej geometrii a także strzałką 4 oznaczono niewielkie pęknięcia propagujące od podłoża w stronę powłoki.

W materiale AMI 3401 i AMI 3413 (rys. 9) występowały pory, nieprzetopione cząstki jak i inne podobieństwa względem wszystkich badanych powłok z tej grupy. Cechą wyróżniającą opisywane mikrostruktury jest praktycznie brak widocznej granicy rozdziału powłoki z podłożem, co zobrazowano za pomocą strzałki 1. Należy również dodać, że natryskane powłoki są najcieńsze spośród badanych w pracy co pokazano na mikrofotografiach.

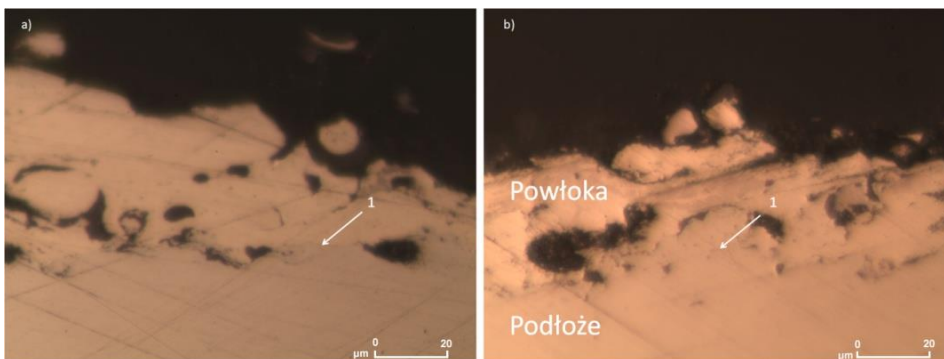
Powłoka nietrawiona materiału UTP EB-2002 (rys. 10) zbliżona jest pod względem występujących defektów do powłok 1 i 5 (AMI 3602 i Deloro 50). W miejscu połączenia powłoki z podłożem występują obszary gdzie granica połączenia jest niewidoczna oraz obszary świadczące o braku połączenia między podmiotami. Ponadto w obszarach centralnych powłoki występują liczne pory – strzałki 1, pęknięcia propagujące od porów – strzałki 2 oraz nieprzetopione cząstki – strzałka 3.



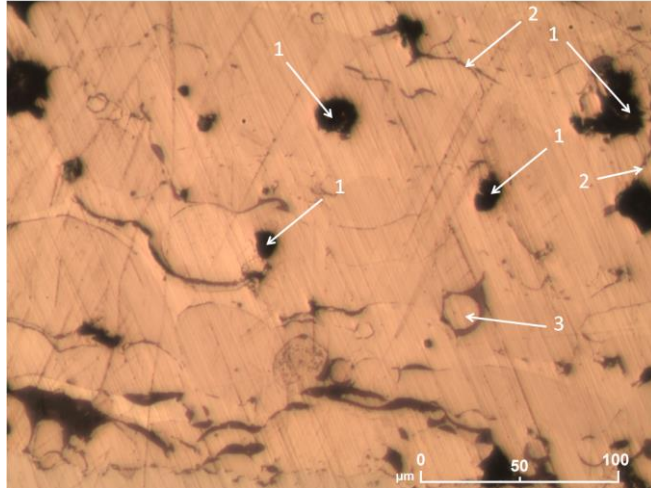
**Rys. 7. Powłoka natryskiwana AMI 3602 – nietrawiona**



**Rys. 8. Powłoka natryskiwana Deloro 50 – a); b) – powiększenie zaznaczonego obszaru na fotografii a)**



**Rys. 9. Powłoka natryskiwana AMI 3401 – a); b) powłoka natryskiwana AMI 3413**



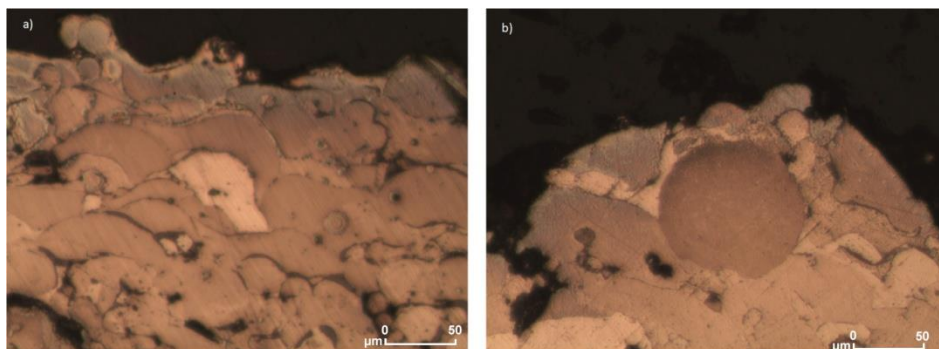
**Rys. 10. Powłoka nietrawiona materialu UTP EB-2002**

#### 4.3. Analiza mikrostrukturalna powłok trawionych

Rysunek 11 przedstawia mikrostrukturę powłoki AMI 3602 po procesie trawienia. Cyfrą "1" oznaczono cztery sąsiadujące ze sobą lamele. Układają się w kształt menisku oraz mają podobną szerokość w całej swojej długości. Opisywana struktura nie występuje w całym przekroju powłoki. Ponadto w mikrostrukturze widać pory, a także pęknięcia lub granice ziaren, które są z nimi połączone.



**Rys. 11. Powłoka natryskiwana AMI 3602. Widoczne lamele (1).  
Materiał trawiony wodą królewską**



**Rys. 12. Powłoka z materiału UTP EB–2002, a) mikrostruktura powłoki z cząstkami odkształconymi częściowo, b) cząstka nieprzetopiona o regularnej geometrii, struktura trawiona wodą królewską**

Rysunek 12 przedstawia strukturę powłoki natryskanej UTP EB–2002. Badania wykonano dla 20x powiększenia. Na rysunku 12–a przedstawiono strukturę, gdzie cząstki odkształciły się częściowo podczas uderzenia, nie osiągając jednak pełnej spłaszczonej struktury. W przypadku rys. 12–b ukazano cząstkę nieprzetopioną, większych rozmiarów o wyraźnej i regularnej granicy ziarna.



**Rys. 13. Powłoka natryskiwana Deloro 50, struktura trawiona wodą królewską**

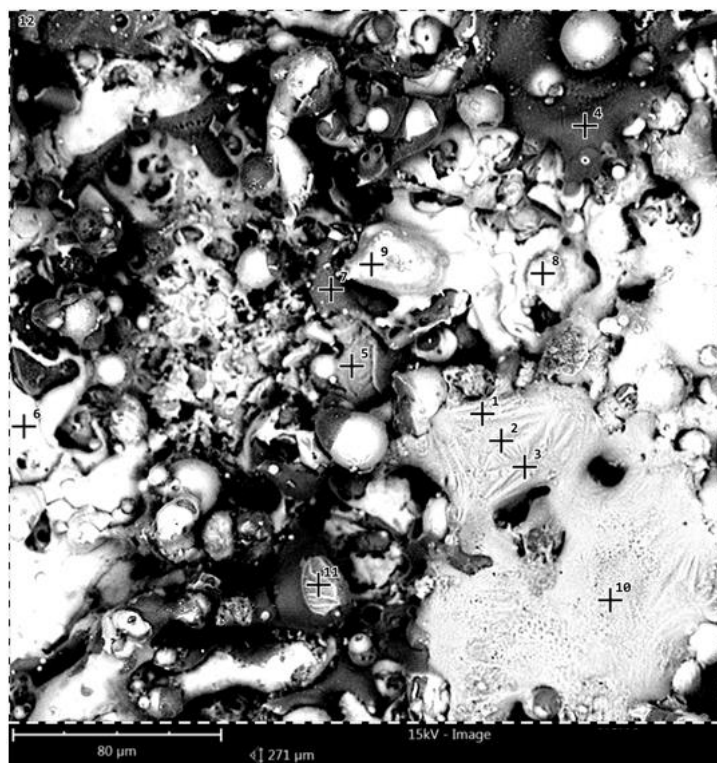


Rysunek 13 przedstawia powłokę natrykiwaną Deloro 50. Dłuższe trawienie pozwoliło na uzyskanie lepiej uwidocznionej mikrostruktury. Granica rozdziału między powłoką a podłożem jest wyraźna. Ponadto za pomocą strzałek przedstawiono wybrane cząstki przetopione (strzałka nr 1), przetopione częściowo (strzałka nr 3) i nieprzetopione (strzałka nr 2).

Badanie mikrostruktury trawionej wodą królewską materiału AMI 3413 i AMI 3401 ujawniło granice ziaren w powłoce oraz ich kształt. W obu powłokach występowały nieprzetopione lub częściowo nieprzetopione ziarna. Powłoki charakteryzowały się defektami w postaci ubytków (zaobserwowano brak powłoki w niektórych badanych obszarach).

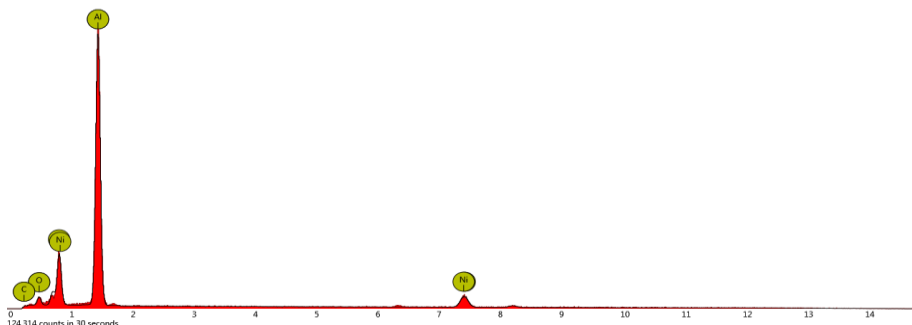
#### 4.4. Badania na skaningowym mikroskopem elektronowym

W celu dokładniejszej oceny mikrostruktury powłoki oraz jej przybliżonego składu chemicznego wykonano badania skaningowym mikroskopem elektronowym. Badania wykonano dla powiększeń 400–1000x. Wyniki badań przedstawiono i opisano dla materiału AMI 3413. Do pomiarów wycięto nowe próbki. Do badań przemyto je w spirytusie oczyszczonym i osuszono.



Rys. 14. Zdjęcie powierzchni powłoki natrykiwanej AMI 3413

Punkty 1 do 11 na rysunku 14 obrazują miejsca badania składu chemicznego wykonanego metodą EDS. Punkty wybierano na podstawie odmienności wizualnej wykazywanej między sobą lub w celu sprawdzenia danego obszaru (punkty 1–3). Zdjęcie przedstawia silnie zróżnicowaną pod względem geometrii zewnętrzną część powłoki.



Rys. 15. Wykres przedstawiający wyniki badań składu chemicznego punktu 1 z rys. 14, SEM-EDS

Badania składu chemicznego pierwszego punktu przedstawiono na wykresie powyżej. Ostatni pik na wykresie przedstawia odczyt z fali powracającej – dlatego też nie jest przypisany do niego żaden pierwiastek. Wyniki badań składu chemicznego dla 11 punktów przedstawiono w postaci procentowej w tabeli 4. W sześciu przypadkach w składzie chemicznym dominuje aluminium. W czwartym punkcie zawartość niklu wynosi jedynie 4,4%, zaś udział tlenu przekracza 50% i jest to wydzielenie  $Al_2O_3$ .

Tabela 4. Wyniki pomiarów składu chemicznego materiału AMI 3413

Nr punktu	Zawartość Ni, % mas.	Zawartość O, % mas.	Zawartość Al, % mas.	Zawartość C, % mas.
1	21,2	8,5	70,2	0,1
2	25,8	14,4	59,9	–
3	52,1	15,3	32,7	–
4	4,4	52,0	43,6	–
5	12,8	9,0	78,2	–
6	85,5	6,7	7,7	–
7	44,1	26,6	29,3	–
8	80,4	10,8	8,8	–
9	73,0	11,4	15,6	–
10	25,1	12,0	6,9	–
11	35,7	26,3	38,0	–



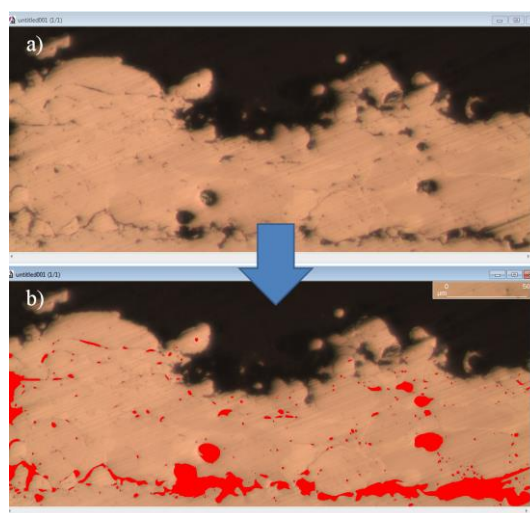
#### 4.5. Badania porowatości

Badania udziału porowatości w mikrostrukturze powłoki przeprowadzono przy wykorzystaniu programu Image Pro Plus. Badania wykonano dla materiału pierwszego, trzeciego oraz piątego. Dla materiału drugiego oraz czwartego nie przeprowadzono badań porowatości ze względu na małą grubość powłoki. Wyniki porowatości są przybliżone i były wykonywane na materiałach nietrawionych. Do analizy obrazu stosowano powiększenie mikroskopu równe 20x. W tabeli 5 przedstawiono porowatości badanych powłok. Ponadto przykładowy proces oznaczania porów przedstawiono na rysunku 16, natomiast rys. 16–a przedstawia mikrostrukturę przed badaniem zaś rysunek 16–b z oznaczonymi porami. Następnie za pomocą programu oblicza się udział powierzchniowy porów w całej badanej mikrostrukturze. Analogiczne badania porowatości wykonano dla pozostałych mikrostruktur.

W materiale AMI 3602 stwierdzono porowatość równą 18,5%. Ma to związek ze słabym połączeniem między powłoką a podłożem gdzie występują liczne pory. W pozostałych dwóch materiałach porowatość jest zbliżona do siebie i nie przekracza 10%. Ponadto dla tych materiałów również zaobserwowano największy udział porów w miejscu połączenia powłoki z podłożem.

Tabela 5. Wyniki pomiarów porowatości dla 3 badanych powłok

Materiał powłoki	AMI 3602	UTP EB–2002	Deloro 50
Porowatość zamknięta	18,5%	8,29%	8,81%

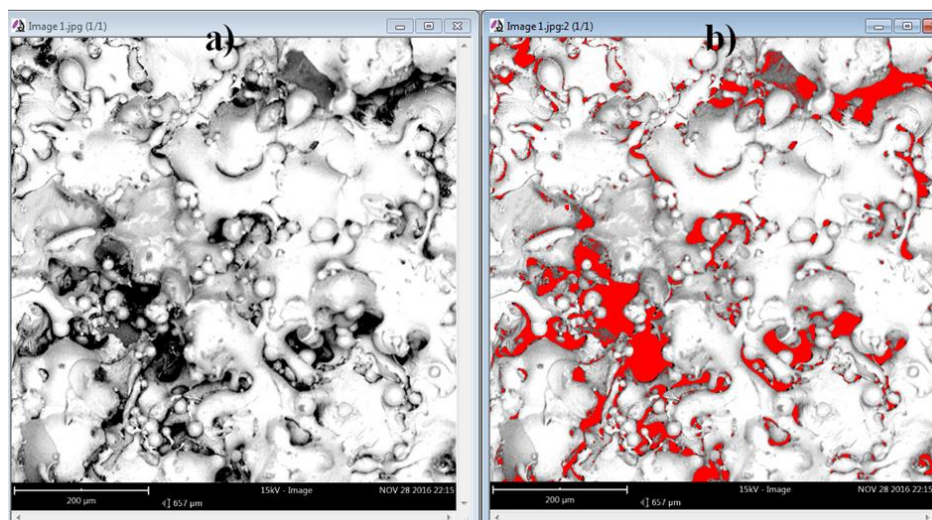


Rys. 16. Badanie porowatości zamkniętej w powloce natrykiwanej Deloro 50, a) mikrostruktura przed badaniem, b) oznaczone pory w programie (kolor czerwony)

Przeprowadzono również badania porowatości otwartej dla wszystkich badanych materiałów. Wyniki pomiarów przedstawiono w tabeli 6. Badania wykonano na powierzchni powłok z obrazów otrzymanych z elektronowego mikroskopu skaningowego. Najmniejszą porowatość odczytano dla materiału AMI 3413 (rysunek 17), zaś największą dla materiału Deloro 50. Zbliżone porowatości względem siebie mają próbki AMI 3602 i Deloro 50 (około 40%), a także AMI i UTP EB-2002 (około 30%).

**Tabela.6. Wyniki pomiarów porowatości otwartej dla 5 badanych powłok**

Materiał powłoki	AMI 3602	AMI 3401	UTP EB-2002	AMI 3413	Deloro 50
Porowatość otwarta	40,9%	30,6%	30,0%	9,6%	41,2%

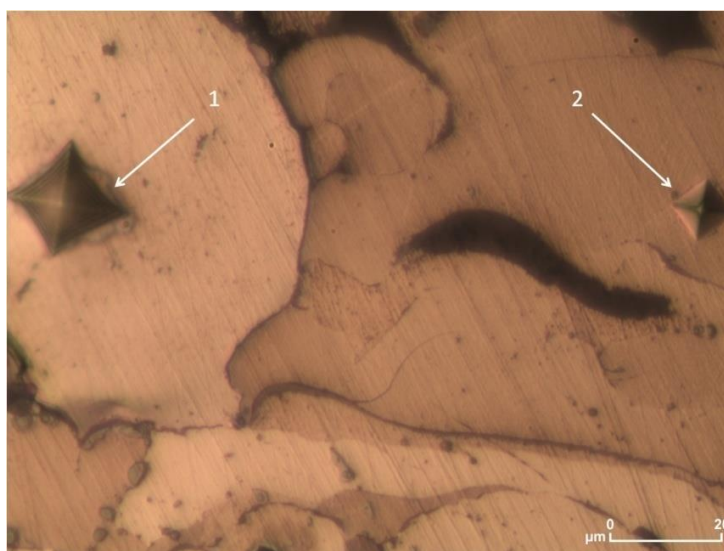


**Rys. 17. Badanie porowatości otwartej w powłoce natryskiwanej AMI 3413 – a) mikrostruktura przed badaniem, b) oznaczenie porów (kolor czerwony)**

#### 4.6. Pomiary mikrotwardości

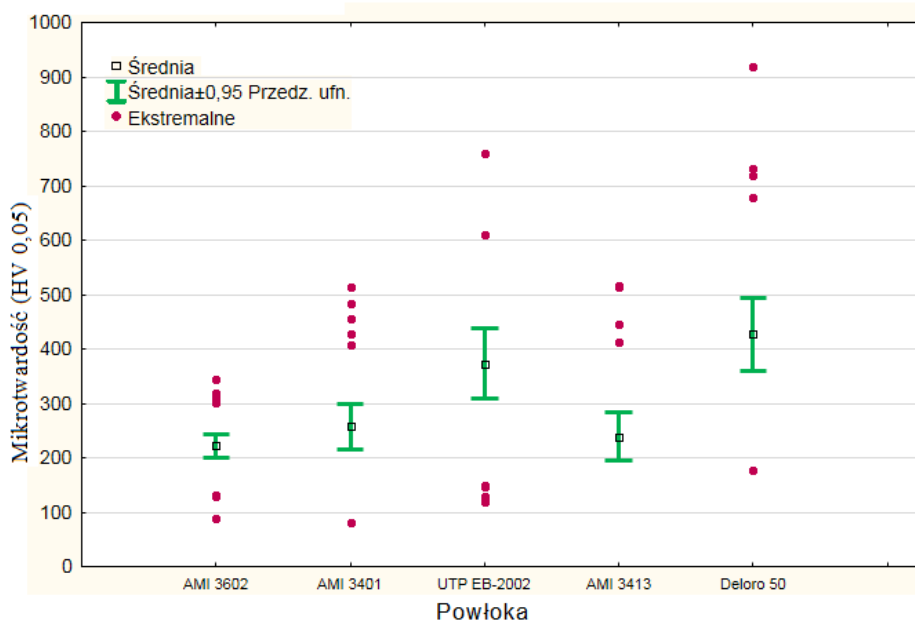
Badania mikrotwardości wykonano w 10 punktach w trzech zglądach dla każdego materiału. Otrzymano w ten sposób po 30 pomiarów dla danej powłoki. Badania przeprowadzono mikrotwardościomierzem FM – 800 zaś do pomiarów użyto metodę Vickersa przy sile nacisku wglębnika równej 0,49 N (50 g). Pomiary wykonywano w środkowej strefie powłoki (rysunek 18). Omawiana fotografia przedstawia mikrostrukturę trawioną aby zobrazować znaczną różnicę mikrotwardości w poszczególnych ziarnach. Odcisk oznaczony strzałką 1

wykonano w ziarnie, którego mikrotwardość wynosi poniżej 200 HV 0,05, natomiast mikrotwardość odczytana dla odcisku oznaczonego strzałką 2 wynosi aż 548,2 HV 0,05.



**Rys. 18. Odciski wykonane w powłoce UTP EB-2002**

Na podstawie otrzymanych pomiarów wykonano za pomocą programu Statistica analizy statystyczne. Wyniki zobrazowano w sposób graficzny na rysunku 19 za pomocą wykresu ramka – wąsy. Najwyższa spośród średnich obliczonych twardości wynosiła 427 HV 0,05 dla powłoki natryskanej z Deloro 50, natomiast najniższa dla AMI 3602–222,7 HV 0,05. Pomiary ekstremalne wystąpiły w każdej powłoce w postaci od 4 do 6 pomiarów. Najmniejszy rozrzut pomiarów zaobserwowano dla powłoki pierwszej. Ponadto w powłoce piątej występują najwyższe wartości minimalne i maksymalne wykonanych pomiarów (177,3 i 918 HV 0,05), natomiast najniższe minimalne otrzymano dla AMI 3401 (81,5 HV 0,05) i najniższe maksymalne dla AMI 3602 (344,3 HV 0,05). W badanych powłokach najmniejszy rozrzut mikrotwardości wystąpił w powłoce AMI 3602 co pokazano na wykresie. Pomiary ekstremalne stanowią w przybliżeniu 17,3% wszystkich pomiarów. Jednak ich liczba nie pozwala na stosowne opracowanie statystyczne.



Rys. 19. Wykres ramka wąsy dla pięciu badanych powłok

## 5. Podsumowanie i wnioski

Warunki natryskiwania, dobór materiałów oraz sposób przeprowadzonego procesu cięcia, niewątpliwie znacząco wpłynął na jakość mikrostruktur nietrawionych. W powłokach powstały liczne wady (szczególnie w AMI 3413 i AMI 3401) w postaci zadziorów, pęknięć, wtrąceń lub oderwania powłoki od podłoża. Trawienie zglądów ujawniło mikrostrukturę oraz obszary lameli. Fakt występowania cząstek nieprzetopionych lub przetopionych częściowo mógł wystąpić ze względu na podanie zbrzonego (połączonych ze sobą cząstek proszku) materiału proszku w obszar płomienia.

Analiza SEM-EDS materiału powłoki z AMI 3413 potwierdziła występowanie tych samych pierwiastków, które występowały w proszku do natryskiwania. W punktach 6, 8 oraz 9 w tabeli 4 mogły powstać fazy międzymetaliczne  $Ni_3Al$ , o czym świadczy skład chemiczny badanych punktów oraz warunki procesu i rodzaj proszku użytego do natryskiwania. Ze względu na brak możliwości zastosowania atmosfery ochronnej w strukturze występują również tlenki. Śladowe ilości węgla w powłoce z AMI 3413 są wynikiem nawęglenia struktury płomieniem palnika.

Najmniejszą porowatość zamkniętą (zmierzoną na powierzchni zglądu powłoki) uzyskano dla powłoki UTP EB-2002 (8,29%) zaś największą dla materiału AMI 3602 (18,5%). Rozbieżności w otrzymanych wynikach pomiarów są przyczyną głównie jakości połączenia powłoki z podłożem. W przypadku

powłoki AMI 3602 defekt występował nie tylko w postaci braku połączenia powłoki z podłożem ale też w miejscu natryskania pierwszych cząstek powłoki gdzie występowały duże pory (rys. 7).

Największą porowatość otwartą (zmierzoną na powierzchni powłoki natryskiwanej) stwierdzono dla materiałów AMI 3602 i Deloro 50 (około 40%), zaś najmniejszą dla materiału AMI 3413 (9,6%). W materiale Deloro 50 porowatość otwarta znacznie różni się od zamkniętej i rozbieżność w otrzymanych wynikach dla badanych materiałów jest największa. W materiale AMI 3602 zarówno porowatość zamknięta i otwarta miały najwyższe wskaźniki względem pozostałych badanych mikrostruktur. Występowanie tak licznych porów ogranicza zastosowanie powłoki w przemyśle. Defekty oraz wysoka porowatość może przyczynić się do szybkiego wykruszenia w warunkach eksploatacji wskutek zużycia np. zmęczeniowego lub ściernego.

Dla powłok AMI 3602 i AMI 3413 otrzymane wyniki pomiarów mikrotwardości były najmniejsze. Z wykresu ramka – wąsy można odczytać, że w powłokach występowały pomiary mikrotwardości zbliżone do 100 HV, co świadczy o wykonaniu pomiarów w miejscu porów. Najwyższe wartości pomiarów mikrotwardości otrzymano dla materiałów UTP EB–2002 i Deloro 50. Ponadto dla tych materiałów otrzymano również najwyższe wartości średnie z pomiarów. Otrzymany pomiar 918 HV w Deloro 50 może świadczyć o powstaniu węgliku chromu w powłoce. Pomiary powyżej 700 HV świadczą o powstaniu faz węglkowych z udziałem chromu. W materiale AMI 3602 mimo występowania około dwukrotnie większej ilości chromu niż w przypadku powłoki UTP EB–2002 i Deloro 50 nie powstały fazy o mikrotwardości większej niż 350 HV. W materiałach UTP EB–2002 i Deloro 50 mogły również powstać eutektyki Ni–Ni<sub>3</sub>B o czym świadczą średnie mikrotwardości otrzymane z zakresu 400–500 HV. W materiałach AMI 3401 oraz AMI 3413 obliczone średnie wartości mikrotwardości (200–300 HV) wskazują na powstanie faz NiAl i Ni<sub>3</sub>Al.

Powłoki stopowe z Ni–5%Al mogą znaleźć zastosowanie do regeneracji zużytych elementów pracujących w środowisku zasolonym (np. elementy okrętów). Wykazują się dobrymi właściwościami antykorozyjnymi. Powłoki wykonane z niklu i aluminium mogą służyć również jako warstwy podkładowe pod kolejne powłoki. Stop AMI 3602 o dużej zawartości chromu i żelaza nadaje się do aplikacji obejmujących procesy spawania gdzie występują wysokie stężenia wodoru. Ponadto materiał AMI 3602 można stosować na części cylindryczne podlegające zużyciu ściernemu, np. wały, łożyska, panewki. Powłoki wykonane z Deloro 50 oraz UTP EB–2002 gdzie występuje w ich składzie bor oraz duża zawartość chromu nadają się do aplikacji w miejscach gdzie zachodzi silne utwardzenie i wymagana jest żaroodporność. Można je stosować na łożyska, wały, łopatki mieszalników, tłoczyska i tym podobne.

## Literatura

- [1] Hejwowski T., *Nowoczesne powłoki nakładane cieplnie odporne na zużycie ściernie i erozyjne*, Politechnika Lubelska, Lublin, 2013.
- [2] Małachowska A., Winnicki M., Ambroziak A., *Perspektywy natryskiwania niskociśnieniową metodą Cold Spray*, Przegląd Spawalnictwa, vol. 84, 10/2012, s. 2–6.
- [3] Morel S., *Powłoki natryskiwane cieplnie*, Politechnika Częstochowska, 1997.
- [4] Klimpel A., Mazur M., *Podręcznik spawalnictwa*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2004.
- [5] Kawiak M., *Instrukcje do ćwiczeń laboratoryjnych z przedmiotu: inżynieria powierzchni i metody spawalnicze w inżynierii powierzchni*, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Szczecin, 2010.
- [6] Chmielewski T., *Struktura i właściwości kompozytowych powłok ochronnych wykonywaną metodą natryskiwania gazo proszkowego*, Politechnika Warszawska, Warszawa, 2003.
- [7] <http://spawalnicy.pl/edukacja/46-natryskiwanie-gazowe> (06.07.2016).
- [8] Głowacka M., *Inżynieria powierzchni. Powłoki i warstwy wierzchnie – wybrane zagadnienia*, Skrypt Politechniki Gdańskiej, Gdańsk, 2007.
- [9] Majewski D., Szala M., Hejwowski T., *Badania mikrostruktury i właściwości powłok natryskiwanych zimnym gazem COLD SPRAY*, Postępy w naukach technicznych i informatycznych oraz współczesne metody nauczania, pod red. Czyż Z., Szala M., Lublin 2016.
- [10] Małachowska A., Winnicki M., Ambroziak A., *Perspektywy natryskiwania niskociśnieniową metodą Cold Spray*, Przegląd Spawalnictwa, vol. 84, 10/2012, s. 2–6.
- [11] <https://www.arl.army.mil/www/default.cfm?page=370> (10.07.2016).
- [12] Irving B., *The HVOF process. The hottest topic in the thermal spray industry*, Welding Journal, vol. 72, 7/1993, s. 25–30.
- [13] Klimpel A., *Napawanie i natryskiwanie cieplne*, Wydawnictwo Naukowo Techniczne, Warszawa, 2000.
- [14] Ambroziak A., *Wybrane właściwości warstw natryskanych cieplnie*, Eksploatacja i Niezawodność, vol. 2/2005.
- [15] Formanek B., Szymański K., *Odporne na korozję i zużycie ściernie powłoki otrzymywane metodami natryskiwania cieplnego*, Politechnika Śląska, Ochrona przed korozją, vol. 3/2010.
- [16] Davies J. R., *Handbook of thermal spray technology*, ASM International, 2004.

## **MIKROSTRUKTURA POWŁOK NATRYSKIWANYCH METODĄ PŁOMIENIOWO – PROSZKOWĄ**

### **Streszczenie**

W pracy poruszono problematykę badania mikrostruktury powłok natryskanych cieplnie. Przedstawiono możliwości aplikacyjne powłok uzyskanych metodą natryskiwania, ich wybrane właściwości oraz sposób powstawania powłoki. Dokonano przeglądu literaturowego. Przedstawiono główne technologie natryskiwania, przybliżono ich istotę oraz pokazano nowe trendy z tego zakresu. Zaprezentowano wybrane schematy procesów oraz technologii z zakresu natrysku cieplnego. Ponadto w pracy przedstawiono właściwości pięciu różnych powłok otrzymanych metodą natryskiwania płomieniowo–proszkowego. Powłoki natryskiwano z proszków Ni–5%Al, Ni–20%Al, NiCrSiB oraz stali 316L. Opisano metodykę przygotowania złączy powłok. Wykonano badania mikroskopowe oraz przedstawiono wyniki badań mikrostruktury powłok. Określono metodą metalografii ilościowej porowatość badanych powłok, zbadano kształt porów, kształt lamelli powłoki, a także przeprowadzono badania mikrotwardości. Ponadto w pracy przedstawiono analizę statystyczną uzyskanych rezultatów oraz określono dokładność pomiarów. Otrzymane wyniki przedyskutowano i wyciągnięto wnioski. Przedstawiono możliwości aplikacyjne badanych powłok w przemyśle.

**Słowa kluczowe:** metalografia ilościowa, mikrostruktura, mikrotwardość, powłoki natryskiwane

## **MICROSTRUCTURE OF COATINGS SPRAYED BY FLAME – POWDER METHOD**

### **Abstract**

The paper presents the problems of investigating microstructure of thermal sprayed coatings. The feasibility of applications of sprayed coatings was described. The major spraying technologies were shown as well as new trends in this area. Selected diagrams of process and equipment applied in thermal spray technology were presented. Furthermore, the paper presents properties of five different coatings obtained by flame – powder spraying. Coatings were sprayed with Ni–5%Al, Ni–20% Al, NiCrSiB and 316L steel powders. The methodology of cross – sections preparation of coatings was described. Microscopic examination were done and results of investigations of the microstructure of coatings were given. Porosity of investigated coatings was determined by quantitative metallography method, pore shape and coatings lamella were examined and microhardness measurements were carried out. Furthermore, the statistical analysis of obtained results was presented. The results were discussed and conclusions were drawn. The feasibility of applications of investigated coatings in industry was shown.

**Keywords:** microhardness, microstructure, sprayed coatings, quantitative metallography