

Dr inż. Beata PACHUTKO, dr inż. Jarosław SAMOLCZYK
Instytut Obróbki Plastycznej, Poznań
e-mail: pachutko@inop.poznan.pl

Mgr inż. Grzegorz MELLER
Fabryka Armatur „Swarzędz” Sp. z o.o., Swarzędz

Nieniszczące badania naprężeń własnych i grubości warstwy azotowanej w matrycy do kucia pierścieni synchronizatorów przed oraz po eksploatacji

Non-destructive testing of internal stresses and nitrided layer thickness in a die for forging synchronizer rings prior to exploitation and after the exploitation of the die

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki nieniszczących badań naprężeń własnych metodą rentgenowską $\sin^2\Psi$ oraz grubości warstwy azotowanej metodą prądów wirowych w matrycy nr 682/99 do kucia pierścieni synchronizatorów, nowej i po eksploatacji. Nowa matryca charakteryzowała się naprężeniami ściskającymi o wartości na poziomie ok. 500 MPa. W wyniku procesu kucia 3500 odkuwek pierścieni nastąpiła zmiana naprężeń na rozciągające o wartości na poziomie ok. 140 MPa. Zmiana znaku i wartości naprężeń spowodowana była zużyciem powierzchni roboczej wskutek niemal całkowitego starcia warstwy azotowanej oraz zmęczenia cieplno-mechanicznego materiału matrycy w badanych obszarach. Zużycie matrycy oceniono na podstawie badań metalograficznych matrycy po eksploatacji. Badania grubości warstwy azotowanej na matrycy nowej i po eksploatacji, przeprowadzone metodą prądów wirowych, potwierdziły skuteczność i selektywność układu pomiarowego przy zastosowanej częstotliwości prądu magnesującego.

Abstract

The paper presents the results of non-destructive testing of internal stresses by the x-ray $\sin^2\Psi$ method and the thickness of the nitrided layer by eddy current method in synchronizer ring forging die no.682/99, new and after exploitation. The new die was characterized by compressive stresses at the level of about 500 MPa. As a result of forging 3500 ring forgings, the stress has changed into tensile one with the value of about 140 MPa. The change of the stress sign and value was due to the wear of the working surface resulting from almost total tear-off of the nitrided layer and thermo-mechanical fatigue of the die material in the tested areas. The die wear has been assessed on the basis of metallographic examinations of the die after exploitation. Examination of the nitrided layer thickness before and after exploitation, performed by eddy current method has proved the effectiveness and selectiveness of the measurement system with the applied frequency of the magnetizing current.

Słowa kluczowe: matryca kuźnicza, warstwa azotowana, naprężenia własne, metoda prądów wirowych, metoda $\sin^2\Psi$

Keywords: forging die, nitrided layer, internal stresses, eddy current method, $\sin^2\Psi$ method

1. WSTĘP

Fabryka Armatur „Swarzędz” Sp. z o.o. jest liderem w produkcji pierścieni synchronizatorów, które służą do synchronizacji biegów w skrzyniach przekładniowych stosowanych

1. INTRODUCTION

“SWARZĘDZ” Factory of Fittings, Ltd is a leader in the production of the rings of synchronizers used for synchronising gears in the gear boxes of trucks, buses and other motor

w samochodach ciężarowych, autobusach i innych pojazdach mechanicznych. Pierścienie te są wytwarzane w średnicach od 90 mm do 200 mm metodą kucia matrycowego. Głównym problemem tych narzędzi jest ich dość niska trwałość - ok. 4000 cykli. Jedną z matryc o nr 682/99 wykonaną ze stali WCLV wybrano do badań opisanych w tej publikacji.

Celem badań było porównanie poziomu naprężeń własnych wyznaczonych metodą rentgenowską $\sin^2\Psi$ oraz grubości warstwy azotowanej - metodą prądów wirowych w nowej matrycy i po jej eksploatacji. Ponadto przeprowadzono badania metalograficzne na próbkach pobranych z matrycy po eksploatacji.

2. CHARAKTERYSTYKA STOSOWANYCH BADAŃ NIENISZCZĄCYCH

2.1. Podstawy pomiaru makronaprężeń metodą $\sin^2\Psi$

Naprężenia powodujące odkształcenie badanego materiału są powodem przesunięć elementów struktury krystalicznej. Znajduje to odzwierciedlenie w zmianie położenia lub charakteru refleksów rentgenowskich na dyfraktoqramie.

Istnieją różne dyfraktometryczne metody pomiaru naprężeń, przy czym najszerzej stosowana tzw. metoda $\sin^2\psi$, która szczegółowo omówiona została w pracy [1, 2]. W metodzie tej miernikiem naprężeń są zmiany odstępów d_{hkl} płaszczyzn sieciowych.

W rentgenowskiej metodzie $\sin^2\psi$ do pomiaru naprężeń własnych wykorzystuje się zjawisko dyfrakcji promieni X na płaszczyznach atomowych kryształu. Metoda polega na wykorzystaniu symetrycznej dyfrakcji Bragg-Brentana, gdzie wektor dyfrakcji jest prostopadły do płaszczyzn uginających $\{hkl\}$ i do powierzchni próbki, a odpowiednie nachylenie wektora dyfrakcji o kąty ψ , w płaszczyźnie prostopadłej do płaszczyzny dyfrakcji, uzyskuje się w goniometrze typu ψ (rys. 1).

vehicles. The rings are made with the diameters from 90 mm to 200 mm by the method of die forging. The major problem of those tools is their short life – about 4000 cycles. One of the dies, numbered 682/99, made of WCLV steel, has been selected for the investigation described in this paper.

The objective of the investigation was a comparison of internal stresses determined by the x-ray $\sin^2\Psi$ method and the nitrided layer thickness determined by the eddy current method in a new die and after exploitation of it. Furthermore, metallographic examinations have been performed on samples taken from a die after exploitation.

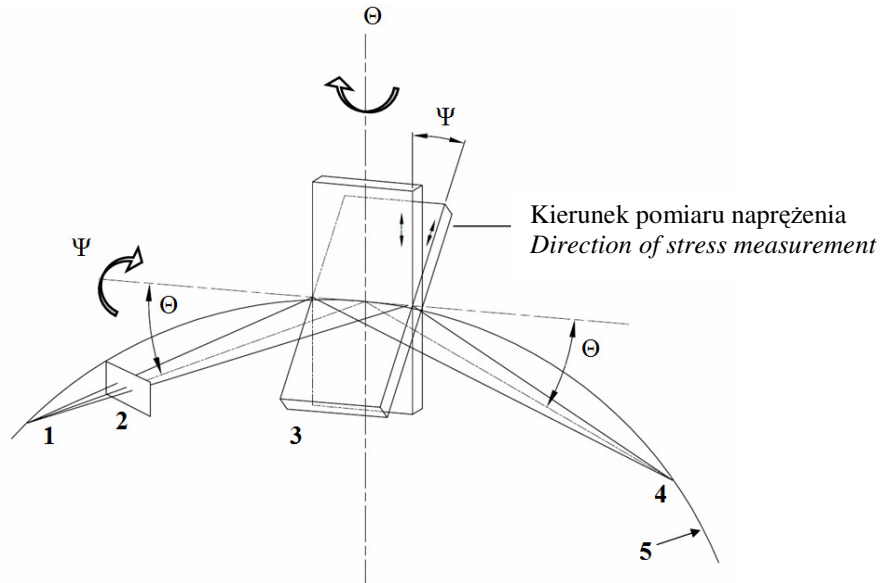
2. CHARACTERISTICS OF THE NON-DESTRUCTIVE TESTS PERFORMED

2.1. Basis of macro stress measurement by the $\sin^2\Psi$ method

The stresses causing deformation of the material under investigation result in shifting of the crystalline structure elements. This is reflected in the change of location or character of x-ray reflexes in the diffraction pattern.

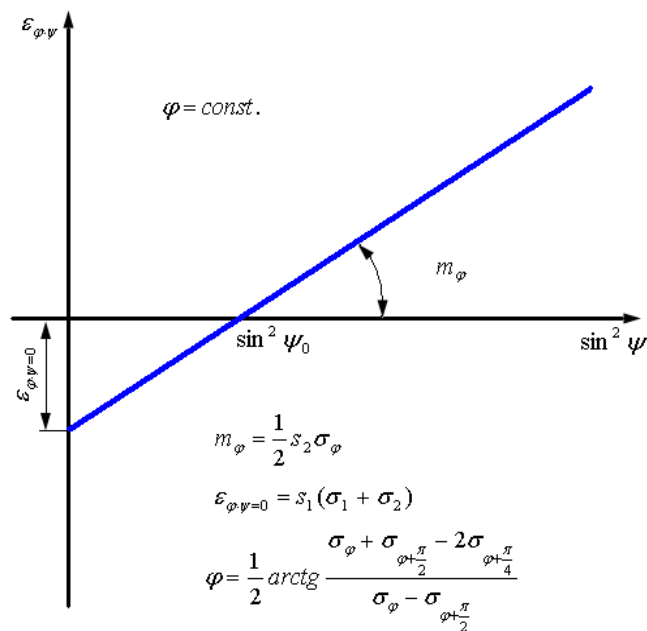
There are various methods of stress measurement, the most widely used one is the so called $\sin^2\Psi$ method which has been discussed in detail in works [1, 2]. In that method, the gauge of the stress is the changes of the d_{hkl} spaces of the lattice planes.

In the x-ray $\sin^2\psi$ method, the phenomenon of diffraction of X rays on the atomic planes of crystals is utilized. The method consists in the utilisation of the symmetrical Bragg-Brentano diffraction where the vector of diffraction is perpendicular to the deflecting planes $\{hkl\}$ and to the sample surface and adequate inclination of the diffraction vector by the ψ angles in a plane perpendicular to the plane of diffraction is obtained in a goniometer type ψ (fig. 1).



Rys. 1. Geometria goniometru Ψ : 1 – źródło promieni rentgenowskich, 2 – szczelina rozbieżności, 3 – próbka, 4 – szczelina wejściowa detektora, 5 – okrąg ogniskowania promieni rentgenowskich

Fig. 1. Geometry of the ψ goniometer: 1 – x ray source, 2 – divergence aperture, 3 – sample, 4 – detector input aperture, 5 – x ray focusing circle



Rys. 2. Liniowa zależność $\varepsilon_{\varphi\psi}$ w klasycznej metodzie $\sin^2 \psi$ [4]

Fig. 2. Linear $\varepsilon_{\varphi\psi}$ relationship in the classical $\sin^2 \psi$ method [4]

Oznaczenia: m_φ = współczynnik kierunkowy prostej, $\varepsilon_{\varphi\psi}$ = odkształcenie sieci krystalicznej, zmierzone w kierunku wyznaczonym przez kąty φ , ψ , jest funkcją liniową $\sin^2 \psi$, φ = kąt pomiędzy układami współrzędnych naprężeń głównych i próbki, ψ = kąt między normalną do powierzchni próbki (osią z) i normalną do płaszczyzn uginających {hkl} odmierzany w płaszczyźnie dyfrakcji wyznaczonej przez promień padający, normalną i promień ugięty, σ_1 , σ_2 = naprężenia główne, σ_φ = składowa naprężenia dla kierunku φ

Designations: m_φ = straight line directional coefficient, $\varepsilon_{\varphi\psi}$ = crystalline lattice deformation measured in the direction determined by angles φ , ψ , a linear function of $\sin^2 \psi$, φ = the angle between the coordinate systems of the main stresses and the sample stresses, ψ = angle between the normal to the sample surface (z axis) and the normal to the reflecting planes {hkl} measured in the plane of diffraction determined by the incident ray, the normal and the deflected ray, σ_1 , σ_2 = main stresses, σ_φ = stress component for direction φ

Odształcenie sieci krystalicznej $\varepsilon_{\varphi\psi}$ zmierzone w kierunku wyznaczonym przez kąty φ i ψ , jest liniową funkcją $\sin^2\psi$ (rys. 2), niezależnie od kierunku wyznaczonego przez azymut φ . Ta liniowa zależność wykorzystywana jest do obliczeń makronaprężeń własnych przy założeniu izotropowości stałych sprężystości.

Do obliczeń bezwzględnych wartości σ_φ nie jest konieczny pomiar d_o materiału wzorcowego (bez naprężeń), gdyż naprężenie obliczone jest z nachylenia prostej. Takie postępowanie przy założeniach ciała izotropowego czyni tę metodę bezwzorcową, umożliwiającą pomiary bezwzględnych wartości makronaprężeń własnych.

Pomiary naprężeń metodą $\sin^2\psi$ przeprowadzono za pomocą dyfraktometru rentgenowskiego Kristalloflex 4 firmy Siemens z goniometrem Eg 4/201 [3]. Pomiary kontrolne przeprowadzono na odprężonym proszku żelaza ARMCO. Do analizy wybrano refleks (211) widoczny przy promieniowaniu $Cr_{K\alpha}$. Wyniki zaprezentowano w tabeli 1. Zaobserwowano, że zastosowane procedury pomiarowe dla goniometru EG 4/201 umożliwiają pomiar odległości międzypłaszczyznowej z dokładnością $\pm 0.00001 \text{ \AA}$ i w tych granicach nie zmieniają się również dla próbki wzorcowej (bez naprężeń).

The crystalline lattice deformation, $\varepsilon_{\varphi\psi}$, measured in the direction determined by angles φ and ψ is a linear function, $\sin^2\psi$, (fig. 2), regardless of the direction determined by the azimuth φ . That linear relationship is used in calculation of internal macro stresses with the assumption of constant elasticity isotropy.

For the calculation of absolute values of σ_φ , measurement of d_o of the model material (without stress) is not necessary because the stress is calculated from the straight line inclination. Such procedure, with the assumptions of an isotropic body, makes this method model free enabling measurements of absolute values of internal macro stresses to be performed.

Stress measurements by the $\sin^2\psi$ method have been performed by means of Kristalloflex 4 diffractometer made by Siemens with Eg 4/201 goniometer [3]. Check measurements have been performed on relieved iron powder, ARMCO. For analysis, reflex (211) visible at $Cr_{K\alpha}$ radiation has been selected. The results can be seen in table 1. It has been found that the measurement procedures applied for the EG 4/201 goniometer make it possible to measure the distance between plane with the accuracy of $\pm 0.00001 \text{ \AA}$ and within those limits they do not vary, too, for the model sample (without stress).

Tabela 1. Sprawdzenie poprawności procedury pomiaru na proszku żelaza ARMCO (odprężony proszek)

Table 1. Verification of the measurement procedure correctness on ARMCO iron powder stress (relieved powder)

Lp.	Ψ [°]	d [Å]	2Θ [°]
1	-44	1,17351	154,646
2	-39	1,17351	154,646
3	-33	1,17351	154,649
4	-27	1,17351	154,650
5	-18	1,17350	154,651
6	0	1,17350	154,650

gdzie: ψ - kąt między normalną do powierzchni i normalną do uginających płaszczyzn {hkl}, d - odległość między płaszczyznami krystalograficznymi {hkl}, θ - kąt Bragga

where: ψ - the angle between the normal to the surface and the normal to the deflecting planes {hkl}, D - distance between the crystallographic planes {hkl}, θ - Bragg angle

Zapisy dyfrakcyjne wykonano stosując:

- promieniowanie $Cr_{K\alpha}$,
- napięcie lampy 40 kV,
- natężenie 16 mA,
- szczelinę ograniczającą wiązkę pierwotną $DS = 0,5^\circ$,
- szczelinę przyjmującą licznika $SS = 0,2$ mm,
- zakres zapisów dyfrakcyjnych: $144^\circ \div 151^\circ$, z krokiem $0,5^\circ$ i czasem zliczania $INT = 30$ s,
- zmiany kątów $\psi = -44^\circ, -39^\circ, -33^\circ, -27^\circ, -18^\circ, 0,0^\circ$.

Otrzymane profile linii dyfrakcyjnych dla badanej matrycy (211) wygładzono, odjęto tło, składową α_2 oraz wyznaczano maksima, z których policzono odległość międzyplaszczynową d_{221} stanowiącą podstawę do obliczeń naprężeń.

Stałe sprężystości dla badanych próbek przyjęto z danych literaturowych:

$$s_1 = 1,15 \quad 1/2s_2 = 5,62 [4].$$

2.2. Podstawy metody prądów wirowych

Metoda prądów wirowych, którą stosuje się do badania grubości warstw dyfuzyjnych, m.in. azotowanych, oparta jest na zjawisku indukcji magnetycznej [5, 6]. W wyniku działania zmiennym polem magnetycznym indukowane są w badanym obiekcie prądy wirowe, które wytwarzają własne pole magnetyczne skierowane przeciwnie do pola wzbudzenia, obniżając jego natężenie. Częstotliwość prądu magnesowania istotnie wpływa na głębokość wnikania prądów wirowych w badany obiekt, tak że jej zwiększanie powoduje zmniejszenie głębokości wnikania prądów. Natężenie pola prądów wirowych zależy przede wszystkim od właściwości fizycznych materiału takich, jak: przewodność elektryczna właściwa, względna przenikalność magnetyczna oraz wielkości badanego obszaru. Zasadniczym elementem układu pomiarowego jest czujnik prądów wirowych. W najbardziej podstawowej wersji zbudowany jest on z rdzenia, na którym nawinięte są dwa uzwojenia: magnesujące i pomiarowe. Uzwojenie magnesujące wytwarza zmienne pole magnetyczne.

Diffraction records have been made with the use of:

- *$Cr_{K\alpha}$ radiation,*
- *lamp voltage 40 kV,*
- *current 16 mA,*
- *primary beam limiting aperture, $DS = 0.5^\circ$,*
- *receiving gap of the counter, $SS = 0.2$ mm,*
- *range of diffraction records: $144^\circ \div 151^\circ$, with the step of 0.5° and counting time of $INT = 30$ s,*
- *changes of angles, $\psi = -44^\circ, -39^\circ, -33^\circ, -27^\circ, -18^\circ, 0,0^\circ$.*

The diffraction line profiles obtained for the die under investigation (211) have been planished, the background and component α_2 have been taken out and maximums have been determined from which the interplanar distance, d_{221} , constituting a basis for stress calculation, has been counted.

The elasticity constants for the samples under investigation have been adopted from literature data:

$$s_1 = 1,15 \quad 1/2s_2 = 5,62 [4].$$

2.2. Bases of the eddy current method

The eddy current method, used for examining the thickness of diffusion layers, among others nitrided ones, is based on the phenomenon of magnetic induction [5, 6]. As result of variable magnetic field action, eddy currents are induced in the object under examination which currents generate their own magnetic field directed oppositely to the field of excitation reducing its intensity. The frequency of the magnetizing current significantly influences the depth of the eddy current penetration into the object under examination, so that its increase causes reduction of the eddy current penetration depth. The intensity of the eddy current field depends, first of all, on the physical properties of the material such as: specific conductance, relative magnetic permeability and the size of the area being examined. The basic element of the measurement system is the eddy current sensor. In the simplest version, it consists of a core on which two coils are wound: the magnetizing one and the measurement one. The magnetizing coil generates variable magnetic field.

W uzwojeniu pomiarowym indukowane jest napięcie wtórne, którego wielkość i położenie fazy zależy od właściwości fizycznych badanego obiektu.

Badania warstw azotowanych metodą prądów wirowych wymagają przygotowania próbek odniesienia. Ze względu na dużą liczbę czynników wpływających na zmiany sygnału napięciowego indukowanego w cewce czujnika należy próbki odniesienia wykonać tak, aby zmienny był jedynie parametr, który podlega badaniu. Sygnał napięciowy cewki pomiarowej jest elektronicznie przetwarzany w przyrządach przystosowanych do badania warstw dyfuzyjnych (np. z serii *Wirotest* konstrukcji IMP) i przedstawiany jako wskazanie przyrządu [7].

W celu wykonania wykresów kalibracyjnych, określających zależność wskazań przyrządu od grubości warstwy azotowanej, do pomiarów grubości warstw azotowanych metodą prądów wirowych należy przygotować próbki odniesienia i przeprowadzić następujące badania [8-10]:

- obserwacje warstw azotowanych za pomocą mikroskopu świetlnego w celu pomiaru np. grubości stref azotków żelaza i strefy dyfuzyjnej α ,
- rozkładu mikrotwardości (od powierzchni próbki w kierunku rdzenia) np. metodą Vickersa lub Knoopa przy obciążeniu 0,981 N i wyznaczyć efektywną grubość warstwy np. o twardości ≥ 700 HV 0,1 (HK 0,1),
- próbek odniesienia i azotowanego wyrobu za pomocą przyrządu prądów wirowych.

3. BADANY MATERIAŁ I METODYKA BADAŃ

Badanym materiałem była azotowana jarmieniowo matryca nr 682/99 wykonana ze stali WCLV (odpowiednik stali X40CrMoV5-1 wg normy PN-EN ISO 4957:2004 – Stale narzędziowe), przed kuciem i po 3500 cyklach kucia.

W artykule wykorzystano następujące metody badawcze:

- pomiar naprężeń własnych w warstwie wierzchniej matrycy nowej i po eksploatacji metodą rentgenowską $\sin^2\psi$ za pomocą

In the measurement coil, secondary voltage is induced whose magnitude and phase location depends on the physical properties of the object under examination.

*Examination of nitrided layers by the eddy current method requires preparation of reference samples. Due to the large number of factors influencing changes of the voltage signal induced in the sensor coil, the reference samples should be made so that only the examined parameter is variable. The voltage signal of the measurement coil is electronically processed in devices adapted for examining diffusion layers (e.g. *Wirotest* series of IMP design) and presented as an indication of the device [7].*

In order to make calibration diagrams defining the dependence of the device indications on the nitrided layer thickness, for the nitrided layer thickness measurements, reference samples should be prepared and the following examinations performed [8-10]:

- *inspection of nitrided layers by means of an optical microscope to measure e.g. the thickness of iron nitride zones and the diffusion zone, α ,*
- *microhardness distribution (from the sample surface towards its core), e.g. by the Vickers or Knoop method with the load of 0,981 N and determination of the effective thickness of a layer, e.g. with the hardness of over 700 HV 0.1 (HK 0.1),*
- *examination of the reference samples and the nitrided product by means of the eddy current device.*

3. INVESTIGATED MATERIAL AND INVESTIGATION METHODOLOGY

The material under investigation was a glow discharge nitrided die no. 682/99 made of WCLV steel (equivalent of X40CrMoV5-1 according to PN-EN ISO 4957:2004 standard – Tool steels) prior to forging and after 3500 cycles of forging.

The following investigation methods have been used in the paper:

- *measurement of internal stresses in the top layer of a new die and one after exploitation by the x-ray $\sin^2\psi$ method by means of a*

- zmodernizowanego dyfraktometru rentgenowskiego Kristalloflex 4 (Siemens),
- badania grubości warstwy azotowanej matrycy nowej i po eksploatacji, metodą prądów wirowych za pomocą układu pomiarowego składającego się z przyrządu Wirotest 03 i czujnika stykowego nieekranowanego o polu detekcji $\varnothing 8,2$ mm, przy częstotliwości prądu magnesującego 3,4 kHz; w badaniach wykorzystano także próbki kontrolne wytworzone we wcześniej wykonywanych badaniach,
 - badania powierzchni matrycy eksploatacyjnej za pomocą mikroskopu skaningowego (SEM) Inspect S (FEI) w miejscach przeprowadzenia ww. badań nieniszczących,
 - badania głębokości pęknięć oraz struktury w różnych obszarach matrycy eksploatacyjnej, za pomocą mikroskopu świetlnego Eclipse L150 (Nikon),
 - wyznaczenie rozkładów mikrotwardości Vickersa wg normy PN-EN ISO 6507-1:2007 – Metale – Pomiar twardości sposobem Vickersa – Część 1: Metoda badań, przy sile obciążającej 0,981 N, w różnych obszarach matrycy. Grubość efektywną $g_{700HV0,1}$ warstwy azotowanej określono jako odległość od powierzchni próbki do miejsca, w którym twardość wyniosła 700 HV 0,1.

4. WYNIKI BADAŃ

Pomiarom rentgenowskim naprężeń metodą $\sin^2\Psi$ poddano miejsca na powierzchniach roboczych nowej matrycy i po eksploatacji, które zaznaczono na rys. 3. Wszystkie pomiary przeprowadzono przy tych samych warunkach prądowo-napięciowych i optycznych wiązki rentgenowskiej.

Wyniki badań naprężeń własnych w warstwie wierzchniej nowej matrycy i po eksploatacji zestawiono w tabeli 2.

Miejsca wykonania badań grubości warstwy azotowanej metodą prądów wirowych na matrycy po eksploatacji pokazano na rys 4. Miejsca badań nowej matrycy i eksploatacyjnej były porównywalne. Wyniki wskazań przyrządu Wirotest 03 odniesione do efektywnej grubości warstwy azotowanej $g_{700HV0,1}$ nowej matrycy i po eksploatacji oraz próbki odniesienia przedstawiono na rys 5.

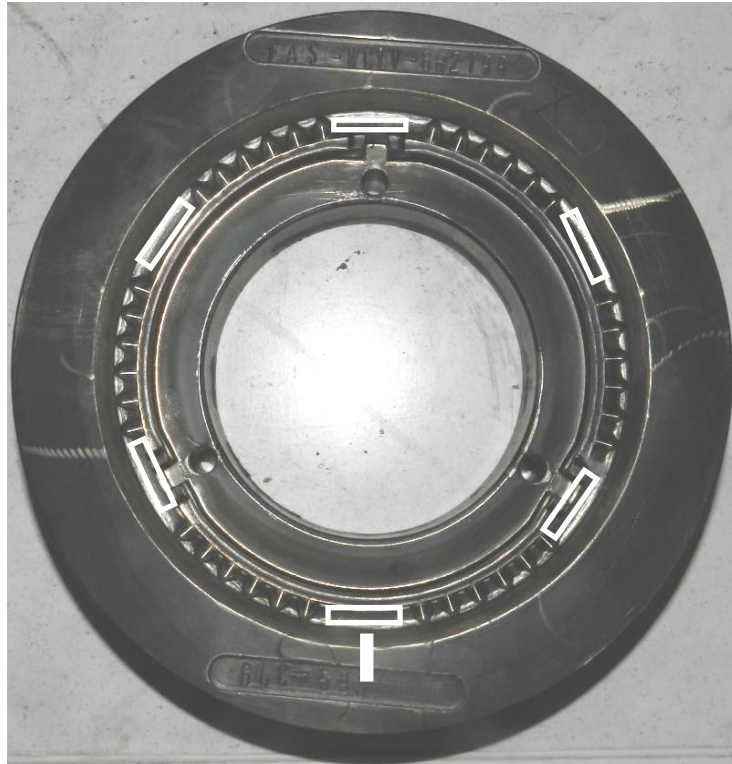
- modernized X-ray diffractometer, Kristalloflex 4 (Siemens),*
- examination of the nitrified layer thickness of a new die and one after exploitation, by the eddy current method by means of a measurement system consisting of Wirotest 03 device and an unshielded contact sensor with the detection field of $\varnothing 8.2$ mm, with the magnetizing current frequency of 3.4 kHz; in the investigation, reference samples made in earlier investigation have also been used,*
 - examination of the exploited die surface by means of a scanning microscope (SEM) Inspect S (FEI) at the locations where the above non-destructive examinations have been performed,*
 - examination of crack depths and structure in various areas of an exploited die, by means of an Eclipse L150 optical microscope (Nikon),*
 - determination of Vickers microhardness distributions according to standard PN-EN ISO 6507-1:2007 – Metals hardness measurement by the Vickers method – Part 1: Method of examination with the loading force of 0.981 N in various areas of the die. The effective nitrified layer thickness, $g_{700HV0,1}$, has been defined as the distance from the surface to the point where the hardness was 700 HV 0.1.*

4. INVESTIGATION RESULTS

The points on the working surfaces of a new die and one after exploitation which have been subjected to X-ray measurements of stresses by the $\sin^2\Psi$ method are marked in fig. 3. All the measurements have been effected under the same optical, current and voltage conditions of the X-ray beam.

The results of internal stress examination in the top layer of a new die and one after exploitation have been assembled in table 2.

The points of the nitrified layer thickness measurements by the eddy current method on the die after exploitation are shown in fig. 4. The points of examination of the new die and the exploited one were comparable the Wirotest 03 device indications referred to the effective nitrified layer thickness, $g_{700HV0,1}$ of a new die and one after exploitation and to a reference sample are shown in fig. 5.

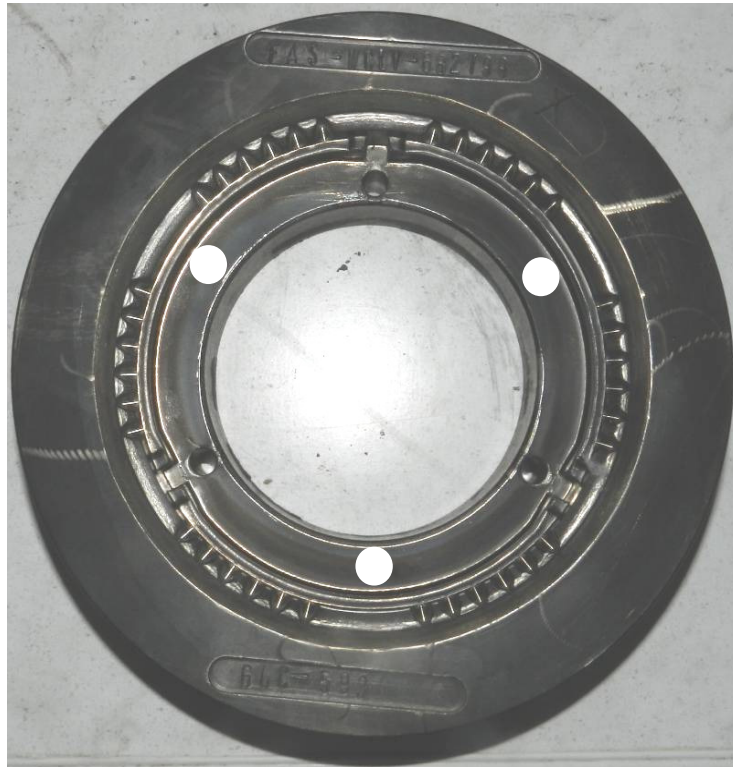


Rys. 3. Matryca nr 682/99 (po eksploatacji) z zaznaczonymi obszarami wykonania pomiarów naprężeń własnych. Kolejność wykonywania pomiarów - od prostopadłej kreski zgodnie z ruchem wskazówek zegara

Fig. 3. Die no. 682/99 (after exploitation) with marked areas of internal stress measurements – from the perpendicular line in the clockwise direction

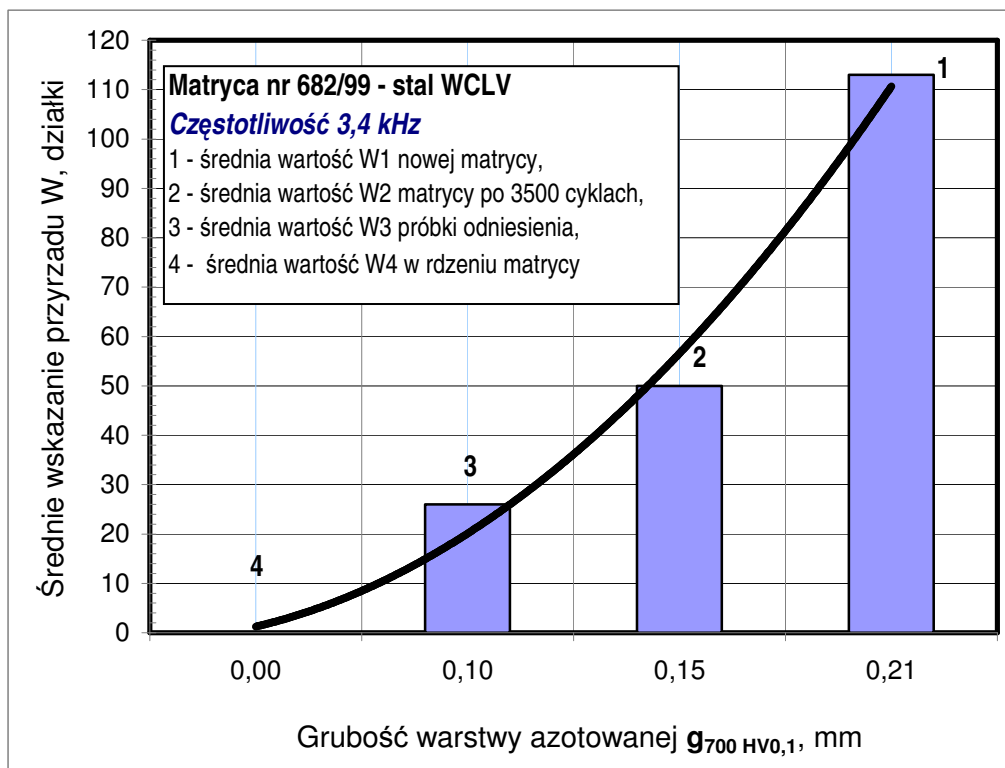
Tabela 2. Naprężenia własne w warstwie wierzchniej nowej matrycy nr 682/99 i po eksploatacji
Table 2. Internal stresses in the top layer of die no.682/99, new and after exploitation

Charakterystyka matrycy <i>Die specification</i>	Numer pomiaru <i>Number of measurement</i>	Naprężenia własne σ <i>Internal stresses, σ</i> [MPa]	Średnia wartość naprężeń własnych σ <i>Average value of internal stresses, σ</i> [MPa]
Nowa matryca nr 682/99 <i>New die no.682/99</i>	1	-537	-510
	2	-453	
	3	-560	
	4	-569	
	5	-492	
	6	-447	
Matryca nr 682/99 po 3500 cyklach <i>Die no. 682/99 after 3500 cycles</i>	1	+112	+139
	2	+146	
	3	+87	
	4	+168	
	5	+133	
	6	+187	



Rys. 4. Miejsca wykonania badań grubości warstwy azotowanej metodą prądów wirowych matrycy nr 682/99 po eksploatacji

Fig. 4. Location of eddy current examination of the nitrided layer thickness of die no. 682/99 after exploitation



Rys. 5. Wskazania przyrządu Wirotest 03 w zależności od grubości warstwy azotowanej $g_{700HV0,1}$ matrycy nr 682/99 – nowej, po eksploatacji oraz próbki odniesienia. Częstotliwość prądu magnesowania 3,4 kHz

Fig. 5. Wirotest 03 device indications depending on the nitrided layer thickness, $g_{700HV0,1}$, of die no. 682/99, new, after exploitation and of a reference sample. Magnetizing current frequency 3.4 kHz

1 – average value, W1, of a new die, 2 – average value, W2, of a die after 3500 cycles, 3 – average value, W3, of a reference sample, 4 – average value, W4, in the die core

Zależność wskazań przyrządu Wirotest 03 od grubości warstwy $g_{700HV0,1}$ opisuje dla badanej matrycy równanie:

$$y = 2630,3x^2 - 35,41x, \quad (1)$$

współczynnik $R^2 = 0,996$

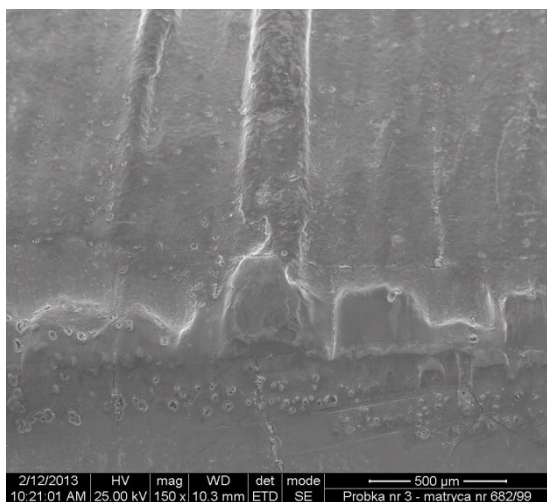
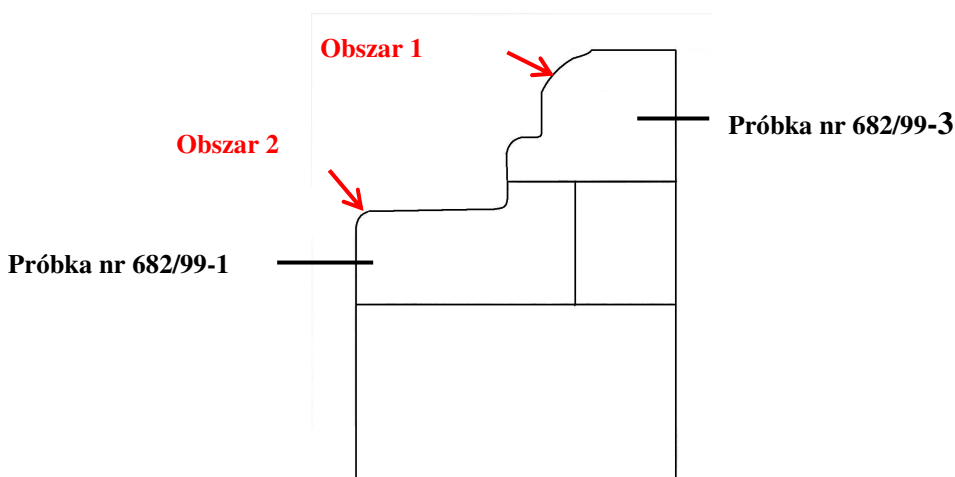
Wyniki obserwacji za pomocą SEM powierzchni próbek, pobranych z matrycy po eksploatacji, w wybranych obszarach: badań naprężeń własnych oraz grubości warstwy azotowanej metodą prądów wirowych pokazano na rys. 6.

The relationship of the Wirotest 03 indications and the $g_{700HV0,1}$ nitrided layer thickness for the die under investigation is stated in the equation:

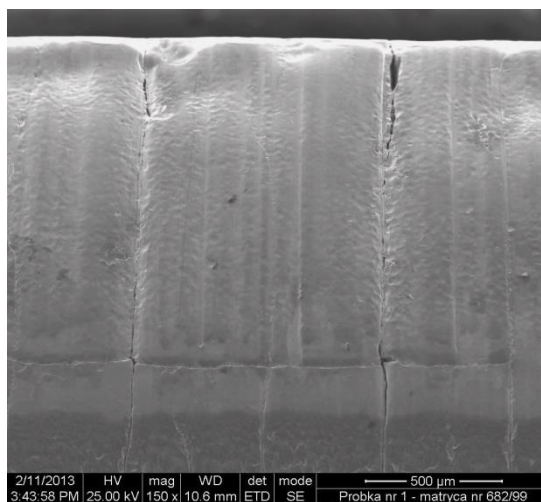
$$y = 2630,3x^2 - 35,41x, \quad (1)$$

coefficient $R^2 = 0,996$

The results of SEM examination of the surface of samples taken from the die after exploitation in the selected areas of internal stress examination and nitrided layer thickness examination by the eddy current method are shown in fig. 6.



a) obszar 1 próbki nr 682/99-3
a) area 1 of sample no. 682/99-3



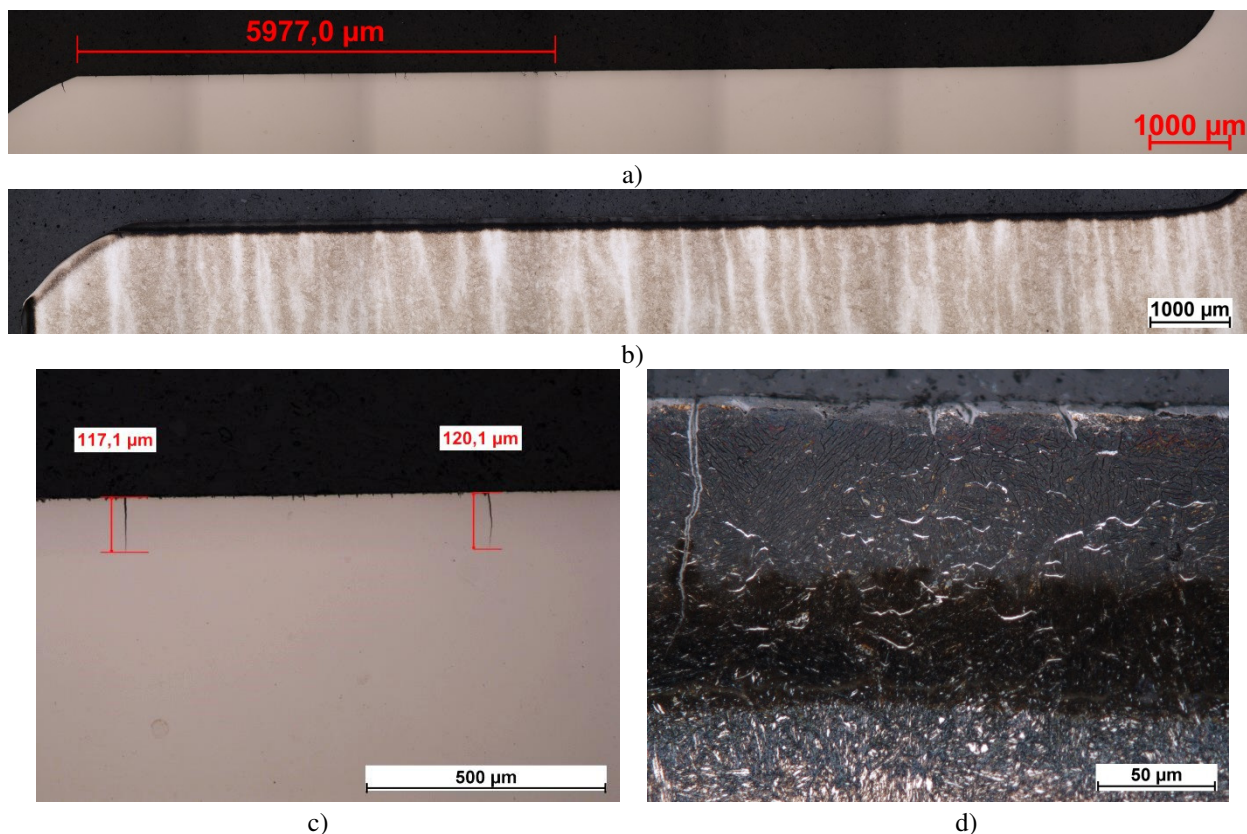
b) obszar 2 próbki nr 682/99-1
b) area 2 of sample no. 682/99-1

Rys. 6. Powierzchnia próbek pobranych z odcinka matrycy 682/99, SEM.

Obszar 1 próbki nr 682/99-3 – wybrany obszar pomiaru naprężeń własnych metodą $\sin^2\Psi$, obszar 2 próbki nr 682/99-1 – wybrany obszar badań grubości warstwy azotowanej metodą prądów wirowych

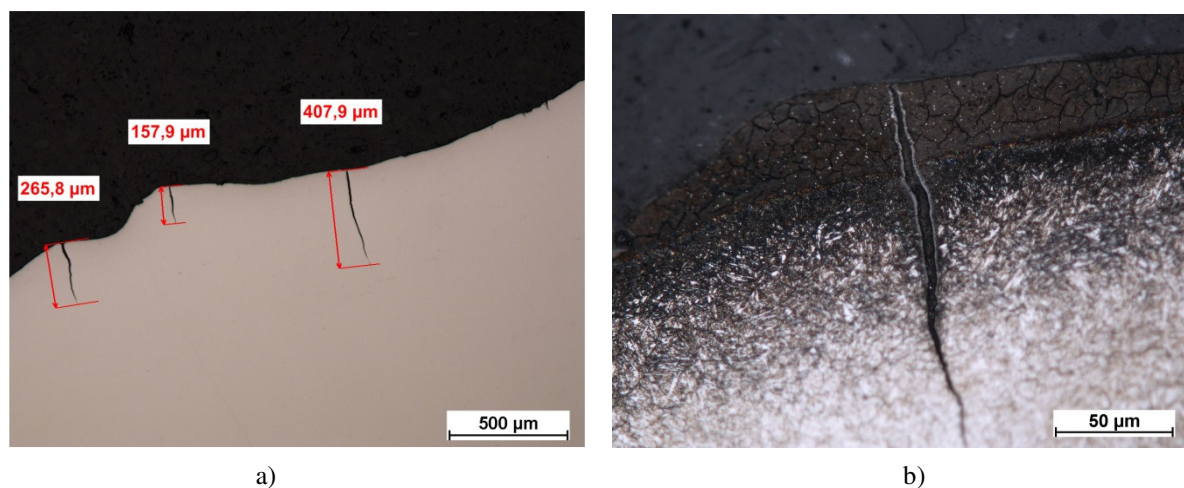
Fig. 6. Surface of the samples taken from a section of die 682/99, SEM.

Area 1 of sample no. 682/99-3 – selected area of internal stress measurement by the $\sin^2\Psi$ method, area 2 of sample no. 682/99-1 – selected area of nitrided layer thickness examination by the eddy current method



Rys. 7. Próbkę nr 682/99-1 (obszar 2 – badania grubości warstwy metodą prądów wirowych):
 a) przekrój wzdłużny, próbka nietrawiona, b) próbka trawiona, c) obszar z pęknięciami, próbka nietrawiona,
 d) struktura na przekroju powierzchni płaskiej, próbka trawiona

Fig. 7. Sample no. 682/99-1 (area 2 – layer thickness examination by the eddy current method):
 a) longitudinal section, not etched sample, b) etched sample, c) area with cracks, not etched sample,
 d) structure on the cross section of a flat surface, etched sample



Rys. 8. Próbkę nr 682/99-3 (obszar 1- badania naprężeń własnych metodą rentgenowską):
 a) obszar z pęknięciami, próbka nietrawiona, b) struktura obszaru z pęknięciem, próbka trawiona

Fig. 8. Sample no. 682/99-3 (area 1 – internal stress examination by the X-ray method):
 a) cracked area, not etched sample; b) cracked area structure, etched sample

Wyniki obserwacji głębokości pęknięć i struktury warstwy azotowanej na zglądach metalograficznych przygotowanych na próbkach nr 682/99-3 i 682/99-1 przedstawiono na rys. 7 i 8. Pęknięcia obserwowano na próbkach

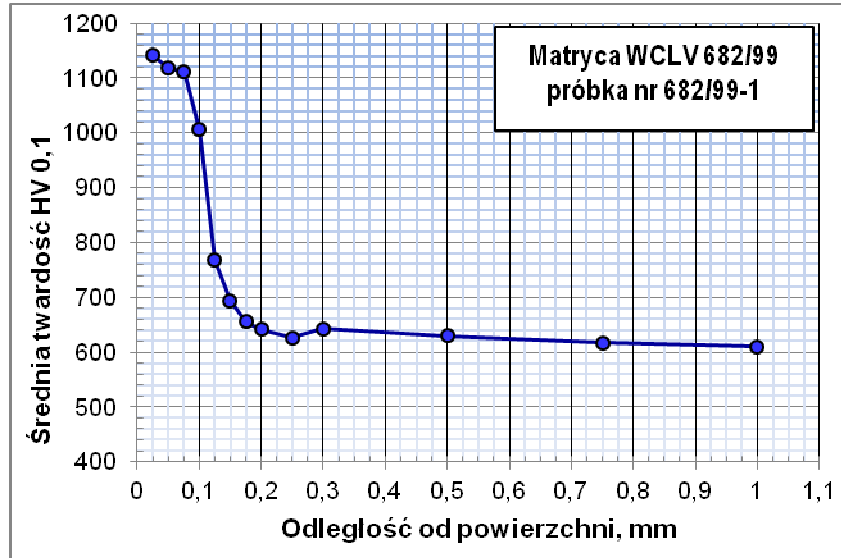
The results of inspection of the crack depths and structure of the nitrided layer on metallographic sections prepared on samples no. 682/99-3 and 682/99-1 are shown in fig. 7 and 8. The cracks were observed on not etched

nietrawionych. Strukturę próbek ujawniono po trawieniu nitałem.

Profile twardości HV 0,1 na przekrojach próbek nr 682/99-1 i 682/99-3 pokazano na rys. 9 i 10.

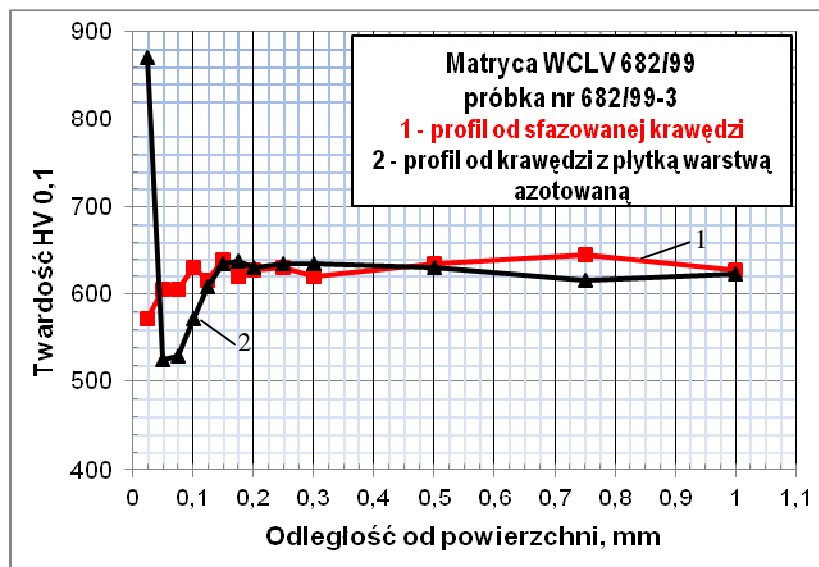
samples. The sample structure has been made visible after etching with nital.

HV 0.1 hardness profiles on the cross sections of samples no. 682/99-1 and 682/99-3 are shown in figs. 9 and 10.



Rys. 9. Średni rozkład twardości w obszarze 2 próbki nr 682/99-1

Fig. 9. Average hardness distribution in area 2 of sample no. 682/99-1



Rys. 10. Rozkłady twardości w obszarze 1 próbki nr 682/99-3

Fig. 10. Hardness distributions in area 1 of sample no. 682/99-3

1 – profile from the chamfered edge, 2 – profile from the edge with shallow nitrided layer

5. PODSUMOWANIE WYNIKÓW BADAŃ

Na podstawie wyników badań naprężeń własnych metodą $\sin^2 \psi$, w wybranych obszarach matrycy nr 682/99 stwierdzono, że nowa matryca charakteryzowała się występowaniem

5. SUMMARY OF THE INVESTIGATION RESULTS

Basing on the results of internal stress examination by the $\sin^2 \psi$ method in selected areas of die no. 682/99, it has been stated that new die was characterized by the occurrence

naprężeń ściskających σ o średniej wartości 510 MPa po azotowaniu jarzeniowym. Natomiast po kuciu (3500 odkuwek) pierścieni synchronizatorów nastąpiła zmiana naprężeń na rozciągające o wartości średniej 139 MPa (tabela 2).

Analiza mikroskopowa za pomocą SEM jednego z obszarów matrycy po eksploatacji (próbka 682/99-3), w którym prowadzono badania naprężeń, wykazała występowanie bruzd (rys. 6a). W badaniach za pomocą mikroskopu świetlnego ujawniono w tym obszarze pęknięcia o największej głębokości ok. 0,4 mm (rys. 8a) oraz mikroobszary bez warstw azotowanej lub z cienką warstwą azotowaną o grubości ok. 0,05 mm, która najprawdopodobniej uległa pocienieniu wskutek zużycia ściernego (rys. 8b).

Badania grubości warstwy azotowanej metodą prądów wirowych wykazały, że grubość warstwy azotowanej o twardości większej od 700 HV 0,1 (obszar 2 próbki nr 682/99-1) wyniosła ok. 0,21 mm na nowej matrycy. W wyniku eksploatacji matrycy warstwa ta uległa zmniejszeniu do 0,15 mm. Na płaskiej powierzchni matrycy eksploatowanej, gdzie prowadzono badania metodą prądów wirowych, stwierdzono wzdłużne pęknięcia (rys. 6b), które powstały wskutek zmęczenia cieplno-mechanicznego. Z kolei na wzdłużnie pobranej próbce metalograficznej zaobserwowano pęknięcia o największej długości ok. 0,12 mm, które występowały w odległości ok. 6 mm od powierzchni sfazowanej (rys. 7a). Struktura materiału matrycy w strefie przypowierzchniowej w tym obszarze wykazywała zanik struktury iglastej odpuszczonego martenzytu i dużą liczbę drobnych wydzielen węglików. Natomiast w strukturze warstwy azotowanej na przekroju płaskiej powierzchni (rys. 7d) stwierdzono: pęknięcia wypełnione tlenkami oraz mniejszą ilość wydzielen azotków żelaza na granicach ziaren, w strefie przy powierzchni próbki, w porównaniu z obszarami na większej głębokości strefy dyfuzyjnej α .

Wyniki badania rozkładów mikrohardości HV 0,1 (rys. 9 i 10) potwierdzają wyniki obserwacji mikroskopowych: występowania warstwy azotowanej na płaskiej powierzchni próbki 682/99-1 oraz braku ciągłości warstwy

of compressive stresses, σ , with an average value of 510 MPa after glow discharge nitriding. After forging of 3500 synchronizer rings, the stresses changed into tensile ones with an average value of 139 MPa (table 2).

Microscopic (SEM) analysis of one of the die areas after exploitation (sample 682/99-3), in which stress examination has been performed, has proved that furrows occurred (fig.6a). In an optical microscope inspection, cracks of maximum depth of 0.4 mm have been found in that area (fig. 8a), as well as micro-areas without the nitrided layer or with a very thin nitride layer (about 0.05 mm thick) which has most probably been thinned due to abrasive wear (fig. 8b).

Examination of the nitrided layer thickness by the eddy current method has shown that the thickness of the nitrided layer with the hardness of more than 700 HV 0.1 (area 2 of sample no. 682/99-1) was about 0.21 mm on a new die as a result of the die exploitation, the layer was reduced down to 0.15 mm. On a flat surface of exploited die, where eddy current examination has been performed, longitudinal cracks have been found (fig. 6b), which have been formed due to thermo-mechanical fatigue. On a longitudinally taken metallographic sample, on the other hand, cracks of the largest length (about 0.12 mm) have been found at a distance of about 6 mm from the chamfered surface (fig. 7a). The die material structure in the surface zone of that area has shown fading of acicular structure of tempered martensite and a large number of small carbide precipitations. In the structure of the nitrided layer on a flat surface cross section, the following has been found: cracks filled with oxides and less iron nitride secretions at the grain boundaries in the zone at the sample surface as compared to the areas at a larger depth of the diffusion zone, α .

The results of HV 0.1 microhardness distribution examinations (fig. 9 and 10) confirm the results of microscopic examinations: presence of nitrided layer on the flat surface of sample 682/99-1 and discontinuity

azotowanej w obszarze 1 próbki 682/99-3 wskutek zużycia ściernego.

of the nitrided layer in area 1 of sample 682/99-3 due to abrasive wear.

6. WNIOSKI

Na podstawie otrzymanych wyników badań można sformułować następujące wnioski:

- 1) badania naprężeń własnych metodą $\sin^2\psi$ w warstwie wierzchniej matrycy do kucia pierścieni synchronizatorów (nowej i po eksploatacji) wykazały, że nowa matryca charakteryzowała się występowaniem korzystnych naprężeń ściskających w badanych obszarach,
- 2) proces eksploatacji przy liczbie cykli 3500 spowodował zmianę znaku naprężeń na rozciągające i zmianę poziomu wielkości naprężeń oraz znaczne zużycie powierzchni roboczych w badanych obszarach w wyniku ścierania i powstania pęknięć wskutek zmęczenia cieplno-mechanicznego,
- 3) badania grubości warstwy azotowanej metodą prądów wirowych, przy częstotliwości 3,4 kHz, matrycy nowej i po eksploatacji okazały się wystarczająco dokładne dla warstw o średniej grubości od ok. 0,15 do ok. 0,2 mm,
- 4) w celu poprawy trwałości matrycy do kucia pierścieni synchronizatorów należy rozważyć zmianę technologii obróbki cieplno-chemicznej, w wyniku której powstałaby warstwa azotowana bez wydzielenia azotków żelaza w strefie azotowania wewnętrznego, o grubości w zakresie 0,25÷0,3 mm i łagodnym pochyleniu profilu mikrotwardości.

6. CONCLUSIONS

Basing on the investigation results obtained, the following conclusions can be formulated:

- 1) *internal stress examinations by the $\sin^2\psi$ method in the top layer of the die for forging synchronizer rings (new one and one after exploitation) has shown that, in a new die revealed advantageous compressive stresses in the examined areas,*
- 2) *the process of exploitation (3500 cycles) has resulted in the change of the stress sign to tensile and a change of the stress magnitude level, as well as significant wear of the working surfaces in the areas under investigation due to abrasion and crack formation as result of thermo-mechanical fatigue,*
- 3) *eddy current examination of the nitrided layer thickness on new die and after exploitation, at the frequency of 3.4 kHz, have proved to be sufficiently accurate for layers with average thickness of about 0.15 to 0.2 mm,*
- 4) *in order to extend the life of synchronizer forging dies, one should consider a modification of the thermochemical treatment technology to form a nitrided layer without precipitations of iron nitrides in the zone of internal nitriding, with a thickness of 0.25÷0.3 mm and mild inclination of the microhardness profile.*

LITERATURA / REFERENCES

- [1] Skrzypek S.J.: Nowe możliwości pomiaru makronaprężeń własnych materiałów przy zastosowaniu dyfrakcji promieniowania X w geometrii stałego kąta padania. Kraków 2002. Rozprawy Monografie 108 AGH Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne.
- [2] Senczyk D., Lis E.: X-ray examination of the stress state in the surface layer of constructional steels, Proc. 4th International Conference - Achievements in the Mechanical and Material Engineering AMME 95, Gliwice – Wiśla (Poland), 1995, p. 295.
- [3] Samolczyk J.: Wyznaczenie naprężeń własnych metodą $\sin^2\psi$ w stemplach do wyciskania przeciwbieżnego wyrobów z cynku. Obróbka Plastyczna Metali 2009 nr 2 s. 38-48.
- [4] Senczyk D.: X-ray diffractometry in the measurement of stresses and elastic properties of polycrystalline materials, Poznan University of Technology, Poznań (Poland), 1995, p. 65.

-
- [5] Heptner H., Stroppe H.: *Magnetische und magnetinduktive Werkstoffprüfung*. Lipsk 1972, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie.
 - [6] Lewińska-Romicka A.: *Badania materiałów metodą prądów wirowych*. Warszawa 2007, Biuro Gamma.
 - [7] Dybiec C.: *Nieniszczący pomiar grubości warstw utwardzonych*. *Metaloznawstwo Obróbka Ciepła Inżynieria Powierzchni* 1987 nr 88 s. 33-35.
 - [8] Pachutko B., Małdziński L.: *Badania nieniszczące warstw azotowanych na stalach narzędziowych za pomocą przyrządów Wirotest*. *Inżynieria Powierzchni* 2006 nr 2 s. 40-46.
 - [9] Pachutko B., Małdziński L.: *Ocena grubości warstw azotowanych na stalach 38HMJ i WCL za pomocą przyrządów Wirotest*. *Obróbka Plastyczna Metali* 2010 nr 1 s. 21-35.
 - [10] Pachutko B.: *Badania wpływu chropowatości powierzchni po azotowaniu gazowym na wskazania przyrządu wiropądowego*. *Obróbka Plastyczna Metali* 2011 nr 4 s. 227-243.