

dr inż. Agnieszka LAURENTOWSKA-TYCZKA¹⁾, dr inż. Jacek BOROWSKI¹⁾,
mgr inż. Henryk JURCZAK²⁾

¹⁾ Instytut Obróbki Plastycznej, Poznań

²⁾ Albatros Aluminium Sp. z o.o., Poznań

E-mail: agnieszka.laurentowska@inop.poznan.pl

Trwałość matryc zależna od kształtu wyciskanego profilu i parametrów procesu azotowania

Die durability dependent on the shape of the extruded profile and nitriding process parameters

Streszczenie

W pracy starano się wykazać zależność geometrii matryc, związanej z kształtem profili aluminiowych i parametrów procesu azotowania na trwałość eksploatacyjną matrycy. Matryce były poddawane jedno lub kilkukrotnemu azotowaniu gazowemu i eksploatowane do końcowego zużycia w firmie Albatros Aluminium. W artykule podjęto próbę wyjaśnienia wpływu różnych procesów azotowania i geometrii matryc na grubość warstwy azotowanej, na trwałość matrycy. Na podstawie badań określono najbardziej optymalną grubość warstwy azotowanej w przedziale 350–400 μm . Stosowanie mniejszej grubości powoduje szybsze zużycie lub uszkodzenie matryc.

Abstract

This work attempted to demonstrate the dependence between die geometry, connected to the shapes of aluminium profiles and the parameters of the nitriding process, to the die's service life. Dies were subjected to single or repeated gas nitriding and used until worn out at the company Albatros Aluminium. The article undertakes an attempt to explain the influence of various nitriding processes and die geometries on the thickness of the nitrided layer and the durability of the die. Based on the research, the optimal thickness of the nitrided layer was determined to be in the range of 350–400 μm . The use of a smaller thickness causes faster wear or damage to the dies.

Słowa kluczowe: azotowanie gazowe, grubość warstwy azotowanej, wyciskanie aluminium, powierzchnia kalibrująca

Keywords: gas nitriding, nitrided layer thickness, aluminium extrusion, bearing surface

1. WSTĘP

Wyciskanie jest konwencjonalnym sposobem wytwarzania profili aluminiowych na skalę przemysłową. Wsad z wybranego stopu aluminium wyciska się przez otwór w matrycy, tworząc profil o prawie dowolnym przekroju poprzecznym (rys. 1). Zużycie części kalibrującej matrycy ma istotne znaczenie technologiczne i ekonomiczne, m.in. ze względu na pogarszanie się kształtu, wielkości i wykończenia powierzchni wyciśniętego profilu [1–3].

Uzyskuje się profile prawie o każdym kształcie i długości, możliwych do wyciskania: pręty, rury, belki, przewody, itp. Przed przystąpieniem

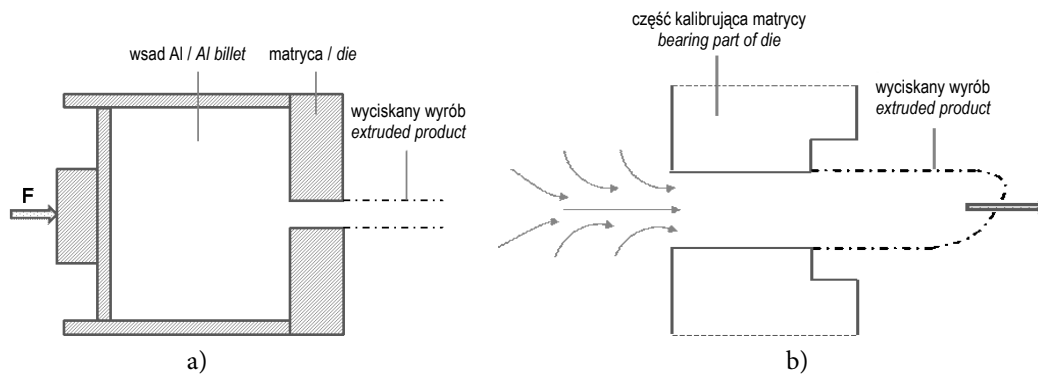
1. INTRODUCTION

Extrusion is an industrially important method for manufacturing of aluminium profiles. A billet of a selected aluminium alloy is extruded through an opening of a die to form a profile of almost any cross-section (Fig. 1). Wear of the die bearing has important technological and economic significance since it deteriorates the shape, size and surface finish of the extruded profile [1–3].

Profiles of almost any shape and length are possible to extrude: rods, tubes, beams, wires, etc. Prior to extrusion, the billet is heated typically

do wyciskania, wsad jest nagrzewany zwykle do 500°C. Następnie podgrzewany jest do rzeczywistej temperatury wyciskania 550–620°C, a odkształcenie następuje w obszarze kalibrującym przy tworzeniu profilu z masywnego wlewka. Powierzchnia profilu wyciskanego pozostaje w nienasmarowanym kontakcie ślizgowym pomiędzy gorącym aluminium i częścią kalibrującą w komorze matrycy. Wydajność, koszt i jakość wyciskanych profili to oczywiście nadrzędne czynniki komercyjne. I wszystkie trzy są bezpośrednio związane z wydajnością procesu, niezależnie od innych czynników, takich jak: rodzaj wyciskanego aluminium, rodzaj prasy do wyciskania i możliwości urządzeń pomocniczych oraz późniejszych operacji, takich jak przesycanie i starzenie, anodowanie lub malowanie. Ze względu na wysoki koszt, wykorzystanie specjalnych materiałów, bardzo wąską tolerancję i wysokie wymagania wydajności termo-mechanicznej najbardziej krytycznym elementem w procesie wyciskania jest matryca. W celu minimalizacji kosztów, matryce do wyciskania są wykonane ze stali narzędziowych do pracy na gorąco i poddawane obróbce powierzchniowej, zwykle przez azotowanie [3, 4].

to 500°C. It is then further heated to an actual extrusion temperature of 550–620°C, and deformation follows in the bearing area when a profile is formed from the massive billet. The profile surface is generated in an unlubricated sliding contact between aluminium and die material in the bearing channel. Productivity, cost and quality of the extruded profiles are of course the overriding commercial factors. And all the three are directly related to the performance of the die, apart from other factors such as billet material, extrusion press and ancillary equipment capability, and latter operations such as age hardening, anodizing and painting. Due to its high cost, based on special material and processing, very fine tolerances and high demands on repeated thermo-mechanical performance, the most critical extrusion component is the die. In order to minimise wear, the extrusion dies are made of hot work tool steels and surface treated, typically by nitriding [3, 4].



Rys. 1. Schemat procesu wyciskania: (a) prasa do wyciskania, (b) kształtowanie profilu, na podstawie [1]

Fig. 1. The diagram of the extrusion process: (a) extrusion press, (b) shaping the profile, on the basis of [1]

Na matryce do wyciskania stosuje się przede wszystkim stal narzędziową H13. Charakteryzuje się ona wysoką plastycznością, wytrzymałością i dobrą odpornością na odpuszczanie, przy stosunkowo niskim koszcie. Stal ta, ulepszona cieplnie, może być również azotowana, do twardości w zakresie 450–500 HV. Azotowanie w środowisku gazowym jest dzisiaj zdecydowanie najczęstszym sposobem obróbki powierzchniowej matryc do wyciskania. Proces ten zwiększa zasadniczo trwałość narzędzi, chroniąc powierzchnię

The AISI H13 hot work tool steel is the tool material that is basically used almost exclusively on extrusion dies. It is characterized by high strength and ductility, good tempering resistance and moderate cost. It is also well suited and established for surface treatments such as nitriding. The steel is used in a quenched and tempered condition at a hardness range of 450–500 HV. Nitriding in a gaseous environment is by far the most common surface treatment for extrusion dies today. This process as a rule increases tools' dura-

przed przyspieszonym zużyciem. Zabieg generuje warstwę o grubości 50–300 μm bogatą w azot (tzw. strefę dyfuzji) i górną warstwę azotku żelaza o grubości od 2 do 10 μm (często określaną jako biała warstwa), która osiąga twardość 1000–1200 HV. Warstwa azotków żelaza może być krucha, w związku z czym nie wiadomo, czy jej obecność wpływa korzystnie na zwiększenie odporności na ścieranie i zużycie [4, 5, 9].

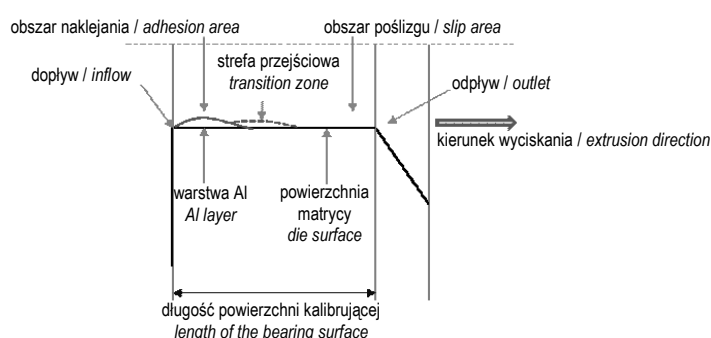
Istotną częścią każdej matrycy jest strefa kalibrująca, wykorzystywana do kontroli kształtu i jakości wykończenia powierzchni profili. Odgrywa również istotną rolę w określaniu żywotności matrycy. Tarcie na powierzchni kalibrującej matrycy opóźnia płynięcie plastyczne metalu [3]. Na rys. 2 przedstawiono schemat poszczególnych stref występujących na powierzchni kalibrującej matrycy podczas wyciskania aluminium.

Zaobserwowano, że podczas wyciskania przez matryce poddawane azotowaniu wlotowa powierzchnia nośna tych matryc pokryta jest stosunkowo stabilną warstwą aluminium. Położenie przedniej krawędzi czołowej warstwy aluminium zmienia się w zależności od etapu początku i końca cyklu wyciskania (tzw. „start-stop”), prędkości przemieszczania się, temperatury wsadu, geometrii części kalibrującej itd. To sugeruje, że następuje powolne i ciągle narastanie warstewki aluminium, co znacznie wydłuża czas chemicznego reagowania wyciskanego stopu aluminium z materiałem matrycy.

durability, protecting the surface from accelerate wear. The treatment generates a 50–300 μm thick nitrogen enriched diffusion zone and a 2–10 μm thick iron nitride compound layer on top (often referred to as the white layer) which attains a hardness of 1000–1200HV. The compound layer may be relatively brittle and the opinions are divided whether its presence is advantageous for the wear resistance or not [4, 5, 9].

The most crucial part of any die is the bearing used to control the dimensions, profile and surface finish. It is also playing a vital part in determining the die life. Friction at the die land (bearing surface) retards and thus controls metal flow [3]. In Fig. 2 there are shown the different regions occurring on the bearing surface during aluminium hot extrusion.

It has been observed that, during extrusion with nitrided dies the inlet of the bearing surface is covered with a relatively stable aluminium film. The position of the leading edge of the aluminium layer changes as a function of phase of the beginning and end of the extrusion cycle (so-called „start-stop”), sliding speed, billet temperature, bearing part geometry, etc. This suggests that a slow and continuous growth of the aluminium film occurs, which significantly lengthens the time for chemical reaction of the extruded alloy with the die material.



Rys. 2. Schemat poszczególnych stref występujących na powierzchni kalibrującej matrycy podczas wyciskania na gorąco aluminium, na podstawie [7]

Fig. 2. The diagram of particular zones present on the surface of the bearing die during hot extrusion of aluminium, on the basis of [7]

Chemiczne oddziaływanie, w połączeniu z silnym naprężeniem ścinającym i oddziałującą siłą rozciągającą, wpływają na odrywanie się od czasu do czasu fragmentów materiału od części kalibrującej matrycy, po czym są one porywane wraz

The chemical bonding in combination with strong shear and tensile stresses force fragments of material to occasionally detached from the bearing, whereupon they are carried along with the extrudate. Severe wear of nitride dies is usually seen

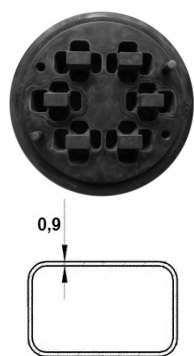
z wyciskaniem profilem. W wyniku znacznego zużycia azotowanych matryc pojawiają się zazwyczaj krater i bruzdy o głębokości od 20 do 100 μm na powierzchni nośnej matrycy. Najgłębsze ślady zużycia można znaleźć na krawędzi czołowej części kalibrującej, w środku lub przy krawędzi wylotowej kanału kalibrującego. Tak odmiennie dane są najprawdopodobniej wynikiem zmian warunków wyciskania, parametrów wytrzymałościowych oraz geometrii wyciskanych profili [4, 6].

Trwałość każdej matrycy jest wyrażona masą wyciśniętego materiału i długością uzyskanych profili. Oba parametry pomagają określić przydatność lub utratę zdolności produkcyjnej matrycy, w zależności od jakości powierzchni i zmian wymiarów wyciskanych profili. Wykazano, że poszczególne fragmenty matrycy mają różny stopień degradacji powierzchni kalibrującej. To umożliwia rekonstrukcję postępu zużycia konkretnych fragmentów matrycy [7].

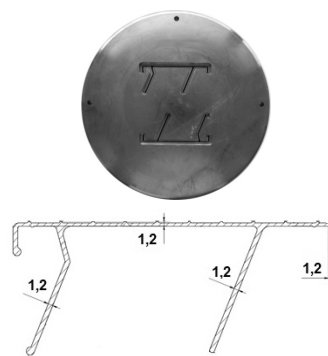
Celem niniejszej pracy była ocena wpływu geometrii matryc, parametrów azotowania na jakość oraz zużycie części kalibrującej matrycy do wyciskania aluminium stosowanych w firmie Albatros Aluminium z Wałcza. Ocena została przeprowadzona na podstawie obserwacji metalograficznych oraz rozkładów twardości w warstwie utwardzonej.

2. PRZEDMIOT I METODYKA BADAŃ

Do badań zostały wytypowane dwa typy matryc do wyciskania profili zamkniętych oraz otwartych. Wszystkie profile wyciskano ze stopu 6060. Matryce oraz kształty profili pokazano na rys. 3.



a) część talerzowa matrycy typu A – profil zamknięty
a) a disc part of a type A die – hollow profile



b) matryca typu B – profil otwarty
b) type B die – hollow profile

Rys. 3. Matryce wytypowane do badań oraz kształt wyciskanych profili
Fig. 3. Dies selected for testing and the shapes of the extruded profiles

as 20–100 μm deep wear craters and furrows on the bearing surface. The deepest wear traces can be found either at the leading edge, in the middle or at the exit edge of the bearing channel. The diverging findings are most likely a function of alterations in extrusion conditions, bearing parameters, extrudate geometries, etc. [4, 6].

The durability of each die is expressed as the mass of extruded material or and the length of the obtained profiles. Both parameters help to specify usefulness or loss of production ability of the dies, depending on the quality of the surface and changes in the dimensions of the extruded profiles. It was demonstrated that particular parts of the die have different degrees of degradation of the bearing surface. This makes it possible to reconstruct the progress of wear of specific parts of the die [7].

The aim of the following work was the assessment of the influence of die geometry and nitriding parameters on the quality and wear of bearing parts of aluminium extrusion dies used at the company Albatros Aluminium in Wałcz. The assessment was carried out based on the metallographic observations and the hardness distribution in the hardened layer.

2. TESTING SUBJECT AND METHODOLOGY

For testing, two types of dies, for extruding flat and hollow profiles, were selected. All profiles have been extruded from alloy 6060. The dies and the shapes of the profiles are shown in Fig. 3.

Z każdego typu matryc 1 oraz 2 przetestowano i poddano badaniom po trzy matryce. Wszystkie matryce wykonano ze stali narzędziowej do pracy na gorąco AISI H13 i poddano azotowaniu gazowemu w celu utwardzenia powierzchni. W tab. 1 zestawiono oznaczenia matryc oraz przypisane im numery technologii procesów azotowania.

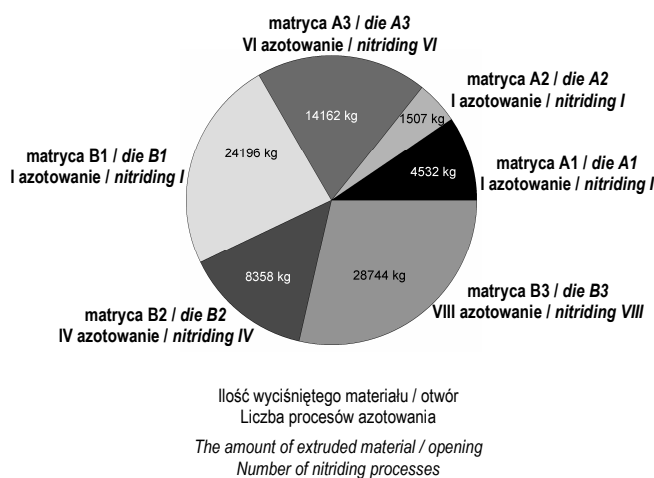
Three dies have been tested and subjected to examination for each type of die, 1 and 2. All dies were made from AISI H13 tool steel for high-temperature work and subjected to gas nitriding in order to harden the surface. The dies' markings and the numbers of the nitriding process technologies assigned to them are listed in Tab. 1.

Tab. 1. Zestawienie badanych matryc w zależności od rodzaju wyciskanego profilu i technologii procesu azotowania
Tab. 1. The list of tested dies depending on the kind of extruded profile and the technology of the nitriding process

Rodzaj matrycy <i>Die type</i>	Technologia procesu azotowania / <i>Technology of the nitriding process</i>		
	Nr 1 / <i>No. 1</i>	Nr 2 / <i>No. 2</i>	Nr 3 / <i>No. 3</i>
Typ A – profil zamknięty <i>Type A – closed profile</i>	matryca A1 / <i>die A1</i>	matryca A2 / <i>die A2</i>	matryca A3 / <i>die A3</i>
	I proces azotowania <i>Nitriding process I</i>	I proces azotowania <i>Nitriding process I</i>	VI procesów azotowania <i>Nitriding process VI</i>
Typ B – profil otwarty <i>Type B – open profile</i>	matryca B1 / <i>die B1</i>	matryca B3 / <i>die B3</i>	matryca B2 / <i>die B2</i>
	I proces azotowania <i>Nitriding process I</i>	VIII procesów azotowania <i>Nitriding process VIII</i>	IV procesy azotowania <i>Nitriding process IV</i>

Matryce zostały testowane i eksploatowane w firmie Albatros Aluminium do całkowitego ich zniszczenia. Jako kryterium zużycia danej matrycy przyjęto nieuzyskiwanie wymiarów danego kształtu profilu w określonym zakresie tolerancji wymiarowej. Wyeksploatowane matryce zostały poddane badaniom metalograficznym. Na rys. 4 zestawiono ilości wyciśniętego materiału przez otwór dla każdej z matryc.

The dies were tested and used at the company Albatros Aluminium until their complete destruction. A profile not achieving the given shape to within the dimensional tolerance was accepted as the criterion for a given die to be worn out. The used up dies were subjected to metallographic examination. The amount of material extruded through the opening for each of the dies is shown in Fig. 4.

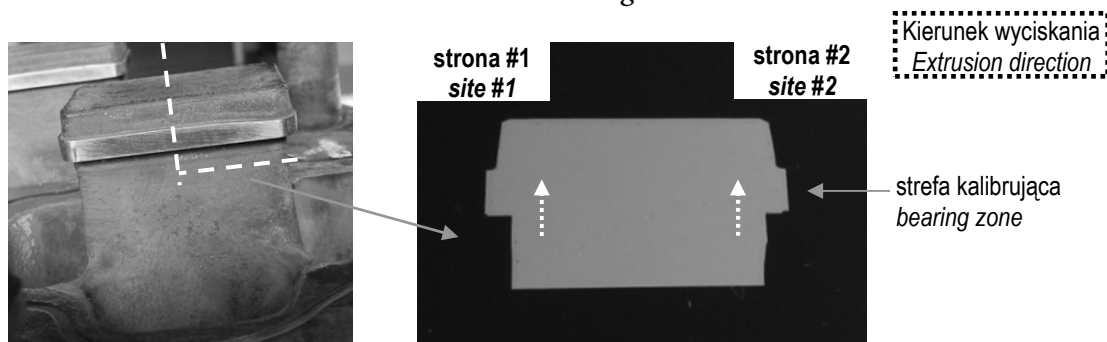


Rys. 4. Zestawienie ilości wyciśniętego materiału przez jeden otwór w zależności od liczby procesów azotowania i typu matrycy

Fig. 4. The statement of the amount of material extruded through one opening, depending on the number of nitriding processes and the die type

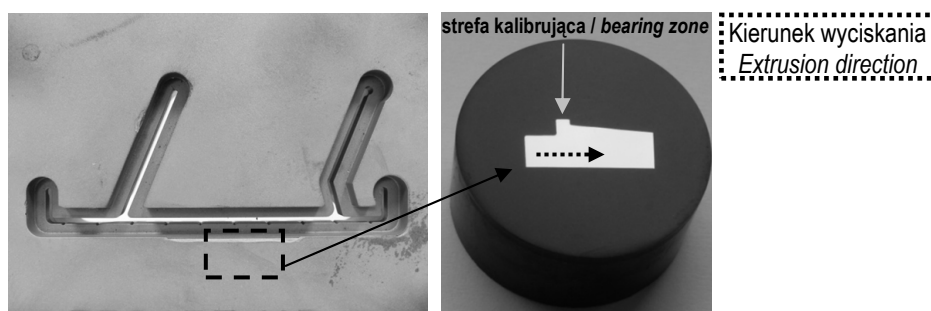
Z wytypowanych matryc zostały pobrane próbki, wycięte za pomocą elektrodrążarki drutowej, z których przygotowano zglądy metalograficzne. Zglądy obejmowały strefę kalibrującą kształt danego profilu, w której następowało największe zużycie. Stan powierzchni kalibrującej określał trwałość całej matrycy. Sposób pobrania próbek do badań pokazano na rys. 5 i 6.

Samples were taken from the selected dies (cut out with the use of a wire spark erosion machine) and metallographic sections were prepared from them. The sections included the zone calibrating the shape of a given profile, in which the greatest wear occurred. The state of the bearing surface determined the durability of the whole die. The method of the samples collection for examination is shown in Fig. 5 and 6.



Rys. 5. Schemat pobrania próbki z trzpienia matrycy typu A

Fig. 5. The diagram of samples collection from the mandrel of a type A die



Rys. 6. Schemat pobrania próbek z matrycy typu B

Fig. 6. The diagram of samples collection from a type B die

Na przygotowanych zglądach przeprowadzono obserwacje metalograficzne oraz pomiary twardości, w celu określenia grubości warstwy azotowanej i oceny jej jakości. Obserwacje mikrostruktury przeprowadzono za pomocą mikroskopu optycznego Eclipse L150 (Nikon), wyposażonego w program do analizy obrazu NIS Elements. Celem ujawnienia warstwy azotowanej próbki poddano trawieniu 3% etanolem 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”.

Metallographic observations and hardness measurements were performed on the prepared sections, in order to determine the thickness of the nitrided layer and to assess its quality. The microstructure observations were performed with the help of an Eclipse L150 optical microscope (Nikon) equipped with the NIS Elements image analysis program. In order to reveal the nitrided layer, the samples were etched with a 3% ethanol solution of nitric acid(V). Hardness tests were performed with the Vickers method with a load of 0.98 N, with the help of a MICROMET 2104 hardness meter (Buehler). The hardness tests were performed according to standard PN-EN 6507-1:2007 – “Hardness measurement with the Vickers method. Part 1: Method of tests”.

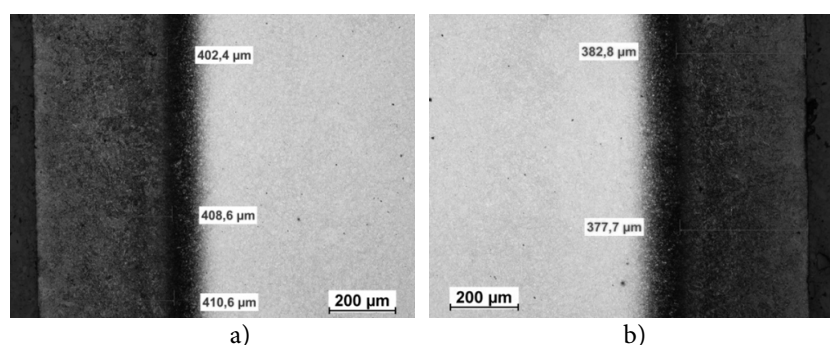
3. WYNIKI BADAŃ

Badania metalograficzne struktury próbek pobranych z matryc umożliwiły oszacowanie grubości oraz budowę warstwy azotowanej dla każdego typu matryc na powierzchni kalibrującej matrycy, po całkowitym okresie eksploatacji i przeznaczeniu jej do złomowania.

3.1. Obserwacje metalograficzne

3.1.1. Matryca A1

Przez matrycę typu A1 wyciskane były profile zamknięte. Najbardziej narażone na zużycie i uszkodzenia były rdzenie w części rdzeniowej matrycy. W związku z czym do obserwacji wytypowano rdzeń wykazujący wizualnie największe ślady zniszczenia. Ponadto matryca ta poddana była tylko jednemu procesowi azotowania (tabela 1) i eksploatacji do zużycia. Na rys. 7 i 8 zestawiono struktury przekroju strefy kalibrującej na całej długości powierzchni po obu stronach rdzenia.



Rys. 7. Warstwa azotowana w strefie kalibrującej matrycy A1 od strony a) #1, b) #2

Fig. 7. The nitrided layer in the bearing zone of die A1, shown from side: a) #1, b) #2

Obserwacje metalograficzne pozwoliły ustalić grubości warstw azotowanych na poziomie ok. 400–410 μm po stronie #1 oraz ok. 360–380 μm po stronie #2 – rys. 7. Tak znaczne różnice w szerokości warstwy utwardzonej mogą wynikać m.in. z nierównomiernego ścierania się powierzchni pracującej w wyniku nierównomiernych obciążeń podczas procesu wyciskania profili.

Drugim istotnym aspektem mogą być zabiegi przygotowania, szlifowania i polerowania obszaru kalibrującego po każdym cyklu produkcyjnym, czyli tzw. korekcje, przeprowadzane

3. TESTS RESULTS

Metallographic examinations of the structures of samples taken from dies allowed estimation of the thickness and structure of the nitrided layer for each type of die on the die's bearing surface, after a full period of use and the final scrapping.

3.1. Metallographic observations

3.1.1. The die A1

Hollow profiles have been extruded through the type A1 die. The cores in the mandrel part of the die were the most exposed to a wear and damage. In connection with this, a core exhibiting visually the greatest signs of destruction was selected for observation. Furthermore, this die was subjected to only one nitriding process (Table 1) and used until worn out. In Fig. 7 and 8 are presented the structures of the cross-sections of the bearing part along the whole length of the surface on both sides of the core.

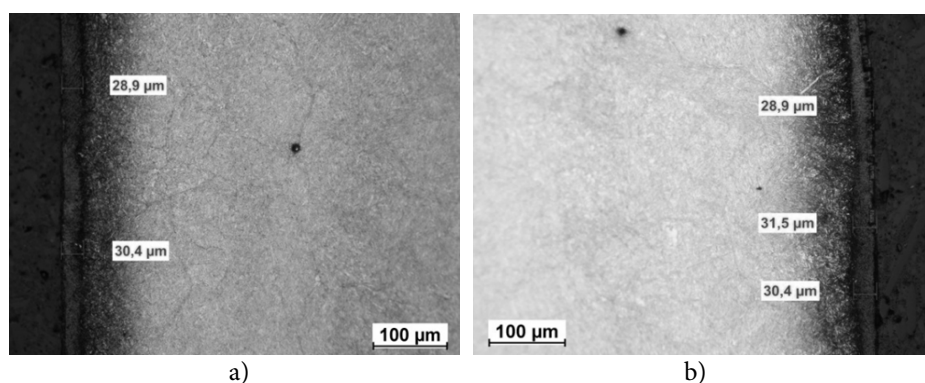
The metallographic observations made it possible to establish the thicknesses of the nitrided layers on the level of about 400–410 μm on side #1 and about 360–380 μm on side #2 – Fig. 7. Such significant differences in the width of the hardened layer may result from, among other things, uneven abrasion of the working layer as a result of uneven loads during the process of extruding profiles.

A second important aspect may be the operations of preparing, blasting and polishing the bearing area after each production cycle, that is so-called corrections performed in order to obtain

w celu uzyskiwania jak najmniejszych odchyłek od wymiarów zasadniczych.

3.1.2. Matryca A2

W przypadku matrycy A2 badania mikroskopowe ujawniły znacznie mniejszą grubość warstwy azotowanej, w porównaniu do matrycy A1, pomimo iż dla każdej z nich przeprowadzono tylko jednokrotny proces utwardzania powierzchni. Grubości warstw azotowanych po obu stronach trzpienia są porównywalne i wynoszą tylko ok. 30–40 μm w środkowej części obszaru kalibrującego (rys. 8).



Rys. 8. Warstwa azotowana w strefie kalibrującej matrycy A2 od strony a) #1, b) #2
 Fig. 8. The nitrided layer in the bearing zone of die A2, shown from side: a) #1, b) #2

Po obu stronach obszaru kalibrującego zaobserwować można uszkodzenia powierzchni w formie wgłębień o długości ok. 300 μm od strony #1 i dwukrotnie większe po stronie #2. Wydaje się, że tak znaczne zniszczenia powierzchni mogły powstać w wyniku oderwania się fragmentu bieżni, w efekcie czego wyciskane profile nie miały wymaganych wymiarów.

3.1.3. Matryca A3

Aż sześciokrotny proces azotowania pozwolił uzyskać warstwę o grubości 370–380 μm (rys. 9a), czyli o podobnej grubości jak w przypadku matrycy A1 po jednorazowym azotowaniu.

the smallest possible deviations from the essential dimensions as well as possible the best quality of profiles surface.

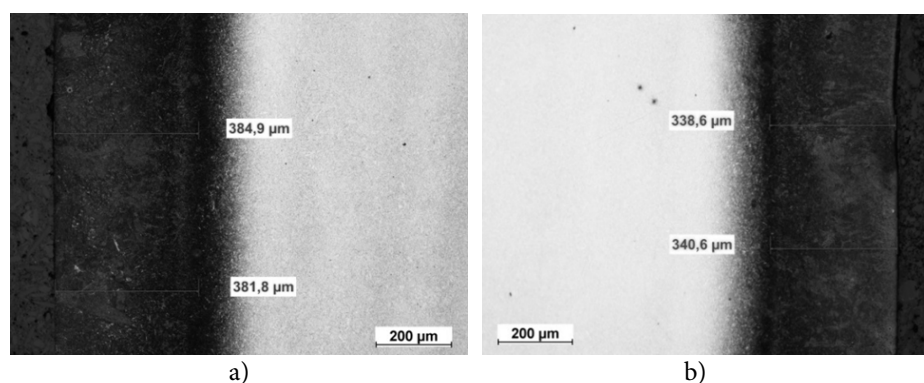
3.1.2. The die A2

In the case of die A2, microscope examinations revealed a much smaller thickness of the nitrided layer compared to die A2, even though only a single surface hardening process was conducted for each of them. The thicknesses of the nitrided layers a on each side of the stem are comparable and are only about 30–40 μm in the middle part of the bearing area (Fig. 8).

On both sides of the bearing zone can be observed surface damage in the form of recesses about 300 μm in length on side #1 and twice as large on side #2. It seems that such significant surface destruction could form as a result of the tearing off of fragments of the track, as a result of which the extruded profiles did not have required dimensions.

3.1.3. The die A3

A full six-time nitriding process made it possible to obtain a layer with a thickness of about 370–380 μm (Fig. 9a), such thickness is similar to that one obtained in the case of die A1 after a single nitriding.



Rys. 9. Warstwa azotowana w strefie kalibrującej matrycy A3 od strony a) #1, b) #2
 Fig. 9. The nitrided layer in the bearing zone of die A3, shown from side: a) #1, b) #2

Nieznacznie cieńszą warstwę (340–360 μm) zaobserwowano po stronie #2 (rys. 9b). Podczas preparatyki próbki metalograficznej nastąpiło oderwanie fragmentu naroża, co jednoznacznie wskazuje na występowanie mikro- i makropęknięć na narożu. Na narożach części kalibrującej oddziałują znaczne siły dynamiczne oraz naprężenia, które wpływają na przyspieszenie procesu zużywania się matrycy.

3.1.4. Matryca B1

W przypadku matrycy o profilu otwartym zaobserwować można zróżnicowanie grubości warstwy azotowanej (rys. 13) na próbce pobranej z bieżni matrycy (rys. 6). Część kalibrująca odznacza się stosunkowo grubą warstwą azotowaną rzędu ok. 310 μm . Nie zaobserwowano uszkodzeń lub wykruszeń naroży, tylko znaczne pęknięcie od strony dopływu materiału wyciskanego (pęknięcie o długości ok. 350 μm).

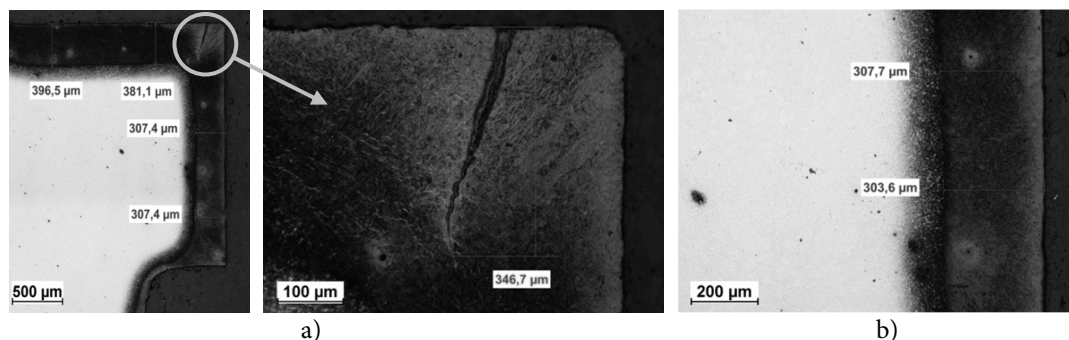
Występowanie pęknięć jest konsekwencją zewnętrznych obciążeń (wpływ naprężeń w wyniku tarcia w czasie wyciskania). Ponadto powiększanie się pęknięć może być spowodowane procesem czyszczenia matrycy (w celu usunięcia naklejonego aluminium do powierzchni), po każdym cyklu produkcyjnym i przestoju przy użyciu zasadowego roztworu sody żrącej NaOH lub sody kaustycznej NaHCO_3 [7, 8].

A slightly thinner layer (340–360 μm) was observed on side #2 (Fig. 9b). During the preparation of the metallographic sample, a fragment of the corner became detached, which unambiguously indicates the presence of micro- and macrofractures in the corner. Significant dynamic forces and tensions existing on the corners of the bearing part, influencing the acceleration of the die's wear process.

3.1.4. The die B1

In the case of a die with a flat profile, variation in thickness of the nitrided layer (Fig. 13) can be observed on the sample taken from the die's track (Fig. 6). The bearing part is denoted by a relatively thick nitrided layer of about 310 μm . No damage or chipping of the corners were observed, only a fracture on the side of the flow of the extruded material (fracture about 350 μm in length).

The occurrence of fractures is a consequence of external load (influence of tensions resulting from friction during extrusion). Furthermore, the expansion of fractures may be caused by the process of cleaning the die (in order to remove aluminium adhering to the surface), after each production cycle and pause using an alkaline solution of the caustic soda NaOH or the caustic soda NaHCO_3 [7, 8].

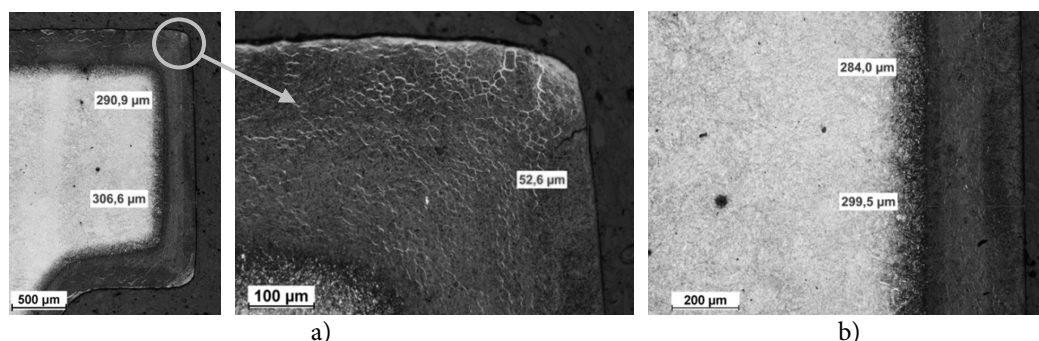


Rys. 10. Warstwa azotowana w strefie kalibrującej matrycy B1: obszar całościowy – powiększenie 50x; powiększenie 200x naroża (a) i powiększenie 100x środka obszaru kalibrującego (b)

Fig. 10. The nitrided layer in the bearing zone of die B1: whole area – 50x magnification; 200x magnification of the corner (a) and 100x magnification of the middle of the bearing area (b)

3.1.5. Matryca B2

3.1.5. The die B2



Rys. 11. Warstwa azotowana w strefie kalibrującej matrycy B2: obszar całościowy – powiększenie 50x; powiększenie 200x naroża (a) i powiększenie 100x środka obszaru kalibrującego (b)

Fig. 11. The nitrided layer in the bearing zone of die B2: whole area – 50x magnification; 200x magnification of the corner (a) and 100x magnification of the middle of the bearing area (b)

Wzrost liczby kolejnych procesów azotowania wpływa na pojawienie się sieci azotków w warstwie azotowanej, o grubości 290–310 μm . Dodatkowo zwiększa się prawdopodobieństwo występowania strefy azotków żelaza ϵ (Fe_{2-3}N), $\epsilon+\gamma'$, i γ' (Fe_4N), tzw. białej warstwy, na zaokrąglonych narożach części kalibrującej. Istotne jest pojawienie się pęknięcia (rys. 11 a) na początkowym odcinku obszaru kalibrującego w kierunku wyciskania. Może to być związane z nadmiernymi oddziaływaniami termicznymi i naprężeniem od przemieszczającego się materiału w początkowym etapie kształtowania profilu [3].

3.1.6. Matryca B3

Na rys. 12 pokazano przekrój przez warstwę uzyskaną podczas ośmiokrotnego azotowania z fragmentu bieżni matrycy B3, o grubości 440–460 μm . Również w tym przypadku widoczne

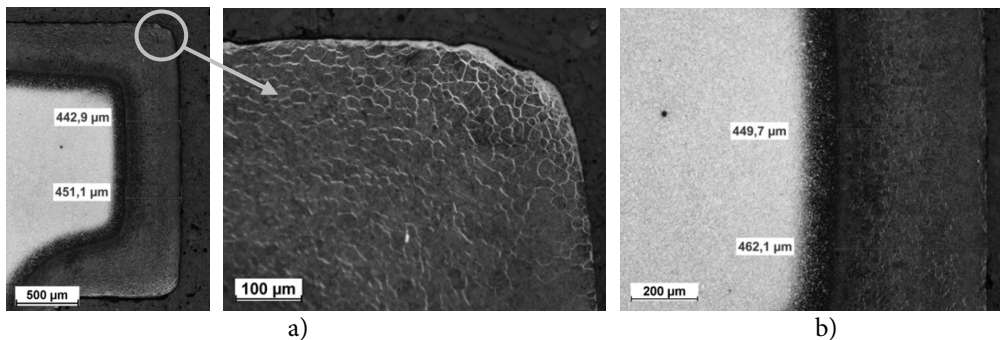
The growth of the number of subsequent nitriding processes affects the appearance of a grid of nitrides in the nitrided layer, 290–310 μm in thickness. Additionally, it increases the probability of the occurrence of an iron nitride zone ϵ (Fe_{2-3}N), $\epsilon+\gamma'$ and γ' (Fe_4N), a so-called white layer, on the rounded corners of the bearing part. The appearance of fractures (Fig. 11 a) in the initial segment of the bearing part in the direction of extrusion is important. This may be connected to excessive thermal and tensile action by the moving material in the initial phase of shaping the profile [3].

3.1.6. The die B3

A cross-section of the layer, obtained through eight-time nitriding, from a fragment of the die track B3, with a thickness of 440–460 μm , is shown in Fig. 12. In this case, the rounding of the corners,

jest zaokrąglenie naroży, na których pojawiają się nieliczne miejsca na narożach z tzw. siatką azotków. W przypadku wytwarzania niesymetrycznych profili obserwuje się nierównomierny rozkład sił przy wyciskaniu. W połączeniu z wysoką temperaturą wsadu może to doprowadzić do odkształceń plastycznych na bieżni, na skutek dodatkowych naprężeń na powierzchni roboczej [3]. Skutkiem tego mogą być właśnie obserwowane, w niniejszych badaniach, zaokrąglenia i wykruszenia naroży.

on which appear only a few places with the so-called nitride grid, is also visible. In the case of production of asymmetric profiles, an uneven distribution of forces is observed during extrusion. In connection with the high temperature of the billet, this may lead to plastic deformations on the track as a result of additional tensions on the working surface [3]. A result of this may be precisely the rounding and chipping of the corners observed during these examinations.



Rys. 12. Widok strefy kalibrującej matrycy B3 do wyciskania profilu płaskiego: obszar całościowy – powiększenie 50x; powiększenie 200x naroża (a) i powiększenie 100x środka obszaru kalibrującego (b)

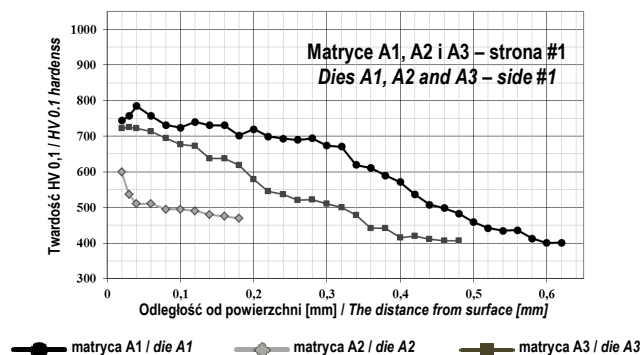
Fig. 12. The view of the bearing zone of die B3: whole area – 50x magnification; 200x magnification of the corner (a) and 100x magnification of the middle of the bearing area (b)

3.2. Pomiary twardości

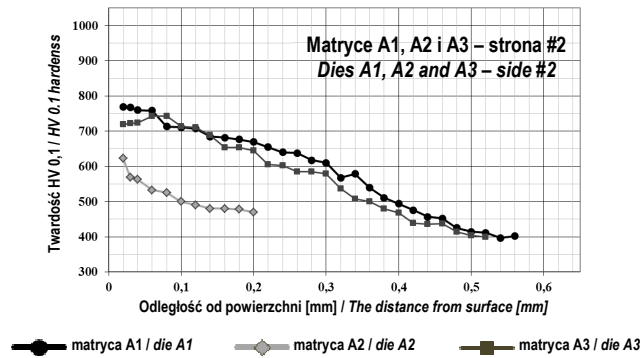
Grubość warstwy utwardzonej, poszczególnych próbek pobranych z każdej z matryc, określono na podstawie rozkładu twardości. Dla każdego obszaru kalibrującego wyznaczono po dwie ścieżki pomiarowe, na podstawie których określono średnią z dwóch pojedynczych wyników. Na podstawie uśrednionych wyników pomiarów twardości sporządzano wykresy (rys. 13–15).

3.2. Hardness measurements

The thickness of the hardened layer, in individual samples taken from each die, was determined on the basis of the hardness distribution. For each bearing area, two measurement pathways were designated, on the basis of which the mean of two single results were determined. On the basis of the averaged results of the hardness measurements, charts has been prepared (Fig. 13–15).



Rys. 13. Rozkłady twardości w strefie kalibrującej matryc A1, A2 i A3 (strona #1) do wyciskania profilu otworowego
Fig. 13. The hardness distributions in the bearing zones of dies A1, A2 and A3 (side #1) for extruding opening profiles



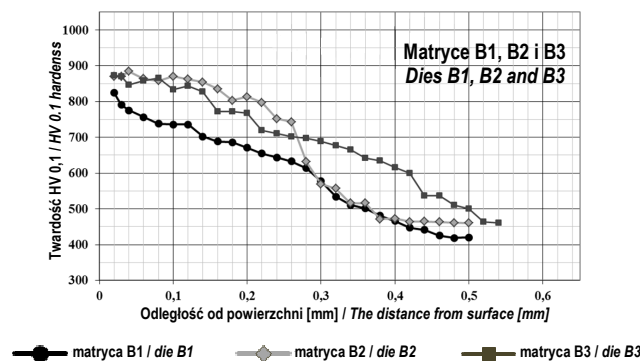
Rys. 14. Rozkłady twardości w strefie kalibrującej matryc A1, A2 i A3 (strona #2) do wyciskania profilu otworowego
Fig. 14. The hardness distributions in the bearing zones of dies A1, A2 and A3 (side #2) for extruding opening profiles

Profile twardości HV 0,1 zmierzone na przekroju próbek z matryc A1, A2 oraz A3 (rys. 13 i 14) odpowiadają cechom mikrostruktury opisanym powyżej. Charakterystyczne jest zróżnicowanie rozkładów twardości w zależności od strony #1 i #2. Średnia twardość w pobliżu powierzchni wynosiła ok. 750 HV 0,1 dla matrycy A1, ok. 620 HV 0,1 w przypadku matrycy A2 oraz ok. 740 HV 0,1 dla matrycy A3. Twardość rdzenia była różna w obu przypadkach: dla matryc A1 i A3 była równa 400 HV 0,1, a dla matrycy A2 470 HV 0,1. Należy zaznaczyć, że matryce A1 i A2 były poddane jednokrotnemu procesowi azotowania, a uzyskane grubości warstwy utwardzonej były znacząco różne.

Dla matrycy A3, poddanej sześciokrotnemu procesowi azotowania, wykazano nieznaczne różnice twardości na poszczególnych odległościach od powierzchni (rys. 14), w porównaniu do matrycy A1.

Profiles of the HV 0.1 hardness, measured in the cross-sections of samples from dies A1, A2 and A3 (Fig. 13 and 14), agree with the microstructure traits described above. It is characteristic that the hardness distributions' variation depends on the side (#1 or #2). The mean hardness near the surface was about 750 HV 0.1 for die A1, about 620 HV 0.1 in the case of die A2 and about 740 HV 0.1 for die A3. The hardness of the core was different in both cases: for dies A1 and A3 it was 400 HV 0.1, while for die A2 it was 470 HV 0.1. It should be pointed out that dies A1 and A2 were subjected to a one-time nitriding process, and the thicknesses of the obtained hardened layers were substantially different.

For die A3, subjected to six-time nitriding, small differences in hardness at various differences from the surface were demonstrated (Fig. 14), in comparison to die A1.



Rys. 15. Zestawienie rozkładów twardości w strefie kalibrującej matryc B1 (I azotowanie), B2 (IV azotowanie) i B3 (VIII azotowanie) do wyciskania profilu płaskiego
Fig. 15. The statement of hardness distributions in the bearing zones of dies B1 (nitriding I), B2 (nitriding IV) and B3 (nitriding VIII) for extruding flat profiles

Zestawione rozkłady twardości wszystkich matryc typu B jednoznacznie pokazują różnice grubości warstw utwardzonych w zależności od krotności procesów azotowania. Głębokości poszczególnych warstw matryc, określone na podstawie profilów twardości, odpowiadają rzeczywistym obserwacjom mikroskopowym struktury. Charakterystyczne jest uzyskiwanie zbliżonych twardości matryc, po IV i VI azotowaniu, na odległości ok. 0,28 mm od powierzchni, dla matrycy B2, a po przekroczeniu tej wartości twardość znacząco maleje.

4. WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że:

- grubość warstwy azotowanej jest ściśle związana z parametrami procesu azotowania, w zależności od metody tego zabiegu technologicznego; już po I procesie azotowania (dostawca na 1) obserwuje się warstwę o grubości uzyskiwanej dopiero po sześciokrotnym azotowaniu (dostawca azotowania nr 3),
- w przypadku jednokrotnego azotowania matrycy typu A (do wyciskania profilu zamkniętego) przy zastosowaniu technologii azotowania nr 1 uzyskuje się 10-krotnie grubszą warstwę utwardzoną w porównaniu do procesu azotowania technologią nr 2,
- w przypadku technologii nr 1 azotowanie matrycy typu A skutkuje grubszą warstwą w porównaniu do tego samego procesu wykonanego na matrycy typu B,
- dobór optymalnych parametrów azotowania pozwala zwiększyć trwałość matrycy, już po pierwszym azotowaniu,
- kształt wyciskanego profilu, a właściwie zależna od niego budowa warstwy azotowanej, ma wpływ na uzyskaną grubość i twardość warstwy utwardzonej (wcześniejsze badania opisano w pracy [10]),
- wszystkie matryce poddane były zmiennym obciążeniom mechanicznym oraz temperaturowym, w wyniku których matryce mogą ulegać uszkodzeniom, a nie

The statement hardness distributions of all dies of type B clearly show a difference in the thicknesses of the hardened layers depending on the number of nitriding processes. The thicknesses of die's individual layers, determined on the basis of profile hardness, agree with real observations of the microscopic structure. It is characteristic that similar die hardnesses are obtained after nitridings IV and VI, at a distance of about 0.28 mm from the surface for die B2, and after surpassing this value, hardness diminishes substantially.

4. CONCLUSIONS

On the basis of the conducted tests, it can be concluded that:

- *the thickness of the nitrided layer is strictly related to the parameters of the nitriding process, depending on the method of this technological operation; already after nitriding I (supplier no. 1) there is observed a layer of a thickness obtained only after six-time nitriding (nitriding supplier no. 3),*
- *in the case of one-time nitriding a die of type A (for extruding closed profiles) using nitriding technology no. 1, a hardened layer 10 times thicker than that resulting from nitriding technology no. 2 is obtained,*
- *in the case of technology no. 1, nitriding a die of type A results in a thicker layer in comparison to the same process performed on a die of type B,*
- *the selection of optimal nitriding parameters makes it possible to increase the durability of dies after just one nitriding,*
- *the shape of the extruded profile, or rather the structure of the nitrided layer dependent on it, affects the thickness and hardness of the obtained hardened layer (earlier research is described in work [10]),*
- *all dies were subjected to variable mechanical and thermal loads, as a result of which the dies may suffer damage, and, not evenly distributed tribological wear,*

- równomiernemu zużyciu tribologicznemu,
- ilość wyciśniętego materiału i trwałość matrycy nie jest zależna od dostępu atmosfery azotującej do powierzchni kalibrującej; dla profili płaskich (wąska szczelina kalibrująca) obserwuje się stosunkowo grubą warstwę utwardzoną o znacznej trwałości, którą wyznacza m.in. ilość wyciśniętego aluminium,
 - optymalną grubością warstwy azotowanej wydaje się być warstwa o grubości powyżej 350 μm i uzyskana podczas jednokrotnego azotowania.
- *the amount of extruded material and the durability of the die do not depend on the nitriding atmosphere's access to the bearing surface; (for flat profiles with narrow slot), one observes a relatively thick and quite durable hardened layer, which among other factors determines the amount of extruded aluminium;*
 - *the optimal thickness of the nitrided layer seems to be above 350 μm obtained during a single nitriding.*

PODZIĘKOWANIA

Praca była realizowana w ramach Umowy Nr PBS1/B5/0/2012 O WYKONANIE I FINANSOWANIE Projektu realizowanego w ramach PROGRAMU BADAŃ STOSOWANYCH w ścieżce B, pt. „Opracowanie procesów regeneracji matrycy do wyciskania profili aluminiowych za pomocą azotowania gazowego” finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju ze środków publicznych na naukę.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was realized under the auspices of Agreement No. PBS1/B5/0/2012 ON THE PERFORMANCE AND FINANSING of a Project carried out as part of the APPLIED RESEARCH PROGRAM in path B, titled „Development of regenerative processes for dies for extruding aluminium profiles with the help of gas nitriding”, financed by the National Centre for Research and Development with public funding for science.

LITERATURA / REFERENCES

- [1] Björk T., Berger M., Westergård R., Hogmark S., Bergström J.: *New physical vapour deposition coatings applied to extrusion dies. Surface and Coating Technology* No. 146–147 (2001), s. 33–41.
- [2] Björk T., Westergård R., Hogmark S., Bergström J., Hedenqvist P.: *Physical vapour deposition duplex coatings for aluminium extrusion dies. Wear* No. 225–229 (1999), s. 1123–1130.
- [3] Arif A.F.M., Sheikh A.K., Qamar S.Z.: *A study of die failure mechanism in aluminium extrusion. Journal of Material Processing Technology* No. 134 (2003), s. 318–328.
- [4] Björk T., Westergård R., Hogmark S.: *Wear of surface treated dies for aluminium extrusion – a case study. Wear* No. 249 (2001), s. 316–323.
- [5] Björk T., Westergård R., Hogmark S.: *Tribological simulation of aluminium hot extrusion. Wear* No. 224 (1999), s. 216–225.
- [6] Saha P.K.: *Thermodynamics and tribology in aluminum extrusion. Wear* No. 218 (1998), s. 179–190.
- [7] Bombáč D., Terčelj M., Peruš I., Fajfar P.: *The progress of degradation on the bearing surfaces of nitrided dies for aluminium hot extrusion with two different relative lengths of bearing surface. Wear* No. 307 (2013), s. 10–21.
- [8] Persson A., Hogmark S., Bergström J.: *Failure modes in field-tested brass die casting dies. Journal of Materials Processing Technology* No. 148 (2004), s.108–118.
- [9] Gasem Z.M.: *Cracking in a multiple gas-nitrided H13 aluminium extrusion mandrel. Engineering Failure Analysis* No. 31 (2013), s. 68–75.
- [10] Laurentowska-Tyczka A., Wendland J., Borowski J., Jurczak H.: *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. Obróbka Plastyczna Metali* vol. XXIV nr 4 (2013), s. 303–315.