

Dr inż. Sylwester SAWICKI, prof. dr hab. inż. Henryk DYJA,  
dr hab. inż. Sebastian MRÓZ, prof. PCz., dr inż. Piotr SZOTA  
Politechnika Częstochowska, Wydział Inżynierii Procesowej, Materiałowej i Fizyki Stosowanej, Instytut Modelowania i Automatykacji Przeróbki Plastycznej, Częstochowa

# Badania doświadczalne i modelowanie numeryczne procesu walcowania żebrowanych prętów bimetalowych

## *Experimental investigation and 3D FEM modelling of the reinforcement bimetallic bar rolling process*

### Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań teoretycznych i doświadczalnych procesu walcowania w wykroju gotowym prętów żebrowanych bimetalowych. W badaniach określono wpływ kształtu materiału wyjściowego w postaci pasma owalnego o różnym udziale warstwy platerującej, na rozkład grubości warstwy platerującej w prętach żebrowanych bimetalowych walcowanych w wykroju gotowym. Teoretyczne i doświadczalne badania przeprowadzono w celu określenia grubości warstwy platerującej zapewniającej odpowiednią odporność na korozję gotowego wyrobu. Do modelowania numerycznego wykorzystano program komputerowy Forge2007®.

### Abstract

*The paper presents results of theoretical and experimental studies on the process of rolling bimetallic ribbed bars in the finishing pass. The work has determined the effect of the shape of oval preformed strip with a variable clad layer share on the distribution of clad layer thickness in bimetallic ribbed bars rolled in the finishing pass. The theoretical and experimental studies were carried out with the aim of determining the clad layer thickness that will ensure the appropriate corrosion resistance of finished product. A software application, Forge2007®, was used for numerical modeling..*

**Słowa kluczowe:** przeróbka plastyczna metali, walcowanie na gorąco, modelowanie numeryczne, pręty żebrowane, stal odporna na korozję, pręty bimetalowe

**Key words:** *plastic working of metals, hot rolling, numerical modelling, reinforcement bar, steel resistant to corrosion, bimetallic bar*

## 1. WPROWADZENIE

W ostatnich latach obserwuje się znaczny wzrost zainteresowania zastosowaniem w przemyśle budowlanym prętów żebrowanych z warstwą platerującą ze stali odpornej na korozję. Jest to spowodowane szczególnymi właściwościami tych prętów - dużą trwałością i sztywnością, wysokimi własnościami mechanicznymi oraz wysoką odpornością na korozję.

Pręty żebrowane bimetalowe mogą być wytwarzane w średnich i małych walcowniach bruzdowych z wcześniej wytworzonego bimetalowego wsadu.

## 1. INTRODUCTION

*A considerable increase in interest in using corrosion resistant steel clad ribbed bars in the construction industry has been observed in recent years. This is owing to the particular properties of these bars, namely high durability and rigidity, good mechanical properties, and high corrosion resistance.*

*Bimetallic ribbed bars can be manufactured in medium-size and small shape mills from previously produced bimetallic feedstock.*

Wytwarzanie prętów żebrowanych z warstwą zewnętrzną ze stali odpornej na korozję jest procesem skomplikowanym i wiąże się z wieloma problemami technologicznymi, z których do najważniejszych należy uzyskanie wsadu bimetalowego o właściwej wytrzymałości złącza w obszarze połączenia rdzenia z warstwą platerującą oraz zapewnienie równomiernej płynięcia plastycznego obydwu warstw bimetalu podczas procesu walcowania w walcowni bruzdowej w wykrojach wydłużających i kształtujących. Niespełnienie tych warunków może spowodować rozwarstwienie się bimetalowego pasma podczas walcowania lub powstanie innych wad, dyskwalifikujących gotowy pręt bimetalowy.

Prawidłowo zaprojektowany proces walcowania powinien zapewnić otrzymanie równomiernej grubości warstwy platerującej na obwodzie i długości pręta o odpowiedniej grubości, która nie ulegnie przerwaniu w wykroju wykańczającym. Ponadto, kształt wykroju wykańczającego powinien być tak zaprojektowany, aby nie powstawały w nim wady powierzchniowe warstwy platerującej podczas kształtowania żeber na pręcie.

Badania obejmowały badania teoretyczne i doświadczalne procesu walcowania prętów żebrowanych bimetalowych, w których rdzeń był wykonany ze stali konstrukcyjnej węglowej C45E, a warstwa platerująca ze stali odpornej na korozję X2CrNi18-10. Do wytworzenia wsadu, okrągłego pręta bimetalowego, zastosowano metodę zgrzewania wybuchowego.

Metoda ta zapewnia otrzymanie wsadu bimetalowego o wysokiej wytrzymałości i wysokich własnościach mechanicznych połączenia rdzenia i warstwy platerującej [1-3]. Walcowanie prętów żebrowanych odbywało się w walcarni laboratoryjnej dwuwalcowej D150.

## 2. MATERIAŁY UŻYTE DO BADAŃ I ICH CHARAKTERYSTYKA

Dokładność obliczeń wykonanych za pomocą programu komputerowego jest uzależniona od dokładnego określania właściwości materiałów użytych do badań.

*The manufacture of ribbed bars with an outer layer of corrosion-resistant steel is a complicated process that involves numerous technological problems, the most important of which include the obtaining of bimetallic feedstock with the adequate strength of the bond in the region of junction between the core and the clad layer, and assuring the even plastic flow of both bimetallic layers during the process of rolling in the stretching and forming passes in the Shape Mill. Failure to meet these conditions may result in a delamination of the bimetallic strip during rolling or the formation of other defects, which will disqualify the finished bimetallic bar.*

*A properly designed rolling process should ensure that a clad layer of the proper and even thickness is obtained on the perimeter and along the length of the bar, which will not break in the finishing pass. Moreover, the shape of the finishing pass should be designed in such a manner as to prevent any surface defects of the clad layer from forming in it during forming ribs on the bar.*

*Theoretical and experimental studies on the process of rolling bimetallic ribbed bars, where the core was of the constructional carbon steel C45E and the clad layer was made of the corrosion resistant steel X2CrNi18-10, were carried out within the work. To produce the feedstock, which was round bimetallic bar, the explosive welding method was used. This method ensures that bimetallic feedstock with the high strength and high mechanical properties of the joint between the core and the clad layer will be obtained [1-3]. The rolling of ribbed bars was carried out on a D150 two-high laboratory mill.*

## 2. MATERIALS USED FOR RESEARCH

*The accuracy of calculations performed by means of computer program is dependent on the accurate determination of the properties of materials used for tests.*

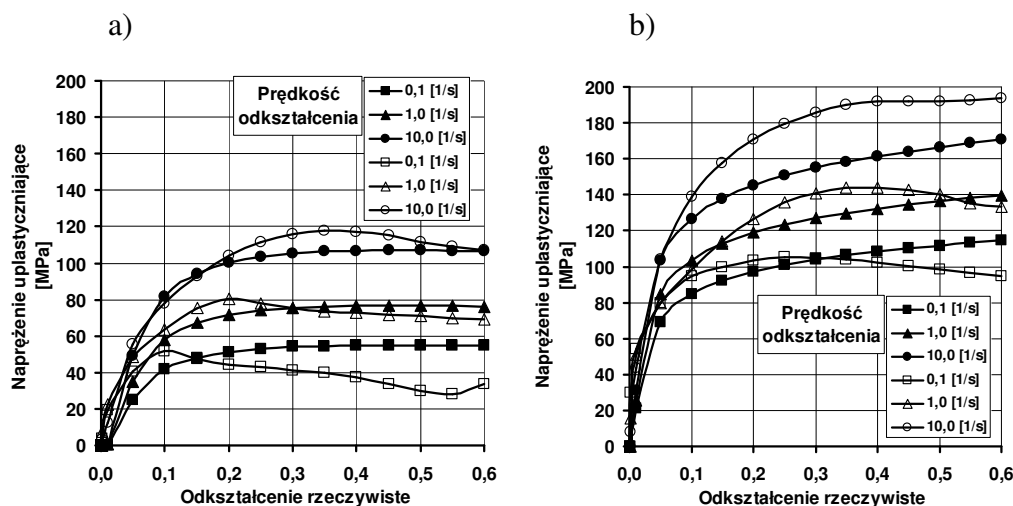
Badania plastometryczne zostały przeprowadzone na symulatorze Gleeble 3800, który znajduje się w Instytucie Modelowania i Automatykacji Procesów Przeróbki Plastycznej Politechniki Częstochowskiej, przy prędkości odkształcenia od  $0.1 \text{ s}^{-1}$ ,  $1.0 \text{ s}^{-1}$  oraz  $10 \text{ s}^{-1}$ . Skład chemiczny stali użytych do badań przedstawiono w tabelicy 1.

Przykładowe krzywe płynięcia dla stali C45E (a) oraz stali X2CrNi18-10 (b) w temperaturze  $1100 \text{ }^\circ\text{C}$  przedstawiono na rys. 1. Krzywe oznaczone znacznikami niewypełnionymi odpowiadają wynikom badań plastometrycznych, krzywe oznaczone znacznikami wypełnionymi odpowiadają wynikom aproksymacji badań plastometrycznych.

*Plastometric tests were performed on a Gleeble 3800 plastometer owned by the Institute of Modeling and Automation of Plastic Working Processes, Częstochowa University of Technology, using strain rates of  $0.1 \text{ s}^{-1}$ ,  $1.0 \text{ s}^{-1}$  and  $10 \text{ s}^{-1}$  respectively. Chemical composition of materials used for tests is given in Table 1, whereas Fig. 1 illustrates the example testing results in the form of flow curves for steel C45E and for steel X2CrNi18-10. The curves denoted with filled signs represent experimental results, the remaining curves are approximated based on experimental tests.*

Tablica 1. Skład chemiczny stali użytych do badań [%]  
Table 1. Chemical composition of materials used for tests [%]

Gatunek stali Grade of steel	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Sn
C45E	0,45	0,64	0,21	0,015	0,031	0,13	0,14	0,04	0,25	0,015
X2CrNi18-10	0,03	2,00	0,24	0,045	0,03	19,0	10,0	0,75	-	-



Rys. 1. Krzywe płynięcia dla stali C45E - a) i dla stali X2CrNi18-10 - b), dla temperatury  $1100 \text{ }^\circ\text{C}$   
Oznaczenia:  $\circ \Delta \square$  – znaczniki badań plastometrycznych,  $\bullet \blacktriangle \blacksquare$  – znaczniki wyników aproksymacji badań plastometrycznych

Fig. 1. The flow curves for: a) steel C45E and b) for steel X2CrNi18-10, for a temperature of  $1100 \text{ }^\circ\text{C}$   
Sings:  $\circ \Delta \square$  – plastometric tests,  $\bullet \blacktriangle \blacksquare$  – approximated based on experimental plastometric tests

Analizując dane przedstawione na rys. 1 można stwierdzić, że wartości naprężenia uplastyczniającego dla stali X2CrNi18-10 są znacznie większe niż dla stali C45E. Różnica ta ma znaczny wpływ na proces walcowania prętów bimetalowych w wykrojach. Wyższe wartości naprężenia uplastyczniającego w warstwie platerującej mogą wpłynąć na plastyczne płynięcie poszczególnych komponentów pręta bimetalowego w wykrojach [4, 5].

W badaniach, w celu uzyskania matematycznego związku między wartościami naprężenia uplastyczniającego  $\sigma_p$  i parametrami odkształcenia  $(T, \varepsilon, \dot{\varepsilon})$ , wyniki przeprowadzonych badań plastometrycznych aproksymowano funkcyjną zależnością zaproponowaną przez Henzel'a i Spittel'a [6]:

$$\sigma_p = A_0 \exp^{m_1 T} \varepsilon^{m_2} \dot{\varepsilon}^{m_3} \exp^{m_4 \varepsilon} \quad (1)$$

Współczynniki funkcji naprężenia uplastyczniającego  $A_0, m_1, m_2, m_3, m_4$  dla stali C45E i stali X2CrNi18-10 zamieszczono w tabelicy 2.

Tablica 2. Wartości współczynników do określania własności reologicznych badanych stali  
Table 2. Parameters of function (1) for the C45E steel and for the X2CrNi18-10 steel

Stal Steel	$A_0$	$m_1$	$m_2$	$m_3$	$m_4$
C45E	1521,3	- 0,00269	- 0,12651	0,14542	- 0,05957
X2CrNi18-10	4321,6	- 0,00305	0,10835	0,08647	- 0,01270

### 3. MODEL MATEMATYCZNY PROGRAMU FORGE 2007®

Do analizy numerycznej procesu walcowania żebrowanych prętów bimetalowych, metodą elementów skończonych, wykorzystano pakiet programowy Forge2007®. Program ten umożliwia modelowanie procesów walcowania w przestrzennym stanie odkształcenia. Do opisu modelu ośrodka odkształcanego wykorzystano prawo Nortona-Hofa [7, 8], które można wyrazić za pomocą równania (2):

$$S_{ij} = 2 K_0 (\varepsilon + \varepsilon_0)^{n_0} \cdot e^{(-\beta_0 T)} (\sqrt{3} \dot{\varepsilon})^{m_0 - 1} \dot{\varepsilon}_{ij} \quad (2)$$

When analyzing the data in Figure 1 it can be found that the yield stress values for the X2CrNi18-10 steel are much higher than for the C45E steel. This difference has a considerable influence on the process of rolling bimetallic bars in passes. The higher yield stress values in the clad layer reduce the effect of the clad layer "flowing down" from the bimetallic bar core [4, 5].

In order to obtain a mathematical relationship making the value of yield stress,  $\sigma_p$ , dependent on deformation parameters,  $(T, \varepsilon, \dot{\varepsilon})$ , the results of the performed tests were approximate to a functional relationship described by Equation (1):

$$\sigma_p = A_0 \exp^{m_1 T} \varepsilon^{m_2} \dot{\varepsilon}^{m_3} \exp^{m_4 \varepsilon} \quad (1)$$

The coefficients  $A_0, m_1, m_2, m_3, m_4$  of the C45E steel and the X2CrNi18-10 steel are given in Table 2.

### 3. MATHEMATICAL MODEL OF FORGE 2007®

For the numerical analysis of the bimetallic bars rolling process by the finite-element method, the Forge2007® software package was used. This program allows the modelling of rolling processes in a three-dimensional state of strain. The visco-plastic model of a deformed body, as defined by the Norton-Hoff law [7, 8], was applied in computation, which can be expressed with the following equation (2):

$$S_{ij} = 2 K_0 (\varepsilon + \varepsilon_0)^{n_0} \cdot e^{(-\beta_0 T)} (\sqrt{3} \dot{\varepsilon})^{m_0 - 1} \dot{\varepsilon}_{ij} \quad (2)$$

gdzie:

$S_{ij}$  – dewiator tensora naprężeń,  
 $\bar{\dot{\epsilon}}$  – intensywność prędkości odkształcenia,  
 $\dot{\epsilon}_{ij}$  – tensor prędkości odkształcenia,  
 $\bar{\epsilon}$  – intensywność odkształcenia,  
 $\epsilon_0$  – odkształcenie bazowe,  
 $T$  – temperatura,  
 $K_0, m_0, n_0, \beta_0$  – stałe materiałowe dotyczą charakterystycznych własności danego materiału.

#### 4. MODELOWANIE NUMERYCZNE I DOŚWIADCZALNA WERYFIKACJA PROCESU WALCOWANIA

Do symulacji procesu walcowania w pracy przyjęto następujące parametry początkowe: średnicę walców  $\phi 150$  mm, temperaturę walcowanego pasma bimetalowego założono jako jednorodną w całej jego objętości i równą  $1100$  °C, prędkość walcowania równą  $0,5$  m/s oraz czynnik tarcia  $0,7$ .

Warunki te dobrano tak, aby możliwe było zweryfikowanie wyników teoretycznych podczas badań eksperymentalnych w laboratorium walcownictwa Instytutu Modelowania i Automatyzacji Procesów Przeróbki Plastycznej Politechniki Częstochowskiej.

Pasmem wejściowym do analizy teoretycznej był pręt okrągły bimetalowy o średnicy  $\phi 22$  mm otrzymany w wyniku zgrzewania wybuchowego. Udział warstwy platerującej w całkowitym polu przekroju poprzecznego wsadu około  $17, 25$  i  $33\%$ .

Proces walcowania okrągłego materiału wyjściowego bimetalowego prowadzono w dwóch typach wykrojów wstępnych: owalnym płaskim i owalnym jednopromieniowym. Kształt wykrojów wstępnych zaprojektowano zgodnie z zasadami podanymi w literaturze [9, 10].

Kształt i wymiary wykroju gotowego żebrowanego zaprojektowano na podstawie norm dla gotowych prętów żebrowanych. Na rys. 2 przedstawiono kształt walców gotowych, a w tablicy 3 zamieszczono ich charakterystyczne wymiary.

where:

$S_{ij}$  – stress tensor deviator,  
 $\bar{\dot{\epsilon}}$  – strain rate intensity,  
 $\dot{\epsilon}_{ij}$  – strain rate tensor,  
 $\bar{\epsilon}$  – strain intensity,  
 $\epsilon_0$  – base strain,  
 $T$  – temperature,  
 $K_0, m_0, n_0, \beta_0$  – material constants deal with characteristic properties of a given material.

#### 4. NUMERICAL MODELLING AND EXPERIMENTAL VERIFICATION ROLLING PROCESS

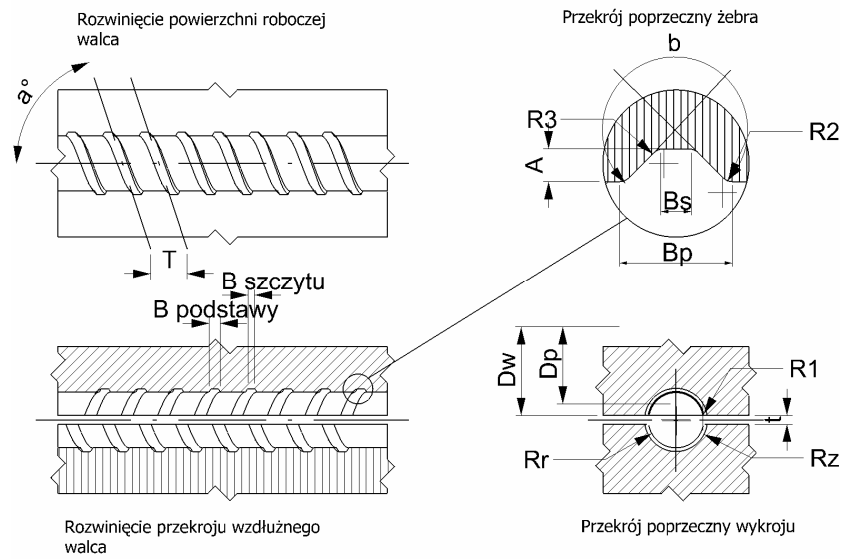
The following initial parameters were taken for rolling process simulation: a roll diameter of  $\phi 150$  mm; the temperature of rolled bimetallic strip was assumed to be uniform within the whole strip volume and equal to  $1100$  °C; the rolling speed equal to  $0.5$  m/s; and a friction factor of  $0.7$ .

These conditions were selected so that it was possible to verify the theoretical results in experimental tests in the Rolling Laboratory of the Institute for the Modelling and Automation of Plastic Working Processes, Częstochowa University of Technology.

For the experimental tests and theoretical studies, bimetallic feedstock in the form of  $\phi 22$  mm diameter round bars made by the explosive method was used, in which the share of the clad layer on the bar cross-section was approx.  $17, 25$  and  $33\%$ , respectively.

The test rolling of round bimetallic feedstock was conducted in preforming passes of two types: single-radial oval and flat oval. The shape of the preforming passes was designed in accordance with the rules, as specified in relevant literature [9, 10].

The shape and dimensions of the finishing ribbed pass were designed based on the standards for finished ribbed bars. Figure 2 shows the shape of finishing rolls, and Table 3 gives their characteristic dimensions.



Rys. 2. Fragmenty rozwiniętej powierzchni wykroju gotowego rozmieszczonego na obwodzie walca

Fig. 2. Shape and dimension of finished to rolling process of ribbed bimetallic bar

Tablica 3. Wymiary walców użytych w badaniach procesu walcowania prętów żebrowanych bimetalowych

Table 3. Dimension of ribbed finished pass

Średnica nominalna pręta <i>Nominal diameter of rod</i> $d$ [mm]	Średnica beczki walca <i>Roll diameters</i> [mm]	Ilość żeber <i>Amount of ribs</i> $N$	Średnica rdzenia <i>Rod diameters</i> [mm]	Wysokość żebra <i>Ribs height</i> $A$ [mm]	Szerokość żebra <i>Ribs widths</i> [mm]	Podziałka żeber <i>Ribs pitch (Dp)</i> $C$ [mm]	Odstęp między walcami <i>Spacing of rolls</i> $t$ [mm]	Kąt pochylenia krawędzi bocznych żebra <i>Angle of rib section</i> $\beta$ [°]	Kąt skosu żebra <i>Angle of rib inclination</i> $\alpha$ [°]	Promienie zaokrągleń <i>Rounding radius</i> [mm]		
										$R1$	$R2$	$R3$
18	$D_w=141.29$ $D_p=133.69$	42	$d1=17.2$ $d2=19.2$	1	$B_s=2.0$ $B_p=4.0$	10.0	2	90	60.96	0.5	0.7	0.6

## 5. WYNIKI OBLICZEŃ NUMERYCZNYCH

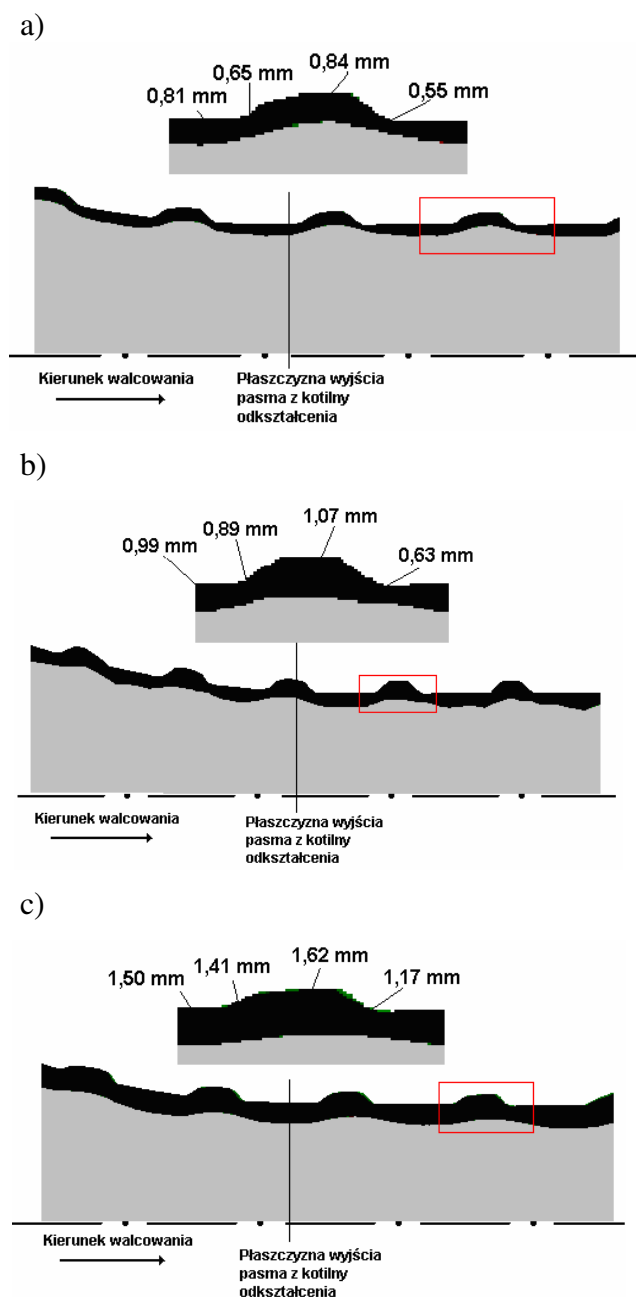
Na podstawie wyników przeprowadzonych symulacji komputerowych walcowania prętów żebrowanych bimetalowych w wykroju gotowym wyznaczono rozkłady grubości i kształtu warstwy platerującej w przekroju wzdłużnym kotliny walcowniczej.

Na rysunku 3 pokazano kształt pręta bimetalowego żebranego otrzymanego na podstawie symulacji numerycznej procesu walcowania w wykroju gotowym przy kącie pochylenia rowka na żebro w bruzdzie wykroju wynoszącego  $60^\circ$ , z wsadu o kształcie poprzecznym owalnym jednopromieniowym, z udziałem warstwy platerującej: 17,3; 25,4 i 33,1%.

## 5. RESULTS OF NUMERICAL MODELING

On the basis of the results obtained from the computer simulations of rolling bimetallic ribbed bars in the finishing pass, clad layer thickness and shape distributions on the longitudinal section of the roll gap were made.

Figure 3 shows the shape of a bimetallic ribbed bar on the longitudinal section, as obtained from the computer simulation of the process of finishing-pass rolling of transverse single-radial oval-shaped feedstock with a clad layer share of 17.3; 25.4; and 33.1%, respectively.



Rys. 3. Rozkład grubości warstwy platerującej na przekroju wzdłużnym pasma w kotlinie walcowniczej podczas walcowania prętów bimetalowych z wsadu o kształcie poprzecznym owalnym jednopromieniowym o udziale warstwy platerującej wsadu bimetalowego: a) – 17,3%; b) – 25,4%; c) – 33,1%. Badania numeryczne

Fig. 3. Distribution of layer surface thickness on the bar longitudinal section during rolling process of ribbed bimetallic bar using radius oval pass with the platter layer containing: a) 17,3%; b) 25,4%; c) 33,1%. Numerical modelling

Pręty bimetalowe o udziale warstwy zewnętrznej we wsadzie bimetalowym równej 17,3% (rys. 3a), charakteryzowały się równomiernym rozkładem warstwy platerującej na obwodzie i długości pręta. Grubość tej warstwy na odcinkach pomiędzy żebrami w gotowych prętach wynosiła średnio 0,81 mm, a przy szczycie żebra 0,84 mm. Mniejszą grubość warstwy platerującej zaobserwowano przy podstawie żeber.

*Bimetallic bars obtained from the feedstock with the clad layer share equal to 17.3% (Fig. 3a) were characterized by a uniform distribution of the clad layer in areas between ribs. The clad layer thickness in sections between ribs on finished bars averaged out at 0.81 mm, and 0.84 mm at the rib top. A smaller clad layer thickness was observed at the rib base.*

Grubość tej warstwy była różna – mniejsza od strony czołowej żebra (0,55 mm), a większa z tyłu żebra (0,65 mm).

W przypadku, gdy udział warstwy zewnętrznej we wsadzie wynosił 25,4% (rys. 3b), po walcowaniu w wykroju gotowym warstwa ta przy szczycie żebra wykazywała średnią grubość około 1,07 mm. Grubość warstwy zewnętrznej pomiędzy żebrami wynosiła 0,99 mm. Średnia grubość warstwy zewnętrznej przy podstawie żeber była różna – większa z tyłu żebra (0,89 mm), a znacznie mniejsza od strony czołowej żebra, 0,63 mm (rys. 3b).

Dla wsadu o udziale warstwy zewnętrznej 33,1% (rys. 3c) średnia grubość tej warstwy między żebrami wynosiła około 1,50 mm, natomiast przy szczycie żebra około 1,62 mm. Stwierdzono także mniejszą grubość warstwy zewnętrznej przy podstawie żeber. Od strony czołowej żebra wynosiła ona średnio 1,17 mm, z tyłu żebra była większa i wynosiła 1,41 mm.

Na rys. 4 pokazano rozkłady grubości warstwy zewnętrznej prętów bimetalowych otrzymane w wyniku symulacji numerycznych procesu walcowania prętów bimetalowych w wykroju gotowym przy kącie pochylenia rowka na zebro w bruździe wykroju  $60^\circ$  z wsadu o kształcie poprzecznym owalnym płaskim.

Dla wsadu bimetalowego o udziale warstwy zewnętrznej 17,3% (rys. 4a), grubość warstwy zewnętrznej na odcinkach pomiędzy żebrami gotowych prętów wynosiła około 0,70 mm, a przy szczycie żebra 0,81 mm. Mniejszą grubość warstwy platerującej obserwowano przy podstawie żeber. Grubość tej warstwy była różna – mniejsza od strony czołowej żebra (0,48 mm), a większa z tyłu żebra (0,58 mm).

W przypadku, gdy udział warstwy zewnętrznej w bimetalowym wsadzie wynosił 25,5% (rys. 4b), po walcowaniu w wykroju gotowym przy szczycie żebra warstwa ta posiadała grubość około 1,17 mm. Grubość warstwy zewnętrznej pomiędzy żebrami wynosiła średnio 1,08 mm. Grubość warstwy platerującej przy podstawie żeber była różna – większa z tyłu żebra (1,04 mm), a mniejsza od strony czołowej żebra (0,70 mm).

*In those locations, the layer thickness differed – on the side of the roll gap entry plane it was 0.65 mm, and on the side of the roll gap exit plane it equalled 0.55 mm.*

*In the case, where the clad layer share in the feedstock was 25.4% (Fig. 3b), after rolling in the finishing pass, the average thickness of this layer at the rib top was approx. 1.07 mm. The thickness of the clad layer between ribs was 0.99 mm. The average thickness of the clad layer at the rib base equalled, respectively: 0.63 mm and, on the other rib side, 0.89 mm (Fig. 3b).*

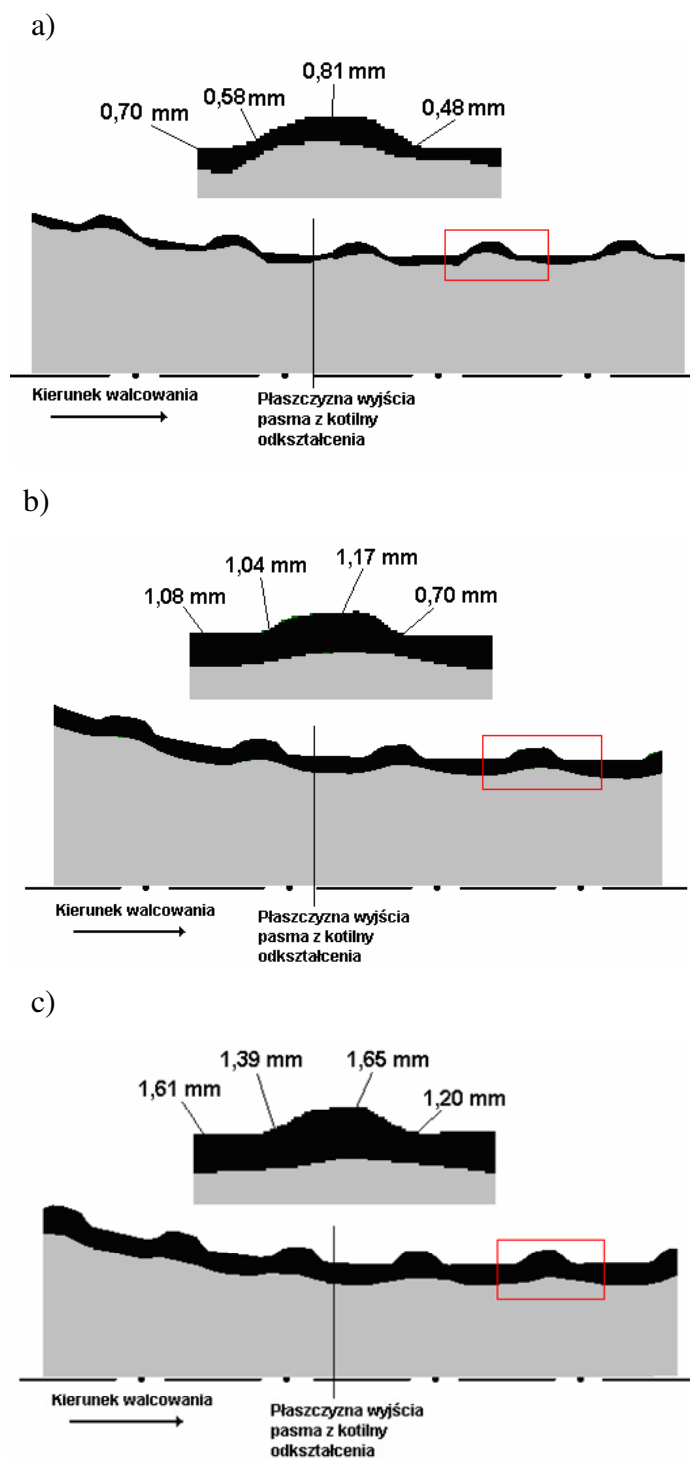
*For the feedstock with the outer layer share of 33.1% (Fig. 3c), the average outer layer thickness between ribs was approx. 1.50 mm, whereas at the rib top it was about 1.62 mm. A smaller clad layer thickness was also found at the rib base, which averaged out at 1.41 mm, and 1.17 mm on the other side of the rib.*

*Figure 4 shows distributions of bimetallic bar outer layer thickness, as obtained from the numerical simulations of the process of bimetallic bar finishing-pass rolling from flat oval feedstock.*

*In bimetallic bars with the outer layer share of 17.3% (Fig. 4a), the thickness of the clad layer in sections between the rib was about 0.70 mm, and at the rib top, 0.81 mm. A smaller clad layer thickness was observed at the rib base. The thickness of the clad layer on the rolling gap entry side was smaller, amounting to 0.48 mm, whereas the layer thickness on the other rib side was greater, being equal to 0.58 mm.*

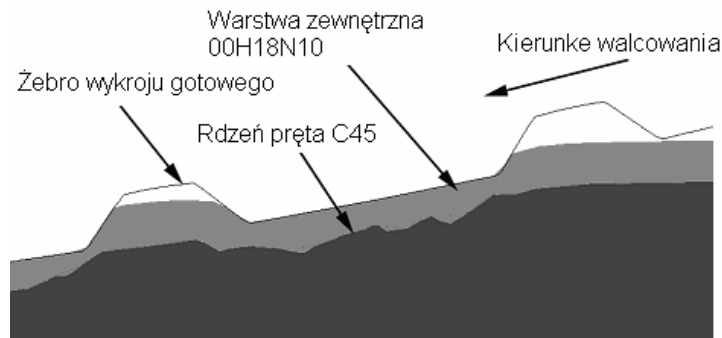
*In the case, where the clad layer share in the bimetallic feedstock was 25.5% (Fig. 4b), after rolling in the finishing pass, the thickness of this layer at the rib top was approx. 1.17 mm. The thickness of the clad layer between ribs averaged out at 1.08 mm. The thickness of the clad layer at the rib base was 0.70 mm and 1.04 mm, respectively.*





Rys. 4. Rozkład grubości warstwy platerującej na przekroju wzdłużnym pasma w kotlinie walcowniczej podczas walcowania prętów bimetalowych z wsadu o kształcie poprzecznym owalnym płaskim o grubości warstwy platerującej pręta bimetalowego: a) – 17,3%; b) – 25,5%; c) – 33,1%. Badania numeryczne

Fig. 4. Distribution of layer surface thickness on the longitudinal cross in deformation zone during bimetallic bar rolling using flat oval pass with the platter layer containing: a) 17,3%; b) 25,5%; c) 33,1%. Numerical modelling



Rys. 5. Kształtowanie żeber pręta bimetalowego w wykroju gotowym żebrowanym [10]

Fig. 5. Forming of the bimetallic round bar ribs in the finishing groove [10]

Podczas walcowania wsadu o udziale warstwy zewnętrznej 33,1% (rys. 4c) średnia grubość warstwy platerującej była mniejsza i między żebrami wynosiła około 1,61 mm, natomiast przy szczycie żebra około 1,65 mm. Przy podstawie żeber grubość warstwy zewnętrznej była jeszcze mniejsza i od strony czołowej żebra wynosiła 1,20 mm, a z tyłu żebra była większa i wynosiła średnio około 1,39 mm.

Przyczyną różnicy grubości warstwy platerującej na powierzchni pręta bimetalowego jest sposób kształtowania żebra w kotlinie walcowniczej. Na rysunku 5 pokazano kształtowanie żeber w początkowej strefie kotliny walcowniczej. Podczas walcowania owalnego wsadu bimetalowego w wykroju żebrowanym gotowym kształtowane są żebra w wyniku wypełniania bruzd wykroju. Ze względu na to, że opór plastyczny rdzenia jest duży a wolna przestrzeń występuje w bruzdzie żebra, warstwa platerująca przemieszcza się właśnie w tym kierunku, powodując zmniejszenie grubości warstwy platerującej przy podstawie żebra.

## 6. WYNIKI BADAŃ DOŚWIADCZALNYCH

W celu weryfikacji wyników analizy teoretycznej procesu walcowania prętów żebranych w wykroju gotowym przeprowadzono badania eksperymentalne w warunkach laboratoryjnych.

W wyniku walcowania pasm wstępnych owalnych w wykroju wykańczającym otrzymano pręty żebrowane bimetalowe.

*In the case of rolling bars with the clad layer share of 33.1% (Fig. 4c), the average outer layer thickness was smaller, amounting to approx. 1.61 mm between ribs, and about 1.65 mm at the rib top. The layer thickness at the rib base for this share was 1.20 mm and 1.39 mm, respectively.*

*The occurrence of differences in clad layer thickness at the rib base between the both rib sides is due to the mode of rib formation in the roll gap. Figure 5 shows the formation of ribs in the initial zone of the roll gap. During the rolling of oval bimetallic feedstock in the finished ribbed pass, the ribs are formed by filling the pass grooves. Due to the fact that the deformation resistance of the core is high, and a free space exists in the rib groove, the clad layer moves in this particular direction, causing a reduction of clad layer thickness at the rib base.*

## 6. RESULTS OF EXPERIMENTAL TESTS

*In order to verify the results of the theoretical analysis of the finished-pass ribbed bar rolling process, experimental tests were carried out in laboratory conditions.*

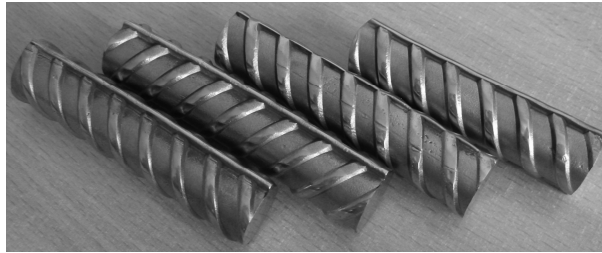
*As a result of oval preformed strip rolling in the finishing pass, bimetallic ribbed bars were obtained.*

Na rysunku 6 pokazano przykładowe kształty bimetalowych prętów żebrowanych otrzymane w procesie walcowania w walczarce laboratoryjnej D150.

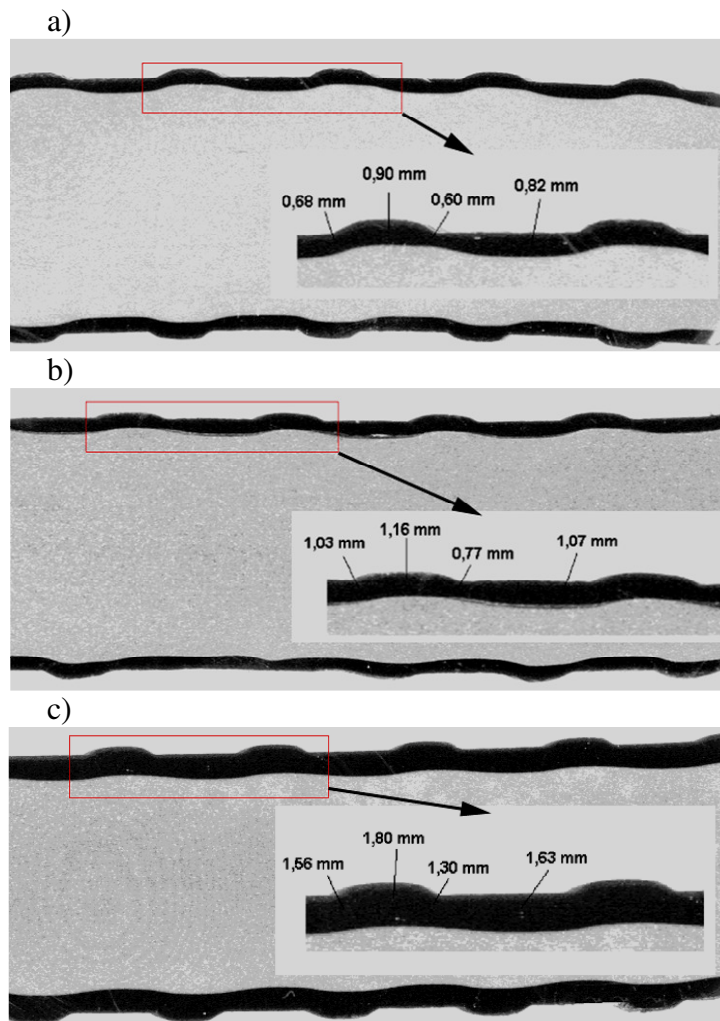
W kolejnym etapie pracy określono wpływ kształtu pasma owalnego wstępnego o różnym udziale warstwy platerującej na rozkład grubości warstwy platerującej w prętach walcowanych w wykroju gotowym.

Figure 6 shows sample shapes of bimetallic ribbed bars obtained in the process of rolling on the D150 laboratory mill.

At the next stage of the work, the effect of the shape of oval preformed strip with a different clad layer share on the distribution of clad layer thickness in bars rolled on the D150 two-high mill was determined.



Rys. 6. Bimetalowe pręty żebrowane  
Fig. 6. Bimetallic ribbed round bars



Rys. 7. Rozkład grubości warstwy platerującej na powierzchni rdzenia prętów bimetalowych otrzymanych z wsadu owalnego jednopromieniowego o udziale warstwy platerującej: a) – 16,2%; b) – 23,4%; c) – 31,7%

Fig. 7. Distribution of layer surface thickness on the bar longitudinal section during rolling process of ribbed bimetallic bar using radius oval pass with the plater layer containing: a) 16,2%; b) 23,4%; c) 31,7%

Z pasm bimetalowych po walcowaniu pobrano próbki w celu przeprowadzenia analizy grubości warstwy platerującej. Pobrane próbki przecięto wzdłużnie i wykonano zglądy. Po ich wykonaniu sporządzono obrazy cyfrowe badanych powierzchni. Na rys. 7 i 8 przedstawiono obrazy cyfrowe zglądów wykonanych na prętach bimetalowych o różnej grubości warstwy platerującej.

Na podstawie pomiarów grubości warstwy platerującej stwierdzono, że dla wsadu o udziale warstwy platerującą 16,2% (rys. 7a), grubość warstwy platerującej na odcinkach pomiędzy poszczególnymi żebrami wynosiła średnio 0,82 mm. Przy szczycie żebra warstwa ta posiadała grubość 0,90 mm, a przy podstawie żeber była zmienna. Po stronie przeciwnej do kierunku walcowania grubość warstwy platerującej przy podstawie żeber była zawsze większa i wynosiła około 0,68 mm, natomiast z drugiej strony żebra grubość warstwy była mniejsza i wynosiła około 0,60 mm.

W przypadku wsadu o udziale warstwy platerującej 23,4% (rys. 7b), warstwa platerująca na odcinkach pomiędzy żebrami na gotowych prętach miała średnią grubość 1,07 mm. Przy szczycie żebra warstwa ta była grubsza i wynosiła 1,16 mm. Przy podstawie żeber po stronie przeciwnej do kierunku walcowania grubość warstwy platerującej była równa około 1,03 mm. Z drugiej strony żebra warstwa ta była cieńsza i wynosiła średnio 0,77 mm.

W prętach żebrowanych walcowanych ze wsadu, w którym udział warstwy platerująca był równy 31,7% (rys. 7c) średnia grubość warstwy platerującej pomiędzy żebrami wynosiła około 1,63 mm. Przy szczycie żebra warstwa ta była grubsza i wynosiła 1,80 mm. Podobnie jak w poprzednich przypadkach grubość warstwy platerującej przy podstawie żeber była większa po stronie przeciwnej do kierunku walcowania i wynosiła 1,56 mm, natomiast z drugiej strony żebra jej grubość wynosiła około 1,30 mm.

Na rysunku 8 pokazano kształt użebrowania na przekroju wzdłużnym (zgodnie z kierunkiem walcowania) prętów bimetalowych otrzymanych w wyniku symulacji numerycznych procesu walcowania z wsadu owalnego płaskiego, przy kącie pochylecia żebra 60°.

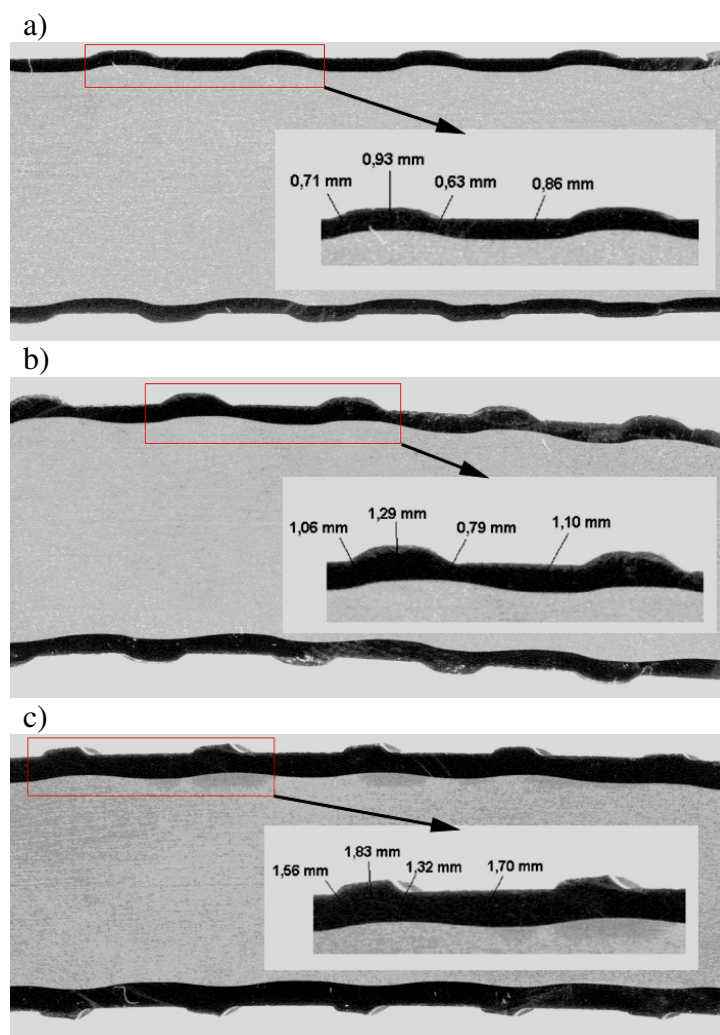
*Samples were taken from the bimetallic strips after rolling to perform the analysis of clad layer thickness. The samples taken were slit lengthwise and microsections were made. After the microsections had been prepared, digital pictures of the surfaces to be examined were made. Figures 7 and 8 show the pictures of the microsections made on bimetallic bars with a different thickness of the clad layer.*

*Measurements of the clad layer thickness found that for bars with the clad layer share of 16.2% (Fig. 7a), the thickness of the clad layer in sections between individual ribs was on average 0.82 mm. At the rib top, the layer thickness was 0.90 mm, whereas at the rib base it was variable. On the side of strip entry to the roll gap, the clad layer thickness at the rib base was always greater, amounting to about 0.68 mm, whereas on the other side of the rib the clad layer thickness was always smaller, being about 0.60 mm.*

*In the case of bars with the clad layer share of 23.4% (Fig. 7b), the clad layer in sections between ribs on finished bars had an average thickness of 1.07 mm. At the rib top, the layer was thicker, being 1.16 mm thick. At the rib base on the roll gap entry side, the clad layer thickness equalled about 1.03 mm. On the other rib side, the layer was thinner, with an average thickness of 0.77 mm.*

*In ribbed bars rolled from feedstock with the clad layer share of 31.7% (Fig. 7c), the clad layer thickness between ribs was approx. 1.63 mm. At the rib top, the layer was thicker, being 1.80 mm thick. Similarly as in the previous cases, the thickness of the clad layer at the rib base was equal to 1.56 mm, whereas on the other side of the rib it equalled approx. 1.30 mm.*

*Figure 8 shows the shape of ribbing on the longitudinal section (along the rolling direction) of bimetallic bars obtained from numerical simulations of the process of rolling flat oval feedstock.*



Rys. 8. Rozkład grubości warstwy platerującej na powierzchni rdzenia prętów bimetalowych otrzymanych z wsadu owalnego płaskiego o udziale warstwy platerującej: a) – 18,0%; b) – 23,3%; c) – 31,9%

Fig. 8. Distribution of layer surface thickness on the longitudinal cross in deformation zone during bimetallic bar rolling using flat oval pass with the platter layer containing: a) 18,0%; b) 23,3%; c) 31,9%

Podczas walcowania prętów bimetalowych z wsadu o udziale warstwy platerującej równym 18,0% (rys. 8a), grubość warstwy platerującej na odcinkach pomiędzy żebrami w gotowych prętach wynosiła średnio 0,86 mm. Przy szczycie żebra warstwa ta miała grubość 0,93 mm. Mniejszą grubość warstwy platerującej stwierdzono przy podstawie żeber. Grubość tej warstwy była różna i zależała od kierunku walcowania. Przy podstawie żeber po stronie przeciwnej do kierunku walcowania grubość warstwy platerującej wynosiła 0,71 mm. Z drugiej strony żebra grubość ta była mniejsza i wynosiła 0,63 mm.

During the rolling of bimetallic bars from feedstock with the clad layer share equal to 18.0% (Fig. 8a), the thickness of the clad layer in sections between ribs on finished bars was on average 0.86 mm. At the rib top, the layer was 0.93 mm thick. A smaller clad layer thickness was found at the rib base. The thickness of that layer was variable, depending on the rolling direction. At the rib base on the side opposite to the rolling direction, the clad layer thickness was 0.71 mm. On the other rib side, the layer thickness was smaller, being 0.63 mm.

W przypadku, gdy do walcowania zastosowano wsad o udziale warstwy platerującej 23,3% (rys. 8b), stwierdzono, że po walcowaniu grubość warstwy platerującej pomiędzy żebrami w gotowych prętach wynosiła średnio 1,10 mm. Przy szczycie żebra warstwa ta była grubsza (1,29 mm). Przy podstawie żeber, podobnie jak poprzednio, po stronie przeciwnej do kierunku walcowania grubość warstwy platerującej była mniejsza niż na szczycie i wynosiła średnio 1,06 mm. Z drugiej strony żebra była jeszcze mniejsza i wynosiła około 0,79 mm.

Dla prętów otrzymanych z wsadu o udziale warstwy platerującej 31,9% (rys. 8c) grubość warstwy platerującej pomiędzy żebrami wynosiła około 1,70 mm. Przy szczycie żebra grubość tej warstwy była większa (1,83 mm). Warstwa platerująca posiadała mniejszą grubość przy podstawie żeber. Po stronie przeciwnej do kierunku walcowania wynosiła średnio około 1,56 mm. Z drugiej strony żebra grubość ta była mniejsza i wynosiła 1,32 mm.

Na podstawie tych badań można stwierdzić, że w prętach występuje pocienienie warstwy platerującej przy podstawie żeber. Grubość tej warstwy w tych miejscach zależy od kierunku walcowania. Tak duże różnice grubości warstwy platerującej na obwodzie rdzenia są wynikiem różnego sposobu kształtowania poszczególnych żeber w kotlinie walcowniczej wykroju wykańczającego.

## 7. PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiono wyniki badań numerycznych oraz badań doświadczalnych procesu walcowania prętów żebrowanych ze stali C45E platerowanych stalą odporną na korozję X2CrNi18-10 w wykroju gotowym. Porównując proces walcowania prętów bimetalowych z wsadu o różnym udziale warstwy platerującej, przy stosowaniu różnego kształtu wykroju owalnego wstępnego, można stwierdzić, że dla wszystkich grubości warstwy platerującej otrzymano wyrób gotowy w postaci pręta żebrowanego bimetalowego bez zawałców oraz pęknięć warstwy platerującej na powierzchni pręta bimetalowego.

*In the case, where the feedstock of the clad layer share of 23.3% (Fig. 8b) was used for rolling, the clad layer thickness between ribs on finished bars was found to be 1.10 mm on average. At the rib top, the layer was thicker (1.29 mm thick). At the rib base, similarly as before, the clad layer thickness on the side opposite to the rolling direction was smaller at the top, being equal on average to 1.06 mm. On the other rib side, the layer thickness was even smaller, amounting to approx. 0.79 mm.*

*For ribs obtained from the feedstock with the clad layer share of 31.9% (Fig. 8c), the clad layer thickness between ribs was approx. 1.70 mm. At the rib top, the layer thickness was bigger (1.83 mm). The clad layer has a smaller thickness at the rib base. On the side opposite to the rolling direction, it averaged out at about 1.56 mm. On the other rib side, the layer thickness was smaller, being 1.32 mm.*

*From the experimental tests it can be concluded that a thinning of the clad layer occurs on bars at the rib base. The thickness of the clad layer in those locations depends on the rolling direction. So big differences in clad layer thickness result from the difference in the mode in which individual ribs are formed in the roll gap in the finishing pass.*

## 7. CONCLUSIONS

*The paper presents the results of numerical and experimental on the process of rolling ribbed bars from C45E steels clad with the X2CrNi18-10 corrosion-resisting steel in the finishing pass. By comparing the process of rolling bimetallic bars from feedstock with a different share of the clad layer using the oval preforming pass of different shape it could be found that, for all thicknesses of the clad layer, a finished product in the form of ribbed bimetallic bar was obtained, which was free from any laps and breaks of the clad layer on the bimetallic bar surface.*

Zastosowanie pasma owalnego płaskiego umożliwia uzyskanie podczas walcowania prętów w wykroju gotowym żebrowanym większej wysokości żeber oraz lepsze wypełnienie elementów bruzd wykroju gotowego. Do walcowania prętów żebrowanych bimetalowych nie zaleca się stosowania wykrojów wstępnych o kształcie owalnym jednopromieniowym, gdyż nie zapewniają one otrzymania gotowego wyrobu spełniającego wymagania norm w zakresie odpowiedniej dokładności wymiarowej.

*The use of oval single-radial preformed strip for the rolling of bimetallic ribbed bars is more favourable in terms of layer thickness distribution. The thickness of the clad layer is more uniform, and the reduction of the layer thickness at the rib base is smaller compared to the use of flat oval strip. The studies on the rolling of ribbed bars, which have been carried out so far, have shown that using oval single-radial strip may cause an uneven distribution of rib height on the rib perimeter and the occurrence of diminishing ribs, which is not desirable in all bar types.*

## LITERATURA/REFERENCES

- [1] Dyja H., Stradomski Z., Mróz S.: Badania obszarów złącza w dwuwarstwowych prętach wstępnie zgrzanych wybuchowo, *Archiwum nauki o materiałach*, t. 23 Nr 2, 2002, s. 165-188.
- [2] Dyja H., Mróz S., Rydz D.: Technologia i modelowanie procesów walcowania wyrobów bimetalowych. Politechnika Częstochowska, Prace Naukowe Wydziału Inżynierii Procesowej, Materiałowej i Fizyki Stosowanej, Seria: Metalurgia Nr 33, Częstochowa 2003.
- [3] Sawicki S.: Teoretyczne i doświadczalne aspekty walcowania prętów żebrowanych platerowanych stałą odporną na korozję, Praca doktorska, Politechnika Częstochowska, Częstochowa, 2009, (niepublikowana).
- [4] Mróz S., Dyja H., Milenin A.: Numeryczne modelowanie i weryfikacja doświadczalna procesu walcowania prętów bimetalowych, *Hutnik – Wiadomości Hutnicze*, Nr 5, 2004, s. 204-208.
- [5] Dyja H., Mróz S., Milenin A.: Theoretical and experimental analysis of the rolling process of bimetallic rods Cu-steel and Cu-Al, *Journal of Materials Processing Technology*, 153-154 (2004), p. 100-107.
- [6] Henzel A., Spittel T.: Rasciet energosilovykh parametrov v processakh obrabotki metallov davlenijem, *Metalurgija*, Moskva 1982.
- [7] Chenot J.L., Bellet M.: The ALE method for the numerical simulation of material forming processes. NUMIFORM'95, Balkena, Rotterdam, 1995, p. 39-48.
- [8] Chenot J.L., Bay F.: An overview of numerical modeling techniques, *J. Mat. Proc. Techn.*, vol. 80-81, 1998, p. 8-15.
- [9] Danchenko V., Dyja H., Lesik L., Mashkin L., Milenin A.: Technologia i modelowanie procesów walcowania w wykrojach, *Wydawnictwo WIPMiFS 2002*, Seria Metalurgia Nr 28, s. 395-403.
- [10] Szota P., Dyja H.: Numeryczne modelowanie procesu walcowania prętów żebrowanych bimetalowych, *Przegląd mechaniczny*, Nr 7-8, 2007, s. 44-47.