



Wytwarzanie struktury ultradrobnoziarnistej z wykorzystaniem koncepcji metody wyciskania bocznego wspomaganego tarcie

Achievement of an ultra-fine-grained structure using the concept of the friction-assisted lateral extrusion method

(1) Szymon Szkudelski*, (2) Stanisław Ziółkiewicz, (3) Beata Pachutko

Instytut Obróbki Plastycznej, ul. Jana Pawła II 14, 61-139 Poznań, Poland

Informacje o artykule

Data przyjęcia: 8.05.2015
Data recenzji: 18.08.2015
Data akceptacji: 30.08.2015

Wkład autorów

- (1) Autor artykułu, badania laboratoryjne
- (2) Autor koncepcji i założeń
- (3) Badania metalograficzne

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań profili wytworzonych metodą wyciskania bocznego wspomaganego tarcie na urządzeniu znajdującym się w Instytucie Obróbki Plastycznej w Poznaniu. Metoda kształtowania polega na wyciskaniu bocznym materiału umieszczonego wewnątrz podgrzewanego pojemnika, na skutek połączenia siły osiowo działającej na próbkę oraz siły tarcia generowanej przez obrotową tarczę. Cykl badań prowadzony był przy trzech prędkościach obrotowych: 8, 18 i 28 obr/min oraz przy trzech wartościach siły wciskającej 30, 55 oraz 80 kN. Wsad wyciskany ze stali gat. 15 grzano do 600° C i poddano stopniu przerobu $\lambda=8$. Struktury, uzyskanych w ten sposób profili, obserwowano na mikroskopie świetlnym. Profil o największym rozdrobnieniu ziarna (8 obr/min, 80 kN) poddano obserwacjom EBSD, które pozwoliły określić średnią wielkość ziaren na poziomie 0,53 μm . Tak duże rozdrobnienie jest efektem nałożenia się silnego odkształcenia materiału i przypuszczalnie dynamicznej rekrytalizacji zachodzącej podczas procesu kształtowania. Najlepsza powierzchnia zewnętrzna profili została uzyskana przy małych prędkościach obrotowych i maksymalnej sile wciskającej wsad w obrotową tarczę. Przy prędkości obrotowej 18, 28 obr/min powierzchnia profili charakteryzowała się dużą nieregularnością śladów powstałych na powierzchni będącej w styku z obrotową tarczą. Dla profili o najlepszym stanie powierzchni zewnętrznej wykonano badanie rozkładu mikrotwardości HV0,3 na przekroju poprzecznym – badanie to wykazało najwyższą twardość dla profili uzyskiwanych przy 8 obr/min oraz 80 kN.

Słowa kluczowe: wyciskanie boczne, tarcie, SPD, struktura ultradrobnoziarnista

Article info

Received: 8.05.2015
Reviewed: 18.08.2015
Accepted: 30.09.2015

Authors' contribution

- (1) Author of the article, laboratory research
- (2) Author of the concept and assumptions
- (3) Metallographic research

Abstract

This article presents the results of studies on sections manufactured by friction-assisted lateral extrusion on a machine found at the Metal Forming Institute in Poznań. The forming method is based on lateral extrusion of material placed inside of a heated container as a result of the combination of axial forces acting on the specimen and friction generated by the rotating disk. The test cycle was performed at three rotational speeds: 8, 18, and 28 rpm and at three values of extruding force 30, 55, and 80 kN. The extruded grade 15 steel stock was heated to 600° C and subjected to degree of processing $\lambda=8$. The structures of sections obtained in this manner were observed under a light microscope. The section with the finest grains (8 rpm, 80 kN) was examined by EBSD, which made it possible to determine a 0.53 μm average grain size. This fine-grained structure is the effect of the combination of strong deformation of a layer of the material and the presumably dynamic recrystallization taking place during the forming process. The best exterior surface of sections was achieved at low rotational speeds and maximum force punching the stock into the rotating disk. At rotational speeds 18, 28 rpm, the surface of sections was characterized by high irregularity of traces formed on the surface

* Autor do korespondencji. Tel.: +48 61 657 05 55; fax: +48 61 657 07 21; e-mail: szymon.szkudelski@inop.poznan.pl

* Corresponding author. Tel.: +48 61 657 05 55; fax: +48 61 657 07 21; e-mail: szymon.szkudelski@inop.poznan.pl

in contact with the rotating disk. Testing of HV0.3 microhardness distribution on the cross-section was conducted for sections with the best exterior surface condition – the greatest hardness was obtained for sections produced at 8 rpm and 80 kN.

Keywords: lateral extrusion, friction, SPD, ultra-fine-grained structure

1. WPROWADZENIE

Nowe technologie kształtowania materiałów oparte na silnym odkształceniu plastycznym mogą wpływać bardzo korzystnie na właściwości materiałów [1, 2, 3]. Szczególnie interesujące są materiały o silnie rozdrobnionej strukturze, charakteryzujące się m.in. wysokimi własnościami wytrzymałościowymi. Wyniki prezentowane w artykule są efektem zastosowania nowej technologii wyciskania, która pozwoliła na uzyskanie stali o ultradrobnych ziarnach. Technologia wyciskania bocznego wspomaganego tarciem powstała jako połączenie idei metody ECAP, gdzie materiał kształtowany przechodzi przez kątową matrycę oraz metody CONFORM, wykorzystującej tarcie koła roboczego względem materiału. Połączenie cech wyżej wymienionych metod pozwoliło na uzyskiwanie znacznego stopnia przerobu oraz wytworzenie silnie rozdrobnionej struktury. Uzyskiwane wyroby charakteryzują się zróżnicowanym stanem powierzchni zewnętrznej, a także stopniem rozdrobnienia struktury.

2. IDEA PROCESU

Idea metody wyciskania bocznego wspomaganego tarciem na poboczniczy obracającej się tarczy jest efektem prac prowadzonych przez Instytut Obróbki Plastycznej w Poznaniu w ramach projektu POIG Poddziałanie 1.3.1 pt. „Kompleksowy system ekspertowy do optymalizacji trwałości narzędzi w procesach kucia” (nr umowy WND-POIG.01.03.01-12-161/09, Konsorcjum Politechnika Wroclawska i Instytut Obróbki Plastycznej) [4, 5].

Na rys. 1 przedstawiona została zasada nowego procesu. Wsad (4), w postaci odcinka pręta, umieszczony jest w pojemniku (1). W zależności od materiału kształtowanego pojemnik może być podgrzewany dla zapewnienia stałej temperatury, ułatwiającej uplastycznienie wsadu.

1. INTRODUCTION

New material forming technologies based on strong plastic deformation may have a positive impact on the properties of materials [1, 2, 3]. Materials with a highly fine-grained structure, characterized by e.g. high strength properties, are particularly interesting. The results presented in this article are the effect of the application of extrusion technology, which made it possible to obtain ultra-fine-grained steel. Friction-assisted lateral extrusion technology was created as a combination of the ECAP concept, where the material that is being formed passes through an angular die, and the CONFORM method, which utilizes the friction of the circular working surface on the material. A high degree of processing and the formation of a highly fine-grained structure were made possible by combining the features of the aforementioned methods. Obtained products are characterized by a varying condition of the exterior surface and level of structural fineness.

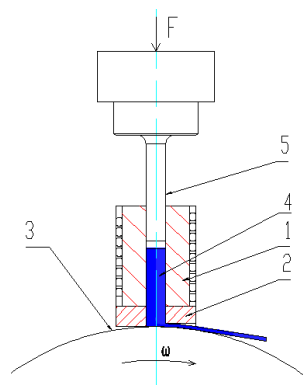
2. CONCEPT OF THE PROCESS

The concept of the lateral extrusion assisted by friction on the side surface of a rotating disk is the result of research conducted by the Metal Forming Institute in Poznań within the framework of the IEOP project Submeasure 1.3.1 titled “Complete expert system for optimizing tool lifetime in forging processes” (contract no. WND-POIG.01.03.01-12-161/09, Consortium comprising Wrocław University of Technology and the Metal Forming Institute) [4, 5].

The concept of the new process has been presented in Fig. 1. The stock (4), in the form of a rod segment, is placed in container (1). Depending on the material that is to be formed, the container may be heated to provide a constant temperature facilitating plasticization of the stock.

Pojemnik z jednej strony zamknięty jest matrycą (2) z otworem z wyprofilowanym kształtem – kanałem bocznym. Otwór matrycy zamknięty jest obracającą się tarczą (3). Umieszczony w pojemniku wsad dociskany jest do tarczy stemplem (5). Złożenie siły tarcia obracającej się tarczy i siły osiowej wywieranej przez stempel powoduje uplastycznienie wsadu w strefie kanału bocznego matrycy, a następnie jego wypłynięcie.

The container is closed by the die (2) on one side, with a shaped opening – the lateral channel. The die's opening is closed by a rotating disk (3). The stock in the container is pushed towards the disk by the punch (5). The combination of the friction with the rotating disk and axial force exerted by the punch causes plasticization of the stock in the area of the die's side channel, and it soon flows out.



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

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

W metodzie tej tarcie, oprócz siły wciskającej wsad w tarczę, jest głównym czynnikiem decydującym o kształtowaniu materiału. Można wykazać podobieństwo tej metody do metody wyciskania przez kanał kątowy (ECAP), w której następuje zmiana kierunku płynięcia materiału i uruchamiane są dodatkowe płaszczyzny ścinania. Dlatego też wydaje się, iż własności materiału po wyciskaniu bocznym wspomaganym tarciem obrotowej tarczy, podobnie jak przy wyciskaniu przez kanał kątowy ECAP, pozwolą otrzymać struktury silnie rozdrobnione [3]. Metoda wyciskania bocznego wspomaganego tarciem pozwala na uzyskanie odkształceń, których otrzymanie tradycyjnymi metodami wyciskania wymaga wielu operacji.

In this method, friction, besides the force pushing the stock into the disk, is a primary factor decisive to forming of the material. There are similarities between this method and the equal channel angular pressing (ECAP) method, in which the direction of material flow is changed and additional shear planes are activated. This is why it seems that the properties of material after lateral extrusion assisted by friction with a rotating disk will make it possible to obtain highly fine-grained structures, similarly as with equal channel angular pressing extrusion [3]. Friction-assisted lateral extrusion makes it possible to achieve deformations that would require many traditional extrusion operations.

3. STANOWISKO BADAWCZE

Badania doświadczalne procesu wyciskania bocznego wspomaganego tarciem obrotowej tarczy wykonano na stanowisku badawczym

3. RESEARCH STATION

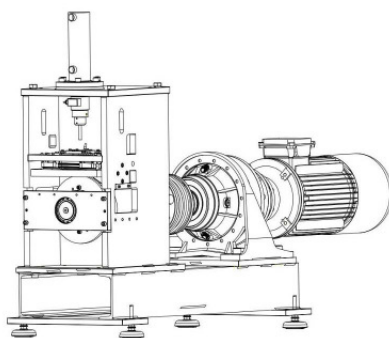
Experimental tests of the friction-assisted lateral extrusion process were performed on research station at the Metal Forming Institute. Fig. 2

w Instytucie Obróbki Plastycznej. Na rys. 2 przedstawiono schemat urządzenia w widoku perspektywnym. Stanowisko badawcze wyposażone zostało w układy pomiarowe, pozwalające na rejestrację takich parametrów procesu, jak: siły wciskania materiału w poboczną powierzchnię tarczy, moment obrotowy, droga stempla, kąt obrotu wału, temperatura matrycy, temperatura tarczy obrotowej, temperatura kształtowanego materiału. Urządzenie posiada możliwość nastawy takich parametrów, jak:

- ciśnienie robocze układu hydraulicznego – od 40 do 160 bar, odpowiadające sile 20–80 kN, (prędkość liniowa siłownika to 30 mm/s),
- prędkość obrotowa tarczy – od 0 do 28 obr/min,
- utrzymanie temperatury wewnątrz pojemnika – od 20 do 470°C.

presents a diagram of the machine in perspective view. The research station was equipped with measuring systems enabling registration of such process parameters as: force pressing the material into the disk's side surface, torque, path of punch, cylinder rotation angle, die temperature, rotating disk temperature, temperature of the material being formed. The machine also makes it possible to set such parameters as:

- *working pressure of the hydraulic system – from 40 to 160 bar, corresponding to 20–80 kN (linear speed of actuator equal to 30 mm/s),*
- *rotational speed of disk – from 0 to 28 rpm,*
- *temperature maintained inside container – from 20 to 470°C.*



Rys. 2. Widok urządzenia badawczego w ujęciu perspektywnym
Fig. 2. Perspective view of the research station

4. METODOLOGIA BADAWCZA

Celem badań była ocena możliwości rozdrobnienia struktury na urządzeniu badawczym dla przyjętych parametrów technologicznych nowego procesu kształtowania. Jako parametry zmienne przyjęto:

- maksymalną, nastawioną siłę na siłowniku hydraulicznym stempla: 30, 55, 80 kN, odpowiadającą minimalnemu, pośredniemu i maksymalnemu ciśnieniu układu hydraulicznego (odpowiednio 60, 110, 160 bar),
- prędkość obrotową tarczy: 8, 18, 28 obr/min.

4. RESEARCH METHODOLOGY

The objective of research was to assess the capabilities of refining the structure on a research machine according to the accepted process parameters of the new forming process. The following were accepted as variable parameters:

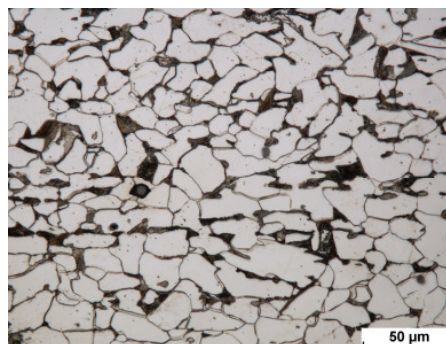
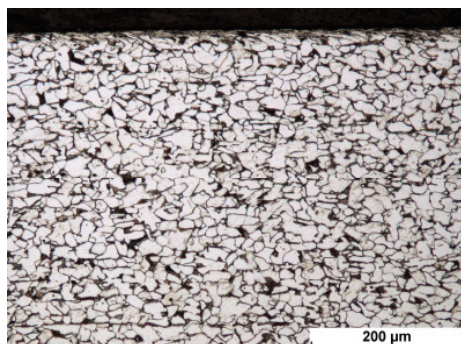
- *maximum set force on punch's hydraulic actuator: 30, 55, 80 kN, corresponding to minimum, medium, and maximum pressure of the hydraulic system (60, 110, 160 bar, accordingly),*
- *rotational speed of disk: 8, 18, 28 rpm.*

W przeprowadzonych badaniach przyjęto stopień przerobu $\lambda=8$, rozumiany jako stosunek przekroju początkowego wsadu do przekroju końcowego profilu $\lambda_s=S_0/S_1$ oraz temperaturę nagrzewania wyjściowego wsadu na 600°C i pojemnika na 470°C. Przyjęty zakres prędkości obrotowej oraz siły wciskającej wynikają z ograniczenia maszyny lub z przeprowadzonych prób technologicznych, na podstawie których określono graniczne wartości parametrów nastawczych, przy których następuje wypływ materiału.

Badania kształtowania prowadzono na stali gat. 15 o strukturze ferrytyczno-perlitycznej (rys. 3), jednorodnej w całym przekroju. Materiał do badań dostarczony był w postaci pręta ciągnionego o średnicy 12 mm, który następnie poddany został frezowaniu na wymiar 9x9x55 mm. Materiał przed plastycznym kształtowaniem nie został poddany żadnej obróbce cieplnej. Uzyskane profile po wyciśnięciu stygły swobodnie na powietrzu, do temperatury otoczenia (20°C).

Degree of processing $\lambda=8$ was accepted in conducted tests, understood as the ratio of the initial cross-section of the stock to the final cross-section of the section $\lambda_s=S_0/S_1$, as well as heating temperatures of 600°C for the starting stock and 470°C for the container. The accepted ranges of rotational speeds and pressing force arise from the machine's limitations or from technological tests conducted to determine limit values of control parameters at which the material flows out of the die.

Forming tests were conducted on grade 15 steel with a ferritic-pearlitic structure (Fig. 3), uniform over the entire cross-section. The material for tests was delivered in the form of a drawn rod 12 mm in diameter, which was then milled to 9x9x55 mm dimensions. Before plastic forming, the material was not subjected to any heat treatment. Sections obtained after extrusion cooled freely in air, to room temperature (20°C).



Rys. 3. Struktura stali gat. 15 na przekroju wzdłużnym (stan dostawy)
Fig. 3. Structure of 15 grade steel on longitudinal section (as-delivered state)

5. BADANIA ROZDROBNIENIA STRUKTURY

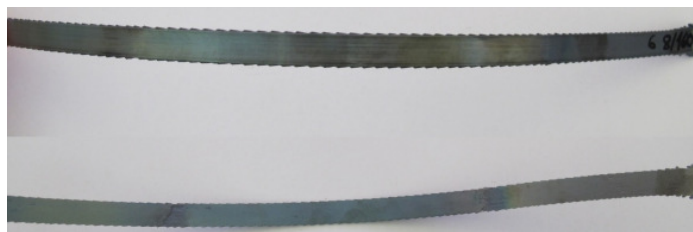
Na rys. 4 i 5 pokazano przykładowe profile dla stopnia przerobu $\lambda=8$ (uzyskany przekrój poprzeczny to 10,1x1 mm) przy różnych prędkościach obrotowych i różnej sile stempla. Zdjęcia te przedstawiają różnicę między profilami uzyskiwanymi przy zmiennych parametrach procesu. Dla dokładnego zobrazowania zmian zachodzących na powierzchni uzyskiwanych profili zestawiono zdjęcia powierzchni profili będących w styku z obrotową tarczą. Zdjęcia wykonano przy pomocy mikroskopu stereoskopowego.

5. EXAMINATIONS OF STRUCTURE

Fig. 4 and 5 show examples of sections at degree of processing $\lambda=8$ (10.1x1 mm final cross-section) at different rotational speeds and different punch forces. These photographs present the difference between sections obtained according to variable process parameters. To precisely illustrate the changes occurring on the surface of obtained sections, photographs of section surfaces in contact with the rotating disk were compared. Photographs were taken using a Stemi 2000C (Zeiss) stereoscopic microscope. Tab. 1 presents section

wego Stemi 2000C (Zeiss). W tab. 1 przedstawiono powierzchnie profili stykające się podczas kształtowania z powierzchnią tarczy dla odkształcenia $\lambda=8$. Powierzchnia profilu wykonana przy prędkości obrotowej 18 oraz 28 obr/min charakteryzuje się dużą nieregularnością śladów powstałych prawdopodobnie na skutek ponad dziesięcio- i czternastokrotnie większej prędkości liniowej obrotowej powierzchni tarczy w stosunku do prędkości stempla. Świadczyłoby to o tym, że w trakcie procesu mamy do czynienia z termomechanicznymi warunkami poślizgu pomiędzy powierzchnią tarczy a materiałem obrabianym, w którym generowany jest gwałtowny wzrost temperatury. Potwierdzeniem nagłej zmiany prędkości płynięcia materiału w strefie dolnej jest falowe ułożenie pasm ziaren (rys. 6) oraz wyniki pomiarów temperatury profilu na wyjściu z matrycy (rys. 7). Z pomiarów temperatury wynika, że wzrost prędkości obrotowej wpływa na wzrost temperatury profilu na wyjściu z matrycy. Dla prędkości obrotowej 28 obr/min temperatura profilu zawierała się w zakresie 800–850°C, dla 18 obr/min temperatura profilu to 700–750°C, natomiast najmniejsza temperatura 600–650°C rejestrowana była dla 8 obr/min. Pomiar temperatury wykonano za pomocą pirometru dwubarwowego Raytek FR1A.

surfaces in contact with the disk surface during the forming process, for $\lambda=8$ deformation. The surface of the section was made at a rotational speed of 18 and 28 rpm and is characterized by high irregularity of traces, which were probably formed as a result of the fact that the linear speed of the rotating disk's surface was over 10 times and 14 times greater than that of the punch. This would indicate that, during the process, we are dealing with thermomechanical slipping conditions between the disk's surface and processed material, under which a sudden increase in temperature is generated. The wavy arrangement of grain bands (Fig. 6) and the results of section temperature measurements of the section upon exiting the die (Fig. 7) confirm the sudden change of material flow rate in the bottom area. Temperature measurements show that the increase in rotational speed affects growth of section temperature upon exiting the die. At rotational speed 28 rpm, section temperatures fell within the 800–850°C range, for 18 rpm section temperature was 700–750°C, and 600–650°C temperatures were registered at 8 rpm. Temperature measurement was performed using a Raytek FR1A two-color pyrometer.



Rys. 4. Wyciśnięty profil, parametry procesu: 8 obr/min, 80 kN, $\lambda=8$










Fig. 4. Extruded section, process parameters: 8 rpm, 80 kN, $\lambda=8$

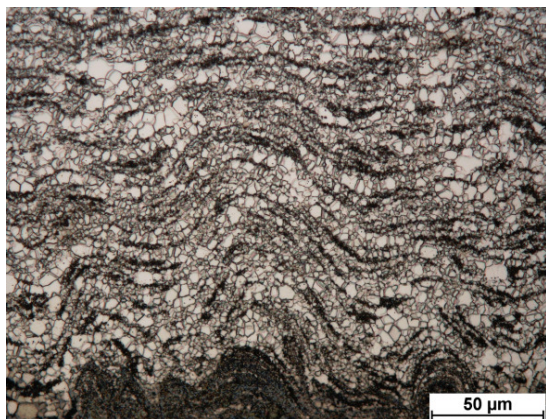


Rys. 5. Wyciśnięty profil, parametry procesu: 28 obr/min, 30 kN, $\lambda=8$

Fig. 5. Extruded section, process parameters: 28 rpm, 30 kN, $\lambda=8$

Tab. 1. Profile o grubości 1 mm; $\lambda=8$; temperatura nagrzewu 600°C; powierzchnia od strony tarczy
 Tab. 1. Sections with 1 mm thickness; $\lambda=8$; heating temperature 600°C; surface on the side of the disk

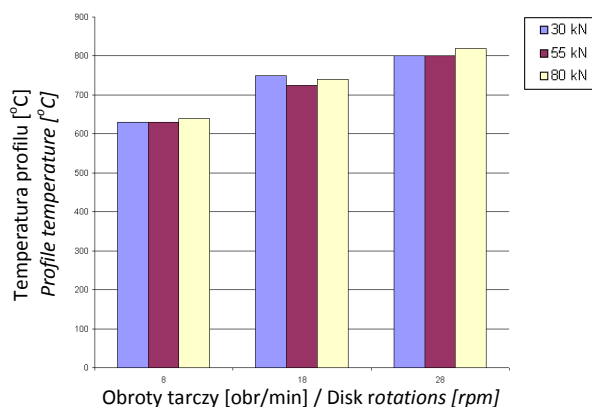
Profile o grubości 1 mm; $\lambda=8$; temperatura nagrzewu 600°C; powierzchnia od strony tarczy Sections with 1 mm thickness; $\lambda=8$; heating temperature 600°C; surface on the side of the disk			
	30 kN	55 kN	80 kN
8 obr/min / 8 rpm			
18 obr/min / 18 rpm			
28 obr/min / 28 rpm			



Rys. 6. Falowe ułożenie ziaren profilu w strefie będącej w styku z tarczą (18 obr/min)

Fig. 6. Wavy arrangement of grains in the area of contact with the disk (18 rpm)

Badania metalograficzne profili wykonywano przy pomocy optycznego mikroskopu świetlnego Eclipse L150 (Nikon). Obserwacje prowadzono na czwartym profilu wyciśniętym z każdej próby. Zdjęcia struktur na przekroju wzdłuż-



Rys. 7. Zestawienie temperatur profili na wyjściu z matryc, dla stopnia przerobu $\lambda=8$

Fig. 7. Comparison of section temperatures upon exiting the die, for degree of processing $\lambda=8$

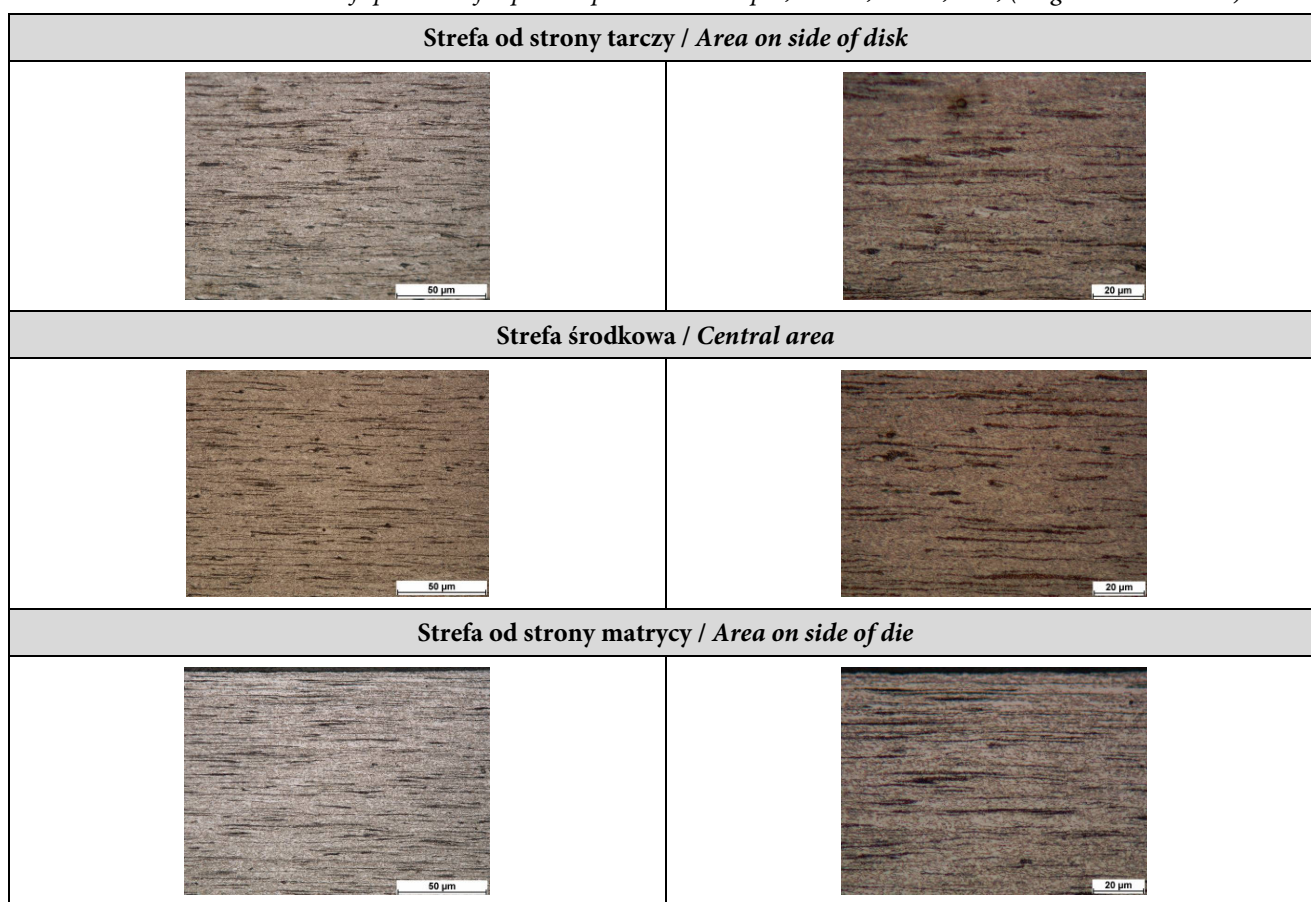
Metallographic examinations of sections were conducted using an Eclipse L150 (Nikon) light microscope. The fourth extruded section from every test was examined. Photographs of structures on the longitudinal section and presented in

nym przedstawiono w tab. 2–3. Pole obserwacji podzielono na trzy strefy: strefę od strony matrycy, strefę środkową i strefę od strony tarczy. Obserwacje wykazały, że najdrobniejszą i najbardziej równomierną strukturę w całym przekroju posiadały profile uzyskane przy 8 obr/min i sile 80 kN (tab. 2). Dla porównania, znacznie większe ziarna można zaobserwować przy parametrach 18 obr/min i 80 kN. W strukturze badanych profili można zauważyć pasmowe ułożenie wydzieleni cementytu.

Tab. 2–3. The field of observation was divided into three areas: the area on the side of the die, the central area, and the area on the side of the disk. Examinations showed that sections obtained at 8 rpm and 80 kN of force (Tab. 2) had the most refined and most uniform structure throughout their entire cross-sections. Much larger grains can be observed for parameters 18 rpm and 80 kN. Cementite precipitates are arranged in bands in the structure of studied sections.

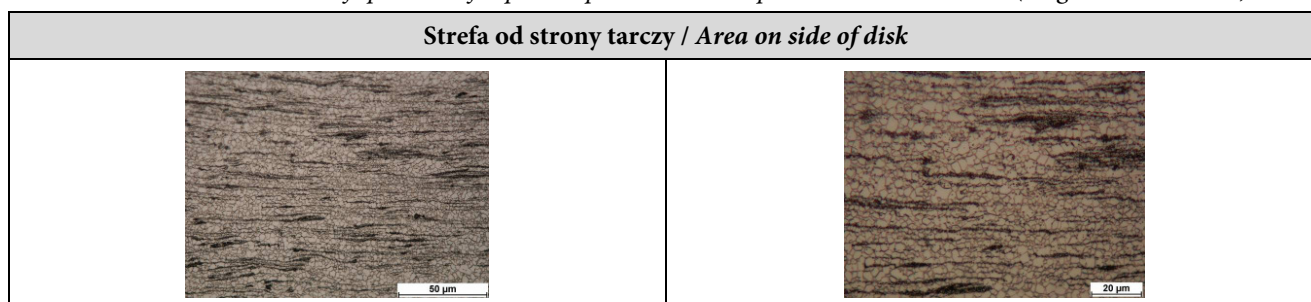
Tab. 2. Mikrostruktury próbki dla parametrów procesu: 8 obr/min; 80 kN ; 600°C; $\lambda=8$; (przekroje wzdłużne)

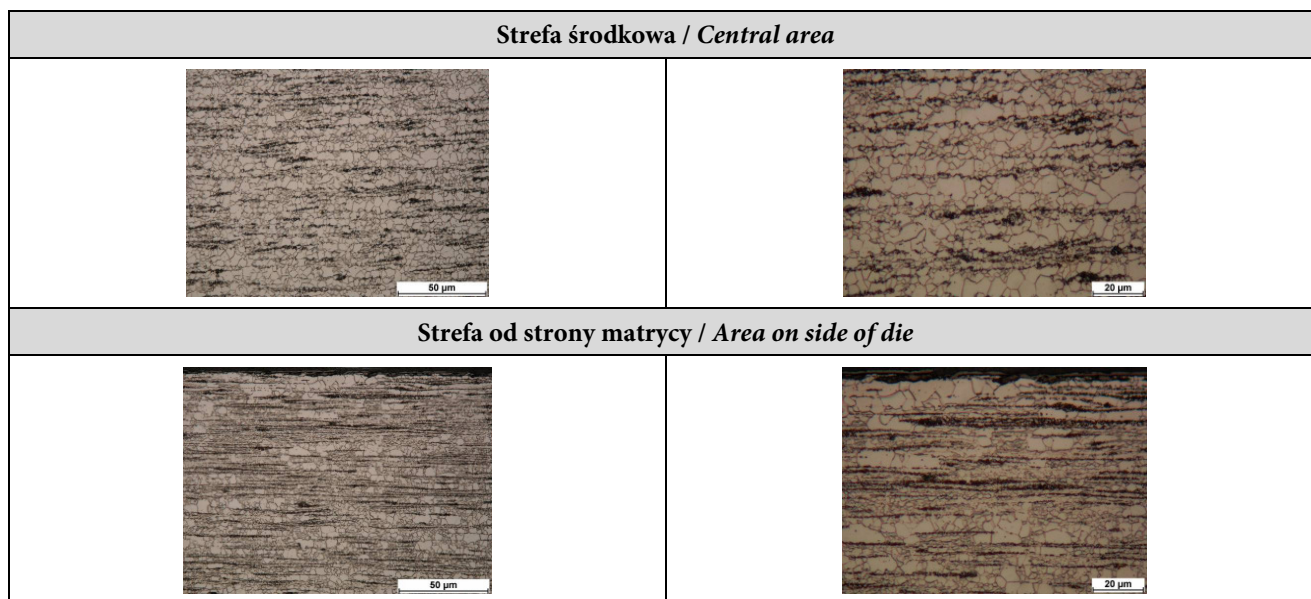
Tab. 2. Microstructures of specimens for process parameters: 8 rpm; 80 kN ; 600°C; $\lambda=8$; (longitudinal sections)



Tab. 3. Mikrostruktury próbki dla parametrów procesu: 18 obr/min; 80 kN ; 600°C; $\lambda=8$; (przekroje wzdłużne)

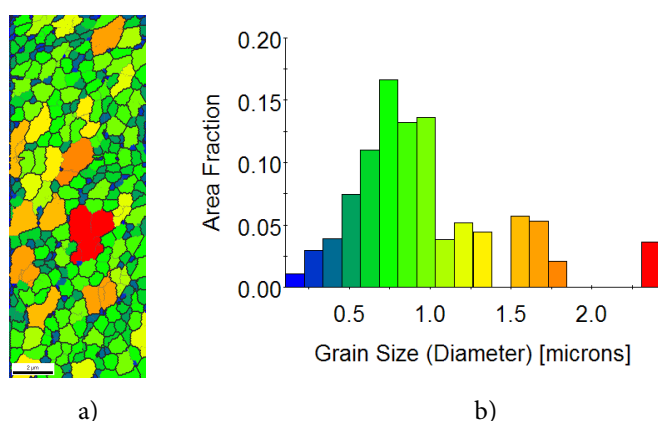
Tab. 3. Microstructures of specimens for process parameters: 18 rpm; 80 kN ; 600°C; $\lambda=8$; (longitudinal sections)





Dla próbek charakteryzujących się największym rozdrobnieniem struktury (dla parametrów: 8 obr/min i 80 kN) wykonano również badania EBSD. Obserwacjom poddano strefę środkową z przekroju wzdłużnego próbki. Badania EBSD wykonano przy napięciu przyspieszającym wiązki elektronów 20kV. Obszar analizy wynosił 6,86x18,31 nm, krok analizy 60 nm. Dane uzyskane w wyniku analizy EBSD zostały przetworzone przy użyciu programu TSL®. Na rys. 8a można zaobserwować, że strukturę tworzą bardzo drobne ziarna fazy α , a na rys. 8b histogram wielkości ziaren. Średnia wielkość ziaren wynosi 0,53 μm . Jest to zatem struktura ultra-drobnoziarnista.

EBSB examinations were also conducted for specimens characterized by the greatest refinement of structure (for parameters: 8 rpm and 80 kN). The central area of a specimen's longitudinal section was also examined. EBSB examinations were performed at an electron beam acceleration voltage of 20 kV. The area of analysis was 6.86x18.31 nm, with a 60 nm analysis step. Data obtained as a result of EBSB analysis was processed using TSL® software. Fig. 8a shows that the structure is made up of very fine α -phase grains, and Fig. 8b presents a grain size histogram. The average grain size is 0.53 μm . Thus, this is an ultra-fine-grained structure.



Rys. 8. Mapa – (a) i histogram – (b) rozkład wielkości ziaren (średnica równoważna)

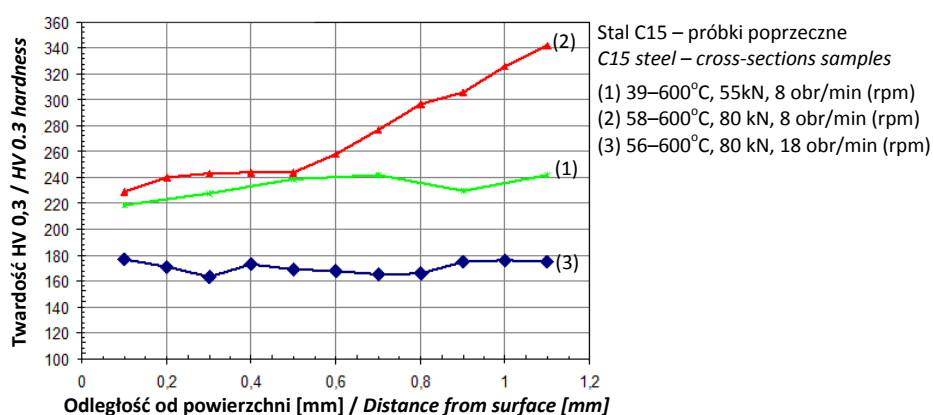
Fig. 8. Map – (a) and histogram – (b) grain size distribution (equivalent diameter)

Na zglądach poprzecznych profili wykonano również pomiary twardości Vickersa za po-

Vickers hardness measurements were also performed on metallographic cross-sections of sec-

mocą twardościomierza FR-800 (Future Tech Corp). Pomiar wykonywano od powierzchni będącej w styku z matrycą do powierzchni będącej w styku z tarczą. Na rys. 9 przedstawiono rozkłady twardości dla profili przy odkształceniu $\lambda=8$. Największa twardość występuje na przekroju profilu uzyskanym przy 8 obr/min i 80 kN, która rośnie wraz z odległością od powierzchni do 340 HV 0,3. Wzrost twardości dla tego profilu może być skutkiem intensywnego efektu rozdrobnienia struktury w części mającej styk z obrotową tarczą, co zaobserwować można w tab. 2. Takiego efektu nie obserwuje się dla profilu uzyskanego przy 18 obr/min i 80 kN (tab. 3), gdyż w przekroju całego profilu nastąpiła rekrytalizacja ziaren.

tions by means of an FR-800 (Future Tech Corp) hardness tester. Measurements were performed from the surface in contact with the die to the surface in contact with the disk. Fig. 9 presents hardness distributions for sections at $\lambda=8$ deformation. The greatest hardness is present on the cross-section obtained at 8 rpm and 80 kN, which increases up to 340 HV0.3 as distance from the surface increases. The increase in the hardness of this section may be the result of an intensive effect of structural refinement in the area in contact with the rotating disk, which can be observed in Tab. 2. This effect is not observed in the section obtained at 18 rpm and 80 kN (Tab. 3), because grain recrystallization had taken place throughout the section's entire cross-section.



Rys. 9. Rozkład mikrohardności dla odkształcenia $\lambda=8$

Fig. 9. Microhardness distribution for $\lambda=8$ deformation

6. PODSUMOWANIE

Omawiany proces zależy od wielu parametrów, które w istotny sposób rzutują na strukturę, geometrię i jakość otrzymanego profilu. Opierając się na uzyskanych wynikach badań, można stwierdzić, że:

- najlepsza powierzchnia zewnętrzna profilu jest uzyskiwana przy małych prędkościach obrotowych (około 8 obr/min) i maksymalnym ciśnieniu roboczym siłownika wciskającego wsad w obrotową tarczę (80 kN),
- na skutek cieplno-mechanicznego procesu w strefie kontaktu z tarczą obserwuje się silne rozdrobnienie struktury, w której średnia wielkość ziaren to około

6. CONCLUSIONS

The process discussed in this article is dependent on many parameters that have a significant influence on the structure, geometry and quality of the obtained section. Based on obtained research results, it can be concluded that:

- the best exterior surface of sections is obtained at low rotational speeds (approx. 8 rpm) and maximum working pressure of the punch's actuator (80 kN);
- strong refinement of the structure, in which the average grain size is approx. $0.53 \mu\text{m}$, is observed in the area of contact with the disk as a result of a thermomechanical

- 0,53 μm (tak duże rozdrobnienie jest efektem nałożenia się silnego odkształcenia warstwy materiału i przypuszczalnie dynamicznej rekrytalizacji zachodzącej podczas procesu kształtowania),
- wraz ze wzrostem prędkości obrotowej tarczy rośnie temperatura profilu na wyjściu z matrycy, wpływając na rozrost ziaren.

process (such strong refinement is the effect of the combined action of strong deformation of a layer of the material and the presumably dynamic recrystallization occurring during the forming process,

- *the section's temperature upon exiting the die increases as the disk's rotational speed increases, causing grain growth.*

PODZIĘKOWANIA

Badania finansowane w ramach pracy statutowej BO .901.27 pt. „Badania wpływu dynamicznych zmian parametrów na utrzymanie stałej prędkości w procesie wytwarzania profili, wyciskaniem bocznym wspomagany tarcie”.

ACKNOWLEDGEMENTS

Research was financed within the framework of statutory project BO .901.27 titled “Studies of the influence of dynamic changes of parameters on maintenance of a fixed speed in the process of manufacturing sections by friction-assisted lateral extrusion”.

LITERATURA

- [1] Kulczyk, Mariusz, Pachla, Waclaw, Świdarska-Środa, Anna, Mazur, Andrzej, Suś-Ryszkowska, Małgorzata, Kurzydłowski, Krzysztof, Krasilnikov, Nikolay. 2006. „Wytworzenie nanostrukturalnego niklu na drodze multi-deformacji plastycznej z użyciem technik wyciskania hydrostatycznego i ECAP.” *Obróbka Plastyczna Metali XVII* (4): 15–19.
- [2] Kurzydłowski, Krzysztof, Lewandowska, Małgorzata. 2010. *Nanomateriały inżynierskie konstrukcyjne i funkcjonalne*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN.
- [3] Valiev, Ruslan Z., Estrin, Yuri, Horita, Zenji, Langdon, Terence G., Zehetbauer, Michael J. 2006. „Producing bulk ultrafine-grained materials by severe plastic deformation.” *JOM* 58 (4, April): 33–39.
- [4] Ziółkiewicz, Stanisław, Szkudelski, Szymon. 2013. „Kształtowanie profili wspomagane tarcie.” *Obróbka Plastyczna Metali XXIV* (2): 147–157.
- [5] Ziółkiewicz, Stanisław, Magda, Janusz, Szkudelski, Szymon. „Sposób badania zużycia ściernego części maszyn w warunkach pracy w wysokiej temperaturze i przy wysokich naciskach jednostkowych i zespół do badania zużycia ściernego części maszyn w warunkach pracy w wysokiej temperaturze i przy wysokich naciskach jednostkowych.” Zgł. pat. nr P.396913.

REFERENCES

- [1] Kulczyk, Mariusz, Pachla, Waclaw, Świdarska-Środa, Anna, Mazur, Andrzej, Suś-Ryszkowska, Małgorzata, Kurzydłowski, Krzysztof, Krasilnikov, Nikolay. 2006. „Nanostructured nickel made by cumulative plastic deformation involving hydrostatic extrusion and ECAP processes.” *Obróbka Plastyczna Metali XVII* (4): 15–19.
- [2] Kurzydłowski, Krzysztof, Lewandowska, Małgorzata. 2010. *Nanomateriały inżynierskie konstrukcyjne i funkcjonalne*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN.
- [3] Valiev, Ruslan Z., Estrin, Yuri, Horita, Zenji, Langdon, Terence G., Zehetbauer, Michael J. 2006. „Producing bulk ultrafine-grained materials by severe plastic deformation.” *JOM* 58 (4, April): 33–39.
- [4] Ziółkiewicz, Stanisław, Szkudelski, Szymon. 2013. „Friction-assisted profile forming.” *Obróbka Plastyczna Metali XXIV* (2): 147–157.
- [5] Ziółkiewicz, Stanisław, Magda, Janusz, Szkudelski, Szymon. „Sposób badania zużycia ściernego części maszyn w warunkach pracy w wysokiej temperaturze i przy wysokich naciskach jednostkowych i zespół do badania zużycia ściernego części maszyn w warunkach pracy w wysokiej temperaturze i przy wysokich naciskach jednostkowych.” Patent filed no. P.396913.

