

Mgr inż. Sylwester SAWICKI, dr inż. Piotr SZOTA, dr hab. inż. Sebastian MRÓZ,
dr inż. Andrzej STEFANIK, prof. dr hab. inż. Henryk DYJA

Politechnika Częstochowska, Wydział Inżynierii Procesowej, Materiałowej i Fizyki Stosowanej, Częstochowa

Wpływ prędkości obrotowej na stan naprężeń i odkształceń prętów bimetalowych w procesie walcowania na trójwalcowej walcarni skośnej

The influence of speed rolling on the state of stress and strain of bimetallic bars in a three-high skew rolling mill process

Streszczenie

Walcowanie na trójwalcowej walcarni skośnej jest skomplikowane ze względu na złożony stan odkształcenia i naprężenia występujący w kotlinie walcowniczej. Na ten stan ma wpływ m.in. prędkość walcowania, średnica walców, temperatura pasma, kąt pochylenia osi walców, itp. Celem prowadzonych badań teoretycznych było określenie wpływu prędkości obrotowej walców na przebieg procesu walcowania na trójwalcowej walcarni skośnej oraz na stan naprężenia i odkształcenia w kotlinie walcowniczej.

Abstract

The process of rolling on a three-high reeling mill is complicated due to the complex strain and stress state prevailing in the roll gap. This state is influenced by a number of parameters, including: rolling speed, roll diameter, strip temperature, roll axis inclination angle, etc. The purpose of the theoretical studies carried out was to determine the effect of roll rotational speed on the process of rolling on the three-high reeling mill and on the strain and stress state in the roll gap.

Słowa kluczowe: walcowanie skośne, pręty bimetalowe, stal - stal odporna na korozję, MES

Key words: rotary rolling, bimetallic bars, steel - steel resistant to corrosion, FEM

1. WPROWADZENIE

Wytwarzanie prętów bimetalowych stal - stal odporna na korozję jest procesem bardzo złożonym i wiąże się z licznymi problemami technologicznymi. Trudności podczas produkcji prętów bimetalowych związane są ze sposobem wytworzenia wsadu bimetalowego, który cechowałby się odpowiednią wytrzymałością połączenia warstwy platerującej i rdzenia oraz równomierną grubością warstwy platerującej na obwodzie i długości rdzenia. Wsad bimetalowy można wykonać metodą walcowania na trójwalcowej walcarni skośnej.

Proces walcowania na trójwalcowej walcarni skośnej jest skomplikowany ze względu na złożony stan odkształcenia i naprężenia występujący w kotlinie walcowniczej. Na ten stan wpływa m.in.

1. INTRODUCTION

The production of steel – steel resistant to corrosion bimetallic ribbed bars is a relatively complex process and is associated with many technological problems. The most important of them include obtaining a bimetallic stock of proper joint strength in the region of core and cladding layer bonding, and assuring a uniform plastic flow of both bimetallic layers during the rolling process. Failure to meet the above conditions may result in a delamination of the bimetallic strip during rolling or the formation of other defects. One of the bimetallic bar manufacture methods is the rolling of bimetallic stock in a three-high skew rolling mill.

prędkość walcowania, średnica walców, temperatura pasma, kąt pochylenia osi walców, itp. [1-4].

Celem prowadzonych badań teoretycznych było określenie wpływu prędkości obrotowej walców na przebieg procesu walcowania na trójwalcowej walcierce skośnej oraz na stan naprężenia i odkształcenia w kotlinie walcowniczej.

2. BUDOWA I ZASADA DZIAŁANIA TRÓJWALCOWEJ WALCARKI SKOŚNEJ

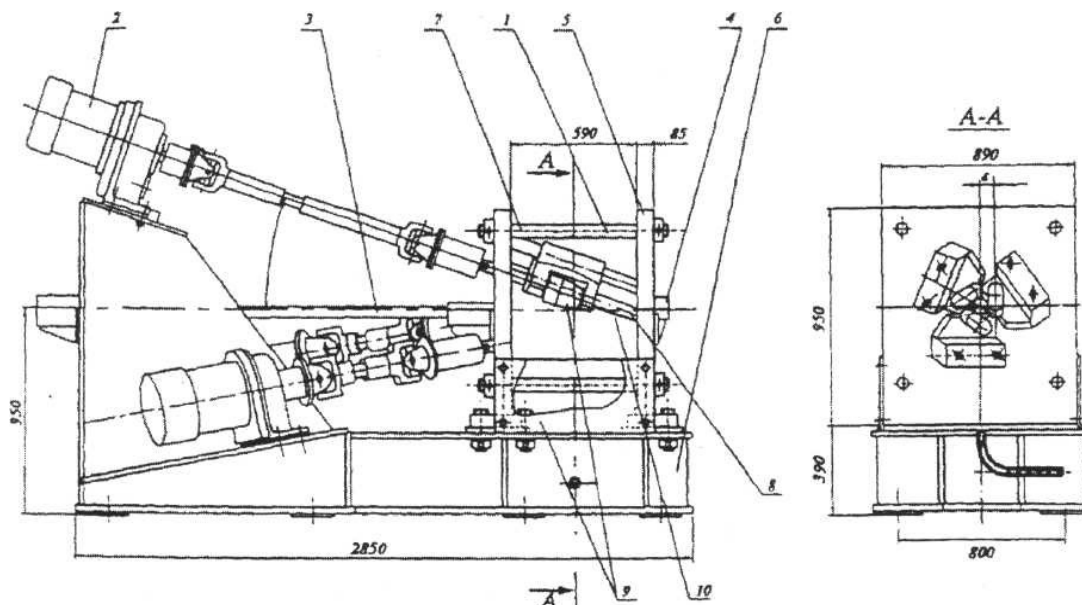
Trójwalcowa walcarka skośna (rys. 1) do walcowania prętów bimetalowych składa się z klatki roboczej (1), walców roboczych (9) napędzanych indywidualnymi silnikami głównymi (2) oraz części wejściowej (3) i części wyjściowej (4). Klatka robocza jest typu zamkniętego i składa się z dwóch stojaków ze stalowych płyt (5), zamocowanych do podstawy (6). Stojaki są równoległe usytuowane i połączone śrubami dystansowymi (7). Między stojakami zamocowane są pod kątem do osi walcowania sztywno kierujące wały oraz walce robocze, (9) które mają po dwa czopy umieszczone w łożyskach oporowych (10 zainstalowanych w kasetach (8). Mechanizm osiowego przesuwania kaset z walcami wzdłuż trzpieni oporoprowadzających zwiększa lub zmniejsza średnicę walcowanego pręta [4].

The process of rolling on a three-high reeling mill is complicated due to the complex strain and stress state prevailing in the roll gap. This state is influenced by a number of parameters, including: rolling speed, roll diameter, strip temperature, roll axis inclination angle, etc. [1-4].

The purpose of the theoretical studies carried out was to determine the effect of roll rotational speed on the process of rolling on the three-high reeling mill and on the strain and stress state in the roll gap.

2. THE THREE-HIGH SKEW ROLLING MILL

Figure 1 presents a three-high skew rolling mill.



Rys. 1. Walcarka do walcowania skośnego prętów [4]

1 - klatka robocza, 2 - silniki główne, 3 - część wejściowa, 4 - część wyjściowa, 5 - płyty stalowe, 6 - podstawa, 7 - śruby dystansowe, 8 - kasety, 9 - walce robocze, 10 - łożyska oporowe

Fig. 1. The three-high skew rolling mill [4]

1 - working stand, 2 - primary engine, 3 - entry guide, 4 - stripper guide, 5 - steel plate, 6 - base, 7 - distance screws, 8 - cassettes, 9 - working rolls, 10 - thrust bearing

3. MODELOWANIE NUMERYCZNE WALCOWANIA NA TRÓJWALCOWEJ WALCARCE SKOŚNEJ

W artykule przedstawiono wyniki przeprowadzonej teoretycznej analizy procesu walcowania wsadu (pasma) bimetalowego na trójwalcowej walcierce skośnej. Do symulacji komputerowej tego procesu wykorzystano program komputerowy Forge2005[®], który oparty jest na metodzie elementów skończonych. W programie tym założono lepkoplastyczny model odkształcanego metalu i trójosiowy stan odkształcania, natomiast stan mechaniczny odkształcanego materiału opisano za pomocą prawa Nortona-Hoffa [5].

$$S_{ij} = 2K_0 (\bar{\epsilon} + \epsilon_0)^{n_0} \cdot e^{(-\beta_0 * T)} \left(\sqrt{3} \dot{\bar{\epsilon}} \right)^{m_0 - 1} \dot{\epsilon}_{ij} \quad (1)$$

gdzie: S_{ij} – dewiator tensora naprężeń, $\dot{\bar{\epsilon}}$ – intensywność prędkości odkształcania, $\dot{\epsilon}_{ij}$ – tensor prędkości odkształcania, $\bar{\epsilon}$ – intensywność odkształcania, ϵ_0 – odkształcenie bazowe, T – temperatura, K_0 , m_0 , n_0 , β_0 – stałe materiałowe charakteryzujące własności reologiczne stali.

3.1. Model walców i pasma

Celem przeprowadzenia obliczeń numerycznych procesu walcowania prętów bimetalowych na trójwalcowej walcierce skośnej zaprojektowano w programie typu CAD trójwymiarowe modele walców i pasma. Modele te były obiektami powierzchniowymi, których powierzchnie przekształcano następnie w siatkę elementów skończonych. W programie komputerowym Forge2005[®] wykorzystuje się modele zbudowane z siatki elementów skończonych, której bazowym elementem jest trójkąt. Dla modelu narzędzi stosowana była powierzchniowa siatka trójwymiarowa, natomiast dla obiektów odkształcanych generowana była siatka przestrzenna na bazie siatki powierzchniowej. Gotowa siatka przestrzenna w odkształcanym obiekcie zbudowana jest z elementów czworosiennych, której wielkość charakteryzowana jest przez określenie średniej długości krawędzi. Opracowanie odpowiedniej siatki było ważnym elementem przygotowania symulacji komputerowej. Wielkość siatki decyduje o dokładności i szybkości prowadzonych obliczeń. Konieczne było określenie optymalnej wielkości elementów, zapewniających kompromis pomiędzy dokładnością i czasem obliczeń.

3. MATHEMATICAL MODEL USED IN THE FORGE2005[®] PROGRAM

For the numerical analysis of the rolling process by the finite-element method, the Forge2005[®] 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, was applied in computation, which can be expressed with the following equation [5]:

where: S_{ij} is the deviatoric stress tensor, $\dot{\bar{\epsilon}}$ - equivalent strain rate, $\dot{\epsilon}_{ij}$ - to strain rate tensor, $\bar{\epsilon}$ - equivalent plastic strain, ϵ_0 - base strain, T is the temperature, K_0 , m_0 , n_0 , β_0 - represent materials constants.

3.1. The rolls and strip model

For performing the numerical computation of the process of rolling bimetallic bars in the three-high reeling mill, a three-dimensional model was designed in a CAD-type program. These models were surface objects, whose surfaces were then transformed into a finite-element mesh. The computer program Forge2005[®] utilizes models built from a finite-element mesh, whose base element is a triangle. For the tool model, a three-dimensional surface mesh was used, while for the objects being deformed a spatial mesh was generated based on the surface mesh. The finished spatial mesh in the object being deformed is built from tetrahedral elements, and its size is characterized by defining the mean edge length. The development of an appropriate mesh is an important element in the preparation of computer simulation. The mesh size is decisive to the accuracy and speed of conducted computation. It is necessary to determine the optimal element size, which will be a trade-off between the accuracy and the computation time.

Walce zaprojektowano zgodnie z dostępną literaturą opisującą wykorzystanie trójwalcowej walcarki skośnej do walcowania rur bez szwu i walcowania prętów ze stopów trudno-odkształcalnych [6].

Kształt modelu walca przygotowanego w programie typu CAD przedstawiono na rysunku 2a, a wymiary w tablicy 1. Ponadto, w programie typu CAD zaprojektowano model bimetalowego pasma (rys. 2b) oraz narzędzia pomocniczego utrzymującego koniec walcowanego pasma bimetalowego w stabilnym położeniu przed kotłową walcowniczą.

Konstrukcja walca zdefiniowana jest przez następujące wymiary: $D1$ - średnica części roboczej, $D2$ - średnica części kalibrującej, α - kąt pochylenia beczki walca, β - kąt pochylenia osi walca, $L1$ - długość części roboczej walca, $L2$ - długość części kalibrującej walca, $R1$ - promień zaokrąglenia części roboczej walca, $R2$ - promień zaokrąglenia części kalibrującej walca.

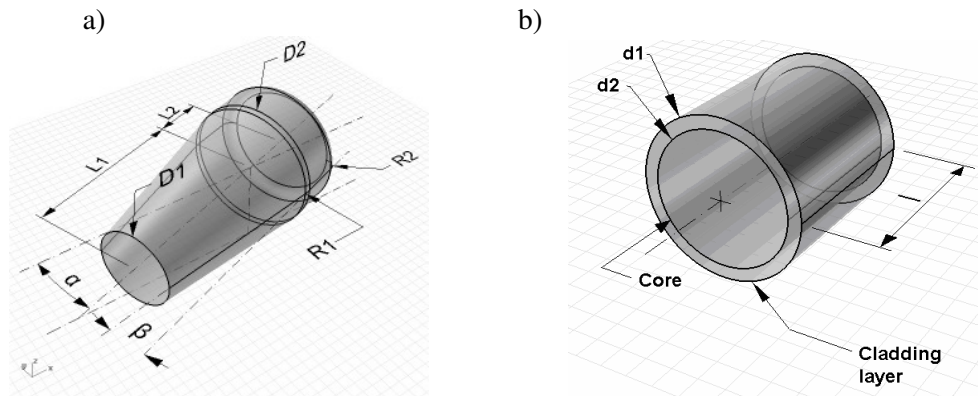
Przygotowane modele narzędzi roboczych i wsadu bimetalowego zestawiono następnie wg schematu zgodnie z przyjętymi warunkami walcowania (rys. 3).

The rolls were designed based on available literature describing the use of the three-high reeling mill for rolling seamless tubes and rolling bars from hard-deformable alloys [6].

The shape of the roll model prepared in the CAD program is shown in figure 2a and the dimensions are given in Table 1, figure 2b shows the shape of the round bimetallic stock. Moreover, the model of bimetallic strip and the auxiliary tool holding the rolled bimetallic strip end in a stable position before the roll gap was also designed in the CAP program.

The roll construction is defined by the following dimensions: $D1$ – working part diameter, $D2$ – sizing part diameter, α – roll face inclination angle, β – roll axis inclination angle, $L1$ – roll working part length, $L2$ – roll sizing part length, $R1$ – roll working part rounding radius, $R2$ – roll sizing part rounding radius.

The prepared working tool and bimetallic stock models were then arranged according to the adopted rolling conditions (Fig. 3).



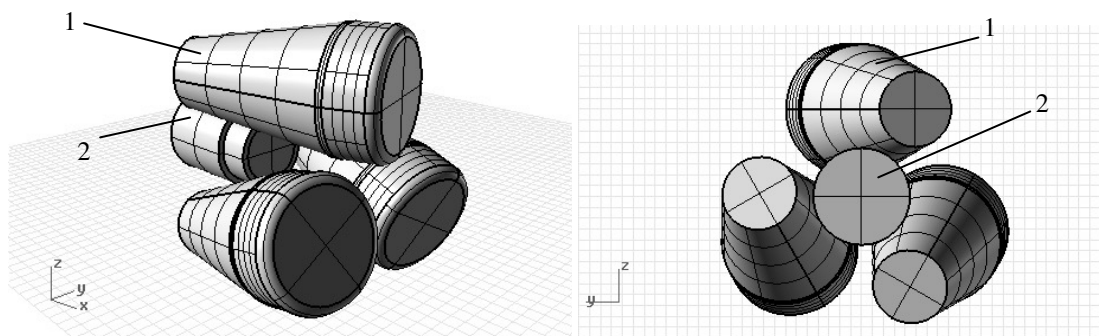
Rys. 2. Model i kształt utworzony w programie CAD: a) walec trójwalcowej walcarki skośnej, b) wsad bimetalowy

Fig. 2. A model created in the CAD program: a) a three-high reeling mill roll, b) bimetallic stock

Tablica 1. Wymiary konstrukcyjne walców roboczych trójwalcowej walcarki skośnej

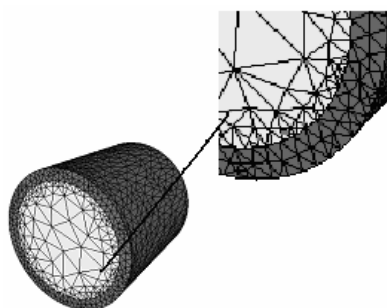
Table 1. The constructional dimensions of the three-high reeling mill working rolls

D1 [mm]	D2 [mm]	α [°]	β [°]	L1 [mm]	L2 [mm]	R1 [mm]	R2 [mm]
74.7	100	9	18	80	25	20	5



Rys. 3. Modele walców i pasma bimetaleowego; 1 – walec; 2 – pasmo bimetaleowe

Fig. 3. The roll and bimetallic strip models; 1 – roll; 2 – bimetallic stock



Rys. 4. Siatka elementów skończonych wygenerowana na powierzchni pasma bimetaleowego

Fig. 4. A finite-element mesh generated on the bimetallic strip surface

Następnym etapem procesu symulacji komputerowej była operacja generowania trójkątnej siatki elementów skończonych na powierzchniach obiektu. Program Forge2005[®] umożliwia zagęszczenie siatki np. na narożach, na zaokrągleniach, w miejscach o skomplikowanym kształcie i małych wymiarach poprzez definicję stref zagęszczenia siatki nazywanych *mesh-box*'ami.

Na rysunku 4 pokazano trójkątną siatkę powierzchniową wsadu.

Pomiędzy poszczególnymi warstwami walcowanego pręta przyjęto model tarcia *bilateral*. Warstwy te nie miały możliwości wzajemnego przemieszczania się pomiędzy sobą. Zastosowanie takiego modelu tarcia spowodowało, że pręt był traktowany jako jednorodny.

3.2. Warunki brzegowe procesu walcowania prętów bimetaleowych w trójwalcowej walcarce skośnej

Symulację procesu walcowania w trójwalcowej walcarce skośnej prowadzono przy następujących parametrach początkowych: temperatura wsadu bimetaleowego - 1000°C (założono jednorodny rozkład temperatury na przekroju poprzecznym i długości wsadu), prędkość obrotowa walców 100 obr/min (wariant I) i 200 obr/min (wariant II), średnica walców $\phi 60$ mm, czynnik tarcia 0,8.

The next stage in the creation of objects for computer simulations is the operation of generating a triangular finite-element mesh on the object surfaces. The Forge2005[®] program enables the mesh to be condensed on quoin, rounding and places with a complicated shape and a small size by defining mesh condensing zones called *mesh boxes*.

Figure 4 shows the triangular surface mesh of the working roll and stock surface.

As the bilateral friction model was adopted between the particular layers of the bar being rolled, these layers had no possibility of mutual displacement between one another. The application of this friction model caused the bar to be treated as being homogeneous.

3.2. Boundary conditions for the process of rolling bimetallic bars in the three-high reeling mill

It was assumed in numerical modelling that the bar core was made of steel C45, while the cladding layer was of steel 00H18N10. The mill feedstock was composed of a tube of a diameter of 38 mm and a wall thickness of 4 mm and a 30 mm-diameter round bar. The following initial conditions were taken for numerical studies: feedstock temperature: 1000 °C, tool temperature: 60 °C, roll rotations: Variant I - 100 rpm, roll rota-

Współczynnik przewodności cieplnej pomiędzy komponentami bimetalu przyjęto taki sam jak dla wymiany ciepła pomiędzy pasmem a walcami - 20000 W/(K·m²).

4. WYNIKI BADAŃ

W artykule przedstawiono wyniki przeprowadzonej analizy wpływu prędkości obrotowej walców na stabilność procesu walcowania oraz na rozkład naprężeń i odkształceń w kotlinie walcowniczej.

W wyniku przeprowadzonych symulacji komputerowych stwierdzono, że proces walcowania wg I wariantu przebiegał stabilnie z niewielkim poślizgiem pomiędzy walcami a pasmem. Odwalcowano całą długość wsadu bimetalewego. Otrzymano bimetalewy pręt o średnicy końcowej równej $\phi 20$ mm.

Zastosowanie II wariantu spowodowało niestabilny przebieg procesu walcowania, wystąpił znaczny poślizg pomiędzy walcami a pasmem, co spowodowało przerwanie ciągłości procesu walcowania.

Na rysunku 5 przedstawiono rozkład składowej prędkości płynięcia wsadu bimetalewego w kierunku walcowania dla analizowanych wariantów.

Porównując obydwa warianty walcowania można stwierdzić, że proces walcowania wg wariantu I przebiegał bez udziału narzędzia centrującego (tzn. w ustalonym procesie walcowania narzędzie centrujące nie dociskało wsadu), (rys. 5a). Walcowanie wg wariantu II, w początkowym etapie przebiegało bez udziału narzędzia centrującego. Podczas przemieszczania się pasma wzdłuż kotliny walcowniczej nastąpił wzrost oporu plastycznego metalu, powodując zatrzymanie odkształcanego pasma w środkowej części kotliny walcowniczej. Na skutek występowania nieustalonych warunków na styku walców z pasmem nastąpiło wypychanie bimetalewego pasma z kotliny walcowniczej. Świadczy o tym otrzymany rozkład prędkości płynięcia metalu w kierunku walcowania (rys. 5b). Wartości prędkości płynięcia były ujemne, dlatego pasmo przemieszczało się w przeciwną stronę w stosunku do kierunku walcowania. Podczas kolejnej fazy procesu walcowania narzędzie centrujące zaczęło dociskać walcowane pasmo (rys. 5b), stąd też proces walcowania przebiegał z udziałem narzędzia centrującego, (symulacja komputerowa została przerwana).

tions: Variant II - 200 rpm, roll diameter: 60 mm, friction factor: 0.8 and thermal conductivity: 20000 W/m·K.

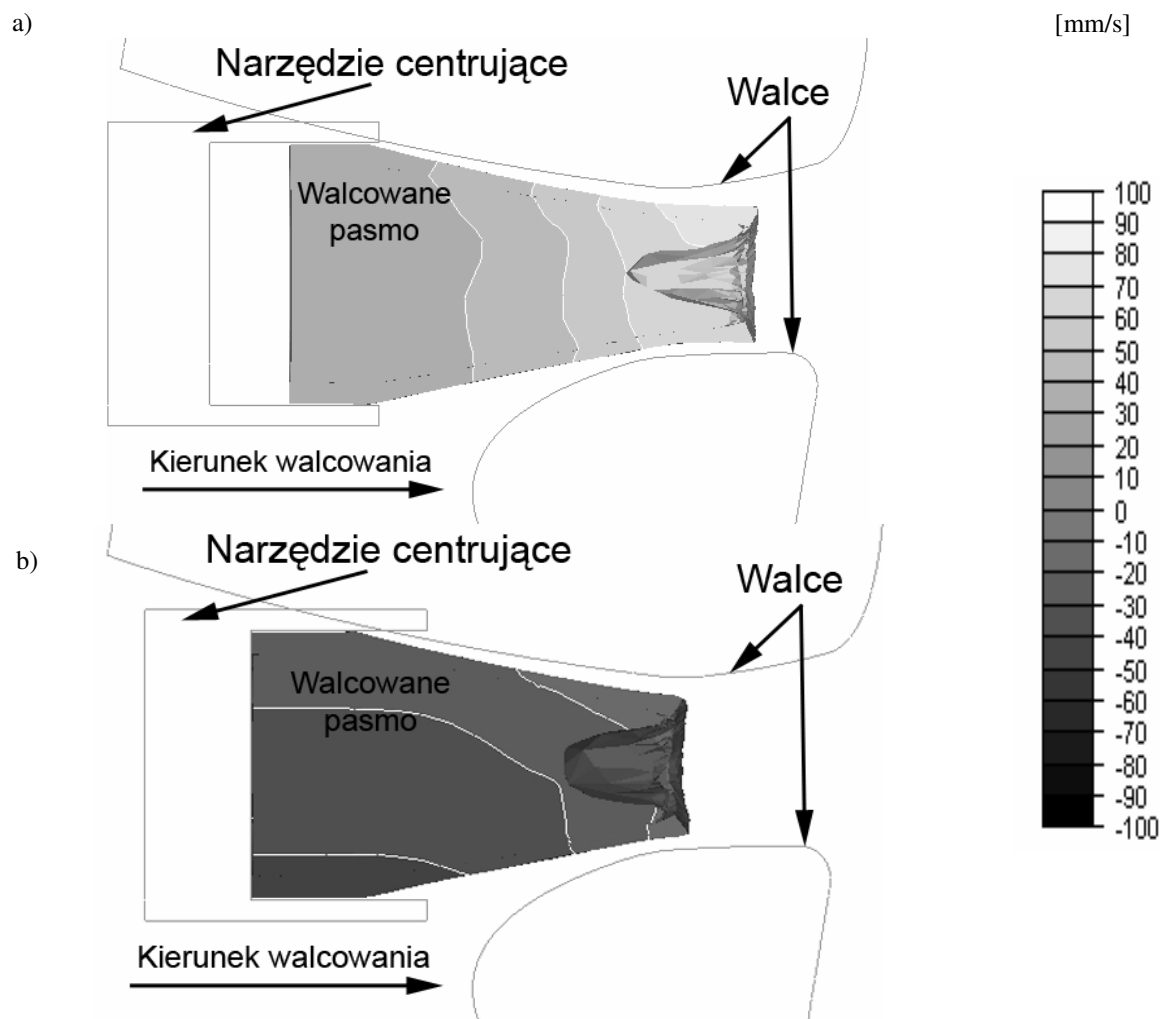
4. RESULTS OF NUMERICAL MODELLING

From the performed computer simulations it was found that the process of rolling according to Variant I progressed stably with a minor slip between the rolls and the strip. The whole length of the bimetallic feedstock was rolled out, as a result of which a bimetallic bar of a final diameter of 20 mm was obtained.

The application of Variant II caused an unstable run of the rolling process, a substantial slip occurred between the rolls and the strip, which broke the continuity of the rolling process.

Figure 5 shows a distribution of the component of the velocity of bimetallic feedstock flow in the rolling direction for the variants analyzed.

When comparing both variants it can be found that the process of rolling according to Variant I ran without the involvement of the centring tool (i.e., in the steady rolling process, the centring tool did not press down on the feedstock), as shown in Figure 5a. Rolling according to Variant II, in its initial stage, progressed without the involvement of the centring tool. As the strip moved along the roll gap, an increase in the deformation resistance of metal occurred, causing the strip being deformed to stop in the middle part of the roll gap. The nonstationary conditions occurring at the contact between the rolls and the strip resulted in pushing the bimetallic strip out of the roll gap. This is indicated by the obtained distribution of the velocity of metal flow in the rolling direction, as shown in Figure 5b. The flow velocity values were negative, therefore the strip moved in the direction opposite to the rolling direction. In the subsequent phase of the rolling process, the centring tool started to press on the strip being rolled (Fig. 5b), hence the rolling process ran with the involvement of the centring tool (the computer simulation was aborted).



Rys. 5. Rozkład prędkości płynięcia metalu w kierunku walcowania na przekroju wzdłużnym:
a) wariant I, b) wariant II

Fig. 5. Distribution of the velocity of metal flow in the rolling direction in the longitudinal section:
a) Variant I, b) Variant II

Przyczyną poślizgu pomiędzy walcami a pasmem i przyczyną przerwania ciągłości procesu była większa prędkość obrotowa walców. Zwiększenie prędkości obrotowej walców ze 100 do 200 obr/min (przy niezmiennych pozostałych parametrach procesu) spowodowało wzrost prędkości odkształcenia w walcowanym pasmie z ok. 12 do ok. 20 s^{-1} . Taki wzrost prędkości odkształcenia znacznie wpływa na wartość naprężenia. Przyrost wartości naprężeń powoduje wzrost oporu plastycznego i w konsekwencji poślizg walców. Takie warunki odkształcenia sprzyjają powstawaniu efektu „trójkątowania” okrągłego pasma w kotlinie odkształcenia, co niekorzystnie wpływa na proces walcownia (w skrajnych przypadkach efekt ten uniemożliwia dalsze walcowanie) [6].

The cause of the slip between the rolls and the strip and the cause of the breaking of process continuity was the increased rotational speed of the rolls. Increasing roll rotational speed from 100 to 200 rpm (with the remaining process parameters unchanged) caused an increase in strain rate in the strip being rolled from approx. 12 to approx. 20 s^{-1} . Such an increase in strain rate substantially influences the stress magnitude. The increment in the magnitude of stress causes an increase in deformation resistance and, as a consequence, a roll slip. Such deformation conditions favour the occurrence of the effect of round strip triangulation in the deformation zone, which adversely influences the rolling process (in extreme cases, this effect makes further rolling impossible).

W początkowym etapie procesu walcowania na powierzchni czołowej wsadu obserwuje się intensywny efekt „spływanie” warstw przypowierzchniowych metalu z rdzenia. W wyniku tego, na powierzchni czołowej, wewnątrz bimetalowego pasma tworzy się pustka (rys. 5).

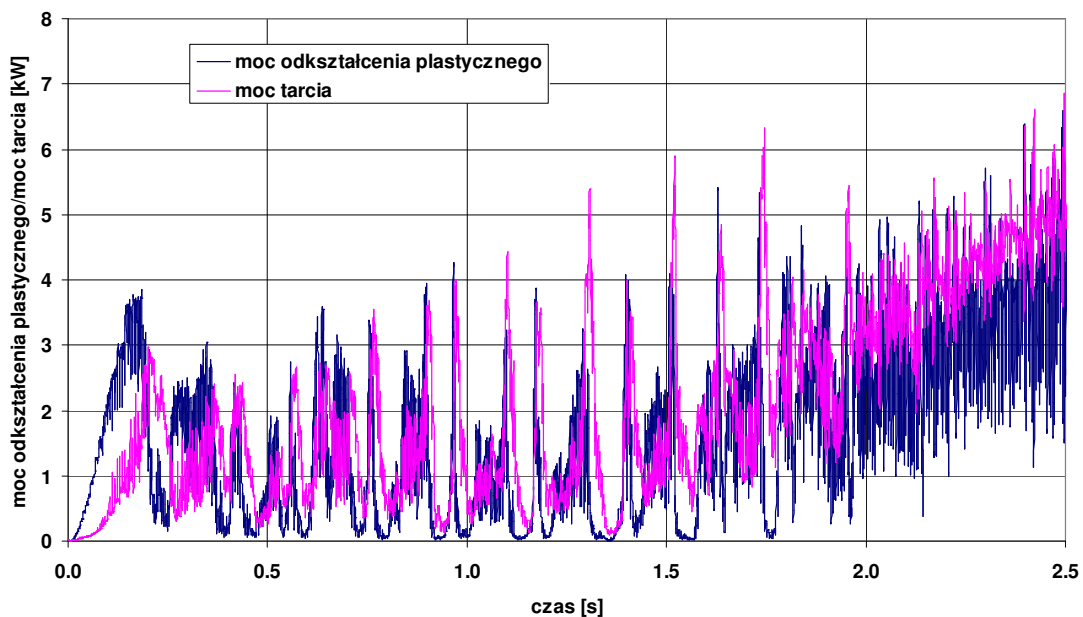
W celu lepszego zobrazowania zjawisk zachodzących w symulacjach, dla których nastąpił chwyt pasma przez walce (wariant I – rys. 6) i symulacji, w której nie wystąpił chwyt metalu przez walce (wariant II – rys. 7) porównano rozkłady mocy potrzebnej na pokonanie oporów tarcia i mocy potrzebnej na wykonanie odkształcenia plastycznego dla obu wariantów.

Analizując otrzymane wyniki badań stwierdzono, że zarówno dla wariantu I, jak również dla wariantu II, w początkowym okresie walcowania moc potrzebna na odkształcenie jest większa od mocy potrzebnej na pokonanie oporów tarcia. Wynika to z faktu, że pasmo jest „wpychane” w kotlinę odkształcenia przez narzędzie pomocnicze. W miarę przemieszczania się pasma przez kotlinę odkształcenia coraz większa powierzchnia pasma ma kontakt z walcami, co powoduje jego szybsze przemieszczanie się w kierunku walcowania, aż do ustalonego procesu. Dla tego etapu rozkład mocy odkształcenia i mocy tarcia mają bardzo zróżnicowany przebieg i wartość mocy odkształcenia plastycznego jest nieznacznie mniejsza od mocy tarcia. Natomiast dla ustalonego procesu walcowania zaobserwowano równomierny rozkład poszczególnych składowych mocy.

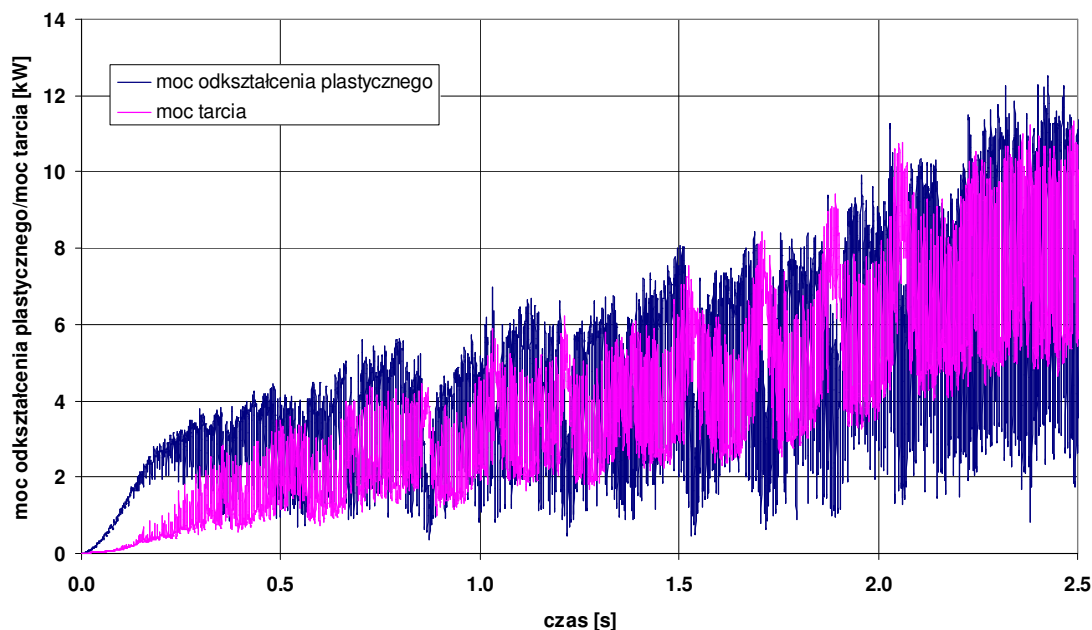
At the initial stage of the rolling process, the effect of intensive "flowing off" of the surface layers of metal from the core is observed on the frontal feedstock surface. As a result, a void forms on the frontal surface inside the bimetallic strip.

To better illustrate the phenomena occurring in the simulations, for which the roll bite of the strip occurred (Variant I – Fig. 6), and in the simulation, in which there was no roll bite of the strip (Variant II – Fig. 7), the distributions of power needed for overcoming the friction resistances and of power needed for performing plastic deformation were compared for both simulations.

By analyzing the obtained testing results (Figures 6÷7) it was found that both for Variant I, as well as for Variant II, in the initial phase of rolling, the power needed for deformation was greater than the power needed for overcoming the friction resistances. This results from the fact that the strip is being "pushed" into the deformation zone by the auxiliary tool. As the strip moves through the deformation zone, an increasingly larger strip area has contact with the rolls, which causes the strip to move faster in the rolling direction until a steady process is attained. For this stage, the distribution of deformation power and the distribution of friction power have a very uneven behaviour, and the magnitude of plastic deformation power is slightly lower than that of friction power. For a steady rolling process, on the other hand, an even distribution of particular power components was observed.



Rys. 6. Porównanie mocy odkształcenia plastycznego i mocy tarcia dla wariantu I – brak chwytu pasma przez walce
Fig. 6. Comparison of the plastic deformation power and the friction power, as obtained for Variant I – not roll bite of the strip



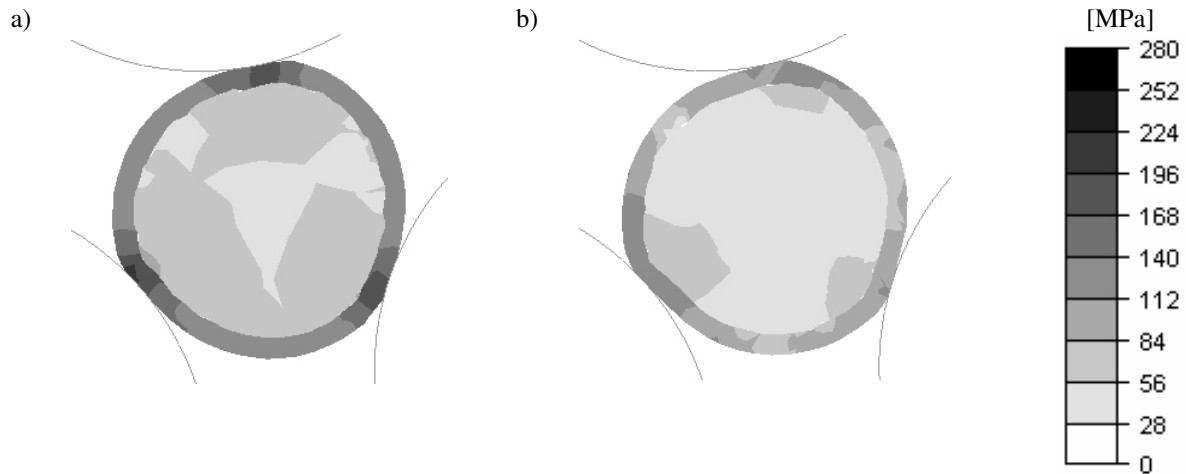
Rys. 7. Porównanie mocy odkształcenia plastycznego i mocy tarcia dla wariantu II – chwyt pasma przez walce
 Fig. 7. Comparison of the plastic deformation power and the friction power, as obtained for Variant II – a roll bite of the strip

Otrzymana wartość mocy potrzebna na odkształcenie plastyczne ma zbliżoną wartość do wartości otrzymanej dla mocy tarcia. Natomiast analizując wyniki otrzymane dla wariantu II stwierdzono, że w miarę przemieszczania się pasma przez kotłnię odkształcenia podobnie jak w wariacie I rozkład mocy odkształcenia i mocy tarcia mają bardzo nierównomierny przebieg, ale moc tarcia przyjmuje większe wartości od mocy odkształcenia. Dla ustalonego procesu walcowania moc odkształcenia jest większa od mocy tarcia. Wynika to z faktu, że pręt bimetalowy jest przepychany przez kotłnię odkształcenia za pomocą narzędzia, które miało na celu wstępne dosunięcie pasma do walców. Prędkość liniowa narzędzia dopychającego jest znacznie mniejsza od prędkości walcowania. Dlatego w prawidłowej symulacji narzędzie to po dosunięciu wsadu do walców roboczych powinno oddzielić się. Natomiast walcowanie według wariantu II, w którym nie nastąpił chwyt pasma przez walce narzędzie to wpycha pasmo do kotłni odkształcenia.

W pracy przeprowadzono także analizę rozkładu intensywności naprężenia i odkształcenia. Na rysunkach 8 i 9 pokazano przykładowe rozkłady intensywności naprężenia (rys. 8) oraz intensywności odkształcenia (rys. 9) na przekrojach poprzecznych walcowanego pasma wykonanych w połowie długości kotłni walcowniczej.

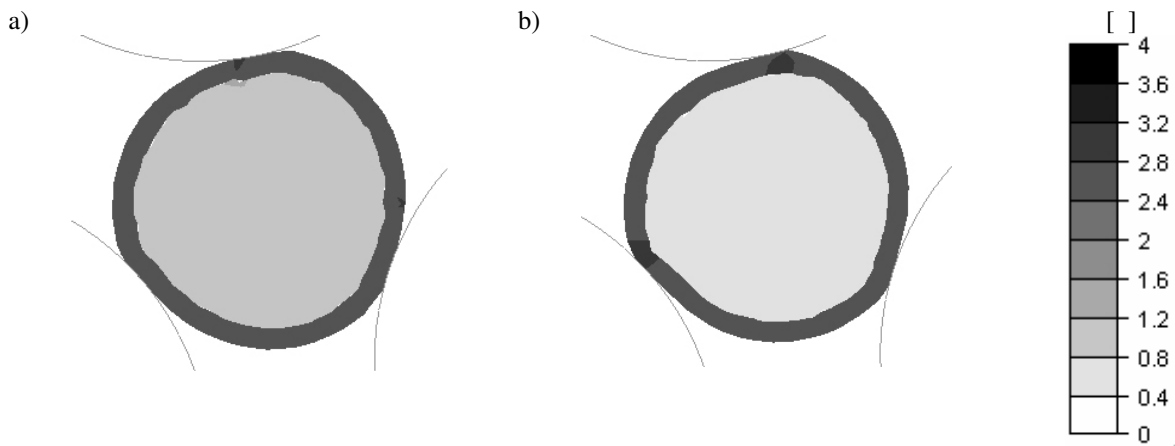
The obtained magnitude of power needed for plastic deformation has a value similar to the value obtained for friction power. By contrast, when analyzing the results obtained for Variant II it was found that as the strip moved through the deformation zone, similarly as in Variant I, the distribution of deformation power and the distribution of friction power had a very uneven pattern, but the friction power took on values greater than those of the deformation power. For a steady rolling process, the deformation power is greater than the friction power. This is due to the fact that the bimetallic bar is pushed through the deformation zone by the tool, whose purpose was to initially push the strip closer to the rolls. The linear velocity of the pushing tool is much lower than the rolling speed. Therefore, in a correct simulation, this tool, after the feedstock has been pushed to the working rolls and then bitten by them, should not separate. Whereas, in rolling according to Variant II, where no roll bite of the strip has occurred, this tool pushes the strip into the deformation zone.

The analysis of the distribution of stress intensity and strain intensity has also been performed within the work. Figures 8 and 9 shows examples of the distributions of stress intensity and strain intensity on the cross-sections of rolled strip, made in the mid-length of the roll gap.



Rys. 8. Rozkład intensywności naprężenia na przekroju poprzecznym walcowanego pasma bimetalowego:
a) wariant I, b) wariant II

*Fig. 8. Distribution of stress intensities in the cross-sections of the bimetallic strip:
a) Variant I, b) Variant II*



Rys. 9. Rozkład intensywności odkształcenia na przekroju poprzecznym walcowanego pasma bimetalowego:
a) wariant I, b) wariant II

*Fig. 9. Distribution of strain intensities in the cross-sections of the bimetallic strip:
a) Variant I, b) Variant II*

Otrzymane wartości intensywności naprężenia podczas walcowania wg wariantu I były wyższe o ok. 25 MPa w porównaniu do wartości otrzymanych w wariantcie II. Podczas walcowania wg wariantu I zaobserwowano również wyższe wartości intensywności odkształcenia. Niższe wartości intensywności naprężenia i odkształcenia podczas walcowania wg wariantu II świadczą o występowaniu poślizgu pomiędzy walcami a pasmem, który mógł być spowodowany niekorzystnymi warunkami odkształcania. W miejscach styku walców z metalem występowały lokalne odkształcenia o wyższych wartościach, co spowodowało efekt „trójkątowania”.

The obtained values of stress intensity during rolling acc. to Variant I were higher by approx. 25 MPa compared to the values obtained in Variant II. During rolling acc. to Variant I, higher values of strain intensity were also observed. The lower values of stress and strain intensities in rolling acc. to Variant II are also indicative of the occurrence of a slip between the rolls and the strip, which might have been caused by unfavourable deformation conditions. In the locations of contact of the rolls with the metal, local strains of higher magnitudes occurred, which caused a triangulation effect.

5. PODSUMOWANIE

Na podstawie przeprowadzonych badań numerycznych procesu walcowania na trójwalcowej walcierce skośnej można stwierdzić:

1) prędkość obrotowa walców istotnie wpływa na stabilność (ciągłość) prowadzonego procesu,

2) warunki odkształcenia panujące w kotlinie walcowniczej są najkorzystniejsze podczas walcowania z prędkością obrotową walców równą 100 obr./min.,

3) zastosowanie programu komputerowego Forge2005[®] umożliwiło wyznaczenie prędkości obrotowej walców pozwalającej na prawidłowe przeprowadzenie procesu walcowania prętów bimetalowych na trójwalcowej walcierce skośnej.

Praca została wykonana w ramach projektu badawczego rozwojowego Nr R07 022 02 finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

5. CONCLUSIONS

On the basis of the performed numerical studies of the process of rolling on the three-high reeling mill it can be stated that the rotational speed of rolls substantially influences the stability (continuity) of the process being run.

The deformation conditions prevailing in the roll gap are more favourable during rolling at a roll rotational speed of 100 rpm.

The use of the computer program Forge2005[®] has made it possible to determine the roll rotational speed that allows the process of rolling bi-metallic bars on the three-high reeling mill to be correctly carried out.

Acknowledgement

Research work was supported by The Ministry of National Education as project no. R07 022 02.

LITERATURA/REFERENCES

- [1] Nakasuji K., Maruda K., Hayashi C.: Development of Manufacturing Process of Clad Bar by Rotary Rolling, ISIJ International, Vol. 37, 1997, No. 9, 899-905.
- [2] Dyja H., Mróz S., Rydz D.: Technologia i modelowanie procesów walcowania wyrobów bimetalowych. Wydawnictwo WIPMiFS Politechniki Częstochowskiej 2003, Seria Metalurgia Nr 33.
- [3] Mróz S.: Teoretyczno-doświadczalna analiza procesu walcowania bimetalowych prętów, Praca doktorska, Politechnika Częstochowska 2002.
- [4] Galkin S.P., Dyja H., Galkin A.M., Rząsowska A.: Kinematyczny model płynięcia metalu podczas walcowania skośnego prętów, Hutnik - Wiadomości Hutnicze Nr 12, 2004, s. 589-593.
- [5] FORGE3[®] Reference Guide Release 6.2, Sophia-Antipolis, November 2005.
- [6] Kazanecki J.: Wytwarzanie rur bez szwu, Kraków 2003.