



Ocena wielkości zużycia matrycy do kucia pierścieni synchronizatora na podstawie optycznego skanowania i badań metalograficznych

Wear analysis of die for forging of synchronizer rings based on optical scanning and metallographic examinations

(1) Beata Pachutko*, (2) Jarosław Lulkiewicz

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

Informacje o artykule

Data przyjęcia: 25.02.2016
Data recenzji: 12.04.2016
Data akceptacji: 30.06.2016

Wkład autorów

- (1) Autor artykułu, koncepcji, założeń, metodyki; wykonawca badań metalograficznych
- (2) Współautor artykułu, metodyki, wykonawca optycznego skanowania matrycy

Streszczenie

W publikacji przedstawiono wyniki optycznego skanowania matrycy do kucia pierścieni synchronizatora typu 682 oraz badań metalograficznych, które przeprowadzono po eksploatacji matrycy. Matrycę wytworzono i eksploatowano w Fabryce Armatur „Swarzędz” Sp. z o.o. Matrycę po ulepszeniu cieplnym azotowano gazowo metodą ZeroFlow w Politechnice Poznańskiej, w procesie dwustopniowym przy następujących parametrach: I stopień: 490°C, 1 h, $N_p=15 \text{ atm} \cdot 1$ II stopień: 550°C, 43,5 h, $N_p=0,3 \text{ atm}^{-1/2}$. Warstwa azotowana charakteryzowała się twardością przy powierzchni ok. 1000 HV 0,1, grubością wynoszącą 0,25 mm i jedynie drobnymi wydzieleniami azotków żelaza w strefie azotowania wewnętrznej. Technologia azotowana metodą ZeroFlow miała być konkurencyjna do technologii azotowania jarzeniowego prowadzonego w temperaturze ok. 550°C w czasie 10 h pod względem braku występowania siatkowego układu wydzieleni fazy γ' w strukturze strefy dyfuzyjnej α . We wcześniej prowadzonych badaniach zaobserwowano podatność warstwy azotowanej z siatkowym układem wydzieleni azotków żelaza do jej wykruszenia podczas eksploatacji. Optyczne skanowanie matrycy wykonano po procesie azotowania i po eksploatacji matrycy. Planowano wykonanie 3000 sztuk pierścieni synchronizatora na badanej matrycy. Jednak po 2500 cyklach kucia pierścieni stwierdzono wyginanie się kolejnych pierścieni. Dlatego przeprowadzono badania metalograficzne na próbkach wyciętych z matrycy w celu wyjaśnienia przyczyny jej przedwczesnego zużycia. Największe zużycie materiału matrycy wystąpiło w obszarach promienia powierzchni kształtującej powierzchnię pierścienia synchronizatora i krawędzi otworu o średnicy ok. 104 mm. W tych obszarach zaobserwowano największe pęknięcia i największą redukcję grubości warstwy azotowanej.

Słowa kluczowe: optyczne skanowanie, zużycie powierzchni, azotowanie gazowe, matryca kuźnicza

Article info

Received: 25.02.2016
Reviewed: 12.04.2016
Accepted: 30.06.2016

Authors' contribution

- (1) Author of article, concept, assumptions, methodology; metallographic examination
- (2) Co-author of article and methodology; optical scanning examination

Abstract

This publication presents the results of optical scanning of a 682-type die for forging of synchronizer rings and of metallographic examinations, which were performed after exploitation of the die. The die was manufactured and exploited at the Fabryka Armatur "Swarzędz" Sp. z o.o. After heat treatment, the die was subjected to ZeroFlow gas nitriding at the Poznań University of Technology, in a two-step process according to the following parameters: 1st step: 490°C, 1 h, $N_p=15 \text{ atm} \cdot 1$ 2nd step: 550°C, 43.5 h, $N_p=0.3 \text{ atm}^{-1/2}$. The nitrided layer was characterized by near-surface hardness of approx. 1000 HV 0.1, thickness amounting to 0.25 mm, and only fine precipitations of iron nitrides in the interior nitriding zone. ZeroFlow nitriding technology was to be competitive to ion nitriding conducted at a temperature of approx. 550°C over 10 h due

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

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

to the absence of a network of γ' -phase precipitations in the structure of the α diffusion zone. Susceptibility of nitrided layers with a network system of iron nitride precipitations to chipping during operation was observed in earlier studies. Optical scanning of the die was performed after the nitriding process and after exploitation of the die. It was planned to make 3000 synchronizer rings using the studied die. However, after 2500 ring forging cycles, bending of rings was observed. This is why metallographic examinations were performed on specimens cut out from the die in order to explain the causes of its premature wear-out. The greatest die wear occurred in areas of the radius of the surface forming the surface of the synchronizer ring and the edge of the hole with a diameter of approx. 104 mm. The largest cracks and greatest reduction of the nitrided layer were observed in these areas.

Keywords: optical scanning, surface wear, gas nitriding, forging die

1. WSTĘP

Synchronizator jest jednym z najważniejszych elementów skrzyni biegów. Odpowiada on za płynną zmianę przełożenia, ponieważ synchronizuje prędkość wału skrzyni biegów i koła zębatego danego biegu, zanim elementy te zostaną sprzęgnięte ze sobą. Głównymi elementami synchronizatora są: piasta, tuleja ślizgowa i pierścień synchronizatora. Pierścień synchronizatora posiada od strony zewnętrznej zęby, które współpracują z wewnętrznym uzębieniem tulei ślizgowej. Powierzchnia wewnętrzna pierścienia jest stożkowa [1]. Fabryka Armatur „Swarzędz” Sp. z o.o. (FAS) jest przedsiębiorstwem zajmującym się wytwarzaniem pierścieni synchronizatorów o średnicach od 90 do 200 mm metodą kucia matrycowego. Na matrycach do kucia pierścieni synchronizatorów prowadzono badania ukierunkowane na rozpoznanie problemu niskiej trwałości matryc poprzez określenie różnic w grubości warstwy azotowanej matryc oraz wartości naprężeń własnych w części kształtującej powierzchnię pierścienia synchronizatora w nowych matrycach (po 1 procesie azotowania jarzeniowego), po ich eksploatacji oraz matryc regenerowanych w procesie drugiego azotowania jarzeniowego i ponownie eksploatowanych. Badania te opisano szczegółowo w pracach [2–3]. W strukturze warstwy wierzchniej matryc azotowanych jarzeniowo zaobserwowano po ich eksploatacji siatkowy układ azotków żelaza γ' w strefie azotowania wewnętrznego, pęknięcia i wykruszenia materiału matryc oraz zmianę geometrii profilu matryc, szczególnie w obszarze kształtowania powierzchni pierścienia z zębami. Dlatego w ramach kontynu-

1. INTRODUCTION

The synchronizer is one of the most important components of the gearbox. It is responsible for fluid gear shifting, since it synchronizes the speed of the gearbox shaft and a given gear before these components are coupled. The synchronizer's main components are: hub, sliding sleeve and synchronizer ring. The synchronizer ring has teeth on its exterior that cooperate with the interior toothing of the sliding sleeve. The ring's interior surface is conical [1]. Fabryka Armatur „Swarzędz” Sp. z o.o. (FAS) is an enterprise concerned with the production of synchronizer rings with diameters from 90 to 200 mm using the die forging method. Examinations were conducted on dies for forging of synchronizer rings, and these tests were oriented towards identifying the problem of short die lifetime by determining differences in the thickness of dies' nitrided layers as well as in internal stress values in the part forming the surface of the synchronizer ring in new dies (after 1 ion nitriding process), after their exploitation, and in dies regenerated in the process of second nitriding, after they had been exploited. These examinations are described in detail in articles [2–3]. A network structure of γ' iron nitrides was observed in the interior nitriding zone in the structure of the surface layer of ion nitrided dies, cracks and chipping of dies' material, and changed geometry of dies' profiles were observed after their exploitation, particularly in the area where the toothed ring surface was formed. This is why the process of regulated gas nitriding of type-682 dies was performed as a continuation of investigations, and

acji badań wykonano proces regulowanego azotowania gazowego matryc typu 682, a wyniki badań otrzymane dla jednej z tych matryc nr 682/117 opisano w niniejszej publikacji oraz [4].

Celem badań było określenie wielkości zużycia matrycy do kucia pierścieni synchronizatora, metodą nieniszczącą, za pomocą skanera optycznego oraz na podstawie badań metalograficznych. Analiza wyników tych badań pozwoli na ocenę skuteczności zastosowanej technologii procesu azotowania pod kątem zwiększenia trwałości matryc do kucia pierścieni synchronizatorów.

2. BADANY MATERIAŁ

Badanym materiałem była matryca do kucia pierścieni synchronizatora typu 682 nr 117, którą wykonano ze stali Unimax w FAS oraz ulepszono cieplnie na twardość 58^{+2} HRC w INOP. Regulowane azotowanie gazowe tej matrycy metodą ZeroFlow przeprowadzono w piecu z poziomą retortą VTR-5022/24 (Seco/ Warwick) na Politechnice Poznańskiej na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu wg wytycznych dr. hab. inż. Leszka Małdzińskiego, prof. nadzw. PP. Procesy azotowania metodą ZeroFlow należą do procesów ekologicznych i związanych z dużą oszczędnością gazów (amoniaku i azotu) oraz pozwalają na sterowanie budową i grubością warstwy azotowanej [5 i 6]. Parametry azotowania gazowego metodą ZeroFlow matrycy i próbek kontrolnych podano w tab. 1.

tests results for one of these dies, no. 682/117, have been described in this publication and [4].

The goal of studies was to determine the degree of wear of dies for forging of synchronizer rings, using a non-destructive method, by means of an optical scanner and on the basis of metallographic examinations. Analysis of the results of these studies will allow for evaluation of the effectiveness of applied nitriding technology from the perspective of improvement of the lifetime of dies for forging of synchronizer rings.

2. STUDIED MATERIAL

Type 682 die no. 117 for forging of synchronizer rings, made from Unimax steel at FAS and heat treated to 58^{+2} HRC hardness at the Metal Forming Institute, was the material that was studied. Regulated gas nitriding of this die by means of the Zero Flow method was performed in a furnace with a horizontal VTR-5022/24 retort (Seco/Warwick) at the Poznań University of Technology (PTU) at the Faculty of Machines and Transportation according to the guidelines of Prof. Leszek Małdziński. Zero Flow nitriding processes are environment-friendly, provide high savings of gases (ammonia and nitrogen), and make it possible to control the structure and thickness of the nitrided layer [5 and 6]. Parameters of Zero Flow gas nitriding of the die and control specimens are given in Tab. 1.

Tab. 1. Parametry azotowania gazowego metodą ZeroFlow badanej matrycy

Tab. 1. Zero Flow gas nitriding parameters of the tested die

Matryca/ próbki Die/ specimens	Parametry azotowania (temperatura, czas, potencjał azotowy) Nitriding parameters (temperature, time, nitrogen potential)
matryca nr 682/117, próbki kontrolne do badania struktury i rozkładów twardości <i>die no. 682/117, control specimens for investigation of structure and hardness distributions</i>	I stopień: 490°C, 1 h, $N_p=15 \text{ atm}^{-1/2}$ II stopień: 550°C, 43,5 h, $N_p=0,3 \text{ atm}^{-1/2}$ <i>1st step: 490°C, 1 h, $N_p=15 \text{ atm}^{-1/2}$</i> <i>2nd step: 550°C, 43.5 h, $N_p=0.3 \text{ atm}^{-1/2}$</i>

Parametry procesów azotowania gazowego metodą ZeroFlow miały zapewnić uzyskanie warstwy azotowanej o minimalnej grubości 0,2 mm. Twardość przy powierzchni warstwy azoto-

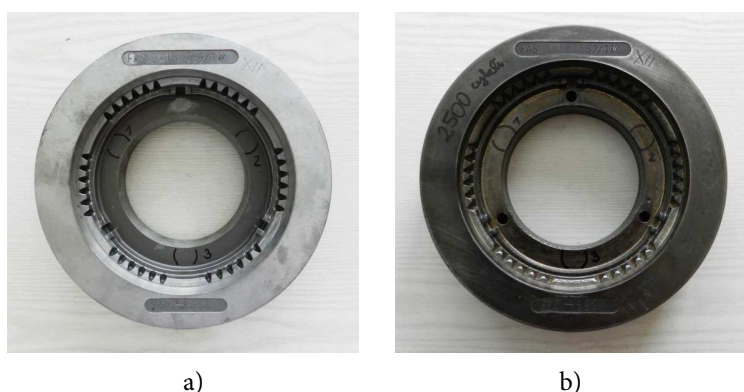
The parameters of Zero Flow gas nitriding processes were to ensure the obtainment of a nitrided layer with a minimum thickness of 0.2 mm. The near-surface hardness of the nitrided layer

wanej miała wynosić ok. 1000 HV 0,1. Warstwa ta miała charakteryzować się łagodnym profilem twardości. Nieakceptowalne były wydzielenia azotków żelaza γ' w układzie siatki w strefie dyfuzyjnej α .

Matrycę poddano eksploatacji w warunkach przemysłowych w FAS. Początkowo planowano dla badanej matrycy 3000 cykli kucia, ale po wykonaniu 2500 odkuwek przzerwano dalszą eksploatację z powodu wyginania kolejnych pierścieni. Dlatego przeprowadzono badania metalograficzne na próbkach wyciętych z tej matrycy w celu wyjaśnienia przyczyny przedwczesnego jej zużycia. Widok nowej matrycy i po eksploatacji pokazano na rys. 1.

was to be approx. 1000 HV 0.1. This layer was to be characterized by a gentle gradient of the hardness profile. Precipitations of γ' iron nitrides were unacceptable in the network configuration of diffusion zone α .

The die was exploited at FAS under industrial conditions. Initially, 3000 forging cycles were planned for the tested die, but after 2500 forgings were performed, further exploitation was abandoned due to bending of successive rings. This is why metallographic examinations were performed on specimens cut out from this die in order to explain the causes of its premature wear-out. A view of the die, new and after exploitation, is shown in Fig. 1.



Rys. 1. Nowa matryca nr 682/117 azotowana metodą ZeroFlow (a) i matryca po eksploatacji 2500 cykli kucia (b)
Fig. 1. New die no. 682/117, nitrided using the Zero Flow method (a) and die after exploitation in 2500 forging cycles (b)

3. METODYKA BADAŃ

W badaniach matrycy i próbek kontrolnych wykorzystano następujące metody badawcze:

- skanowanie powierzchni roboczej matrycy przed eksploatacją i po eksploatacji za pomocą optycznego skanera ATOS Compact 5M (GOM) oraz oprogramowania GOM Inspect V8 Professional,
- skaningową mikroskopię elektronową (SEM) do obserwacji powierzchni roboczej matrycy, za pomocą mikroskopu Inspect S (FEI),
- mikroskopię świetlną do pomiaru głębokości pęknięć i badań zmian struktury na przekroju wzdłużnym matrycy po eksploatacji oraz struktury próbek kontrolnych azotowanych metodą ZeroFlow w tych samych warunkach co matryca, za pomocą mikroskopu Eclipse

3. RESEARCH METHODOLOGY

The following research methods were used in studies of the die and control specimens:

- *scanning of the die's working surface before and after exploitation by means of an ATOS Compact 5M optical scanner (GOM) and GOM Inspect V8 Professional software,*
- *scanning electron microscopy (SEM) for observation of the die's working surface by means of an Inspect S microscope (FEI),*
- *optical microscopy for measurement of crack depth and examination of structural changes on the longitudinal section of the die, after exploitation, and of the structure of control specimens nitrided according to the ZeroFlow method under the same conditions as the die, by means of an Eclipse L150 microscope (Ni-*

L150 (Nikon); próbki metalograficzne trawiono trzyprocentowym wodnym roztworem kwasu azotowego; powierzchnię próbki kontrolnej zabezpieczono folią aluminiową przed inkludowaniem),

- badania rozkładów twardości Vickersa przy sile obciążającej 0,981 N (pomiar twardości HV 0,1 wykonano zgodnie z normą PN-EN ISO 6507-1:2007 – Metale -- Pomiar twardości sposobem Vickersa -- Część 1: Metoda badań).

kon); metallographic specimens were etched with a 3% aqueous solution of nitric acid; the surface of the control specimen was protected by aluminum film before it was mounted,

- measurements of Vickers hardness distributions under 0.981 N load. Measurements of HV 0.1 hardness were conducted according to standard PN-EN ISO 6507-1:2007 – Metallic materials -- Vickers Hardness Test -- Part 1: Test method.

4. WYNIKI BADAŃ I ICH OMÓWIENIE

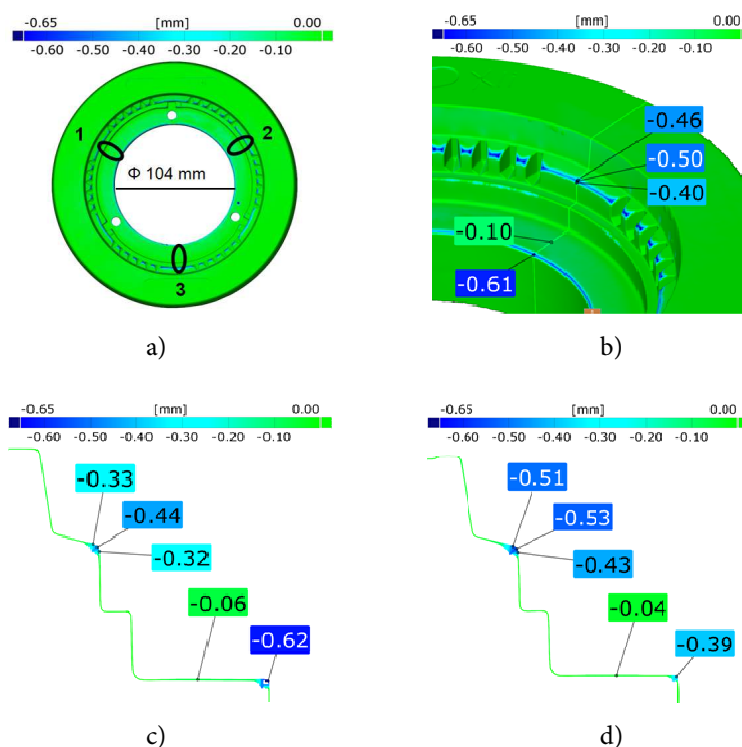
4.1. Skanowanie matrycy

Wyniki optycznego skanowania matrycy nr 682/117 w postaci barwnej mapy i profili przekrojów wykonanych w obszarach kształtowania powierzchni pierścienia oraz płaskiej powierzchni pokazano na rys. 2.

4. RESULTS OF STUDIES AND DISCUSSION

4.1. Scanning of the die

The results of optical scanning of die no. 682/117, in the form of a color map, and cross-section profiles made in ring surface-forming areas and on the flat surface are shown in Fig. 2.



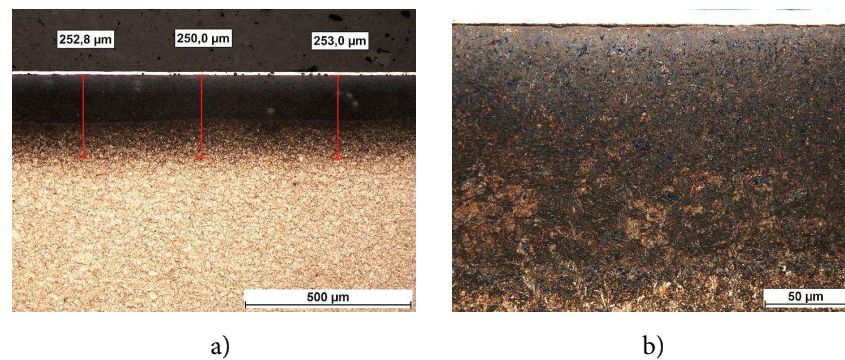
Rys. 2. Wyniki optycznego skanowania matrycy nr 682/117 po eksploatacji, 2500 cykli: a – mapa topografii powierzchni z zaznaczonymi obszarami badań, b – fragment mapy topografii powierzchni z zaznaczonym profilem obejmującym obszar 2, c – profil obejmujący obszar 1, d – profil obejmujący obszar 3

Fig. 2. Results of optical scanning of die no. 682/117 after exploitation, 2500 cycles: a – map of surface topography with marked testing areas, b – part of the surface topography map with marked profile covering area 2, c – profile covering area 1, d – profile covering area 3

Największe ubytki materiału odnotowano w obszarach kształtowania powierzchni pierścienia oraz na krawędzi otworu o średnicy 104 mm matrycy nr 682/117 po 2500 cykli kucia, które wyniosły odpowiednio 0,5 mm i 0,62 mm (rys. 2b–d). Największe zużycie materiału na płaskiej powierzchni matrycy wskutek wytarcia wyniosło 0,1 mm (rys. 2b).

4.2. Badania struktury próbki kontrolnej azotowanej metodą ZeroFlow

Wyniki tych badań na przekroju próbki azotowanej dwustopniowo – I stopień: 490°C, 1 h, $N_p=15 \text{ atm}^{-1/2}$, II stopień: 550°C, $N_p=0,3 \text{ atm}^{-1/2}$ w czasie 43,5 h pokazano na rys. 3.



Rys. 3. Struktura na przekroju próbki kontrolnej azotowanej metodą ZeroFlow przy parametrach: I stopień 490°C, 1 h, $N_p=15 \text{ atm}^{-1/2}$, II stopień 550°C, 43,5 h, $N_p=0,3 \text{ atm}^{-1/2}$: a – środek próbki z zaznaczoną grubością warstwy azotowanej, b – powiększony fragment obszaru z rys. 3a

Fig. 3. Structure on the cross-section of the control specimen nitrided using the ZeroFlow method with the following parameters: 1st step 490°C, 1 h, $N_p=15 \text{ atm}^{-1/2}$, 2nd step 550°C, 43.5 h, $N_p=0.3 \text{ atm}^{-1/2}$: a – center of specimen with marked thickness of nitrided layer, b – enlarged part of the area from Fig. 3a

Po azotowaniu próbki kontrolnej metodą ZeroFlow otrzymano warstwę azotowaną o grubości ok. 0,25 mm (rys. 3a). W strefie azotowania wewnętrznego tej próbki występowały jedynie pojedyncze, bardzo drobne wydzielenia azotków żelaza (rys. 3b).

4.3. Obserwacje mikroskopowe próbek pobranych z matrycy – SEM

Z matrycy nr 682/117 pobrano próbki metalograficzne nr 682/117-1 i 682/117-2. Miejsce rozkroju matrycy i pobrania próbek metalograficznych pokazano na rys. 4.

The greatest losses of material were observed in areas forming the ring surface and on the edge of the 104 mm-diameter hole of die no. 682/117, after 2500 forging cycles, amounting to 0.5 mm and 0.62 mm respectively (Fig. 2b–d). The greatest wear of material on the die's flat surface, resulting from abrasion, amounted to 0.1 mm (Fig. 2b).

4.2. Examination of the structure of control specimen nitrided according to the ZeroFlow method

The results of these examinations on the cross-section of the specimen nitrided in two steps – 1st step: 490°C, 1 h, $N_p=15 \text{ atm}^{-1/2}$, 2nd step: 550°C, $N_p=0.3 \text{ atm}^{-1/2}$ over a time of 43.5 h, are shown in Fig. 3.

After ZeroFlow nitriding of the control specimen, a nitrided layer with a thickness of approx. 0.25 mm was obtained (Fig. 3a). Only individual, very fine iron nitride precipitations (Fig. 3b) were present in the interior nitriding zone of this specimen.

4.3. Microscope observations of specimens collected from die – SEM

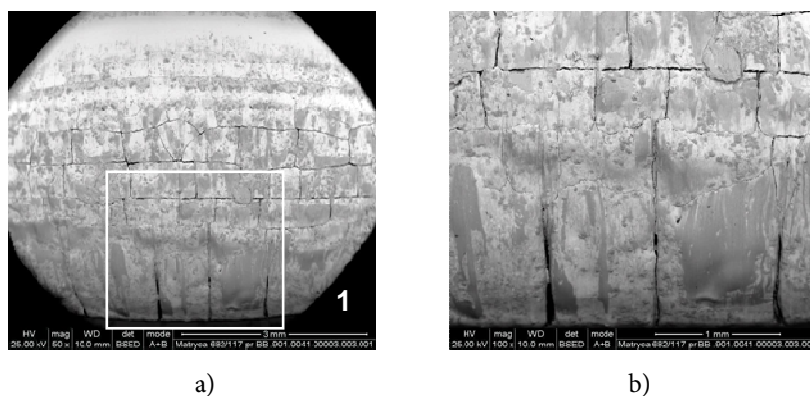
Metallographic specimens no. 682/117-1 and 682/117-2 were collected from die no. 682/117. The place where the die was cut and metallographic specimens were collected from is shown in Fig. 4.



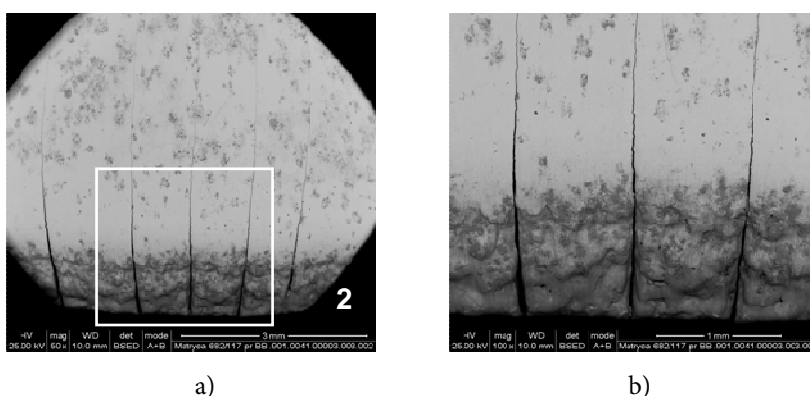
Rys. 4. Rozkrój matrycy nr 682/117 (a) i miejsca pobrania próbek nr 682/117-1 i 682/117-2 (b)
 Fig. 4. Cutting of die no. 682/117 (a) and areas of collecting specimens no. 682/117-1 and 682/117-2 (b)

Wyniki badań powierzchni roboczych próbek nr 682/117-1 i 682/117-2 pokazano na rys. 5 i 6. W badaniach stosowano: detektor elektronów wstecznie rozproszonych (w celu wyraźnego uwidocznienia pęknięć), napięcie 25 kV i odległość roboczą WD wynoszącą 10 mm.

The results of tests of the working surfaces of specimens no. 682-117-1 and 682/117-2 are shown in Fig. 5 and 6. The following were applied during examinations: backscatter electron detector (for clear visualization of cracks), 25 kV accelerating voltage and working distance WD amounting to 10 mm.



Rys. 5. Powierzchnia próbki nr 682/117-1, SEM: a – obszar przy krawędzi, b – powiększony fragment obszaru 1
 Fig. 5. Surface of specimen no. 682/117-1, SEM: a – area near edge, b – enlarged fragment of area 1



Rys. 6. Powierzchnia próbki nr 682/117-2, SEM: a – obszar przy krawędzi, b – powiększony fragment obszaru 2
 Fig. 6. Surface of specimen no. 682/117-2, SEM: a – area near edge, b – enlarged fragment of area 2

Na powierzchni próbki nr 682/117-1 zaobserwowano pęknięcia wzdłużne przy krawędzi próbki oraz siatkę pęknięć na zakrzywionej powierzchni (rys. 5). Pęknięcia w kierunku wzdłużnym oraz plastycznie odkształconą powierzchnię zauważono na krawędzi otworu o średnicy 106 mm próbki nr 682/117-2 (rys. 6).

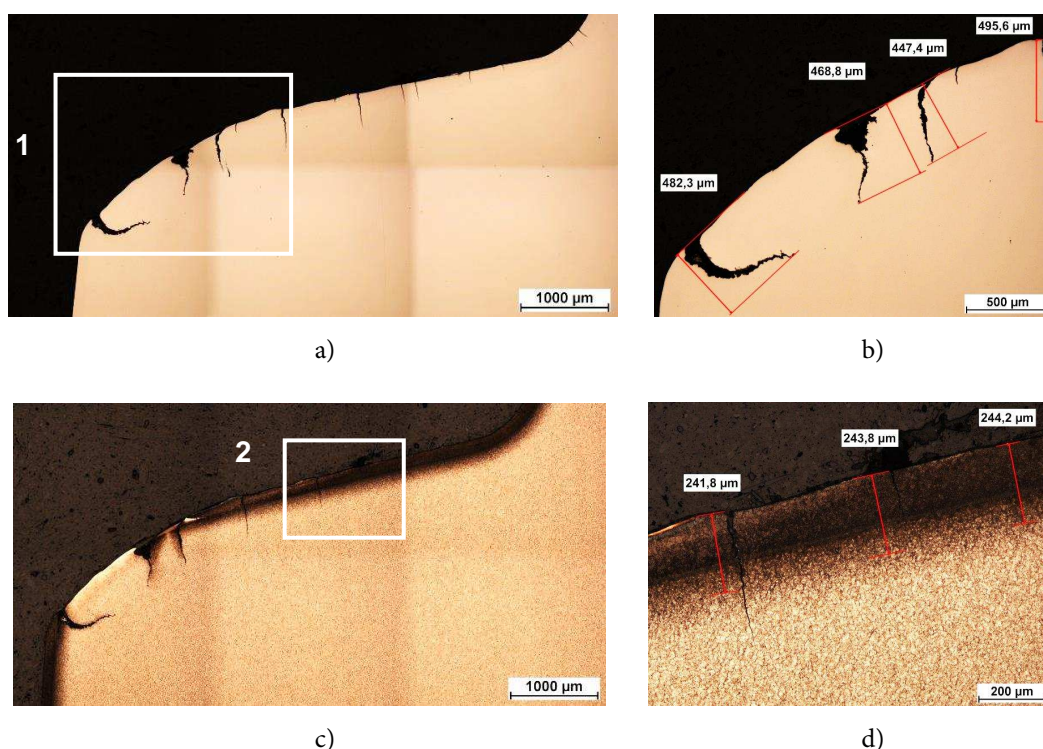
4.4. Obserwacje mikroskopowe próbek pobranych z matrycy – mikroskop świetlny

Wyniki obserwacji pęknięć i struktury próbek poddanych badaniom za pomocą SEM pokazano na rys. 7 i 8.

Longitudinal cracks were observed on the surface of specimen no. 682/117-1, near the edge of the specimen, as well as a network of cracks on the curved surface (Fig. 5). Cracks in the longitudinal direction and the surface with plastic deformation were observed on the edge of the 106mm-diameter hole of specimen no. 682/117-2 (Fig. 6).

4.4. Microscope observations of specimens collected from die – optical microscope

The results of examinations of cracks and the structure of specimens, which were investigated under SEM, are shown in Fig. 7 and 8.

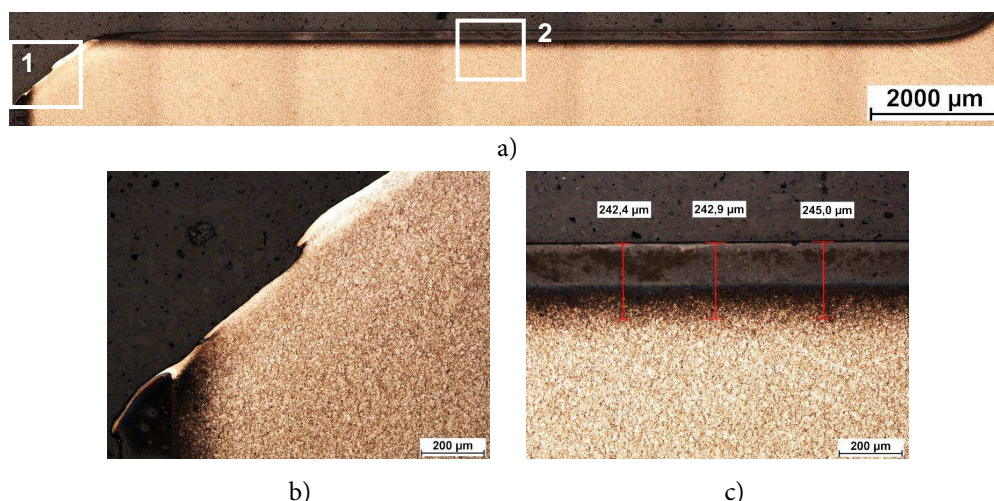


Rys. 7. Próbkę nr 682/117-1: a–b – pęknięcia na przekroju wzdłużnym matrycy (obszar 1) – próbka nietrawiona, c–d – struktura warstwy wierzchniej z zaznaczoną grubością warstwy azotowanej (obszar 2) – próbka trawiona

Fig. 7. Specimen no. 682/117-1: a–b – cracks on the die's longitudinal section (area 1) – unetched specimen, c–d – structure of surface layer with marked thickness of nitrided layer (area 2) – etched specimen

Największe pęknięcia na przekroju próbki nr 682/117-1 miały głębokość od ok. 0,45 mm do ok. 0,5 mm (rys. 7b). Warstwa azotowana uległa całkowitemu zniszczeniu na promieniu powierzchni kształtującej powierzchnię pierścienia (rys. 7c). W obszarze tym nastąpiło plastyczne odkształcenie materiału matrycy. Grubość warstwy azotowanej w okolicy środka przekroju tej próbki wyniosła ok. 0,24 mm (rys. 7d).

The largest cracks on the cross-section of specimen no. 682/117-1 had a depth from approx. 0.45 mm to approx. 0.5 mm (Fig. 7b). The nitrided layer was completely destroyed on the radius of the surface forming the ring surface (Fig. 7c). Plastic deformation of the die's material took place in this area. The thickness of the nitrided layer near the middle of this specimen's cross-section amounted to approx. 0.24 mm (Fig. 7d).



Rys. 8. Próbkę nr 682/117-2: a – struktura na przekroju wzdłużnym, b – struktura przy krawędzi otworu (obszar 1), c – struktura warstwy wierzchniej z zaznaczoną grubością warstwy azotowanej (obszar 2); próbkę trawioną

Fig. 8. Specimen no. 682/117-2: a – structure on longitudinal section, b – structure near edge of hole (area 1), c – structure of surface layer with marked thickness of nitrided layer (area 2); etched specimen

Całkowite zużycie warstwy azotowanej i wąską nietrawiącą się strefę typu „white layer” zaobserwowano w okolicy krawędzi otworu o średnicy 104 mm próbki nr 682/117-2 (obszar 1 na rys. 8a i b). Grubość warstwy azotowanej w okolicy środka tej próbki wyniosła ok. 0,24 mm (rys. 8c).

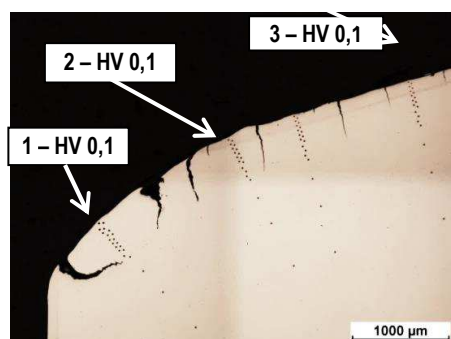
Total wear of the nitrided layer and narrow, non-etching “white layer” zone were observed near the edge of the hole with diameter of 104 mm of specimen no. 682/117-2 (area 1 in Fig. 8a and b). The thickness of the nitrided layer near the middle of this specimen amounted to approx. 0.24 mm (Fig. 8c).

4.5. Badania rozkładów twardości próbek pobranych z matrycy

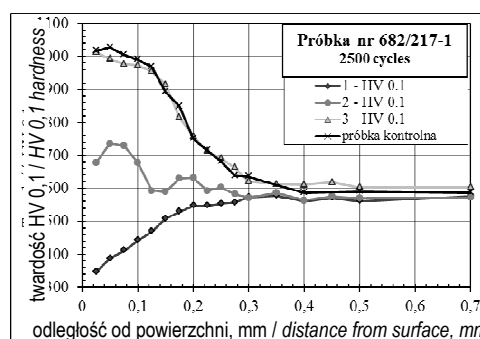
Wyniki badania rozkładów twardości metodą Vickersa na przekrojach próbek pobranych z matrycy nr 682/117, które poddano obserwacjom mikroskopowym pokazano na rys. 9 i 10.

4.5. Hardness distribution tests of specimens collected from die

The results of hardness distribution examinations, conducted according to the Vickers method, on cross-sections of specimens collected from die no. 682/117, which were subjected to microscope examinations, are shown in Fig. 9 and 10.



a)



b)

Rys. 9. Rozkłady twardości HV 0,1 na przekrojach wzdłużnych próbek kontrolnej i nr 682/117-1: a – miejsca wykonania pomiarów twardości HV 0,1, b – profile twardości HV 0,1

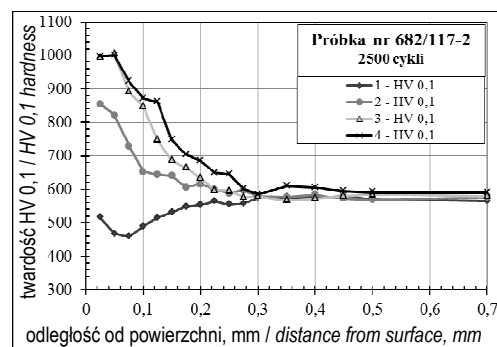
Fig. 9. HV 0.1 hardness distributions on longitudinal sections of the control specimen and no. 682/117-1: a – place where HV 0.1 hardness measurements are performed, b – HV 0.1 hardness profiles

Największe obniżenie twardości materiału matrycy nr 682/117 do ok. 350 HV 0,1 stwierdzono w obszarze rozkładu 1 HV 0,1, w którym warstwa azotowana uległa całkowitemu zużyciu (rys. 9b). Głębokość odpuszczenia materiału matrycy w tym obszarze wyniosła ok. 0,3 mm. W obszarze rozkładu 2 HV 0,1 wystąpił spadek twardości przy powierzchni wynoszący 680 HV 0,1, który był związany z odpuszczeniem materiału matrycy i zmniejszeniem grubości warstwy azotowanej. W miejscu wykonania rozkładu 3 HV 0,1, twardość i umowna grubość warstwy azotowanej wyniosły odpowiednio: ok. 1020 HV 0,1 i 0,25 mm i były zbliżone do wartości otrzymanych dla próbki kontrolnej.

The greatest reduction in hardness of the material of die no. 682/117, down to approx. 350 HV 0.1, was observed in HV 0.1 hardness distribution area 1, in which the nitrided layer was completely worn out (Fig. 9b). The tempering depth of the die's material in this area was approx. 0.3 mm. In HV 0.1 hardness distribution zone 2, a decrease in hardness on the surface, equal to 680 HV 0.1, took place due to tempering of the die's material and reduction of the nitrided layer's thickness. In the case of HV 0.1 hardness distribution 3, the hardness and conventional thickness of the nitrided layer amounted to, respectively: approx. 1020 HV 0.1 and 0.25 mm and were similar to values obtained for the control specimen.



a)



b)

Rys. 10. Rozkłady twardości HV 0,1 na przekroju wzdłużnym próbki nr 682/117-2: a – miejsca wykonania pomiarów twardości HV 0,1, b – profile twardości HV 0,1

Fig. 10. HV 0.1 hardness distributions on the longitudinal section of specimen no. 682/117-2: a – place where HV 0.1 hardness measurements are performed, b – HV 0.1 hardness profiles

Największy spadek twardości materiału matrycy do ok. 460 HV 0,1 nastąpił w obszarze wykonania rozkładu 1 HV 0,1, gdzie warstwa azotowana uległa całkowitemu wytarciu (rys. 10b). Głębokość odpuszczonego materiału w tym obszarze wyniosła ok. 0,3 mm (rys. 10b). W obszarach wykonania rozkładów twardości 2 i 3 HV 0,1 zaobserwowano zmniejszenie grubości warstwy azotowanej. Grubość warstwy azotowanej wyniosła ok. 0,19 mm w okolicy środka

The greatest reduction in the die material's hardness, down to approx. 460 HV 0.1, was observed in HV 0.1 hardness distribution area 1, in which the nitrided layer was completely worn out (Fig. 10b). The depth of tempered material in this area amounted to approx. 0.3 mm (Fig. 10b). A reduction in the thickness of the nitrided layer was observed in HV 0.1 hardness distribution areas 2 and 3. The thickness of the nitrided layer amounted to approx. 0.19 mm in the

płaskiej powierzchni roboczej, w miejscu wykonania rozkładu 4 HV 0,1.

area of the center of the flat working surface, in HV 0.1 distribution area 4.

5. WNIOSKI

Na podstawie otrzymanych wyników badań można sformułować następujące wnioski:

1. W wyniku gazowego azotowania matrycy 682/117 metodą ZeroFlow otrzymano warstwę azotowaną o twardości powierzchniowej ok. 1000 HV 0,1 i umownej grubości ok. 0,25 mm, bez siatki wydzieleni fazy γ' w strefie azotowania wewnętrznego, która była całkowicie odporna na wykruszanie materiału matrycy, ale mniej odporna na zużycie ściernie i pęknięcie wskutek zmęczenia cieplnego.
2. Badania topografii powierzchni matrycy przed i po eksploatacji, za pomocą skanera optycznego, wykazały największe zużycie materiału matrycy w obszarach zarówno promienia powierzchni kształtującej powierzchnię pierścienia synchronizatora, jak i krawędzi otworu o średnicy ok. 104 mm. Średnie zmniejszenie wymiaru matrycy w okolicy środka płaskiej powierzchni roboczej po 2500 cyklach kucia było znacznie mniejsze niż w obszarze promienia powierzchni kształtującej powierzchnię pierścienia i stanowiło ok. 14% średniej wartości zmierzonej w tym obszarze.
3. Przyczyną przedwczesnego wycofania matrycy nr 682/117 z eksploatacji mogła być zbyt niska twardość podłoża warstwy azotowanej o wartości ok. 600 HV 0,1, która uległa obniżeniu o ok. 100 HV 0,1 wskutek długotrwałego procesu azotowania metodą ZeroFlow. Po 2500 cyklach kucia nastąpiło całkowite zużycie warstwy azotowanej i spadek twardości materiału matrycy do ok. 350 HV 0,1 w obszarze kształtowania powierzchni pierścienia, co mogło spowodować wyginanie się odkuwki.
4. W celu zwiększenia trwałości matrycy do kucia pierścienia synchronizatora należy zmodyfikować parametry II stopnia procesu regulowanego azotowania gazowego tak, aby twardość podłoża warstwy azotowanej nie uległa znacznemu obniżeniu w porównaniu ze stanem po ulepszeniu cieplnym. Potencjał azo-

5. CONCLUSIONS

Based on obtained test results, the following conclusions can be formulated:

1. *As a result of Zero Flow gas nitriding of die 682/117, a nitrided layer with a surface hardness of approx. 1000 HV 0.1 and conventional thickness of approx. 0.25 mm was obtained, without a network of γ' -phase precipitations in the interior nitriding zone, which was completely resistant to chipping of die material but less resistant to abrasive wear and cracking as a result of thermal fatigue.*
2. *Die surface topography tests before and after exploitation, performed with an optical scanner, showed the greatest die material wear in the areas of both the radius of the surface forming the synchronizer ring's surface as well as the edge of the hole with diameter of approx. 104 mm. The average reduction of the die's dimension near the center of the flat working surface after 2500 forging cycles was significantly less than in the area of the radius of the surface forming the surface of the ring and made up approx. 14% of the mean value measured in this area.*
3. *The cause of premature withdrawal of die no. 682/117 from use could have been insufficient hardness of the substrate of the nitrided layer, with a value of approx. 600 HV 0.1, which was reduced by approx. 100 HV 0.1 as a result of the long-lasting Zero Flow nitriding process. After 2500 forging cycles, complete wear of the nitrided layer and hardness reduction of the die's material to approx. 350 HV 0.1 occurred in the ring surface forming area, which may have caused bending of the forging.*
4. *In order to increase the lifetime of dies for forging of synchronizer rings, the parameters of the 2nd step of the regulated gas nitriding process must be modified so that the hardness of the nitrided layer's substrate is not reduced significantly compared to the state after heat treatment. The nitrogen potential should be*

towy powinien być większy od $0,3 \text{ atm}^{-1/2}$, aby nastąpiło zwiększenie twardości i tym samym odporności na ścieranie strefy dyfuzyjnej α , nie powodując przy tym nadmiernego zwiększenia podatności tej strefy na kruche pękanie.

PODZIĘKOWANIA

Artykuł zrealizowano na podstawie wyników badań uzyskanych w pracy BB .901.0041 – Badania technologii wytwarzania wyrobów metodami obróbki plastycznej oraz właściwości wyrobów i narzędzi do ich produkcji zadanie 03 – Nieniszczące badania naprężeń własnych i grubości warstwy azotowanej w matrycach do kucia pierścieni synchronizatora, modyfikowanych w wyniku regulowanego azotowania gazowego, w 2015 roku.

LITERATURA

- [1] Sekrecki M., P. Krawczyk P., A. Kopczyński. 2014. „Modelowanie synchronizatora do analizy warunków pracy i sterowania skrzynią biegów w układzie napędowym samochodu elektrycznego”. *Logistyka* 6: 9433–9440.
- [2] Pachutko B., J. Samolczyk, G. Meller. 2016. „Nieniszczące badania naprężeń własnych i grubości warstwy azotowanej w matrycy do kucia pierścieni synchronizatorów przed oraz po eksploatacji”. *Obróbka Plastyczna Metali XXIV* (1): 15–29.
- [3] Pachutko B., J. Samolczyk i in. 2004. Praca statutowa BB .901.30 – Badania technologii wytwarzania wyrobów metodami obróbki plastycznej oraz właściwości wyrobów i narzędzi do ich produkcji zadanie 03: Nieniszczące badania naprężeń własnych i grubości warstwy azotowanej w warstwie wierzchniej matryc do kucia synchronizatorów. Poznań: INOP. Praca niepublikowana.
- [4] Pachutko B., J. Samolczyk. 2016. “Non-destructive testing of internal stresses and examinations of surface structure and hardness of dies for forging synchronizer rings”. W mat. konf. *Advanced Metal Forming Processes in Automotive Industry. AutoMetForm. The 5th International Lower Silesia – Saxony Conference Wrocław, 28–29 2016*, 341-348. Wrocław: Politechnika Wrocławska.
- [5] Małdziński L. 2007. „Controlled nitriding using a ZeroFlow process”. *Heat Treating Progress* 7 (August): 53–55.
- [6] Małdziński L., M. Bazel, M. Korecki, A. Miliszewski, T. Przygoński. 2009. „Industrial experiences with controlled nitriding using a ZeroFlow method”. *Heat Treating Progress* 9 (4): 19–22.

greater than $0.3 \text{ atm}^{-1/2}$, so that hardness increases along with the resistance to abrasion of diffusion zone α , while not causing an excessive increase of this zone's susceptibility to cracking.

ACKNOWLEDGEMENTS

This article was written on the basis of test results obtained in work BB .901.0041 – Research on production technologies utilizing plastic working methods and on the properties of products and tools for their production task 03 – Non-destructive tests of internal stresses and nitrided layer thickness in dies for forging of synchronizer rings, modified as a result of regular gas nitriding, in 2015.

REFERENCES

- [1] Sekrecki M., P. Krawczyk P., A. Kopczyński. 2014. „Modelowanie synchronizatora do analizy warunków pracy i sterowania skrzynią biegów w układzie napędowym samochodu elektrycznego”. *Logistyka* 6: 9433–9440.
- [2] Pachutko B., J. Samolczyk, G. Meller. 2016. „Nieniszczące badania naprężeń własnych i grubości warstwy azotowanej w matrycy do kucia pierścieni synchronizatorów przed oraz po eksploatacji”. *Obróbka Plastyczna Metali XXIV* (1): 15–29.
- [3] Pachutko B., J. Samolczyk i in. 2004. Praca statutowa BB .901.30 – Badania technologii wytwarzania wyrobów metodami obróbki plastycznej oraz właściwości wyrobów i narzędzi do ich produkcji zadanie 03: Nieniszczące badania naprężeń własnych i grubości warstwy azotowanej w warstwie wierzchniej matryc do kucia synchronizatorów. Poznań: INOP. Unpublished work.
- [4] Pachutko B., J. Samolczyk. 2016. “Non-destructive testing of internal stresses and examinations of surface structure and hardness of dies for forging synchronizer rings”. In conf. proc. of *Advanced Metal Forming Processes in Automotive Industry. AutoMetForm. The 5th International Lower Silesia – Saxony Conference Wrocław, 28–29 2016*, 341-348. Wrocław: Politechnika Wrocławska.
- [5] Małdziński L. 2007. „Controlled nitriding using a ZeroFlow process”. *Heat Treating Progress* 7 (August): 53–55.
- [6] Małdziński L., M. Bazel, M. Korecki, A. Miliszewski, T. Przygoński. 2009. „Industrial experiences with controlled nitriding using a ZeroFlow method”. *Heat Treating Progress* 9 (4): 19–22.