

dr inż. Agnieszka LAURENTOWSKA-TYCZKA, mgr inż. Justyna WENDLAND  
dr inż. Jacek BOROWSKI  
Instytut Obróbki Plastycznej w Poznaniu  
kontakt: agnieszka.laurentowska@inop.poznan.pl

mgr inż. Henryk JURCZAK  
Albatros Aluminium, Poznań

# Wpływ geometrii profili aluminiowych na trwałość matryc do ich wyciskania

## *Influence of the geometry of aluminum profiles on the durability of dies used for their extrusion*

### Streszczenie

W pracy analizowano wpływ geometrii matryc do wyciskania profili aluminiowych na ilość wyciśniętego materiału oraz trwałość matryc. Matryce przekazane do badań były poddawane cztero- lub pięciokrotnemu azotowaniu gazowemu i eksploatowane do końcowego zużycia w firmie Albatros Aluminium. W artykule podjęto próbę wyjaśnienia wpływu geometrii matryc na grubość warstwy azotowanej, a tym samym na wzrost ich trwałości. Uzyskane wyniki badań pozwoliły stwierdzić, że ilość wyciśniętego materiału, niezależnie od kształtu matrycy, zwiększa się prawie dwukrotnie po trzecim azotowaniu i dwuipółkrotnie po czwartym azotowaniu. Matryca do wyciskania profilu o płaskim kształcie pozwoliła osiągnąć dwuipółkrotny wzrost ilości wyciśniętego materiału już po trzecim azotowaniu.

### Abstract:

*In this work, the influence of the geometry of dies for extrusion of aluminum profiles on the amount of extruded material and durability of dies was analyzed. The dies that were provided for study were subjected to four- or five-fold gas nitriding and were exploited until they were finally worn out at the Albatros Aluminium company. In this article, an attempt was made to explain the influence of die geometry on the thickness of the nitrided layer, and thus, on the increase of their durability. Obtained results of studies made it possible to state that the amount of extruded material increases almost twice after the third nitriding and 2.5 times after the fourth nitriding, independently of the shape of the die. The die for extrusion of a flat-shaped profile made it possible to achieve a 2.5-fold increase of the amount of extruded material after only the third nitriding.*

**Słowa kluczowe:** matryca, geometria matryc, profil aluminiowy, azotowanie, warstwa azotowana, wyciskanie

**Keywords:** die, geometry of dies, aluminum profile, nitriding, nitrided layer, extrusion

## 1. WSTĘP

Wyroby ze stopów aluminium są lekkie i wytrzymałe, wykazują dobrą odporność na korozję atmosferyczną, jak również łatwo poddaje się je recyklingowi i naprawie [1]. Właściwości mechaniczne stopów aluminium są ściśle związane z zawartością dodatków stopowych, jak również z parametrami ich

## 1. INTRODUCTION

*Products made from aluminum alloys are light and strong, exhibit good resistance to atmospheric corrosion, and are also easily recyclable and repairable [1]. The mechanical properties of aluminum alloys are strictly related to the content of alloy additions and to their processing parameters, e.g.*

obróbki, np. z wyciskaniem, wyginaniem czy obróbką cieplną [1-3].

Wyciskanie na gorąco jest najczęściej wykorzystywaną technologią przy formowaniu wyrobów z aluminium, takich jak rury, belki, pręty czy profile. Materiały stosowane na matryce do wyciskania powinny charakteryzować się wysoką twardością, wysoką granicą plastyczności, odpornością na pełzanie i wytrzymałością w podwyższonej temperaturze oraz dobrą odpornością na odpuszczanie i odpornością chemiczną. W produkcji matryc do wyciskania profili aluminiowych najczęściej wykorzystywana jest stal narzędziowa do pracy na gorąco H13. Wydłużenie czasu eksploatacji osiąga się głównie poprzez modyfikację powierzchni matryc azotowaniem gazowym lub jonowym [4, 5].

Obróbka cieplno-chemiczna matryc o nieregularnych kształtach jest zadaniem niezwykle trudnym ze względu na uzyskiwanie nierównomiernej twardości na powierzchni nośnej matrycy. W celu poprawy jednorodności azotowania, ważne jest określenie istotnych cech geometrycznych matrycy w odniesieniu do możliwości utworzenia warstwy azotowanej. Uwzględnienie właściwości geometrycznych i włączenie ich do projektowania procesu azotowania wpływa na tworzenie jednolitej warstwy azotowanej o zwiększonej trwałości [6].

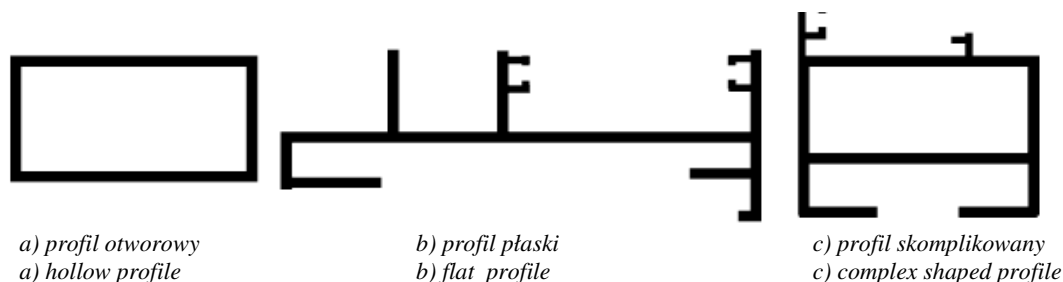
Kształt wyciskanego profilu determinuje budowę matrycy oraz kształt strefy kalibrującej, która odwzorowuje kształt profilu. Ze względu na kształt profile dzieli się na otworowe, płaskie i skomplikowane (rys. 1). Złożoność profili opisuje stosunek obwodu profilu do pola jego przekroju poprzecznego [7].

*related to extrusion, bending, or heat treatment [1-3].*

*Hot extrusion is the technology that is most often used to shape aluminum products such as pipes, beams, rods, or profiles. The materials used to make dies for extrusion should be characterized by high hardness, a high yield point, creep resistance, and resistance to high temperatures, as well as good tempering resistance and chemical resistance. H13 hot working tool steel is the material that is used most often to produce dies for extrusion of aluminum profiles. Extension of operating lifetime is mainly achieved through modification of die surfaces by means of gas or ion nitriding [4, 5].*

*Thermo-chemical treatment of dies with irregular shapes is an exceptionally difficult task due to the obtainment of a non-uniform hardness on the die's load-bearing surface. In order to improve the uniformity of nitriding, it is important to determine significant geometrical qualities of a die related to the possibility of forming a nitrided layer. Accounting for geometrical properties and incorporating them into designing of the nitriding process has an influence on the formation of a uniform nitrided layer with increased durability [6].*

*The shape of the extruded profiles is determined by the design of the die and the shape of the bearing zone that represents the shape of the profile. In terms of shape, profiles are divided into hollow, flat, and complex shaped profiles (fig. 1). The complexity of profiles is described by the ratio of perimeter to the cross-sectional area of the part [7].*

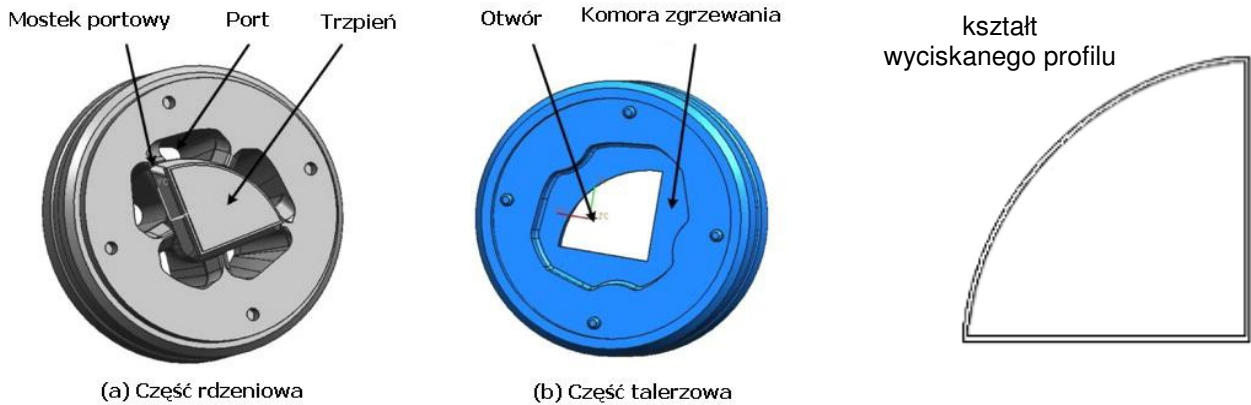


Rys. 1. Podział profili ze względu na kształt [7]

Fig. 1. Classification of sections in terms of shape [7]

Celem wytworzenia profili otworowych stosuje się matryce składane, złożone z części rdzeniowej i talerzowej, w których po złożeniu powstaje tzw. komora zgrzewania oraz szczelina kalibrująca profil (rys. 2).

*Collapsible dies, made up of a mandrel and disk part are used to produce hollow profiles. After the two die parts are assembled, the so-called welding chamber and bearing gaps of profile are formed (fig. 2).*

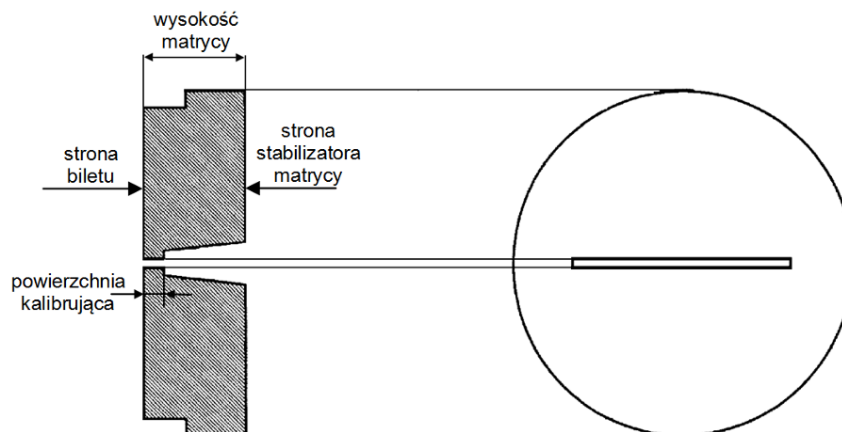


Rys. 2. Przykład budowy matrycy do wyciskania otworowych profili aluminiowych, na podstawie [8]

*Fig. 2. Example of a design of a die for extrusion of aluminum hollow profile [8]*

Matryce stosowane do wytwarzania płaskich profili posiadają w części talerzowej szczelinę kalibrującą kształt profilu (rys. 3) [7].

*Dies used to produce flat sections have a section shape calibration slit in the disk part (fig. 3) [7].*



Rys. 3. Przykład matrycy do wyciskania prostego profilu płaskiego, na podstawie [7]

*Fig. 3. Example of a die for extrusion of a simple flat profile [7]*

Kwon wraz z zespołem prowadził badania nad kinetyką wzrostu warstwy azotanowej na matrycy do wyciskania rury z falistością na jej powierzchni wewnętrznej. Zaobserwowali oni różnice w budowie i grubości warstwy powierzchni płaskiej oraz rowków

*Kwon et al. conducted studies on the kinetics of the growth of the nitrated layer on a die for extrusion of a pipe with corrugation on its interior surface. They observed differences in the structure and thickness of the layer on the flat surface and in the grooves*

matrycy, modelujących falistą powierzchnię wewnętrzną wyciskanego profilu [9].

Terčelj prowadził badania nad azotowaniem jonowym i gazowym matryc ze stali narzędziowej H10 z wąskimi i szerokimi szczelinami kalibrującymi. Analizował on wpływ warunków azotowania na właściwości tribologiczne matryc w układzie blok-cylinder, w którym próbki pobrane z matrycy stanowiły blok. Próbki poddawane były dużym siłom dociskowym w celu wyjaśnienia, czy warstwa azotków żelaza poprawia lub zmniejsza odporność na zużycie azotowanych matryc do wyciskania aluminium. Udowodnił, że warstwa azotków  $\epsilon$  (tzw. biała warstwa) jest bardziej stabilna chemicznie pod gorącym aluminium niż azotowana powierzchnia matrycy bez białej warstwy [11]. Podobne badania prowadził Kugler wraz ze współpracownikami na matrycach ze stali H13 [12]. W obu przypadkach zaobserwowano zmianę grubości warstwy azotowanej w zależności od szerokości szczeliny kalibrującej. Geometria szczeliny matrycy wpływa na mechanizm azotowania oraz kinetykę tworzenia warstwy azotowanej wzdłuż powierzchni szczeliny, ponieważ temperatura może różnić się miejscowo, a szybkość azotowania może rozkładać się nierównomiernie wzdłuż powierzchni. Podczas modelowania procesu azotowania dąży się do uzyskania równomiernego rozkładu temperatury wzdłuż całej obrabianej powierzchni, a znaczne gradienty termiczne są uwarunkowane skomplikowaną geometrią matrycy [10].

W budowie mikrostrukturalnej warstwy azotowanej istotny jest stosunek ilościowy faz  $\text{Fe}_3\text{N}$  ( $\epsilon$ ) i  $\text{Fe}_4\text{N}$  ( $\gamma'$ ). Faza  $\epsilon$  jest twarda i krucha, może cechować się również niekorzystną porowatością, podczas gdy  $\gamma'$  jest twarda i wytrzymała. Właściwości użytkowe warstwy azotków zależą zarówno od jednorodności struktury warstwy oraz od jej grubości [13, 14]. Dąży się do uzyskania warstwy jednofazowej ( $\epsilon$  lub  $\gamma'$ ) o najmniejszej grubości, zapewniającej odporność na ścieranie. Złożona struktura warstwy azotowanej może przyspieszyć łuszczenie się warstwy azotowanej już w początkowym etapie procesu wyciskania i negatywnie wpływać na

*of the die that model the corrugated interior surface of the extruded section [9].*

*Terčelj conducted studies on ion and gas nitriding of dies made of H10 tool steel with wide and narrow calibration slits. He analyzed the influence of nitriding conditions on the tribological properties of dies in a block-cylinder system in which the samples collected from the die constituted the block. Samples were subjected to large pressing forces for the purpose of explaining whether the iron nitride layer improves or reduces the wear resistance of nitrided dies for aluminum extrusion. He proved that the nitride layer  $\epsilon$  (so-called white layer) is more chemically stable in contact with hot aluminum than a nitrided surface of a die without the white layer [11]. Kugler conducted similar studies with his co-workers on dies made from H13 steel [12]. In both cases, a change of the thickness of the nitrided layer was observed depending on the width of the calibration slit. The geometry of the die's slit has an influence on the nitriding mechanism and on the kinetics of formation of the nitrided layer along the surface of the slit, because the temperature may be different locally, and the rate of nitriding may be distributed unevenly along the surface. During modeling of the nitriding process, the aim is to achieve a uniform distribution of temperature along the entire processed surface, and significant thermal gradients are conditioned by complex die geometry [10].*

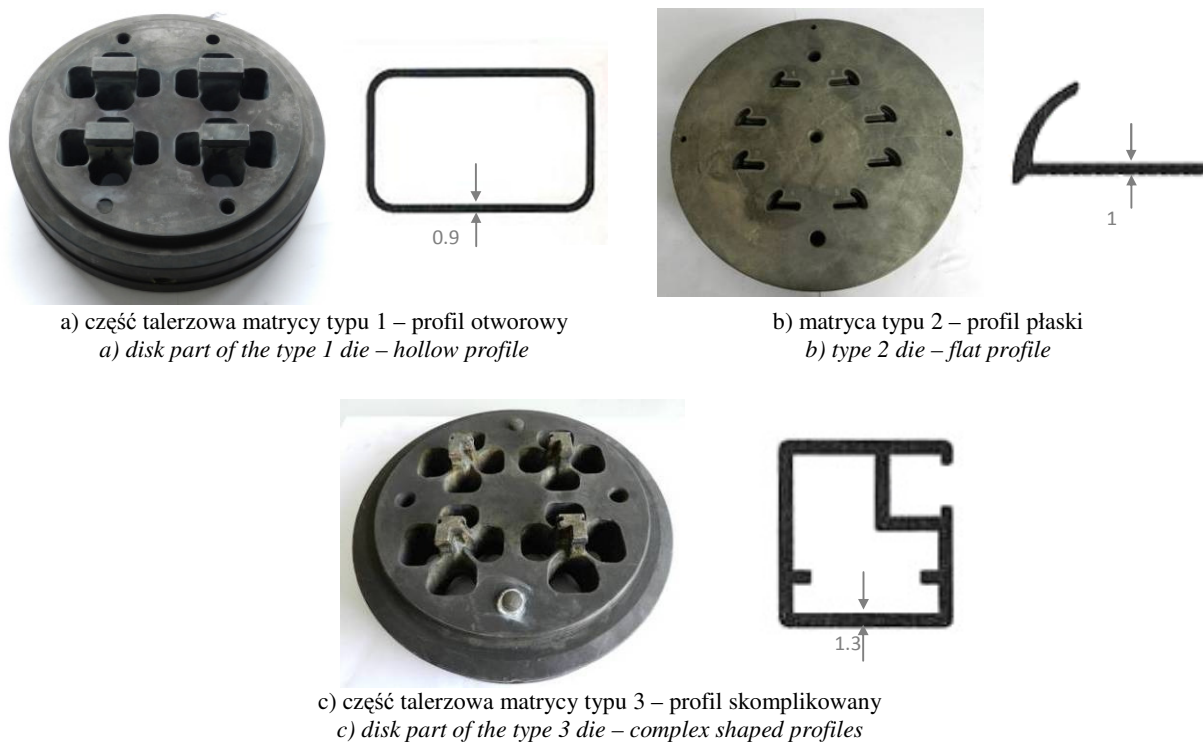
*The quantitative proportion of the  $\text{Fe}_3\text{N}$  ( $\epsilon$ ) and  $\text{Fe}_4\text{N}$  ( $\gamma'$ ) phases in the microstructure of the nitrided layer is significant. The  $\epsilon$  phase is hard and brittle and may also be characterized by unfavorable porosity, while  $\gamma'$  is hard and strong. The functional properties of the nitride layer are dependent on both the uniformity of the structure of the layer and on its thickness [13, 14]. It is sought to obtain a single-phase layer ( $\epsilon$  or  $\gamma'$ ) of the smallest thickness, while ensuring resistance to abrasion. A complex structure of the nitrided layer may accelerate lamination of the nitrided layer as early as during the initial phase of the extrusion and may have a negative*

odporność na ścieranie azotowanej powierzchni [15].

Celem badań była próba określenia, czy kształt wyciskanych profili ma wpływ na trwałość matryc stosowanych do wyciskania stopów aluminium serii 6xxx.

## 2. PRZEDMIOT I METODYKA BADAŃ

Do badań wytypowano matryce za pomocą, których wyciskane są profile otworowe (typ 1), płaskie (typ 2) i skomplikowane (typ 3). Matryce oraz kształty i grubości profili pokazano na rys. 4.



Rys. 4. Matryce wytypowane do badań oraz kształt profili

*Fig. 4. Dies selected for studies and shape of profiles*

Wszystkie badane matryce wykonane były ze stali narzędziowej do pracy na gorąco H13 i poddane azotowaniu gazowemu w celu utwardzenia powierzchni oraz kilkukrotnej regeneracji matryc w trakcie procesu produkcyjnego. Wszystkie profile wyciskano ze stopu 6060.

W ramach badań analizowano ilość wyciśniętego stopu aluminium przez każdy otwór wytypowanych matryc w zależności od

*influence on the resistance to abrasion of the nitrided surface [15].*

*The goal of studies was to determine whether the shape of extruded profiles has an influence on the durability of dies used to extrude 6xxx series aluminum alloys.*

## 2. SUBJECT AND METHODOLOGY OF STUDIES

*Dies used to extrude hollow profiles (type 1), flat profiles (type 2), and complex shaped profiles (type 3) were selected for studies. Dies as well as the shapes and thicknesses of profiles are shown on fig. 4.*

*All studied dies were made from H13 hotworking tool steel and subjected to gas nitriding for the purpose of hardening the surface as well as to several cycles of die regeneration during the production process. All profiles were extruded from the 6060 alloy.*

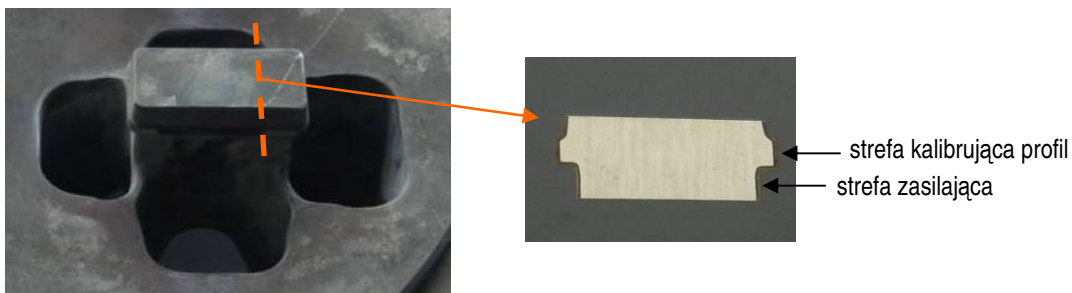
*Within the framework of studies, the amount of aluminum alloy extruded by each hollow of the selected dies was analyzed depending*

stanu ich obróbki cieplno-chemicznej, tzn. ilości procesów azotowania. Matryce typu 2 i 3 azotowane były czterokrotnie, natomiast matryca typu 1 – pięciokrotnie.

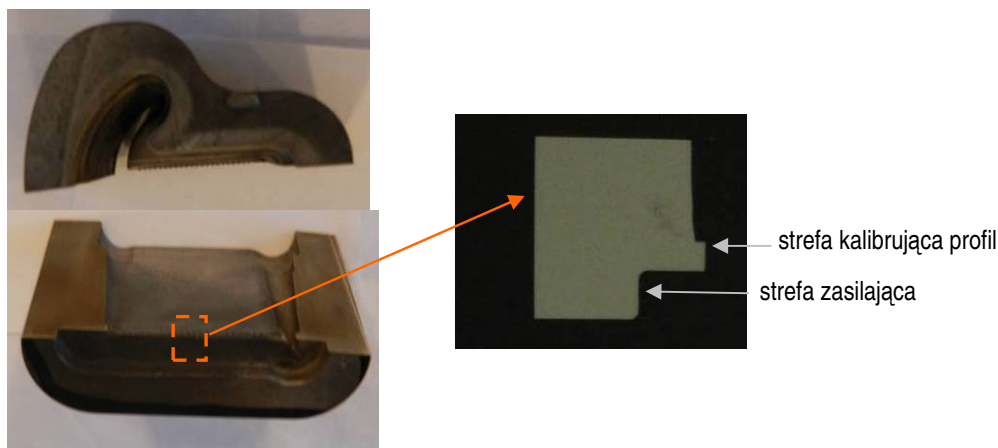
Następnie za pomocą elektrodrażarki drutowej z matryc pobrano próbki, z których przygotowano zgłądy metalograficzne. Zgłądy obejmowały strefę kalibrującą profil oraz strefę zasilającą, w której następuje największe odkształcenie materiału wsadowego (w przypadku matryc składanych z rdzeni części talerzowej). Sposób pobrania próbek do badań pokazano na rys. 5-7.

on the state of their thermo-chemical treatment, that is, the number of nitriding processes. Type 2 and 3 dies were nitrided four times, and the type 1 die – five times.

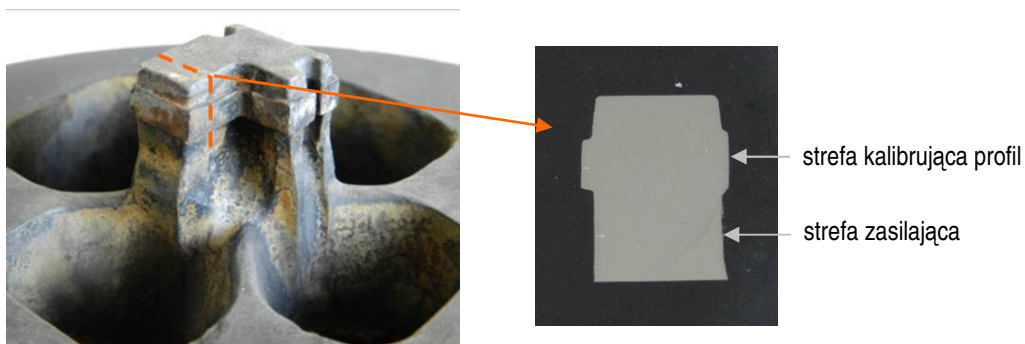
Next, samples were collected from dies using a wire electrical discharge machine, and metallographic cross-section specimens were prepared. Specimens encompasses the bearing zone and the feeding zone, in which the greatest deformation of the feed material takes place (in the case of collapsible dies assembled from mandrel and disk parts). The method of collection of samples for studies is shown on fig. 5-7.



Rys. 5. Schemat pobrania próbki z rdzenia matrycy typu 1  
Fig. 5. Diagram of sample collection from the mandrel of a type 1 die



Rys. 6. Schemat pobrania próbki z matrycy typu 2  
Fig. 6. Diagram of sample collection from a type 2 die



Rys. 7. Schemat pobrania próbki z rdzenia matrycy typu 3  
Fig. 7. Diagram of sample collection from the mandrel of a type 3 die

Na przygotowanych zglądach wykonano obserwacje metalograficzne oraz pomiary twardości w celu oceny jakości i grubości warstwy utwardzonej. Obserwacje metalograficzne przeprowadzono przy użyciu mikroskopu optycznego Eclipse L150 (Nikon). Dla ujawnienia warstwy azotowanej próbki trawiono 3% etanolowym roztworem kwasu azotowego (V). Pomiary twardości wykonano metodą Vickersa przy obciążeniu 0,98 N, za pomocą twardościomierza MICROMET 2104 (Buehler). Badanie twardości przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN ISO 6507-1:2007 – „Pomiar twardości sposobem Vickersa. Część 1: Metoda badań”.

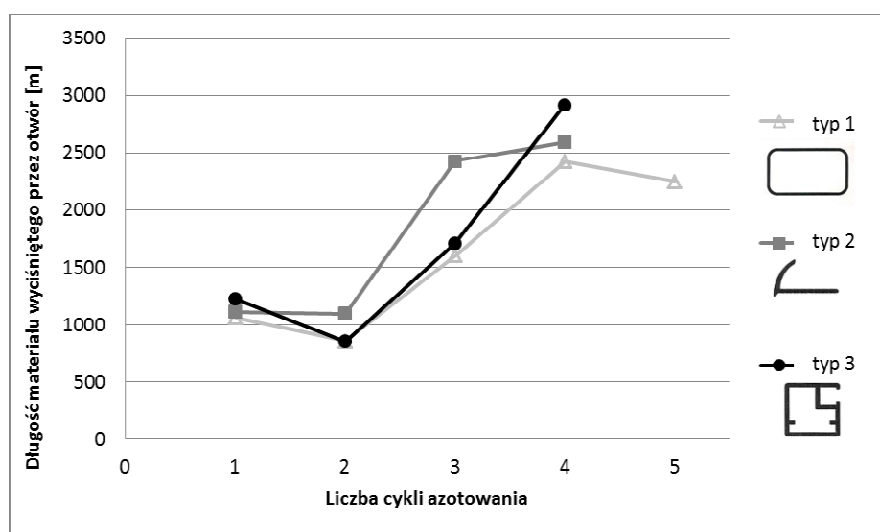
### 3. WYNIKI BADAŃ

Analizie poddano zależność ilości materiału wyciśniętego przez każdy otwór matrycy (wyrażony długością profili) od liczby procesów azotowania wykonanych w trakcie eksploatacji matryc w produkcji profili o danym kształcie. Wynik analizy pokazano na rys. 8.

*Metallographic examinations and hardness measurements were performed on the cross-section samples for the purpose of assessing the quality and thickness of the hardened layer. Metallographic observations were performed with the use of an Eclipse L150 (Nikon) optical microscope. To reveal the nitrided layer, samples were etched with a 3% ethanol solution of nitric acid(V). Hardness measurements were performed with the use of the Vickers method with a load of 0.98 N by means of a MICROMET 2104 (Buehler) hardness tester. Hardness tests were performed according to standard PN-EN ISO 6507-1:2007 – "Vickers hardness test. Part 1: Test method".*

### 3. RESULTS OF STUDIES

*The dependency of the amount of material extruded through each hollow of a die (expressed by the length of profiles) on the number of nitriding processes performed over the course of exploitation of dies in the production of profiles of a given shape was analyzed. The results of analysis are shown on fig. 8.*



Rys. 8. Długość wyciśniętego materiału profili [m] w zależności od krotności procesu azotowania danego typu matrycy

Fig. 8. The length of extruded profile material [m] as a dependency of the number of nitriding processes for a given type of die

Kształt wszystkich krzywych jednoznacznie wskazuje na wzrastającą ilość wyciśniętego aluminium po trzecim procesie azotowania niezależnie od kształtu wyciskanego profilu. Najwyższy wzrost odnotowano

*The shape of all curves unequivocally indicates an increasing amount of extruded aluminum after the third nitriding process, independently of the shape of the extruded profile. The greatest increase was noted for the*

dla matrycy do wyciskania profili płaskich (typ 2). Interesujący jest fakt, iż po drugim azotowaniu, we wszystkich przypadkach, odnotowano najmniejszą ilość wyciśniętych profili aluminiowych. Istotnym mankamentem jest brak stosowania jednoznacznego kryterium zużycia, na podstawie którego operatorzy linii produkcyjnej decydują, czy dana matryca może pracować dalej czy ma zostać przekazana do regeneracji. Bazuje się na doświadczeniu pracowników, którzy dokonują obserwacji powierzchni matrycy i wyciskanego profilu. Fakt przekazania matrycy do regeneracji nie ma zatem rzeczywistego powiązania z ubytkiem/zużyciem warstwy utwardzonej azotowaniem. W kolejnych procesach regeneracji matrycy następuje więc azotowanie powierzchni bogatej w azot.

Obserwacje metalograficzne próbek pobranych z matryc pozwoliły na oszacowanie grubości i budowy warstwy azotowanej dla każdego typu matrycy w strefie kalibrującej profil oraz w strefie zasilającej w momencie złomowania matrycy. Matryca typu 1 obserwowana była po pięciu procesach azotowania i eksploatacji do zużycia, natomiast matryce typu 2 i 3 po czterech procesach azotowania i eksploatacji. Na rys. 9 zestawiono obrazy struktury przekroju strefy zasilającej, natomiast na rys. 10 strefy kalibrującej.

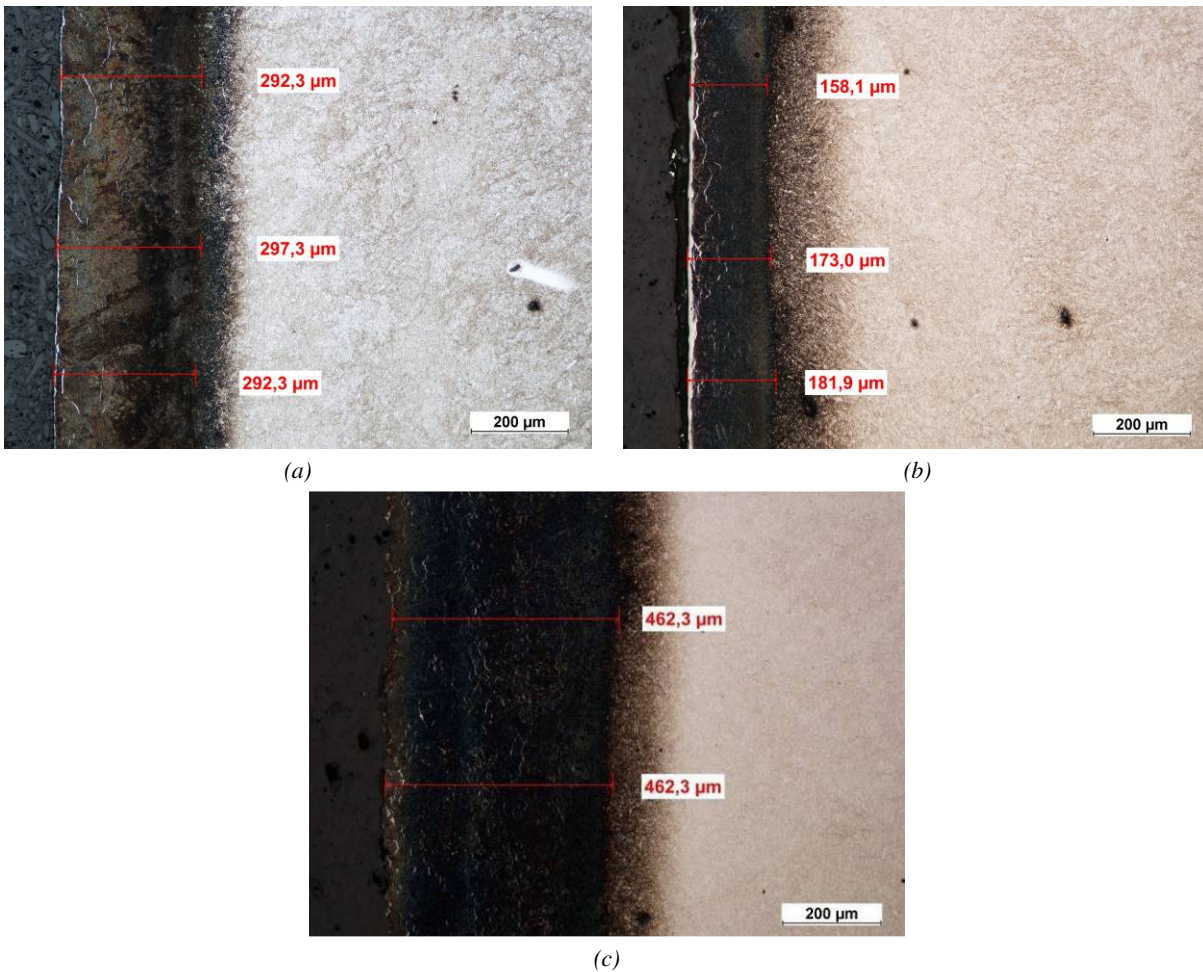
Grubość warstwy azotowanej w matrycy typu 1 (wyciskającej profil otworowy) w strefie zasilającej wynosi ok. 290  $\mu\text{m}$ , natomiast w strefie kalibrującej jest zredukowana do ok. 260  $\mu\text{m}$ . W matrycy typu 2 (do wyciskania profili płaskich) zarówno w strefie zasilającej, jak i kalibrującej, występuje biała warstwa. Grubość warstwy utwardzonej w matrycy typu 2 jest najmniejsza z badanych i wynosi odpowiednio ok. 160-180  $\mu\text{m}$  w strefie zasilającej oraz ok. 190  $\mu\text{m}$  w strefie kalibrującej. W matrycy typu 3 (do wyciskania profili skomplikowanych), która zbudowana jest z dwóch talerzy, tak jak matryca typu 1, grubość warstwy azotowanej jest największa spośród badanych matryc i wynosi odpowiednio 460  $\mu\text{m}$  w strefie zasilającej i zredukowana jest do ok. 360  $\mu\text{m}$  w strefie kalibrującej.

*die for extrusion of flat profile (type 2). It is interesting that in all cases, after the second nitriding, the lowest amount of extruded aluminum profiles was noted. The lack of application of an unequivocal criterion of wear on the basis of which production line operators decide whether a given die can operate further or be transferred for regeneration is a significant disadvantage. The experience of workers, who observe the surface of the die and the extruded profile, is used to assess wear. Thus, the fact that a die is transferred for regeneration has no real link to the decrement/wear of the layer hardened by nitriding. In successive die regeneration processes, nitriding of a surface rich in nitrogen takes place.*

*Metallographic examinations of samples collected from dies made it possible to estimate the thickness and structure of the nitrated layer for each type of die in the bearing zone as well as in the feeding zone at the moment of die scrapping. The type 1 die was observed after five cycles of nitriding and exploitation until wear, and type 2 and 3 dies were observed after four cycles of nitriding and exploitation. Fig. 9 shows images of the structure of the cross-section of the feeding zone, and fig. 10 of the bearing zone.*

*The thickness of the nitrated layer in the type 1 die (for extrusion of a hollow profile) in the feeding zone is about 290  $\mu\text{m}$ , but in the bearing zone, this thickness is reduced to about 260  $\mu\text{m}$ . In the type 2 die (for extrusion of flat profiles), a white layer is present both in the feeding zone and the bearing zone. The thickness of the hardened layer in the type 2 die is the smallest from among the studied dies and is equal to approx. 160-180  $\mu\text{m}$  in the feeding zone and approx. 190  $\mu\text{m}$  in the bearing zone. In the type 3 die (for extrusion of complex shaped profile), which is made up of two plates just like the type 1 die, the thickness of the nitrated layer is the greatest from among the studied dies and is equal to 460  $\mu\text{m}$  in the feeding zone and reduced to approx. 360  $\mu\text{m}$  in the bearing zone.*



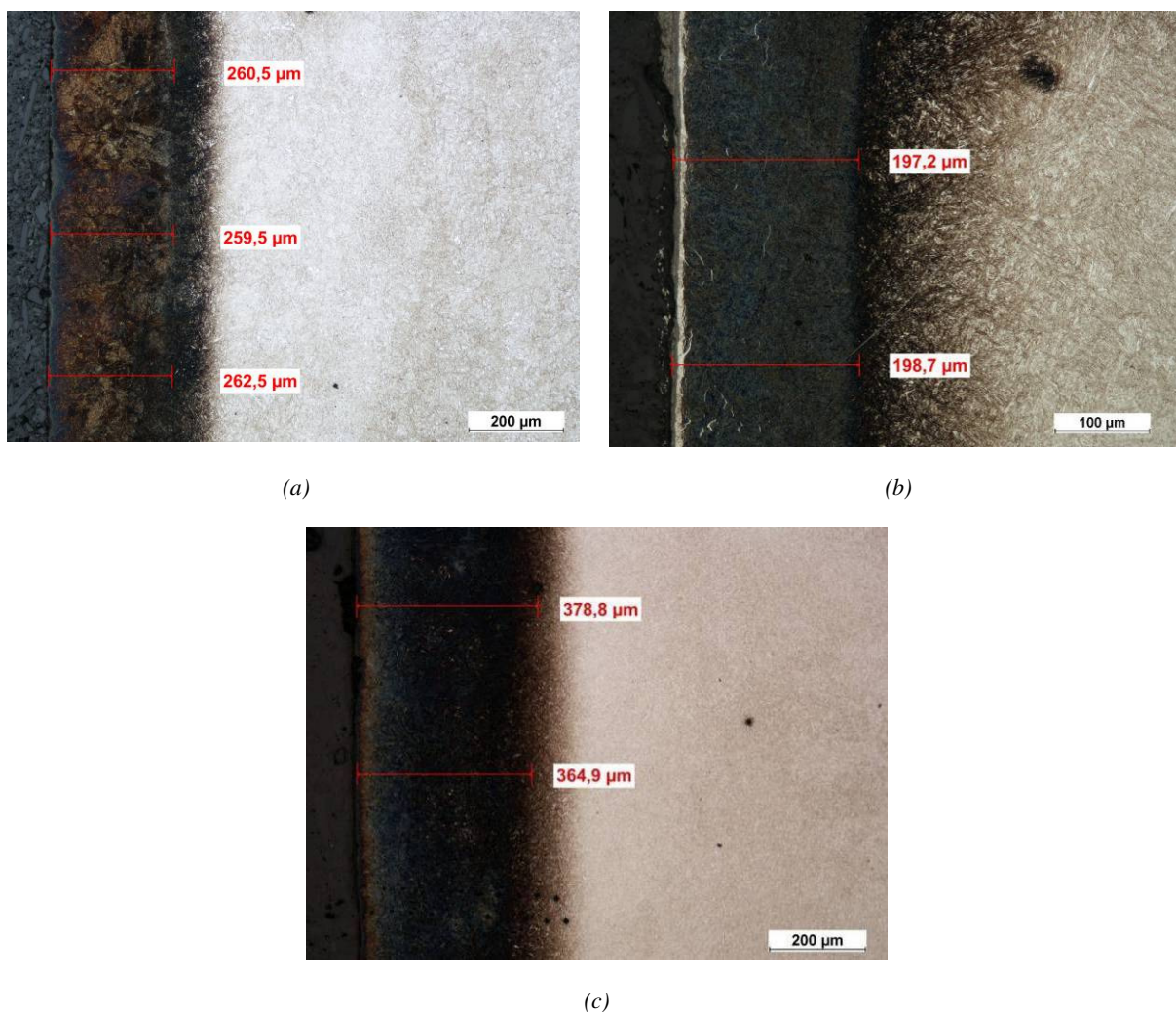


Rys. 9. Struktura warstwy w strefie azotowanej zasilającej matrycy do wyciskania profilu otworowego – typ 1 (a), płaskiego – typ 2 (b) i specjalnego – typ 3 (c)

Fig. 9. The structure of the nitriding layer in the feeding zone of the die for extrusion of a hollow profiles – type 1 (a), of a flat profile – type 2 (b) and of a complex shaped profile – type 3 (c)

Większą grubość warstwy azotowanej w matrycach typu 1 i 3 w porównaniu do matrycy typu 2 można tłumaczyć ich budową. Matryce typu 1 i 3 do procesu obróbki cieplno-chemicznej są rozkładane, dzięki czemu osobno azotowana jest część rdzeniowa i talerzowa, co zapewnia łatwy dostęp atmosfery azotującej do wszystkich powierzchni matrycy. Natomiast matryca typu 2, do wyciskania profili płaskich, posiada szczelinę kalibrującą o szerokości 1 mm, położoną poniżej strefy zasilającej o szerokości kilkunastu mm. Interesujący jest fakt, że grubość warstwy azotowanej w matrycy typu 3 po czterech procesach azotowania i eksploatacji jest większa niż w matrycy typu 1 po pięciu procesach azotowania i eksploatacji. Wydaje się, że efekt ten związany jest z korekcją i przygotowaniem powierzchni matrycy przed procesem kolejnego azotowania.

*The greater thickness of the nitrided layer in type 1 and 3 dies in comparison to the type 2 die may be explained by their structure. Type 1 and 3 dies are disassembled during the process of thermo-chemical treatment, thanks to which the mandrel and disk parts are nitrided separately, which ensures easy access of the nitriding atmosphere to all due surfaces. However, the type 2 die for extrusion of flat profiles has a bearing gap with a width of 1 mm, located below the feeding zone which has a width of a dozen or so mm. It is interesting that the thickness of the nitrided layer in the type 3 die after four cycles of nitriding and exploitation is greater than in the type 1 die after five such cycles. It seems that this effect is related to the correction and preparation of the die surface before every next nitriding process.*



Rys. 10. Struktura warstwy azotowanej w strefie kalibrującej matrycy do wyciskania profilu otworowego – typ 1 (a), płaskiego – typ 2 (b) i specjalnego – typ 3 (c)

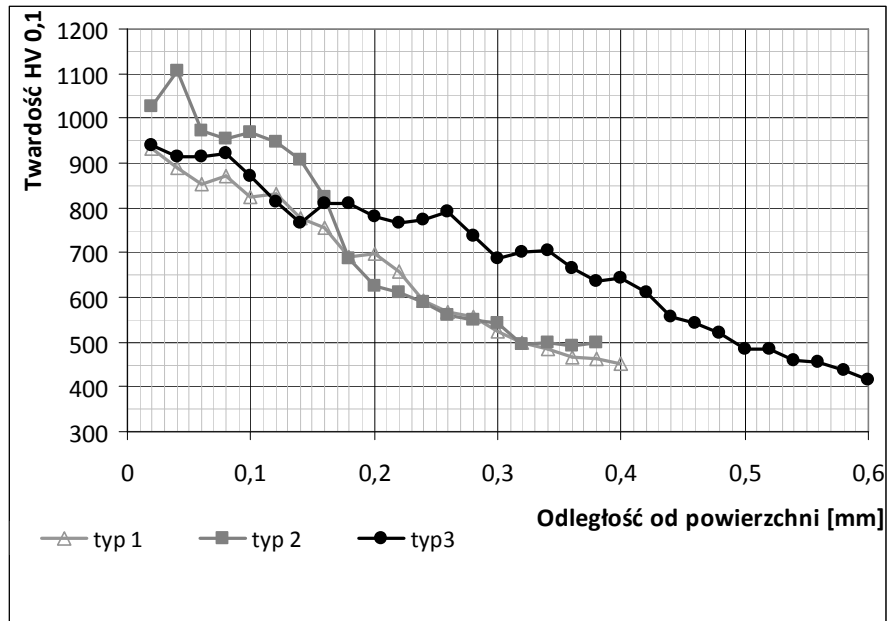
Fig. 10. The structure of the nitriding layer in the bearing zone of the die for extrusion of a hollow profile – type 1 (a), of a flat profile – type 2 (b) and of a complex shaped profile – type 3 (c)

Obserwowane warstwy azotowane matrycy wykazały dobrą stabilność chemiczną pod wpływem gorącego aluminium, nie zaobserwowano złuszczenia się warstwy. Wczesniejsze złuszczenie warstwy może prowadzić w konsekwencji do przyspieszonego procesu zużycia matrycy [10].

Grubość warstwy utwardzonej w poszczególnych strefach matrycy określono na podstawie rozkładu twardości. Z uzyskanych wyników pomiaru twardości sporządzono wykresy (rys. 11 i 12).

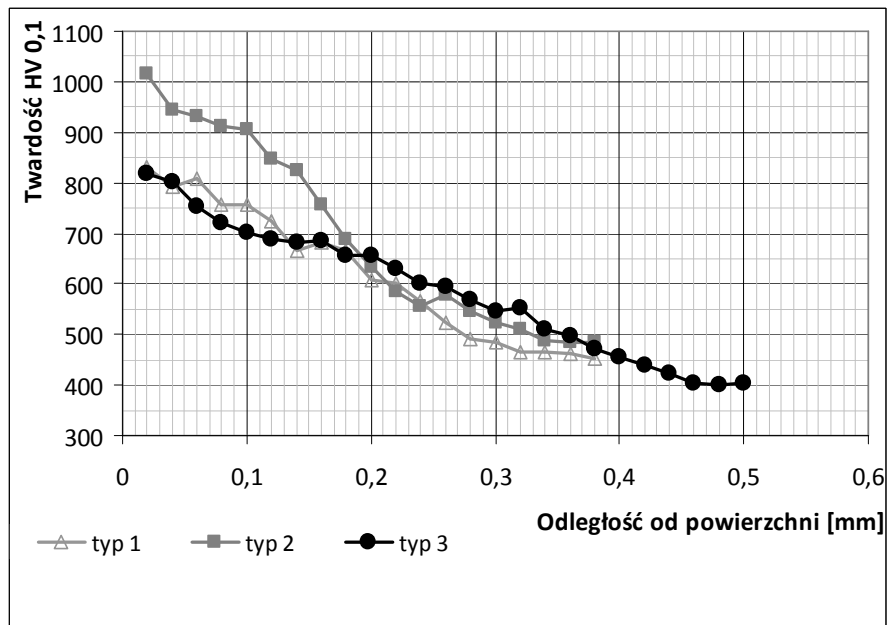
The observed nitrided layers of dies exhibited good chemical stability under the influence of hot aluminum, and no delamination of the layer was observed. Early delamination of the layer may lead to accelerated die wear [10].

The thickness of the hardened layer in respective die zones was determined based on the hardness distribution. The graphs were made from obtained results of hardness measurement (fig. 11 and 12).



Rys. 11. Rozkłady twardości w strefie zasilającej poszczególnych typów matryc do wyciskania profilu otworowego (typ 1 – po V azotowaniu), płaskiego (typ 2 – po IV azotowaniu) i specjalnego (typ 3 – po IV azotowaniu)

Fig. 11. Hardness distributions in the feeding zone of individual types of dies for extrusion of a hollow profile (type 1 – after V nitriding), flat profile (type 2 – after IV nitriding), and complex shaped profile (type 3 – after IV nitriding)



Rys. 12. Rozkłady twardości w strefie kalibrującej poszczególnych typów matryc do wyciskania profilu otworowego (typ 1 – po V azotowaniu), płaskiego (typ 2 – po IV azotowaniu) i specjalnego (typ 3 – po IV azotowaniu)

Fig. 12. Hardness distributions in the calibration zone of individual types of dies for extrusion of a hollow profile (type 1 - after V nitriding), flat profile (type 2 - after IV nitriding) and complex shaped profile (type 3 - after IV nitriding)

#### 4. WNIOSKI

Na podstawie zrealizowanych badań wraz z partnerem przemysłowym (Albatros Aluminium) można stwierdzić, że:

- zidentyfikowana we wcześniejszych badaniach zwiększona trwałość matryc po drugim lub trzecim azotowaniu regenerującym związana jest ze wzrostem grubości warstwy azotowanej i jej budową (wcześniejsze badania opisane w artykule [16]),
- kształt wyciskanego profilu, a właściwie zależna od niego budowa warstwy azotowanej, ma wpływ na uzyskaną grubość i twardość warstwy utwardzonej,
- mniejsza grubość warstwy azotowanej matrycy typu 2, do wyciskania profili płaskich, nie ma bezpośredniego przełożenia na trwałość matrycy, która w tym przypadku jest większa niż matryc rozkładanych typu 1 i 3 (wynikać to może z mniejszego odkształcenia wyciskanego materiału i podwyższonej twardości niż ma to miejsce w przypadku matryc otworowych typu 1 i 3),
- proces azotowania pierwszego i kolejnych (regenerujących) powinien być opracowywany w zależności od dostępu atmosfery azotującej do powierzchni kalibrującej,
- wyznacznikiem dobrze zrealizowanego procesu azotowania matryc do wyciskania powinna być grubość i budowa warstwy azotowanej w strefie przypowierzchniowej „paska kalibrującego”,
- wyższa twardość w strefie przypowierzchniowej w matrycy typu 2 jest przyczyną większej trwałości zwłaszcza po trzecim azotowaniu.

#### 4. CONCLUSIONS

*Based on studies conducted with an industrial partner (Albatros Aluminium), it can be stated that:*

- *the increased die durability identified in earlier studies after the 2nd and 3rd regenerative nitriding is related to the increase of the thickness of the nitrided layer and its structure (earlier studies described in article [16]),*
- *the shape of the extruded profile, and more precisely, the structure of the nitrided layer, which is dependent on this shape, has an influence on the obtained thickness and hardness of the hardened layer,*
- *the lesser thickness of the nitrided layer of the type 2 die for extrusion of flat profiles does not reflect directly onto the durability of the die, which, in this case, is greater than that of type 1 and 3 collapsible dies (this may result from lesser deformation of the extruded material and greater hardness than in the case of type 1 and 3 dies),*
- *the first nitriding process and subsequent (regenerative) processes should be developed depending on the access of the nitriding atmosphere to the bearing surface,*
- *the determinant of a well-performed nitriding process on dies for extrusion should be the thickness and structure of the nitrided layer in the superficial layer of the „bearing gap”,*
- *the greater hardness in the superficial layer of the type 2 die is the cause of greater durability, particularly after the third nitriding process.*

#### LITERATURA / REFERENCES

- [1] Terčelj M., Fazarinc M., Kugler G., Perus I.: Influence of chemical composition and process parameters on the mechanical properties of an extruded aluminium alloy for highly loaded structural parts. *Construction and Building Materials* 44 (2013), 781-791.
- [2] Aytac A., Dascilar B., Usta M.: The effect of extrusion speed on the structure and corrosion properties of aged and non-aged 6063 aluminium alloy. *Mater Chem Phys* 130 (2011), 1357-1360.
- [3] Li YM., Li RD.: Effect of casting variables on microporosity and mechanical properties in an investment aluminium cast alloy. *Sci Technol Adv Mater* 2 (2001), 277-280.
- [4] Terčelj M., Smolej A., Fajfar P., Turk R.: Laboratory assessment of wear on nitrided surfaces of dies for hot extrusion of aluminium. *Tribology International* 40 (2007), 374-384.

- 
- [5] Björk T., Bergström J., Hogmark S.: Tribological simulation of aluminium hot extrusion. *Wear* 224 (1999), 216-225.
- [6] Akhtar S. S., Arif A. F. M., Yilbas B. S.: Nitriding of aluminium extrusion die : Effect of die geometry. *Journal of Materials Engineering and Performance* 19 (2010), 401-412.
- [7] Arif A.F.M., Sheikh A.K., Qamar S.Z.: A study of die failure mechanism in aluminium extrusion. *Journal of Materials Processing Technology* 134 (2003), 318-328.
- [8] Zhang C., Zhao G., Chen Z., Chen H., Kou F.: Effect of extrusion stem speed on extrusion process for a hollow aluminum. *Materials Science and Engineering B* 177 (2012), 1691-1697.
- [9] Kwon S. C., Park M. J., Baek W. S., Lee G. H.: Geometric effect of ion nitriding on the nitride growth behavior in hollow tube. *J. Mater. Eng. Perform* 1 (1992), 353-358.
- [10] Alves C. Jr., da Silva E. F., Martinelli A. E.: Effect of workpiece geometry on the uniformity of nitride layers. *Surface and Coating Technology* 139 (2001), 1-5.
- [11] Terčelj M., Somolej A., Večko-Pirtovšek T., Turk R.: The microstructures and wear resistance of gas-nitrided and ionically nitride AISI H13 dies with narrow gaps designed for hot extrusion of aluminium. *JSME Int. J. Ser. C* 49 (2006), 121-127.
- [12] Kugler G., Turk R., Večko-Pirtovšek T., Terčelj M.: Wear behavior of nitride microstructures of AISI H13 dies for hot extrusion of aluminium. *Metalurgija* 45 (2006), 21-29.
- [13] Baranowska J., Wysiecki M.: Influence of surface pre-treatment on case formation during gaseous nitriding. *Surface & Coatings Technology* 125 (2000), 30-34.
- [14] Keramis M. B., Gerçekcioglu E.: Wear behaviour of plasma nitride steels at ambient and elevated temperatures. *Wear* 143 (2000), 76-84.
- [15] Alsaran A., Celik A., Celik C.: Determination of the optimum conditions for ion nitriding of AISI 5140 steel. *Surface & Coatings Technology*, 160 (2002), 219-226.
- [16] Borowski J., Wendland J., Laurentowska A., Jurczak H.: Struktura przypowierzchniowa matryc do wyciskania profili aluminiowych, *Obróbka Plastyczna Metali*, Nr 1 (2013), 5-14.

