Mgr inż. Piotr ŻOŁNIK, prof. dr hab. inż. Zbigniew PATER
Politechnika Lubelska, Wydział Mechaniczny, Lublin

Analiza numeryczna procesu walcowania poprzecznego gwintu śruby M20x2,5 metodą styczną

Numerical analysis of tangential rolling of an M20x2.5 screw thread

Streszczenie
W artykule podano wybrane wyniki analizy numerycznej procesu walcowania poprzecznego gwintu śruby ze stali gatunku C45. Obliczenia wykonano metodą elementów skończonych w warunkach przestrzennego stanu odkształcenia (3D) oraz w warunkach osiowo-symetrycznego stanu odkształcenia (2D), przy uwzględnieniu zjawisk cieplnych zachodzących podczas kształtowania. W artykule przedstawiono zmianę kształtu śruby w czasie walcowania, mapy odkształceń, naprężeń i temperatur oraz rozkłady składowych siły walcowania. Uzyskane rezultaty z obliczeń wykazały przydatność wykorzystania MES w warunkach przestrzennego stanu odkształcenia (model 3D) do analizy złożonego procesu kształtowania plastycznego metodą walcowania gwintu. Modelu 2D nie można wykorzystywać do analizy stanu naprężenia i odkształcenia w procesie walcowania gwintu.

Abstract
The paper presents selected results of a numerical analysis of the screw thread rolling process performed on a C45 steel workpiece. The calculations have been made with the finite element method in a three-dimensional state of strain (the 3D model) and axially symmetric strain conditions (the 2D model). In either case thermal phenomena occurring during the process have been taken into account. The paper describes screw shape changes which occur in rolling. It also presents strain, stress and temperature fields, as well as the rolling force distribution. The obtained analysis results have proved the suitability of applying the finite element method to the 3D model to analyze the complex process of thread rolling. In contrast, the 2D model cannot be used to analyze the stress and strain state occurring during the thread rolling process.

Słowa kluczowe: walcowanie gwintu, MES, stal C45

Key words: *thread rolling, FEM, C45 steel*

1. WPROWADZENIE

Połączenia gwintowe pełnią bardzo ważną rolę praktycznie we wszystkich gałęziach przemysłu. Są one zaliczane do najczęściej stosowanych połączeń w zespołach maszynowych. Zastosowanie takich połączeń daje możliwość wielokrotnego rozmontowania i ponownego złożenia zespołów części bez konieczności wymiany łączników jakimi są komplety połączeń śrubowych.

Obecnie przemysł wykorzystuje różne metody wykonywania gwintów, które można podzielić na metody ubytkowe oraz metody obróbki plastycznej.

1. INTRODUCTION

Screw joints play a very important role in practically all branches of industry and they are most often used in machines. The use of such joints provides the possibility for multiple disassembling and re-assembling of parts without the necessity of exchanging connectors.

At present industry makes use of a variety of thread forming methods which fall under two categories: machining and metal forming methods.

Kształtowanie plastyczne ma wiele zalet w porównaniu do metody ubytkowej głównie ze względu na własności wytrzymałościowe wykonywanych części. Podczas obróbki skrawaniem w czasie procesu wykonywania gwintu usuwana jest część materiału półfabrykatu. W wyniku tego włókna materiału są rozcinane, co niekorzystnie wpływa na własności wytrzymałościowe gotowych wyrobów. Gwintowanie metodami obróbki plastycznej wymaga stosowania większych sił kształtowania, co jednak rekompensują lepsze własności wytrzymałościowe wykonanych śrub.

Gwint w procesie obróbki plastycznej powstaje w wyniku kształtowania materiału między narzędziami odwzorowującymi jego zarys. W grupie metod obróbki plastycznej gwintów wyróżnia się metody styczne, poprzeczne oraz wzdłużne. Jedynym ograniczeniem stosowania metod walcowania gwintu jest długość śruby. Tylko w metodzie wzdłużnej nie ma tych ograniczeń.

W literaturze specjalistycznej można znaleźć prace na temat badań doświadczalnych, oraz obliczeń numerycznych realizowanych w warunkach płaskiego stanu odkształcenia 2D [1, 2, 4–8], co jest jednak dużym uproszczeniem ze względu na charakter płynięcia materiału podczas kształtowania gwintu. Obliczenia prowadzone z wykorzystaniem modelu 3D [1–3, 9, 12, 13, 15] wiernie opisują proces kształtowania gwintu podczas walcowania. Współczesna technika komputerowa oraz dostępne na rynku oprogramowania pozwalają na analizę numeryczną skomplikowanych procesów obróbki plastycznej nawet na komputerach osobistych. Walcowanie gwintów jest jednym z najbardziej złożonych procesów kształtowania plastycznego ze względu na skomplikowaną geometrię narzędzi, które muszą być zamodelowane z wykorzystaniem dużej ilości elementów. W czasie procesu kształtowania może wystąpić jednocześnie poślizg, jak również przyleganie materiału do narzędzi. Ponadto skok roboczy narzędzi jest wielokrotnie większy od gabarytów wsadu. Wpływa to na wydłużenie czasu obliczeń. Dzięki zastosowaniu w obliczeniach modelu 3D można jednak dobrać optymalne parametry rzeczywistego procesu kształtowania gwintu.

The advantages of metal forming outweigh the benefits of machining mainly due to strength of produced parts. When threads are formed by means of machining, some part of the semi-finished product material has to be removed. As a result, the material fibres are cut, which negatively affects strength of finished products. Threading by means of metal forming methods requires greater forming forces, which, however, results in better strength properties of produced screws.

In metal forming, threads are formed with the material positioned in between the tools which generate the thread profile. Metal forming methods of producing threads include tangential, transverse, and longitudinal methods. With the exception of the longitudinal method, the application of the other two methods is only limited by the length of screws.

The specialist literature on the subject includes studies on experimental tests and numerical calculations conducted in a two-dimensional (2D) state of strain [1, 2, 4-8], which constitutes a significant simplification given material flow characteristics in thread rolling. The calculations made with the use of the 3D model [1-3, 9, 12, 13, 15] accurately describe the thread rolling process. Contemporary computer software and hardware tools make it possible to conduct a numerical analysis of complex metal forming processes even with the use of a personal computer. Thread rolling is one of the most complex metal forming processes owing to a complex geometry of tools whose models have to include many elements. During rolling operations both slipping and material sticking may occur. What is more, the operating stroke of the used tools is much bigger than the overall dimension of the workpiece, which makes the calculation time longer. The use of the 3D model in the calculations makes it however possible to set optimum parameters for real-life thread rolling operations.

W niniejszym artykule opisane są wyniki wstępnych obliczeń numerycznych procesu walcowania gwintu M20x2,5 na śrubie ze stali gatunku C45. Obliczenia te wykonano za pomocą termomechanicznego modelu 3D, który oddaje rzeczywiste warunki kształtowania gwintu śruby, a także termomechanicznego modelu 2D, który zawiera szereg uproszczeń. Przyjęto, że gwint śruby walcowany jest na półfabrykacie o średnicy ∅18,5 mm [4].

The following paper presents the results of preliminary numerical calculations of the rolling process of an M20x2.5 screw thread, performed on a C45 steel workpiece. The calculations have been made both with the use of a 3D thermo-mechanical model, which renders real-life threading conditions, and with the aid of a simplified 2D thermo-mechanical model. It has been assumed that the workpiece diameter is 18.5 mm [4].

2. MODELE MES PROCESU WALCOWANIA GWINTU

2.1. Model 2D

Do wykonania obliczeń numerycznych za pomocą modelu 2D wykorzystano oprogramowanie MSC Super Form 2005, które było już stosowane w analizie kształtowania gwintów na wkrętach do podkładów szynowych [12, 13]. Symulację komputerową procesu kształtowania gwintu wykonano w dwu wariantach.

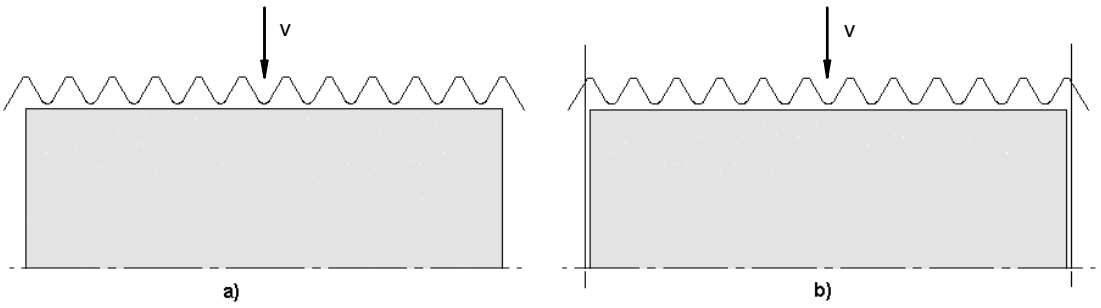
W pierwszym przypadku zamodelowano proces wciskania narzędzia odwzorowującego zarys gwintu w materiał wsadowy. Zaobserwowano jednak, że materiał nie wypełnił dokładnie rowków w narzędziu. Powodem tego było jego osiowe płynięcie. W drugim wariancie zastosowano podpory boczne ograniczające ruch materiału w kierunku osiowym. Widok obu wariantów modelu 2D wykorzystanych w obliczeniach przedstawiono na rys. 1.

2. FEM MODELS OF THE THREAD ROLLING PROCESS

2.1. 2D model

Numerical calculations for the 2D model have been made with the use of MSC Super Form 2005. This software has already been used for the analysis of thread forming on screw spikes [12, 13]. The computer simulation of the thread rolling process has been run for two variants.

The first variant models a process of pressing the thread forming tool into the workpiece. It has been observed that the material does not completely fill in the grooves on the tool, which results from its axial flow. The second variant involves the use of side props to limit the material flow in the axial direction. Figure 1 illustrates both variants of the 2D model used in the calculations.



Rys. 1. Model 2D procesu kształtowania gwintu: a) bez podpór, b) z podporami

Fig. 1. 2D model of the thread forming process: a) without the props, b) with the props

W obliczeniach przyjęto model tarcia stałego, zakładając, że czynnik tarcia m = 0,5. Model kształtowanego materiału (stal C45) przyjęto z biblioteki zastosowanego programu MSC Super Form 2005. Ponadto założono, że temperatura wszystkich narzędzi i wsadu jest jednakowa i równa temperaturze otoczenia 20 °C, a współczynnik wymiany ciepła między materiałem a narzędziami wynosi 20 kW/m^{2}K. Narzędzia z częścią roboczą o zarysie wykonywanego gwintu poruszają się promieniowo w kierunku osi z prędkością v = 1,24 mm/s. W modelu 2D prędkość narzędzi dobrano tak, aby narzędzie wykonało pracę odkształcenia w tym samym czasie, w którym narzędzie w modelu 3D przemieszcza się na długość strefy wejściowej narzędzia.

2.2. Model 3D

W obliczeniach numerycznych za pomocą modelu 3D, wykorzystano program DEFORM-3D v6.1, który był wcześniej stosowany w analizie kształtowania gwintów na wkrętach [13, 15]. Model geometryczny narzędzi – szczęki płaskie oraz model materiału wyjściowego, które wykorzystano w modelu 3D, zostały wykonane w systemie CAD Solid Edge.

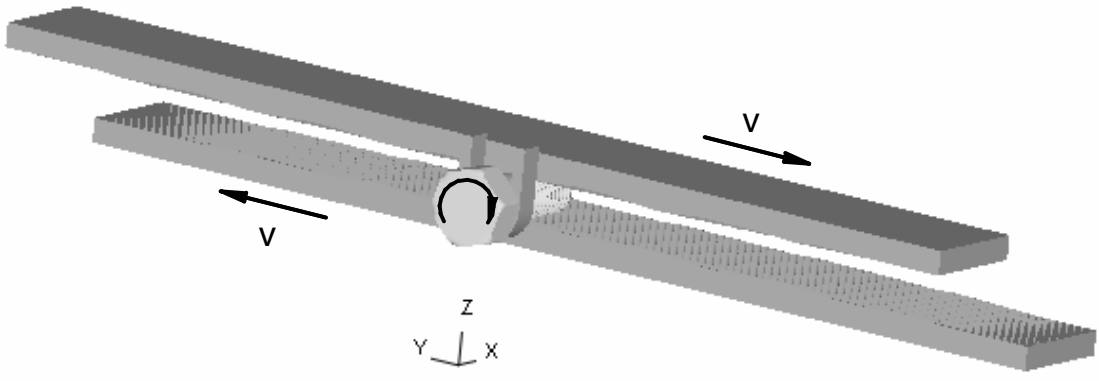
Model 3D procesu walcowania gwintu, przyjęty do obliczeń przedstawiono na rys. 2.

For the calculations the constant friction model has been adopted, with the friction factor m = 0.5. The material model (C45 steel) has been taken from the MSC Super Form 2005 material database. Additionally, it has been assumed that the tool and workpiece temperatures are the same and equal to the ambient temperature of 20˚C, whereas the heat exchange factor between the material and the tools equals 20 kW/m²K. The thread rolling tools move radially towards the axis with the speed v = 1.24 mm/s. The speed rate for the 2D model tool has been set in such a way so as the amount of time that the tool needs to do strain work is the same as the amount of time which the 3D model tool needs to pass through the input zone.

2.2. 3D model

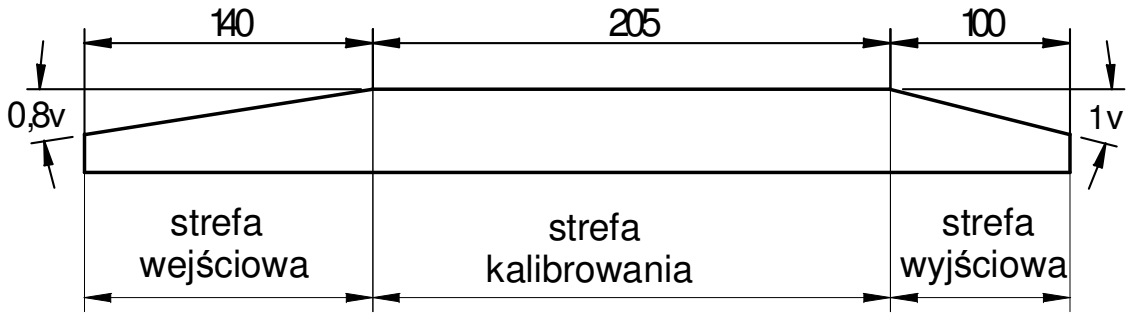
The 3D model calculations have been made with the DEFORM-3D v6.1 program which has already been applied to analyze forming of screw spike threads [13, 15]. The geometrical models of the tools (i.e. flat dies) and the workpiece blank for the 3D model have been generated with the CAD Solid Edge system.

Figure 2 presents the analyzed 3D model of the thread rolling process.



Rys. 2. Model geometryczny procesu walcowania gwintu

Fig. 2. Geometrical model of the thread rolling process



Rys. 3. Szczęki do kształtowania gwintu
Fig. 3. Thread rolling dies

W analizowanym procesie jako metodę walcowania gwintu przyjęto metodę styczną realizowaną narzędziami płaskimi. Zgodnie z rys. 2 szczęki płaskie w czasie walcowania wykonują przeciwbieżnie ruch posuwisty zgodnie z kierunkiem Y, z prędkością v = 100 mm/s.

W metodzie tej w szczękach kształtujących wyróżnia się trzy strefy: wejściową, kalibrowania, oraz wyjściową (rys. 3). W strefie wejściowej na narzędziach wykonano nacięcia poprzeczne w celu wyeliminowania poślizgu między narzędziem, a materiałem obrabianym.

W strefie kalibrowania kształt narzędzi wiernie odtwarza znormalizowany zarys wykonywanego gwintu. Obok szczęk ustawiona jest prowadnica, która ma za zadanie utrzymanie wsadu w odpowiedniej pozycji podczas procesu walcowania.

W obliczeniach numerycznych za pomocą modelu 3D przyjęto takie same dane jak dla modelu 2D, opisanego w punkcie 2.1.

The thread rolling operation has been conducted with flat tools. As shown in Figure 2, the flat dies move in a reciprocating manner in the direction Y, with the speed v = 100 mm/s.

The forming dies used in tangential thread rolling have three zones: an input zone, a sizing zone, and an output zone (Fig. 3). In the input zone, transverse serrations have been made on the tools to prevent the workpiece from slipping.

The shape of the tools in the sizing zone makes it possible to produce accurate threads. A slide which is placed next to the dies maintains the workpiece in a desired position during the rolling operation.

The numerical calculations for the 3D model have been based on the same data as in the case of the 2D model described in 2.1.

3. WYNIKI OBLICZEŃ

Wykonanie obliczeń numerycznych procesu walcowania gwintu M20x2,5 na modelu 2D oraz 3D, pozwoliło na porównanie wyników analiz uzyskanych w tych dwóch przypadkach oraz na określenie przydatności, i zakresu ewentualnego stosowania obu modeli 2D i 3D.

W artykule opisano wyniki analiz numerycznych w zakresie rozkładu temperatur, odkształceń oraz sił kształtowania potrzebnych do przeprowadzenia procesu walcowania gwintu.

3. ANALYSIS RESULTS

The numerical analysis of the M20x2.5 thread rolling process with the use of the 2D and 3D models has made it possible to compare the results obtained in these two cases and to decide on suitability and potential applications of both models.

The paper presents the numerical analysis results of the distribution of temperature and strain, as well as of the forming forces necessary for the thread rolling process.

Dzięki zastosowaniu modelu 3D można było także pokazać charakter zmian kształtu materiału w czasie procesu walcowania.

Na rys. 4 przedstawiono rozkład naprężeń średnich w materiale (w MPa). Prezentowane mapy wykonano dla końca fazy wejściowej oraz fazy kalibrowania (dla modelu 3D), a w przypadku modelu 2D dla końca procesu kształtowania.

Z analizy danych przedstawionych na rys. 4 wynikają różnice występujące między rezultatami obliczeń uzyskanymi z modelu dwuwymiarowego (2D) oraz trójwymiarowego (3D). W przypadku modelu 2D przy zastosowaniu podpór (rys. 4b) materiał poddany jest ściskaniu promieniowemu na całym obwodzie. Prowadzi to do dużych wartości naprężeń ściskających w całej objętości kształtowanego materiału (co nie zachodzi w rzeczywistości).

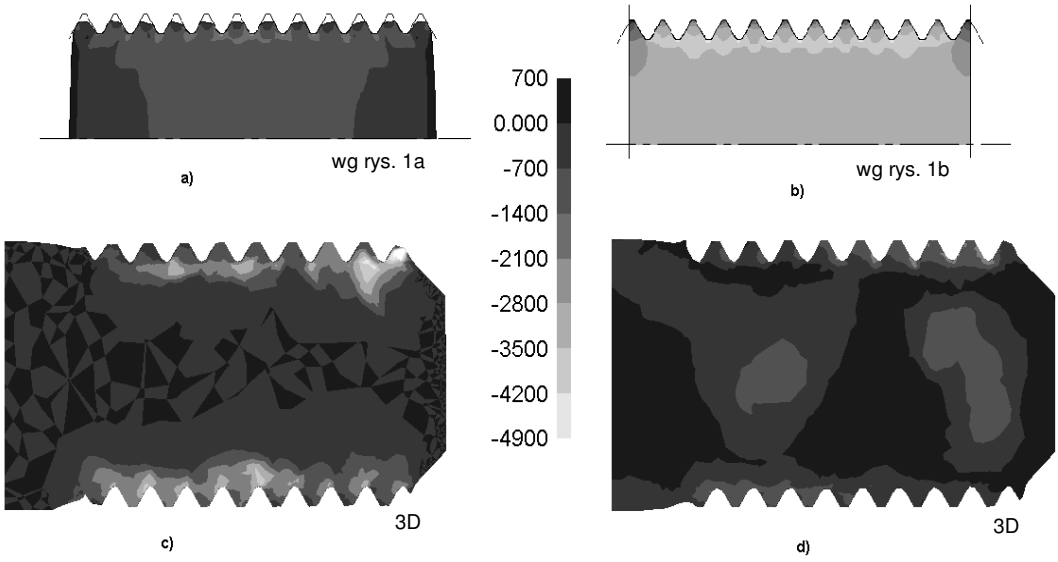
W przypadku braku podpór (rys. 4a) materiał nie wypełnia całkowicie rowków narzędzia w efekcie osiowego płynięcia materiału podczas procesu kształtowania. W praktyce w procesie walcowania poprzecznego realizowanego bez wydłużania wyrobu, zjawisko to nie występuje.

The use of the 3D model has also made it possible to observe the progression of material shape changes in rolling.

Figure 4 shows the mean stress distribution (in MPa). The maps show the end of the input and sizing phases for the 3D model, and the end of the rolling process for the 2D model.

The analysis of the data presented in Figure 4 demonstrates the differences between the results obtained for the two-dimensional (2D) model and the three-dimensional (3D) model. The use of the side props in the 2D model (Fig. 4b) results in the material being radially stressed along its whole circumference. This leads to high stress values in the entire volume of the formed material (which does not occur in real-life rolling operations).

When there are no props (Fig. 4a), the material flows axially and therefore does not completely fill in the grooves on the tools. In reality, such a phenomenon does not occur in cross rolling unless there is product elongation.



Rys. 4. Rozkład naprężeń średnich (w MPa) w przekroju osiowym śruby wyznaczony dla końca procesu kształtowania gwintu w modelu 2D bez podpór (a), z podporami (b), oraz dla końca fazy wejściowej (c) i kalibrowania (d) w modelu 3D

Fig. 4. Mean stress distribution (in MPa) in the axial section observed at the end of the thread rolling process for the 2D model: without the props (a), with the props (b), and for the 3D model: at the end of the input phase (c), at the end of the sizing phase (d)

W modelu 3D (rys. 4c) pod koniec fazy wejściowej zauważyć można, że wykonywana śruba jest poddawana działaniu głównie naprężeń ściskających. Natomiast w małym stopniu występują naprężenia rozciągające. Największe naprężenia ściskające występują w miejscu styku materiału z narzędziem (czego można było się spodziewać). Pod koniec fazy kalibrowania (rys. 4d) różnice między naprężeniami ściskającymi a rozciągającymi maleją, ponieważ geometria gwintu została ostatecznie ukształtowana.

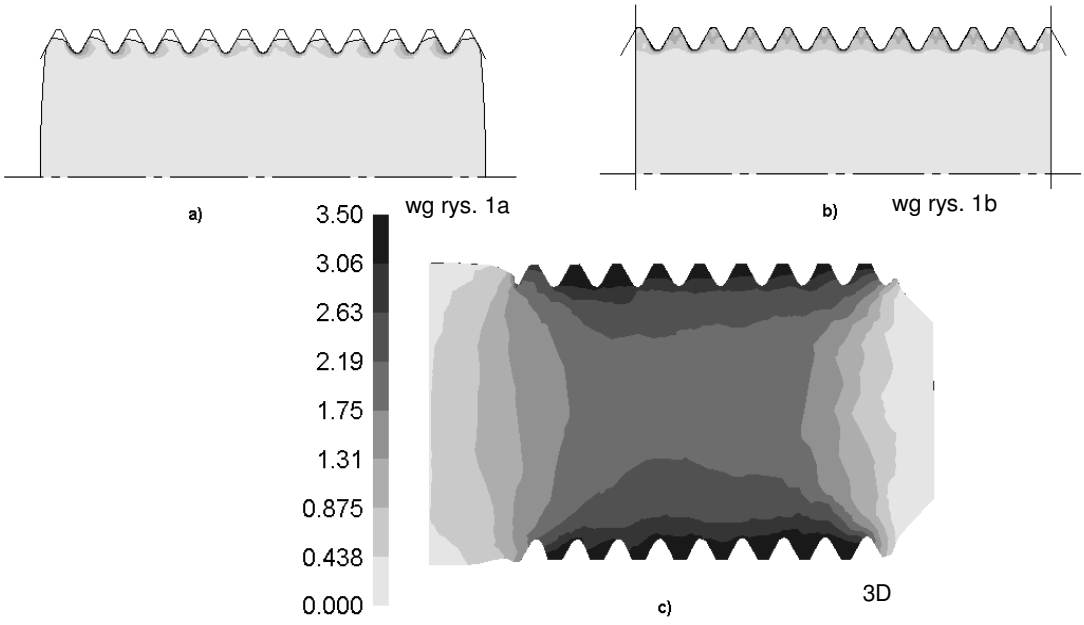
Rozkład odkształceń po zakończonym procesie kształtowania gwintu przedstawiono na rys. 5.

Wyniki obliczeń uzyskane za pomocą modeli 2D oraz 3D znacznie różnią się między sobą. W modelu 3D największe odkształcenia występują w miejscu styku narzędzia z materiałem, i zmniejszają się w miarę zbliżania się do osi śruby. Taki rozkład odkształceń jest charakterystyczny dla procesów walcowania poprzecznego, gdzie nie występuje wydłużanie materiału. W badaniach modelowych 2D (rys. 5a, 5b) odkształcenia wystąpiły jedynie w bliskiej strefie styku narzędzi z materiałem.

Analyzing the end of the input phase for the 3D model (Fig. 4c), it can be observed that the screw is mainly subject to compressing stresses. Stretching stresses, on the other hand, occur to a smaller extent. As predicted, the maximum compressing stress occurs in the tool-workpiece contact area. The differences between these pressing and stretching stresses decrease at the end of the sizing phase because the thread has finally been created (Fig. 4d).

Figure 5 shows the distribution of strain after the thread rolling process has been completed.

The results obtained for the two-dimensional model significantly differ from the results obtained for the three-dimensional model. In the case of the 3D model, the biggest strain occurs in the tool-workpiece contact area and its rate decreases the closer it is to the axis of the screw. Such a strain distribution is typical of cross rolling where product elongation does not occur. In the case of the 2D model (Fig. 5a, 5b) strain occurs only near the tool-workpiece contact area.



Rys. 5. Rozkład odkształceń w przekroju osiowym ukształtowanej śruby w modelu 2D bez podpór (a), z podporami (b), w modelu 3D (c)

Fig. 5. Strain distribution in the axial section of the formed screw for the 2D model: without the props (a), with the props (b), and for the 3D model (c)

Taki rozkład odkształceń wystąpił głównie na skutek pominięcia stycznego płynięcia metalu w kierunku obwodowym, które dominuje w procesie rzeczywistym. Dlatego modelu 2D nie można wykorzystywać do analizy stanu naprężenia i odkształcenia w procesie walcowania gwintu.

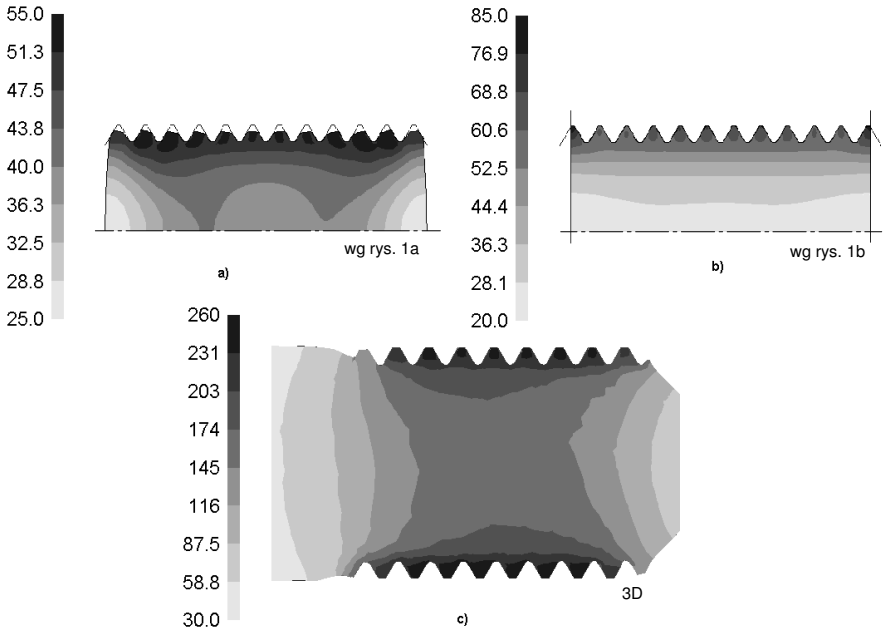
Zastosowanie obliczeń numerycznych do analizy kształtowania gwintu pozwoliło także na określenie rozkładu temperatury materiału w czasie kształtowania.

Przedstawione na rys. 6 rozkłady temperatury odnoszące się do modeli 2D (rys. 6a, 6b), dotyczą końca procesu kształtowania. Taki rozkład temperatury jest bliski rzeczywistości, gdyż największa temperatura metalu występuje w miejscu styku narzędzi z materiałem, a jej wzrost jest wynikiem zamiany pracy tarcia, oraz pracy odkształcenia plastycznego na ciepło. Jednak rząd wielkości amplitud temperatur jest kilkakrotnie niższy od odnotowanego dla modelu 3D. W przypadku obliczeń modelowych 3D maksymalna temperatura w chwili przechodzenia materiału śruby ze strefy wejściowej do strefy kalibrowania jest bliska 260 ºC.

Such a strain distribution mainly results from eliminating tangential material flow in the circumferential direction, which is predominant in the real-life rolling process. For this reason, the 2D model cannot be applied to analyze stress or strain states in the thread rolling process.

The numerical calculations of the thread rolling process have also determined material temperature distribution during the process.

Shown in Figure 6, the temperature distribution in the 2D model has been determined at the end of the rolling operation (Fig. 6a, 6b). Such a temperature distribution is close to reality as the highest material temperature occurs in the tool-workpiece contact area, and its increase results from the heat generated by strain and friction. However, the temperature amplitude range is several times lower than the one observed in the case of the 3D model. In the three-dimensional model, the maximum temperature observed at the moment of the material passing from the input zone to the sizing zone is close to 260˚C.



Rys. 6. Rozkład temperatury (w °C) w przekroju osiowym śruby wyznaczony dla końca fazy kształtowania w modelu 2D bez podpór (a), z podporami (b), oraz dla końca fazy wejściowej dla modelu 3D (c)

Fig. 6. Temperature distribution (in ˚C) in the axial section of the screw determined at the end of the forming zone for the 2D model: without the props (a), with the props (b), and for the end of the input phase for the 3D model (c)

Wykonane obliczenia numeryczne procesu walcowania gwintu śruby M20x2,5 metodą styczną, narzędziami płaskimi, pozwoliły również na wyznaczenie sił kształtowania potrzebnych do przeprowadzenia procesu (rys. 7).

W modelu 2D można było określić jedynie wartości sił promieniowych. Wymagało to określenia szerokości powierzchni styku materiału z narzędziem - b (rys. 8). W tym celu skorzystano z zależności [14]:

$$b = \sqrt{2\Delta r\, r_o}\,, \qquad (3.1)$$

gdzie:

b – szerokość powierzchni styku materiału z narzędziem,

Δr – gniot bezwzględny,

r_o – promień materiału wyjściowego.

The conducted numerical calculations of the M20x2.5 screw thread rolling process with the tangential method using flat tools have also helped determine forces which are necessary for the process (Fig. 7).

The 2D model has helped determine values of radial forces only. To do so, it has been necessary to determine the width of the contact surface area between the workpiece and the tool (Fig. 8). For this reason, the following formula has been applied [14]:

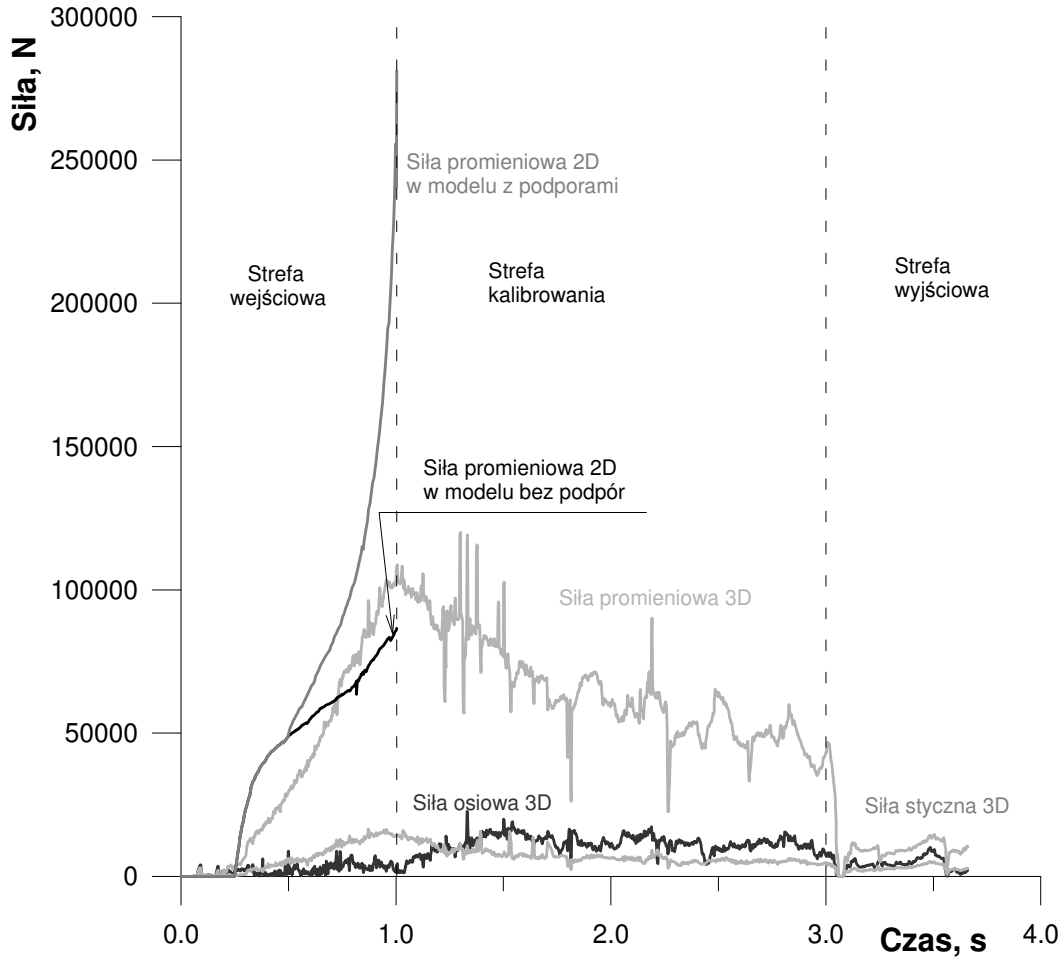
$$b = \sqrt{2\Delta r\, r_o}\,, \qquad (3.1)$$

where:

b - is the width of the tool-workpiece contact area,

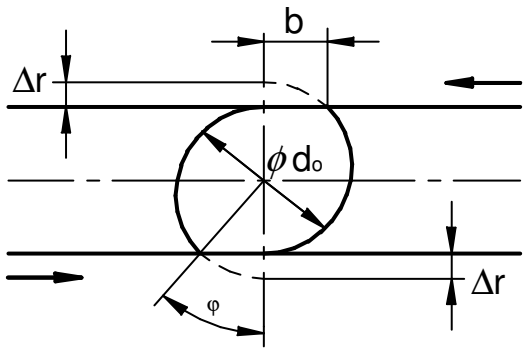
Δr - is the rolling depth,

r_o - is the radius of the input material.



Rys. 7. Rozkład składowych sił walcowania w procesie kształtowania gwintu M20x2,5 na śrubie wykonanej ze stali gatunku C45

Fig. 7. Distribution of the rolling force components in the M20x2.5 thread rolling process on a C45 steel screw



Rys. 8. Schemat procesu kształtowania wykorzystany do wyznaczenia szerokości powierzchni kontaktu w procesach walcowania poprzecznego – b

Fig. 8. Scheme used to calculate the contact area width (b) in the cross rolling process

Wartość Δr wyznaczono przyjmując, że śruba wykonała pół obrotu. Kąt φ obliczono z zależności trygonometrycznych, jako:

$$\varphi = \arcsin\left(\frac{b}{r_o}\right) \qquad (3.2)$$

Wielkości sił promieniowych – F_x wyznaczono mnożąc siły - F uzyskane z analizy numerycznej 2D przez stosunek obliczonego kąta φ do wartości kąta pełnego:

$$F_x = F\frac{\varphi}{360°} \qquad (3.3)$$

gdzie:
F_x – siła promieniowa,
F – siła uzyskana z analizy numerycznej 2D.

Siły promieniowe – F_x obliczone dla modeli 2D przez cały okres kształtowania miały postać funkcji rosnącej (rys. 7). Powodem tego jest to, że model 2D nie uwzględnia ruchu obrotowego materiału a narzędzie jest wciskane w materiał obwodowo przez cały czas trwania procesu. Tym samym w modelu 2D nie uwzględnia się fazy kalibrowania i fazy wyjściowej, które występują w procesie rzeczywistym. Z rys. 7 wynika, że wartość siły wyznaczonej w modelu 2D z wykorzystaniem podpór jest kilkukrotnie wyższa w porównaniu z siłą wyznaczoną w modelu 3D. Natomiast siła obliczona dla modelu 2D bez podpór ograniczających osiowy ruch materiału jest zbliżona do odnotowanej w modelu 3D.

The Δr value has been determined on the assumption that the screw has made a half turn. To calculate the value of angle φ the following trigonometric formula has been used:

$$\varphi = \arcsin\left(\frac{b}{r_o}\right) \qquad (3.2)$$

The values of radial forces (F_x) have been measured by multiplying the forces obtained from the 2D numerical analysis (F) by the ratio of the calculated angle φ to a round angle:

$$F_x = F\frac{\varphi}{360°} \qquad (3.3)$$

where:
F_x - is the radial force,
F- is the force obtained from the 2D numerical analysis.

The radial forces F_x calculated in the 2D numerical analysis take on the form of an increasing function throughout the rolling operation (Fig. 7). It results from the fact that the 2D model does not allow for rotational motion of the material and the tool is circumferentially pressed into the material for the duration of the operation. Hence, neither the sizing phase or the output phase which occur in real-life rolling are taken into consideration in the 2D model. As demonstrated in Figure 7, the value of the force calculated for the 2D model with the props is several times higher when compared to the value of force calculated for the 3D model. In contrast, the force value calculated for the 2D model without the props preventing the material from moving axially is similar to the one calculated for the 3D model.

Model 2D nie uwzględnia tworzenia owalu podczas procesu gwintowania narzędziami płaskimi. Aby oszacować wielkości sił kształtowania w modelu 2D należy dodatkowo korzystać ze wzoru na szerokość kontaktu między materiałem, a narzędziem. Wykorzystanie modelu dwuwymiarowego (2D) nie pozwala także na wyznaczenie przebiegu sił kształtowania całego procesu gwintowania śruby.

Wykorzystanie modelu trójwymiarowego (3D) pozwoliło na wyznaczenie wszystkich składowych sił podczas całego procesu walcowania gwintu, bez konieczności prowadzenia dodatkowych obliczeń. W strefie wejściowej siła promieniowa F_x (zgodnie z układem współrzędnych z rys. 2) oraz styczna F_y rosły sukcesywnie do końca tej strefy. W momencie przechodzenia materiału do strefy kalibrowania te dwie siły zaczęły zmniejszać się. W strefie kalibrowania wystąpiły skoki sił o amplitudach większych niż w strefie wejściowej. Powodem tego było tworzenie się dużego owalu przekroju poprzecznego śruby w fazie wejściowej. Kształtowanie owalu w strefie kalibrowania powodowało skokową zmianę sił. Po wyjściu śruby ze strefy kalibrowania siła promieniowa zmniejszała się do wartości siły stycznej oraz osiowej w wyniku pełnego ukształtowania gwintu.

Z obliczeń numerycznych wykonanych za pomocą modelu 3D wynika, że największą wartość osiąga siła promieniowa F_x. Natomiast siła styczna F_y wynosiła średnio 12,7%, a siła osiowa 15,3% wartości siły Fx.

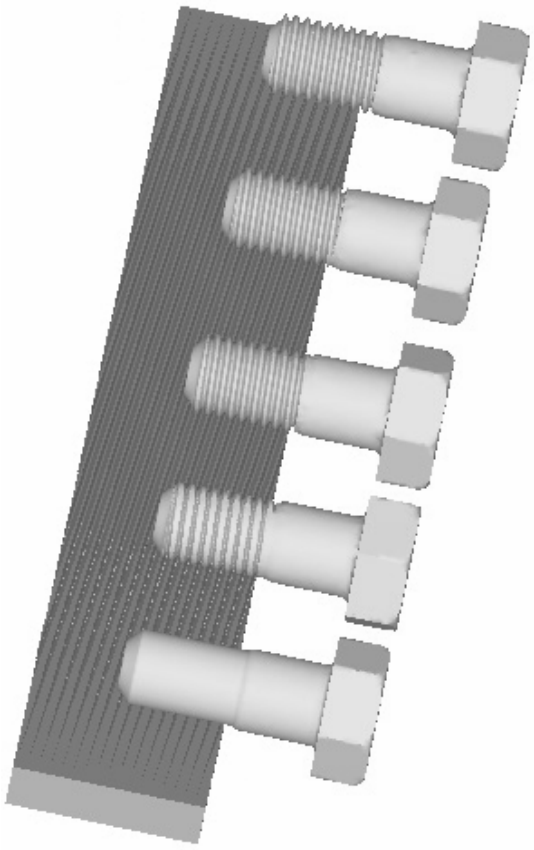
Na rys. 9 pokazano kolejne położenia śruby względem narzędzia w czasie trwania procesu kształtowania. Możliwość zastosowania modelu 3D do obliczeń walcowania gwintu pozwoliła na prześledzenie zmian kształtu śruby podczas walcowania gwintu. Na końcu strefy wyjściowej śruba ma prawidłowy kształt i jest wyrobem gotowym do użycia.

The 2D model does not allow for creating an oval in a rolling operation with flat tools. To calculate the values of rolling forces in the 2D model, it is also necessary to make use of the tool-workpiece contact width formula. What is more, the application of the two-dimensional model does not make it possible to determine the distribution of rolling forces which occur throughout the threading operation.

Thanks to the application of the three-dimensional (3D) model, all force components occurring in threading have been determined without the necessity of doing additional calculations. In accordance with the co-ordinate system shown in Figure 2, the radial force F_x and the tangential force F_y increase gradually within the input zone. When the material enters the sizing zone, the two forces begin to decrease. The amplitude of abrupt force changes in the sizing zone is higher than in the input zone. It results from the fact that a big cross-section oval of the screw is formed in the input phase. Its further forming in the sizing zone leads to abrupt changes of forces. Once the screw leaves the sizing zone, the radial force decreases and reaches the value of the tangential and axial forces because the thread is fully created.

The numerical calculations made with the use of the 3D model show that it is the radial force F_x that reaches the highest value. The approximate value of the tangential force F_y corresponds to 12.7% of the radial force value, whereas the axial force equals 15.3% of the F_x value.

Figure 9 illustrates successive positions of the screw relative to the tool during the rolling operation. The application of the 3D model has made it possible to examine the screw shape changes which occur in the thread rolling process. On leaving the output zone, the shape of the screw is proper and the product is ready for use.



Rys. 9. Zmiana kształtu śruby w czasie kształtowania metodą walcowania poprzecznego stycznego
Fig. 9. Screw shape changes in tangential thread rolling

4. PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono rezultaty analizy numerycznej procesu walcowania gwintu metodą styczną z wykorzystaniem szczęk płaskich zarówno w warunkach przestrzennego stanu odkształcenia (model 3D), jak i osiowosymetrycznego stanu odkształcenia (model 2D). Analiza rezultatów obliczeń z modeli symulacji 2D i 3D wykazała, że model 2D nie odzwierciedla prawdziwych warunków przebiegu procesu kształtowania występujących podczas procesu walcowania gwintu. Natomiast zastosowanie modelu 3D pozwala na dokładną symulację tego skomplikowanego procesu kształtowania. W szczególności możliwe jest uzyskanie dokładnych informacji na temat rozkładów stanu naprężenia i odkształcenia, których nie można wyznaczyć w inny sposób. Można również prześledzić jak zmienia się temperatura materiału podczas walcowania poprzecznego gwintu śruby metodą styczną.

4. CONCLUSION

The paper presents numerical analysis results of tangential thread rolling with flat dies in a three-dimensional state of strain (the 3D model) and in an axially symmetric state of strain (the 2D model). The analysis of the results obtained from the 2D and 3D simulations has shown that the 2D model does not render real-life conditions which occur in thread rolling. In contrast, the 3D model makes an accurate simulation of this complex rolling process possible. Particularly, it is possible to obtain accurate data on stress and strain distributions, which cannot be done in any other way. It is also possible to observe material temperature changes which occur in tangential thread rolling.

Opracowany model 3D procesu walcowania będzie w przyszłości rozwijany również na inne metody kształtowania gwintu. Planowane jest wykonanie kompleksowej analizy podstaw tego dość powszechnie stosowanego procesu kształtowania plastycznego, który jednakże do tej pory nie został rozpoznany teoretycznie w sposób zadowalający. Wykonane zostaną również badania doświadczalne, głównie w zakresie weryfikacji wyników uzyskanych z symulacji numerycznych.

The presented 3D model of the rolling process will be developed further and applied to other methods of thread rolling. Given that the problem of thread rolling has not been exhaustively described yet, a comprehensive theoretical analysis of the basis of this commonly used process is therefore planned to be made. Additionally, experimental tests to verify the calculations obtained from the numerical simulations are to be conducted.

LITERATURA/*REFERENCES*

[1] Domblesky J., Feng F.: A parametric study of process parameters in external thread rolling. Journal of Materials Processing Technology 121 (2002) s. 341–349.
[2] Domblesky J., Feng F.: Two-Dimensional and Three-Dimensional Finite Element Models of External Thread Rolling. Proc. Inst. Mech. Eng., Part B s. 507–517.
[3] Domblesky J., Feng F.: Finite element modeling of external thread rolling. Wire Journal International 2001 s. 110-115.
[4] Dotson J., Henrey Ch., Domblesky J.: Experimental investigation of the external thread rolling. Wire Journal International 2002 s. 64-68.
[5] Kim W., Kwai K., Koyama H.: Metal flow in wedge indentation of V- and W- shaped tools. Journal of Materials Processing Technology 189 (2007) s. 392-400.
[6] Kukiełka K., Kukiełka L.: Modeling and numerical analysis of the thread rolling process. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Vol. 6, Issue 1, 2006 s. 745-746.
[7] Kukiełka K., Kukiełka L.: The numerical analysis of the trapezoidal thread rolling process. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Vol. 7, Issue 1, 2007 s. 4010027-4010028.
[8] Kukiełka K., Kukiełka L.: The numerical analysis of the External Round Thread Rolling. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA,Vol. 8, Issue 1, 2008, s. 10731-10732.
[9] Mathurin F., Guillot J., Daidie A.: 3D Finite Element Modelling of an Assembly Process with Thread Forming Screw. Journal of Manufacturing Science and Engineering 2009, Vol. 131.
[10] Łyczko K.: Technologia narzędzi i wygniatania gwintów wewnętrznych. Wyd. Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 1999.
[11] Poradnik Inżyniera. Mechanika. Tom III Zagadnienia Technologiczne, WNT.
[12] Pater Z. Gontarz A. Weroński W.: New method of thread rolling. Journal of Materials Processing Technology 153–154 (2004) s. 722–728.
[13] Pater Z.: Modelowanie numeryczne procesu walcowania poprzeczno-klinowego wkrętów szynowych. Obróbka Plastyczna Metali t. XX nr 3 (2009) s. 13-24.
[14] Smirnov V. S. i in: Properecnaja prokatka v masinostroenii. Moskva: Masgiz 1957.
[15] Yung-Chou K., Hsin-Yu C., Chen-Hua S.: Development of an integrated CAD/CAE/CAM system on taper-tipped thread-rolling die-plates. Journal of Materials Processing Technology 177 (2006) s. 98–103.