

Dr inż. Stanisław ZIÓŁKIEWICZ, mgr inż. Szymon SZKUDELSKI
Instytut Obróbki Plastycznej, Poznań
E-mail: stziolk@inop.poznan.pl

Kształtowanie profili wspomagane tarciem

Friction-assisted profile forming

Streszczenie

W inżynierii materiałowej silny nacisk kładzie się na otrzymywanie metali o bardzo drobnych ziarnach aż do wielkości nanometrycznych włącznie. Badania prowadzone są poprzez poszukiwanie odpowiednich metod wytworzenia metali o jednorodnej drobnej strukturze. W tym zakresie metody obróbki plastycznej, które w swojej istocie silnie oddziaływują na strukturę, są potencjalnym, przyszłościowym kierunkiem wytwarzania metali o ultra drobnych ziarnach na skale przemysłową. W takim kierunku prowadzone są badania w Instytucie Obróbki Plastycznej w Poznaniu. W artykule przedstawiono nową koncepcję procesu kształtowania profili, w której tarcie jest elementem wspomagającym płynięcie metalu. Przedstawiono opracowane i uruchomione w INOP stanowisko badawcze procesu kształtowania według nowej koncepcji. Celem prowadzonych badań była weryfikacja możliwości technologicznych kształtowania metali według nowego sposobu oraz ocena wpływu głównych parametrów technologicznych na przebieg procesu kształtowania. Badaniom wstępnym poddano dwa materiały: stop aluminium gat. PA4 oraz stal gat. 15. Przedstawiono wyniki prób technologicznych i wskazano zakres parametrów, dla których uzyskano pozytywne wyniki kształtowania. Badania potwierdziły możliwości praktycznego kształtowania profili ze stali i stopu aluminium. Konieczna jest optymalizacja parametrów procesu wyciskania profili wg nowej koncepcji dla stabilnego przebiegu kształtowania. Zastosowany materiał do badań nie pozwolił na określenie stopnia rozdrobnienia ziarn. Należy jednak przypuszczać, iż jest ono znaczące, gdyż niemożliwe było wytrawienie ziarn na zglądach metalograficznych dla próbki ze stopu Al.

Abstract

In material engineering, sarong emphasis is laid on obtaining metals with very small grains, down to nanometric sizes. Investigation is effected by seeking methods of manufacturing metals with homogenous fine structure. In this aspect, the methods of metal forming which strongly influence structure are the potential future direction of industrial scale manufacturing of metals with ultra fine grains. This is the direction of investigations performed by the Metal Forming in Poznań. The article presents a new concept of the process of forming profiles in which concept friction is an element boosting the metal flow. A stand for testing the process of forming according to the new concept elaborated and executed by INOP has been described. The objective of the investigation was to verify the technological possibility of forming metals by the new method and to find the influence of the main technological parameters on the forming process. Two materials have been subjected to initial testing: aluminium alloy grade PA4 and steel grade 15. Technological test results have been presented as well as the range of parameters for which positive results have been obtained. The investigation has proved the possibility of actual forming of profiles made of steel and aluminium alloy. Optimization of the new concept profile extrusion process parameters is necessary for stable progress of forming. The material used in the tests has not allowed for the determination of the degree of grain comminution. It should be supposed, however, that it was significant because etching of the grains in metallographic microsections of an aluminium alloy sample was impossible.

Słowa kluczowe: profile, wyciskanie, SPD, tarcie

Keywords: sections, extrusion, SPD, friction

1. WSTĘP

W ostatnich latach obserwowany jest znaczący wzrost zainteresowania nowymi metodami kształtowania metali, które pozwalają na

1. INTRODUCTION

In recent years, there has been a significant rise of interest in new metal forming methods, which make it possible to make

wytwarzanie wyrobów o podwyższonych własnościach mechanicznych, mniejszej pracochłonności i niższych kosztach. Atrakcyjne są metody, które umożliwiają otrzymywanie jednorodnej struktury drobnoziarnistej w całym przekroju wytworzonego wyrobu. W tym zakresie technologie obróbki plastycznej metali są technologiami szczególnie uprzywilejowanymi. Charakteryzują się m.in. tym, że wraz ze zmianą formy następuje silna ingerencja w strukturę odkształcanego metalu. Taka ingerencja powoduje, że wzrost wytrzymałości stopów metali obniża ich plastyczność, co zaś powoduje gwałtowny wzrost sił technologicznych, niezbędnych do ich uplastycznienia. Wyniki wielu prac pokazują, że możliwości kryjące się w naturze metalu i procesach strukturalnych nie zostały jeszcze wystarczająco dobrze rozpoznane. W ostatnim czasie pojawiło się wiele metod generujących intensywne odkształcenie plastyczne (ang. SPD - Sever Plastic Deformation), które zadziwiają swoją prostotą [1-3], a pozwalają na uzyskiwanie silnie rozdrobionej struktury i bardzo dobrych własności użytkowych.

W Instytucie Obróbki Plastycznej prowadzone są badania nad nowymi metodami kształtowania metali. W niniejszym artykule przedstawiono założenia nowej koncepcji [7] wytwarzania profili ze stopów metali metodą wyciskania bocznego wspomaganego tarcieniem na pobocznicy obracającej się tarczy.

2. IDEA NOWEGO PROCESU

Na rysunku 1 przedstawiona została idea procesu wyciskania bocznego wspomaganego tarcieniem obracającej się tarczy. Wsad (4) w postaci odcinka pręta, umieszczony jest w rezypiencie (1). W zależności od rodzaju materiału kształtowanego oraz założonej temperatury procesu, rezypiencja znajduje się w układzie grzewczym, który pozwala na zapewnienie stałej temperatury wsadu. Rezypiencja z jednej strony zamknięta jest matrycą z otworem (2). Na powierzchni czołowej w matrycy wykonany jest kanał boczny o profilowanym kształcie. Umieszczony w rezypiencie wsad (4) dociskany jest do tarczy stemplem (5). Na skutek działania siły osiowej wywieranej przez stempel (5)

products with improved mechanical properties, less labor consumption, and at lower cost. Methods that allow for the achievement of a homogenous, fine-grained structure over the entire cross-section of a product are attractive. In this scope, plastic working technologies for metals are particularly desirable. They are characterized, for example, by the fact that as the form is changed, there is strong interference in the structure of the deformed metal. Such interference causes that the growth of the strength of metal alloys reduces their plasticity, which, in turn, causes a sudden growth of the technological forces necessary to plasticize them. The results of many papers show that the possibilities hidden in the nature of metal and structural processes have not been sufficiently identified. In recent times, many methods generating intense plastic deformation (Sever Plastic Deformation) have appeared, and they are both astoundingly simple [1-3] and make it possible to obtain a very fine structure as well as very good utility properties.

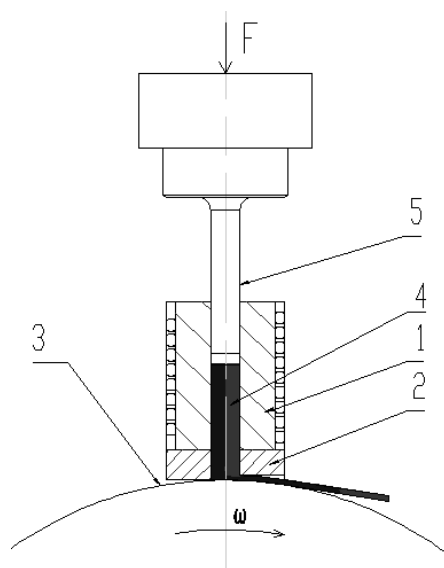
Studies concerning new methods of plastic forming of metals are being conducted at the Metal Forming Institute. This article presents the assumptions of a new concept [7] of producing sections from metal alloys by the method of side extrusion supported by friction on the side surface of a rotating disk.

2. CONCEPT OF THE NEW PROCESS

Fig. 1 shows the concept of the lateral extrusion process assisted by friction with a rotating disk. The stock (4), in the form of a rod segment, is placed in the receptacle (1). Depending on the type of formed material and the assumed temperature of the process, the receptacle is found in a heated system which makes it possible to heat the stock to a constant temperature. On one side, the receptacle is closed by the die with an opening in it (2). A shaped side channel is made on the face surface of the die. The preform (4) placed in the receptacle is pressed to the disk by a punch (5). As a result of the action of axial force exerted by the punch (5) and friction forces

oraz sił tarcia wywołanych obrotem tarczy metal ulega odkształceniu, przemieszczając się w kierunku zgodnym z kierunkiem obrotu tarczy przez profilowany kanał boczny matrycy.

caused by disk rotation, the metal is deformed and moves in a direction according to the direction of disk rotation through the shaped side channel on the die.



Rys. 1. Technologia wytwarzania profili metodą wyciskania bocznego przy wspomaganii tarciem obracającej się tarczy; 1 - recypient, 2 - matryca, 3 - tarcza, 4 - wsad, 5 - stempel

Fig. 1. Section production technology using the lateral extrusion method assisted by friction with a rotating disk; 1 – receptacle, 2 – die, 3 – disk, 4 – preform, 5 – punch

W prezentowanej metodzie można doszukiwać się podobieństw do innych znanych metod obróbki plastycznej metali. Wyciskanie boczne wspomagane tarciem realizowane jest podobnie jak w metodzie CRE (Continuous Rotary Extrusion) przy użyciu narzędzia roboczego jakim jest obrotowe koło-tarcza. Metoda CRE [4] działa w cyklu ciągłym, dzięki czemu znalazła zastosowanie w przemyśle. Kształtuje się nią materiały aluminiowe, ewentualnie miedź.

Zjawisko tarcia w omawianej metodzie jest głównym czynnikiem kształtującym, podobnie jak przy kształtowaniu z wykorzystaniem aktywnego tarcia [5], gdzie wykorzystanie zjawiska tarcia pozwala na dokładniejsze wypełnienie wykroju matrycy z równoczesnym obniżeniem siły.

W prezentowanej metodzie, podobnie jak w metodzie ECAP, następuje kątowna zmiana kierunku płynięcia, dzięki czemu można spodziewać się, że podczas kształtowania uruchamiane zostaną dodatkowe płaszczyzny ścinania. Przypuszczać można, że własności materiału uzyskiwane tą metodą pozwolą, podobnie jak przy wyciskaniu ECAP, otrzymać silnie rozdrobnione struktury[6].

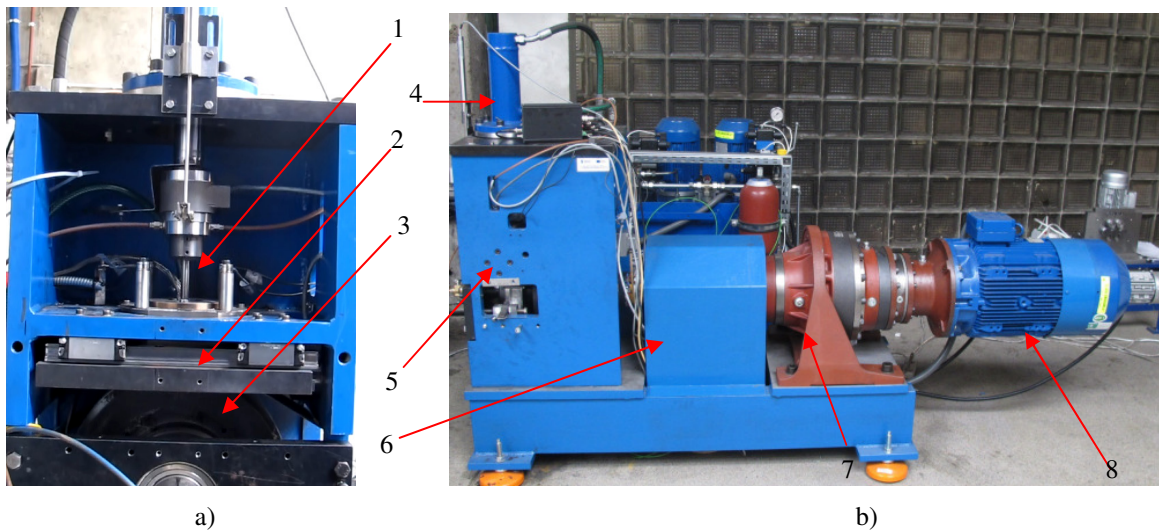
In the presented method, similarities to other known methods of metal plastic working can be found. Friction-assisted side extrusion is performed similarly as in the CRE method (Continuous Rotary Extrusion), which uses a rotating disk-wheel as a working tool. The CRE method [4] operates in a continuous cycle, thanks to which it has found applications in industry. It is used to form aluminum materials and if need be, copper.

The phenomenon of friction in the discussed method is the primary forming factor, similarly as in forming with active friction [5], where the application of the phenomenon of friction makes it possible to more accurately fill the die impression with simultaneous reduction of force.

In the presented method, similarly as in the ECAP method, an angular change in the direction of flow takes place, thanks to which it can be expected that additional shearing planes will be activated during forming. It can be surmised that the properties of material obtained through this method will allow for the obtainment of very refined structures, similarly as in the ECAP extrusion method [6].

3. LABORATORYJNE STANOWISKO BADAWCZE

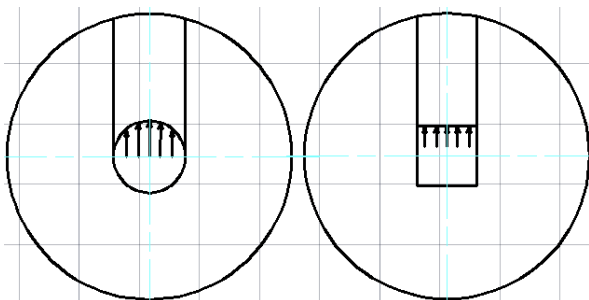
Urządzenie badawcze (rys. 2a, b) wyposażone zostało w możliwość rejestracji takich parametrów procesu jak: temperatura matrycy, temperatura tarczy obrotowej, temperatura kształtowanego materiału, siła wciskania materiału w pobocznice tarczy, siła boczna działająca na matrycę, moment obrotowy, droga stempla oraz prędkość obrotowa tarczy.



Rys. 2. a) Widok układu roboczego urządzenia badawczego UB-001; 1 - stempel, 2 - układ grzewczy, 3 - tarcza, b) Widok urządzenia badawczego UB-001; 4 - siłownik hydrauliczny, 5 - korpus, 6 - osłona sprzęgła, 7 - przekładnia planetarna, 8 - silnik elektryczny

Fig. 2. a) View of the working system of the UB-001 testing machine; 1 - ram, 2 - heating system, 3 - disk, b) View of the UB-001 testing machine; 4 - hydraulic actuator, 5 - body, 6 - coupling screen, 7 - planetary gear, 8 - electric motor

W trakcie prowadzonych badań zaobserwowano, że zmiana matryc z otworem okrągłym na matryce z otworem kwadratowym zwiększa kilkukrotnie ich żywotność (rys. 3). Największe siły działające na matryce z otworem okrągłym występują w momencie wyjścia materiału, niszcząc tym samym promień wyjściowy w części środkowej matrycy. Przekrój kwadratowy wsadu pozwala na równomierne obciążenie promienia wyjściowego matrycy.



3. LABORATORY RESEARCH STATION

The testing machine (fig. 2a, b) has been equipped with the capability of recording such process parameters as: die temperature, rotating disk temperature, temperature of the formed material, pressing force of the material into the disk side surface, side force acting on the die, torque, punch path, and disk rotational speed.

During conducted studies, it was observed that a change of dies with a round opening to dies with a square opening increases their life by several times (fig. 3). The greatest forces acting on the die with the round opening are present at the time of exit of the material, and at the same time, they destroy the exit radius in the central part of the die. A square cross-section of the stock enables uniform application of load onto the die exit radius.

Rys. 3. Schematyczny rozkład sił działających na matrycę z otworem okrągłym i otworem kwadratowym

Fig. 3. Schematic distribution of forces acting on dies with round and square openings

4. BADANIA NOWEGO PROCESU

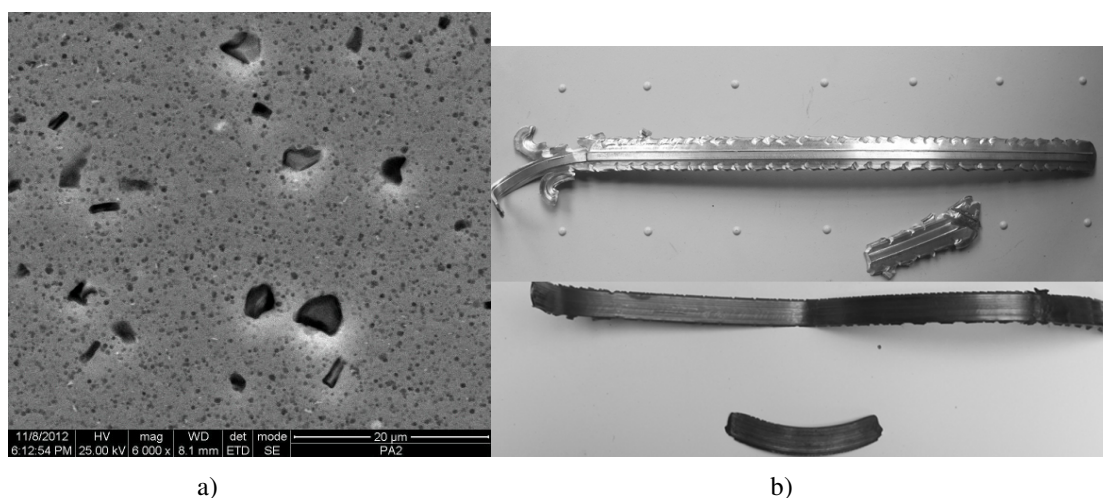
4.1. Badania możliwości kształtowania metali

Celem badań było rozpoznanie możliwości kształtowania metali na modelowym stanowisku badawczym oraz identyfikacja zjawisk zachodzących podczas procesu wyciskania. Badania zostały wykonane dla próbek o wymiarach $\text{Ø}12 \times 55$ mm z dwóch rodzajów materiałów: z aluminium PA4 i stali gatunku 15. Uzyskane profile pokazano na rys. 4b. Przyjęte w doświadczeniu parametry procesu dla aluminium PA4 przedstawione zostały w tabeli 1, natomiast dla stali w tabeli 2. Wyciśnięty profil z aluminium PA4 poddany został analizie SEM (rys. 4a). Mimo wielu prób nie udało się wytrawić zglądów tak, aby uzyskać widoczne granice ziaren. Wskazywać to może, że po procesie nastąpiło tak duże rozdrobnienie ziaren, że nie jest możliwe wytrawienie ich granic. Duże wydzielenia są związkami międzymetalicznymi Mg-Al-Si.

4. STUDIES OF THE NEW PROCESS

4.1. Studies of metal forming capabilities

The purpose of studies was to recognize metal forming capabilities on the model testing station and to identify phenomena occurring during the extrusion process. Studies were carried out for samples with dimensions of $\text{Ø}12 \times 55$ mm made from two types of materials: PA4 aluminum and 15 grade steel. Obtained sections are shown on fig. 4b. The process parameters for PA4 aluminum that were accepted in the experiment are presented in table 1, and for steel in table 2. An extruded section made from PA4 aluminum was subjected to SEM analysis (fig. 4a). Despite many attempts, there was no success in etching specimens so as to obtain visible grain boundaries. This may indicate that grains were so refined after the process that it was not possible to etch their boundaries. The large precipitations are Mg-Al-Si intermetallic compounds.



Rys. 4. a) Struktura profilu, SEM przy powiększeniu 6 tysięcy razy, nie ujawnia granic ziaren, b) wyciśnięte profile z aluminium PA4 i stali gat. 15

Fig. 4. a) Section structure, SEM at 6000x magnification does not show grain boundaries, b) extruded PA4 aluminum and 15 grade steel sections

Tabela 1. Parametry kształtowania dla aluminium PA4

Table 1. Forming parameters for PA4 aluminum

Temperatura [°C] Temperature [°C]		Siła docisku stempla Ram pressing force [kN]	n tarczy [obr/min] disk rotation [rpm]	Kanał matrycy [mm] Die channel [mm]
Wsad Stock	Receptent Receptacle			
150	150	30	7,2	4x1

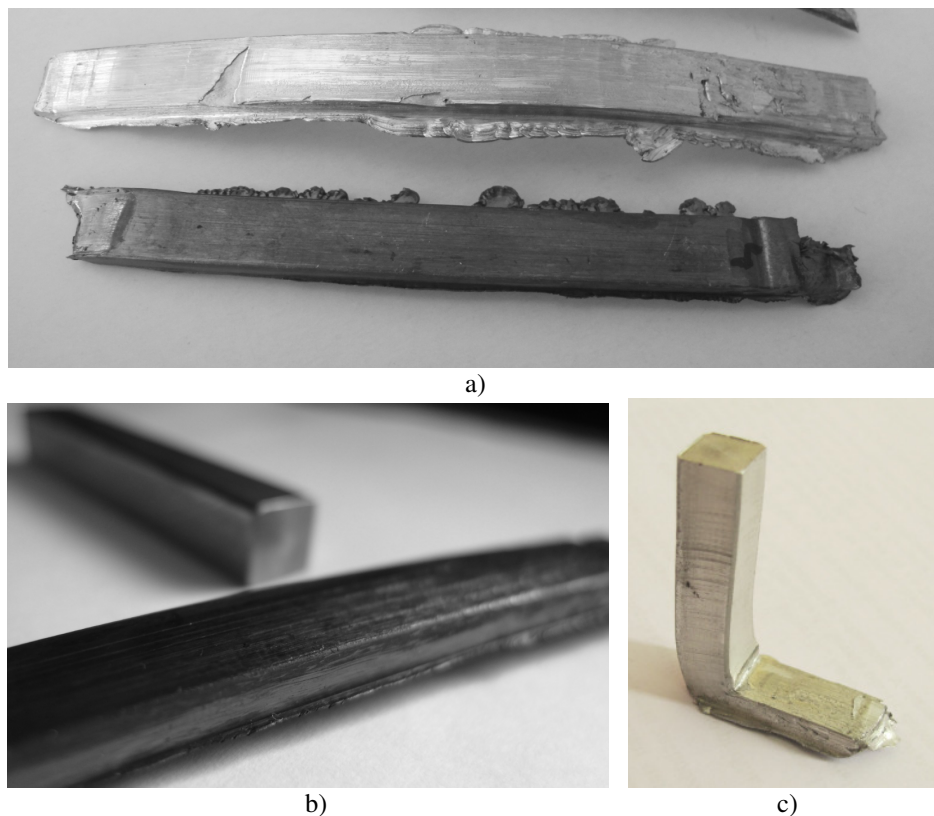
Tabela 2. Parametry kształtowania dla stali gatunku 15

Table 2. Forming parameters for 15 grade steel

Temperatura [°C] Temperature [°C]		Siła docisku stempla Ram pressing force [kN]	n tarczy [obr/min] disk rotation [rpm]	Kanał matrycy [mm] Die channel [mm]
Wsad Stock	Receptent Receptacle			
650	470	65	18	13x0,6

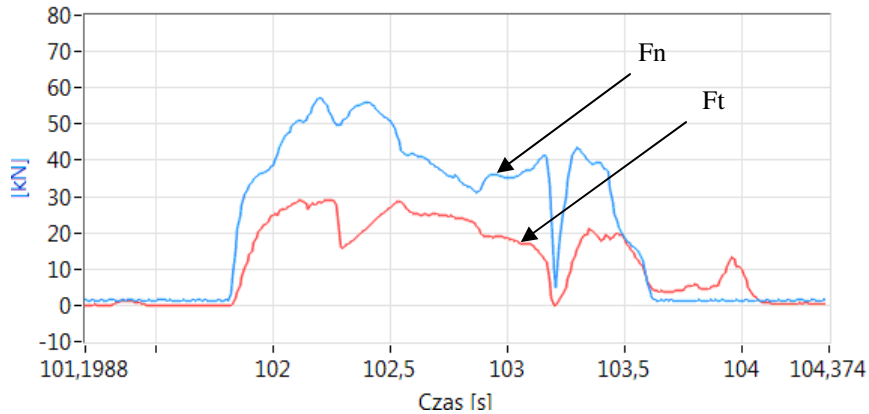
Przeprowadzone zostały również badania wyciskania profili ze wsadu o przekroju kwadratowym. Na rys. 5 przedstawione zostały profile o przekroju 4,5x10 mm wyciśnięte z wsadu o wymiarach 9x9x55 mm z materiału PA4 i stali gatunku 15. Profil ze stopu aluminium wyciśnięty w temperaturze 100°C oprócz wypłytki posiadał również pojedyncze pęknięcia poprzeczne (rys. 5a). Profil ze stali wyciskany w temperaturze 600°C pozbawiony był tych wad (rys. 5b).

Studies of section extrusion from stock with a square cross-section were also carried out. Fig. 5 shows sections with a cross-section of 4.5x10mm extruded from stock with dimensions of 9x9x55 mm made of PA4 aluminum and 15 grade steel. Besides a fin, the aluminum alloy section extruded at a temperature of 100°C also had individual transverse cracks (fig. 5a). The steel section extruded at a temperature of 600°C was free of these defects (fig. 5b).



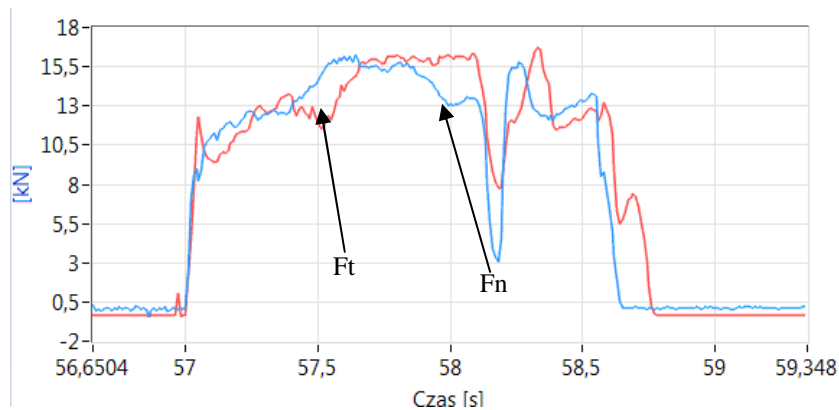
Rys. 5. a) Profile wyciśnięte ze stali gatunku 15 i aluminium PA4 o przekroju 4,5x10 mm ze wsadu 9x9x55 mm; b) profil wyciśnięty ze stali gat.15; c) częściowo wyciśnięty wsad z aluminium PA4

Fig. 5 a) Sections extruded from 15 grade steel and PA4 aluminum with a cross-section of 4.5x10 mm from 9x9x55 mm stock; b) section extruded from 15 grade steel; c) partially extruded PA4 aluminum stock



Rys. 6. Przebieg siły docisku wsadu do tarczy i siły bocznej działającej na matrycę w czasie kształtowania profilu, dla stali gat. 15

Fig. 6. Function of the pressing force of the stock on the disk and of the side force acting on the die over the time of section forming, for grade 15 steel



Rys. 7. Przebieg siły docisku wsadu do tarczy i siły bocznej działającej na matrycę w czasie kształtowania profilu, dla aluminium PA4

Fig. 7. Function of the pressing force of the stock on the disk and of the side force acting on the die over the time of section forming, for PA4 aluminum

Na rys. 6 i rys. 7 przedstawiony został wykres zależności siły pionowej i siły bocznej działającej na matrycę w czasie kształtowania profilu. Dla stali i aluminium siły potrzebne do wyciśnięcia profilu są różne (60 i 15 kN); dla stali siła pionowa jest dwa razy większa od siły działającej na matrycę, jednak dla aluminium siły te są sobie równe. Wskazywać to może na istotny wpływ współczynnika tarcia dla pary: tarcza obrotowa-wsad.

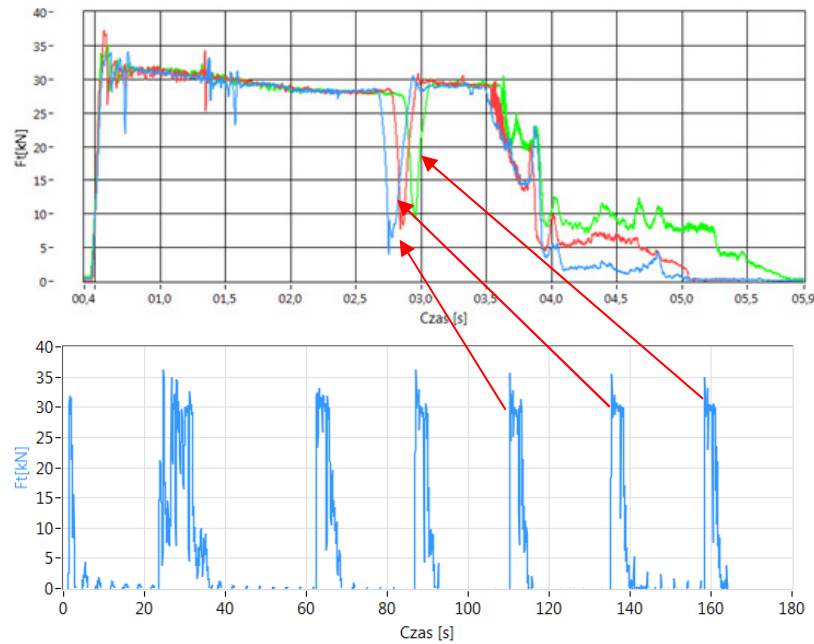
4.2. Stabilizacja procesu wyciskania

Opisywany proces, ze względu na modelowy charakter i laboratoryjne rozmiary stanowiska badawczego, prowadzony jest w sposób nieciągły, tzn. jedna próbka materiału wsadowego jest przeciskana kolejną.

Fig. 6 and Fig. 7 present a chart of the dependency of vertical force and side force acting on the die during forming of sections. The forces required to extrude a section vary between steel and aluminum (60 and 15 kN); for steel, the vertical force is two times greater than the force acting on the die, however for aluminum, these forces are equal to one another. This may indicate a significant impact of the friction coefficient for the pair: rotating disk – stock.

4.2. Stabilization of the extrusion process

Due to its model nature and the laboratory size of the testing station, the described process is performed in a non-continuous way, that is, one sample of stock material is pushed through by the next one.



Rys. 8. Przebieg siły działającej na matrycę w czasie wyciskania
 Fig. 8. Function of the force acting on the die over the time of extrusion

Na rys. 8 przedstawiono przebiegi siły bocznej działającej na matrycę w czasie. Zauważyć można, że po pierwszych 3 wyciśniętych wsadach następuje stabilizacja procesu.

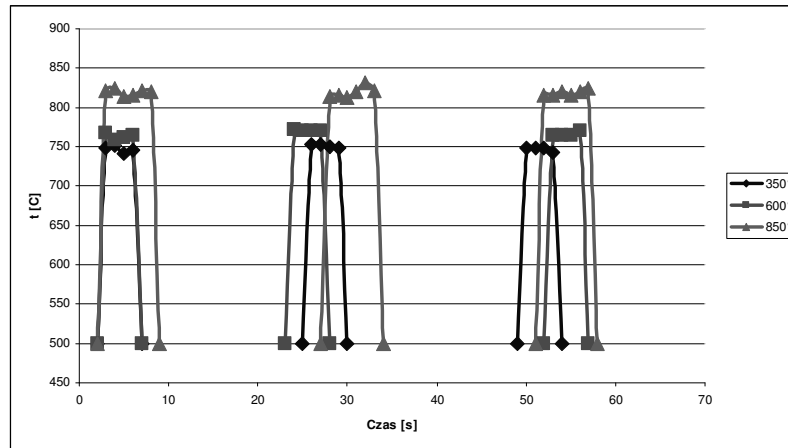
4.3. Pomiar temperatury kształtowanego materiału i ocena jakości powierzchni profili

Pomiar temperatury procesu przy użyciu pirometru dwubarwowego prowadzony był dla próbek stalowych o temperaturze początkowej od 350°C do 850°C, co 100°C; przy stałych pozostałych parametrach procesu- siła docisku 65 kN, obroty tarczy 18 obr/min. W badaniach kontrolowana była temperatura materiału po przejściu przez kanał boczny matrycy oraz na powierzchni ukształtowanego profilu. Na rys. 9 przedstawiono zestawienie temperatury po wyjściu materiału z kanału bocznego przy założonej temperaturze nagrzewu wsadu. Wartość mierzonej temperatury kształtowała się w przedziale 750-840°C, dla temperatury nagrzewu wsadu od 350-850°C. Wskazuje to, że temperatura generowana przez pracę tarcia, ma istotne znaczenie dla przebiegu procesu odkształcenia.

Fig. 8 presents functions of the side force acting on the die over time. It can be observed that after the first 3 extruded stocks, the process is stabilized.

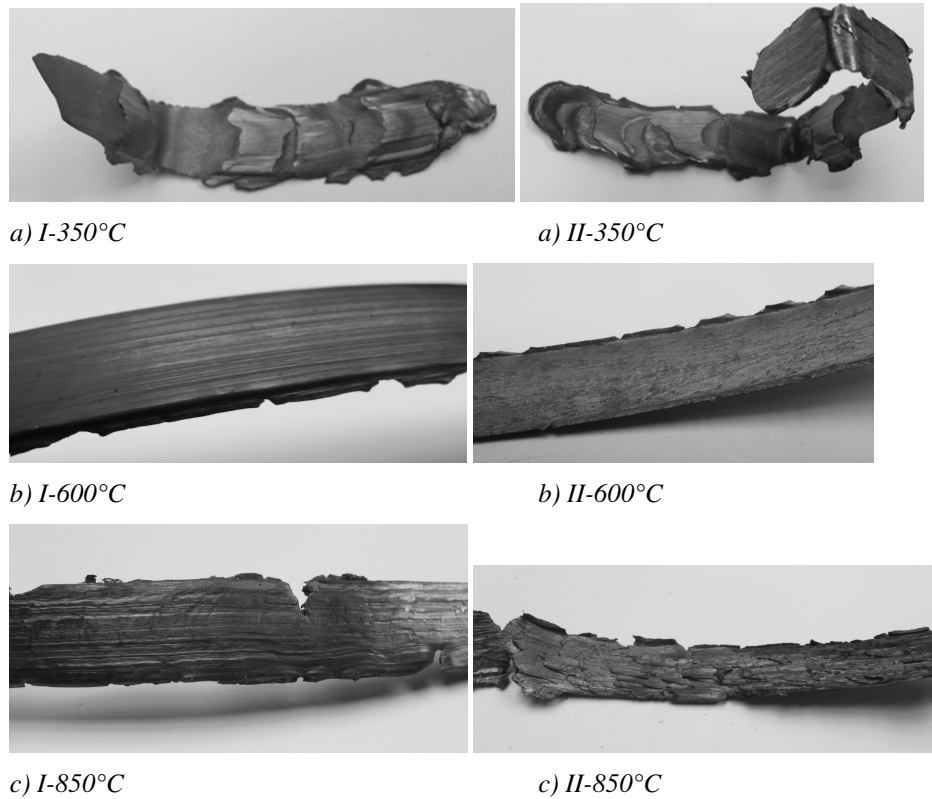
4.3. Measurement of the temperature of the formed material and assessment of the quality of section surfaces

Measurement of the process temperature using a two-color pyrometer was performed for steel samples at an initial temperature from 350°C to 850°C, every 100°C; with other process parameters constant - pressing force 65 kN, disk rotating speed 18 rpm. In studies, the temperature of the material after its passage through the side channel of the die and on the surface of the formed section was monitored. Fig. 9 presents a chart of the temperature after the material's exit from the side channel at the assumed stock heating temperature. The value of the measured temperature was within the range of 750-840°C, for a stock heating temperature from 350-850°C. This indicates that the temperature generated by friction work is of great significance to the course of the deformation process.



Rys. 9. Przebieg temperatury odkształconego materiału po wyjściu z matrycy, dla temperatury początkowej: 350°C, 600°C, 850°C

Fig. 9. Function of the temperature of the deformed material after its exit from the die, for initial temperatures: 350°C, 600°C, 850°C



Rys. 10. Profile wyciśnięte w różnej temperaturze: a) 350°C, b) 600°C, c) 850°C; I - powierzchnia od strony matrycy, II - powierzchnia od strony tarczy

Fig. 10. Sections extruded at various temperatures: a) 350°C, b) 600°C, c) 850°C; I - surface from the side of the die, II - surface from the side of the disk

Na rys. 10 przedstawiono widok uzyskanych profili podczas pomiarów temperatury. Dla każdej temperatury powierzchnia materiału kształtowanego, będąca w styku z matrycą, nie wykazuje zniszczenia na skutek szczepień adhezyjnych.

Fig. 10 presents a view of the sections obtained during temperature measurements. For each temperature, the surface of the formed material that was in contact with the die does not exhibit destruction resulting from adhesive grafting.

Natomiast powierzchnia materiału kształtowanego w temperaturze 850°C, będąca w styku z tarczą obrotową, pokryta jest bardzo dużą liczbą śladów po wyrwaniach materiału. Jest to efekt wyrwania zrostów tarczowych. Stwierdzić można, że dla temperatury z zakresu 550-650°C, ilość szczepień materiału tarczy i materiału kształtowanego jest niewielka, powierzchnia pokryta jest niewielką liczbą płytkich wyrwań – rys. 10b. Natomiast dla temperatury 350°C, śladów po wyrwaniach nie zaobserwowano, powierzchnia będąca w styku z tarczą jest gładka, jednak niska temperatura i duże odkształcenie powodowało ścinanie w regularny sposób materiału odkształcanego co 30 mm – rys. 10a.

5. PODSUMOWANIE

W badaniach wykazano, że w zaproponowanym procesie wyciskania możliwe jest kształtowanie profili ze stali i stopów aluminium. Istnieje wąska granica temperatury, dla której jakość wyciskanych profili jest zadowalająca. Dla badanego gatunku stali jest to temperatura $600\pm 50^\circ\text{C}$. Podczas procesu kształtowania istotną rolę odgrywa tarcie zachodzące pomiędzy materiałem kształtowanym a tarczą, ponieważ wprowadza siłę styczną do kierunku płynięcia kształtowanego profilu i podgrzewa lokalnie materiał.

Wydaje się, że w przypadku stopu aluminium nastąpiło znaczne rozdrobnienie ziaren. Dla potwierdzenia tej hipotezy prowadzone są obecnie badania na stopie 1050 i żelazie 04J z określoną wcześniej wielkością ziaren.

Badania przeprowadzono w ramach pracy statutowej BO.901.16.02 pt. „Modelowe badania specjalnych metod kształtowania wyrobów w procesach obróbki plastycznej”.

LITERATURA / REFERENCES

- [1] Azushima A., Kopp R., Korhonen A., Yang D.Y., Micari F., Lahoti G.D., Groche P., Yanagimoto J., Tsuji N., Rosochowski A., Yanagida A.: Severe plastic deformation (SPD) processes for metals. CIRP Annals - Manufacturing Technology 2008 Vol. 57 Iss. 2 s. 716–735.
- [2] Rodak K.: Ultrafine grain structures in Cu by using combined method of deformation. Rudy i Metale Nieżelazne 2009 R. 54 nr 2 s. 82-86.

However, the surface of material formed at a temperature of 850°C and in contact with the rotating disk is covered with a very large number of traces created through ripping off of material. This is the effect of ripping off at points of adhesion created due to friction. It can be stated, that for a temperature within the range 550-650°C, the number of grafts of the disk material and formed material is small, the surface is covered by a small number of shallow tearings – fig. 10b. However, at a temperature of 350°C, no such traces were observed, the surface in contact with the disk is smooth, however low temperature and high deformation caused regular shearing of the deformed material every 30 mm – fig. 10a.

5. SUMMARY

Studies proved that it is possible to form sections made from steel and aluminum alloys using the proposed extrusion method. There is a narrow temperature range for which the quality of extruded sections is satisfactory. For the studied steel grade, this is the temperature of $600\pm 50^\circ\text{C}$. During the forming process, the friction taking place between the formed material and disk plays a significant role, because it introduces a force tangent to the direction of flow of the formed sections and locally heats the material.

It seems that significant grain refinement took place in the case of the aluminum alloy. To confirm this hypothesis, studies are currently being conducted on 1050 alloy and 04J iron with a previously determined grain size.

The investigation has been performed within the statute work BO.901.16.02 entitled "Model investigation of special methods of product shaping in metal forming processes".

-
- [3] Rodak K., Wrożyna A., Niewielski G.: The structure changes in copper after deformation under controlled strain path. *Inżynieria Materiałowa* 2007 Nr 3-4 s. 589.
 - [4] Cho J.R., Jeong H.S.: CONFORM process: surface separation, curling and process characteristics to the wheel diameter. *Journal of Materials Processing Technology* 136 (2003) s. 217–226.
 - [5] Lacki P.: Modelowanie tarcia w procesach objętościowej obróbki plastycznej. Monografia - Politechnika Częstochowska, Wydanie 169, s. 123.
 - [6] Bryła K., Dutkiewicz J., Malczewski P.: Grain refinement in AZ31 alloy processed by equal channel angular pressing. *Archives of Materials Science and Engineering*, November 2009 s. 17-22.
 - [7] Zgł. pat. pol. P.396912 pt. Sposób wytwarzania profili z metali i zespół do wytwarzania profili z metali.