



Badania struktury i naprężeń własnych w grzybkach zaworów silników spalinowych

Studies of structure and internal stresses in internal combustion engine poppet valve heads

(1) Jarosław Samolczyk^{1*}, (2) Beata Pachutko¹, (3) Eryk Gralak², (4) Henryk Woźniak³

¹ Instytut Obróbki Plastycznej, ul. Jana Pawła II 14, 61-139 Poznań, Poland

² Heiche Polska Sp. z o.o., ul. Jarzębinowa 2, 55-200 Stanowice, Poland

³ Obróbka Plastyczna Metali Henryk Woźniak, ul. Jana Pawła II 14, 61-139 Poznań, Poland

Informacje o artykule

Data przyjęcia: 25.05.2015

Data recenzji: 29.06.2015

Data akceptacji: 30.09.2015

Wkład autorów

- (1) Autor artykułu, koncepcji i założeń, wykonawca pomiaru naprężeń własnych
- (2) Współautor artykułu, metodyki, wykonawca badań metalograficznych
- (3) Dostarczenie materiału do badań
- (4) Współautor artykułu

Streszczenie

W pracy przedstawiono wyniki badań przeprowadzonych na talerzykach zaworów w stanie przed nałożeniem i po nałożeniu powłoki chromowej na trzonek zaworu silnika spalinowego. Badane zawory silnikowe wykonano w całości ze stali zaworowej X45CrSi9-3 (1.4718) w procesie elektrospęczania i procesie kucia na gorąco. Fazowany pręt jest nagrzewany indukcyjnie i spęczany, a po tym zabiegu umieszczany jest w matrycy i odkuty. Tak przygotowany zawór trafia do pieca, gdzie jest wygrzewany w temperaturze 800°C w celu usunięcia naprężeń, jakie powstały podczas procesu kucia. Ostatnią z operacji jest proces indukcyjnego hartowania przyłgni talerzyka, który ma na celu zwiększenie twardości tego elementu [1–3]. Kształtowanie zaworów z wykorzystaniem procesu elektrospęczania i kucia na gorąco mimo, że od dawna jest powszechnie stosowane, to często naraża producentom silników wiele trudności technologicznych. Przeprowadzono pomiary naprężeń własnych metodą rentgenowską, badania mikro-struktury za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego oraz pomiary twardości. Uzyskano informacje, czy proces technologiczny wpływa na powstawanie dużych dodatnich naprężeń własnych; odkształcanie na gorąco i prędkość odkształcania wywołują niejednorodność mikrostruktury i są źródłem naprężeń własnych w przekroju poprzecznym talerzyka zaworu. Stwierdzono, że nie ma istotnych różnic w stanie naprężeń własnych, powstałych na skutek zmian strukturalnych w talerzyku zaworu, w stanie przed nałożeniem i po nałożeniu powłoki chromowej na trzonek zaworu.

Słowa kluczowe: zawór silnika spalinowego, naprężenia własne, martenzyt, węgliki, ferryt, profil twardości

Article info

Received: 25.05.2015

Reviewed: 29.06.2015

Accepted: 30.09.2015

Abstract

The present paper presents the results of studies conducted on valve disks before and after deposition of a chromium coat onto the stem of an ICE poppet valve. Studied poppet valves were made entirely of X45CrSi9-3 valve steel (1.4718) in the process of electro-upsetting and in the process of hot forging. A chamfered rod is heated by induction and upset forged, and after this process, it is placed in a die and forged. A valve prepared in this way is placed in a furnace, where it is held at a temperature of 800°C in order to remove stresses created during the forging process. The final operation is the process of quenching the seat face of the disk by induction, which has the purpose of increasing the hardness of this component [1–3]. Despite the fact that valve shaping using the electro-upsetting and hot forging process has been universally applied for a long time, it often poses many technological difficulties for engine manufacturers. Measurements of internal stresses were conducted using the X-ray method, microstructure investigations were carried out using a scanning electron microscope, and hardness mea-

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

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

Authors' contribution

- (1) Author of the article, concept and assumptions, residual stress investigation
 (2) Co-author of the article, methods, metallographic investigation
 (3) Provider of test material
 (4) Co-author of the article

surements were conducted. Information was obtained on whether the technological process has an impact on the creation of large positive internal stresses; hot deformation and strain rate cause heterogeneity of the microstructure and are the source of internal stresses in the valve disk's cross-section. It was stated that there are not significant differences in the state of internal stresses created as a result of structural changes in the valve disk, in a state before and after deposition of a chromium coat onto the valve stem.

Keywords: internal combustion engine poppet valve, internal stresses, martensite, carbides, ferrite, hardness profile

1. WSTĘP

Rozwój silników spalinowych ukierunkowany jest między innymi na: ciągle rosnące wymagania odnośnie ich osiągnięć (wskaźnik mocy jednostkowej), ograniczanie emisji toksycznych składników spalin i nietoksycznego CO₂ (efekt cieplarniany), zachowanie odpowiedniej trwałości jednostki napędowej.

Zadaniem zaworów jest odsłanianie w ściśle określonym czasie wlotów do kanałów dolotowych i wylotowych, a co za tym idzie, umożliwienie wymiany ładunku w cylindrze. Natomiast zadaniem gniazd zaworowych jest przede wszystkim uszczelnienie zaworów jak również umożliwienie odprowadzenia nadmiaru ciepła z powierzchni ich przylgni do głowicy silnika [1–3].

Poruszający się osiowo zawór dolotowy i wylotowy składa się z następujących części (rys. 1) [1]:

- trzonka,
- przejścia pomiędzy trzonkiem a grzybkiem,
- grzybka nazywanego również talerzykiem.

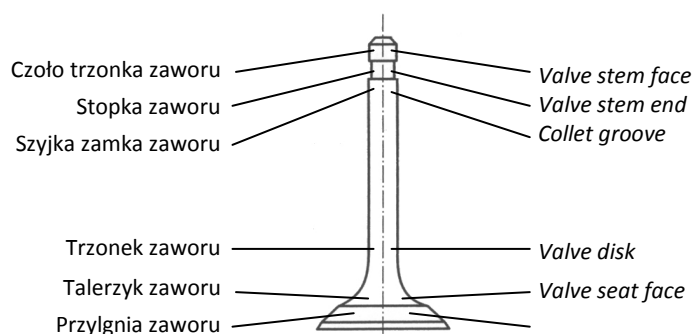
1. INTRODUCTION

The development of internal combustion engines is oriented towards, among other things: continuously growing requirements pertaining to their performance (power density), limitation of toxic exhaust emissions and non-toxic CO₂ (greenhouse effect), maintenance of appropriate lifetime of the drive unit.

Valves serve to open inlet and outlet ports at specific times, thus enabling charge exchange in the cylinder. Valve seats are tasked with sealing valves and making it possible to carry off excess heat from the surface of their seat face to the engine head [1–3].

The axially traveling inlet and outlet valve consists of the following parts (Fig. 1) [1]:

- stem,
- transition between the stem and the head,
- the head, also known as the disk.



Rys. 1. Budowa zaworu silnika spalinowego

Fig. 1. Design of an ICE poppet valve

Zawory silnikowe, które były przedmiotem badań opisanych w tym artykule, wykonano w procesie elektroszczęzania i kucia na gorąco. Najpierw fazowany pręt był nagrzewany induk-

The ICE poppet valves that are the subject of studies described in this paper were made in the process of electro-upsetting and hot forging. First, a chamfered rod was heated by induction and up-

cyjnie i spęczany, a po tym zabiegu umieszczany w matrycy i kuty. Tak przygotowany zawór trafia do pieca gdzie jest wygrzewany w temperaturze 800°C w celu usunięcia naprężeń, powstałych podczas kucia. Ostatnią z operacji jest proces indukcyjnego hartowania przylgni talerzyka, który ma na celu zwiększenie twardości tego elementu. Alternatywną technologią wykonania zaworów jest wyciskanie współbieżne i spęczanie.

Celem przeprowadzonych badań jest określenie stanu naprężeń własnych oraz struktury w talerzyku zaworu silnika spalinowego po procesie obróbki plastycznej i cieplnej oraz wykazanie różnic w stanie naprężeń własnych zaworu w stanie surowym i po nałożeniu warstwy chromu na trzonek zaworu, a także zmian strukturalnych w talerzyku zaworu.

2. BADANY MATERIAŁ I METODYKA BADAŃ

Przedmiotem badań był talerzyk zaworu silnika spalinowego po procesie obróbki plastycznej i obróbce cieplnej. Materiałem zaworu była stal X45CrSi9-3 (1.4718) wg normy PN-EN 10090:2001 – Stale i stopy zaworowe stosowane w silnikach spalinowych. Skład chemiczny stali przedstawiono w tab. 1.

set forged, and after this process, it was placed in a die and forged. A valve prepared in this way is placed in a furnace, where it is held at a temperature of 800°C in order to remove stresses created during the forging process. The final operation is the process of quenching the seat face of the disk by induction, which has the purpose of increasing the hardness of this component. Coextrusion and upsetting is an alternative valve production technology.

The objective of conducted studies was to determine the internal stress state and structure in the ICE valve disk after the plastic forming and heat treatment process as well as to show differences in the valve's stress state between the as-worked condition and condition after deposition of a chromium layer on the valve stem, including structural changes in the valve disk.

2. STUDIED MATERIAL AND METHODOLOGY OF STUDIES

The subject of studies was an ICE poppet valve disk after the plastic forming and heat treatment process. The material of the valve was X45CrSi9-3 steel (1.4718) according to standard PN-EN 10090:2001 – Valve steels and alloys for internal combustion engines. The chemical composition of the steel is presented in Tab. 1.

Tab. 1. Skład chemiczny stali zaworowej

Tab. 1. Chemical composition of valve steel

Materiał / Material	Zawartość pierwiastków, % wag. / Elements content, % wt.						
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni
X45CrSi9-3	0,4–0,5	≤0,6	2,7–3,3	≤0,04	≤0,03	8,0–10,0	≤0,5

Przeprowadzone badania obejmowały:

- pomiary twardości metodą Vickersa od powierzchni w głąb talerzyka zaworu,
- badania mikrostruktury,
- pomiar naprężeń własnych metodą $\sin^2\Psi$.

Obserwacje mikrostruktury próbek wykonano przy użyciu skaningowego mikroskopu elektronowego Inspect S (FEI). Pomiary mikro-twardości wyznaczono za pomocą twardościomierza Vickersa FM-800 (FUTURE-TECH Corp.).

Conducted studies included:

- Vickers hardness measurements from the surface into the valve disk,
- microstructure investigations,
- measurement of internal stresses using the $\sin^2\Psi$ method.

Investigations of the microstructure of samples were carried out using an Inspect S (FEI) scanning electron microscope. Microhardness measurements were carried out using an FM-800 (FUTURE-TECH Corp.) Vickers hardness tester.

Do pomiaru naprężeń własnych zastosowano metodę rentgenowską $\sin^2 \Psi$ [4] za pomocą zmodernizowanego aparatu rentgenowskiego Kristalloflex 4 z goniometrem EG 4/201.

The $\sin^2 \Psi$ method was applied to measure internal stresses [4] by means of a modernized Kristalloflex 4 X-ray apparatus with an EG 4/201 goniometer.

3. WYNIKI BADAŃ

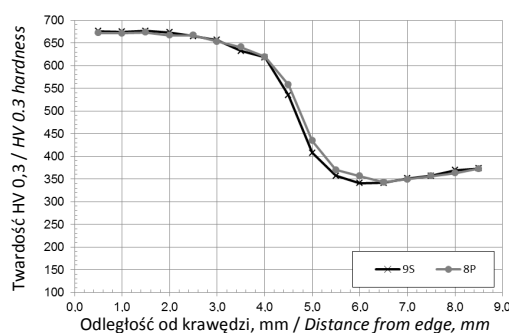
3. TEST RESULTS

3.1. Badania rozkładów twardości

3.1. Hardness distribution tests

Pomiary twardości HV 0,3 wykonano na próbkach oznaczonych 9S i 8P, poddanych badaniom struktury, od krawędzi zewnętrznej grzybków zaworu w kierunku krawędzi wewnętrznej. Wyniki pomiarów twardości przedstawiono na rys. 7.

Measurements of HV 0.3 hardness were conducted on samples marked 9S and 8P, subjected to microstructure investigations, from the exterior edge of valve disks in the direction of the interior edge. The results of hardness measurements are presented in Fig. 7.



Rys. 2. Rozkłady twardości na przekrojach poprzecznych talerzyków zaworu, próbki 9S i 8P

Fig. 2. Hardness distributions on cross-sections of valve disks, samples 9S and 8P

Rozkłady twardości HV 0,3 na przekrojach poprzecznych próbek pobranych z talerzyków zaworu (oznaczonych 9S i 8P) są niemal identyczne. Największa twardość przy krawędzi zewnętrznej obu grzybków wyniosła ok. 670 HV 0,3. Twardość przy krawędzi wewnętrznej talerzyków zaworu wyniosła ok. 370 HV 0,3. Utwardzenie materiału talerzyków (po spęczaniu i kuciu) obejmowało obszar od krawędzi zewnętrznej do ok. 4 mm (rys. 2).

HV 0.3 hardness distributions on cross-sections of samples collected from valve disks (marked 9S and 8P) are nearly identical. The greatest hardness near the exterior edge of both disks amounted to approx. 670 HV 0.3. The greatest hardness near the interior edge of a valve disk amounted to approx. 370 HV 0.3. Hardening of disk material (after upsetting and forging) covered an area from the exterior edge up to approx. 4 mm (Fig. 2).

3.2. Badania mikrostruktury talerzy grzybków zaworu

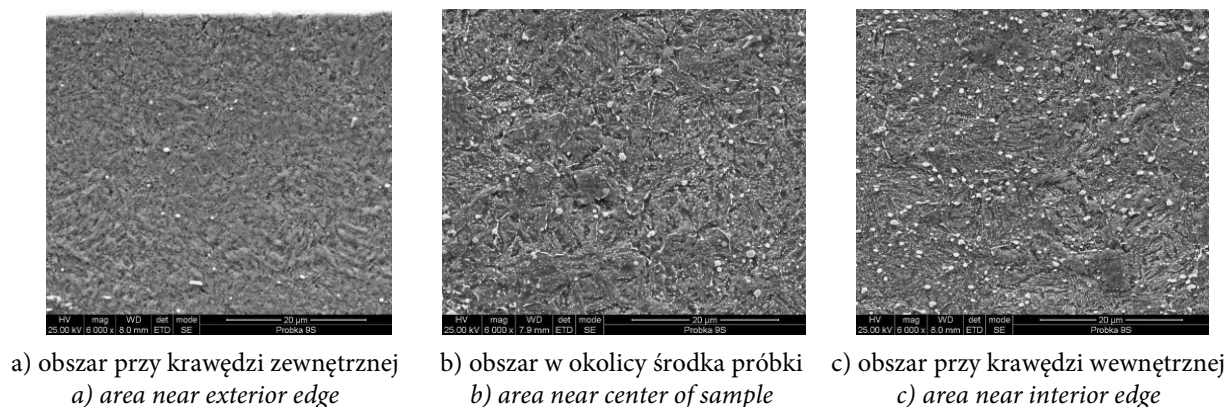
3.2. Microstructure investigations of valve disks

Badania te wykonano za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM) na próbkach (zgładach metalograficznych) 9S i 8P pobranych poprzecznie z talerzyków zaworu. Zgłady trawiono w odczynniku będącym alkoholowym roztworem kwasu solnego z dodatkiem

These investigations were performed using a scanning electron microscope (SEM) on samples (metallographic specimens) 9S and 8P, collected crosswise from valve disks. Specimens were etched in a reagent being an alcohol solution of hydrochloric acid with the addition of iron chlo-

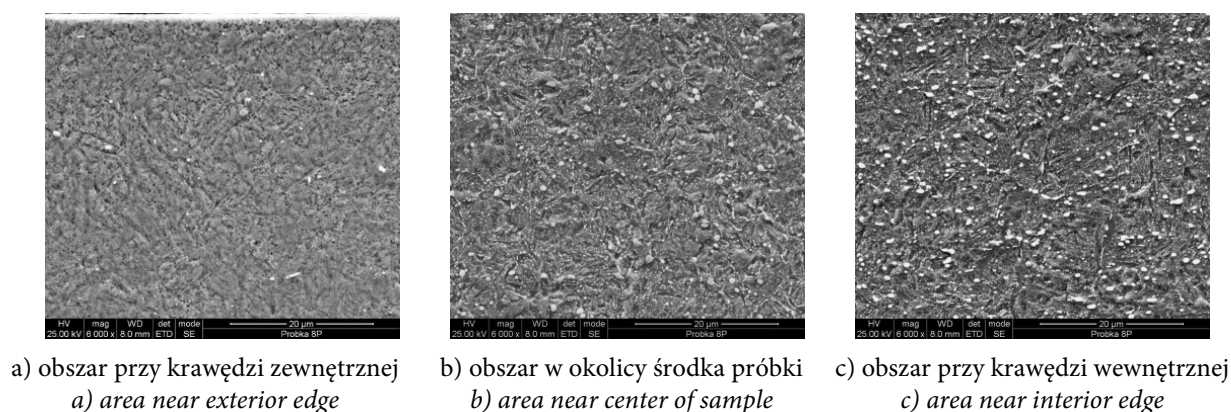
chlorku żelaza. W badaniach stosowano detektor elektronów wtórnych (SE) przy napięciu 25 kV, odległości roboczej $WD=8$ mm i powiększeniu obrazu 6000x. Wyniki badań struktury próbek pokazano na rys. 5 i 6.

ride. A secondary electron detector was used in studies at a voltage of 25 kV, working distance $WD=8$ mm, and image magnification 6000x. The results of sample structure investigations are shown in Fig. 5 and 6.



Rys. 3. Struktura próbki 9S w różnych obszarach przekroju poprzecznego talerza grzybka zaworu, SEM

Fig. 3. Structure of 9S sample in different areas of the valve disk cross-section, SEM



Rys. 4. Struktura próbki 8P w różnych obszarach przekroju poprzecznego talerza zaworu, SEM

Fig. 4. Structure of 8P sample in different areas of the valve disk cross-section, SEM

Strukturę talerzyków zaworu przy powierzchni zewnętrznej stanowi martenzyt i węgliki stopowe, które nie uległy rozpuszczeniu w austenicie podczas cyklu hartowania przylgni talerzyka zaworu. Przy powierzchni wewnętrznej i w okolicy środka talerza zaworu zaobserwowano ferryt i węgliki stopowe. Niektóre węgliki wydzieliły się na granicach byłych ziaren austenitu (rys. 5 i 6).

The structure of valve disks near the exterior edge is made up of martensite and alloy carbides that were not dissolved in austenite during the valve seat face quenching cycle. Ferrite and alloy carbides were observed near the interior surface and in the area of the disk's center. Certain carbides precipitated on the boundaries of former austenite crystallites (Fig. 5 and 6).

3.3. Pomiar naprężeń własnych metodą $\sin^2\Psi$

Pomiary kontrolne przeprowadzono na odprężonym proszku żelaza ARMCO.

3.3. Measurement of internal stresses using the \sin^2 method Ψ

Control measurements were conducted on stress-relieved ARMCO iron powder.

Zapisy dyfrakcyjne wykonano stosując:

- promieniowanie $Cr_{K\alpha}$,
- napięcie lampy 40kV,
- natężenie 16 mA,
- zakres zapisów dyfrakcyjnych: 144° – 152° , z krokiem $0,5^\circ$ i czasem zliczania $INT=30$ s,
- zmiany kątów $\psi=-50^\circ$, -43° , -36° , -29° , -18° , $0,0^\circ$.

Otrzymane profile linii dyfrakcyjnych stali zaworowej wygładzono, odejmowano tło, składową α_2 , i obliczono maksimum, z których wyznaczono odległość międzypłaszczyznową d_{211} , stanowiącą podstawę do obliczeń naprężeń.

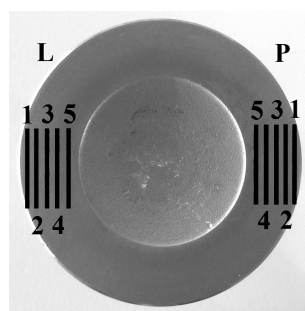
Miejsca wykonania pomiarów naprężeń własnych na talerzyku zaworu pokazano na rys. 5.

Diffraction readings were taken using:

- *radiation $Cr_{K\alpha}$,*
- *tube voltage 40kV,*
- *intensity 16 mA,*
- *range of diffraction readings: 144° – 152° , with step 0.5° and counting time $INT=30$ s,*
- *angle changes $\psi=-50^\circ$, -43° , -36° , -29° , -18° , 0.0° .*

Diffraction line profiles obtained for valve steel were smoothed, background noise and component α_2 were removed, and the maximum was calculated, from which inter-plane distance d_{211} was determined, and this distance constituted the basis for stress calculations.

Points of internal stress measurement on the valve disk are shown in Fig. 5.



Rys. 5. Miejsca wykonania pomiarów naprężeń własnych na talerzyku zaworu

Fig. 5. Points of internal stress measurement on valve disk

Eksperymentalnie sprawdzono stan naprężeń własnych na 10 talerzykach zaworów silników spalinowych w dobrze zdefiniowanych warunkach technologicznych (5 zaworów w stanie surowym i 5 po nałożeniu warstwy chromu na trzonek zaworu). Stanowiły one zestaw testujący, w których weryfikowano stan naprężeń własnych rozciągających i ściskających (tab. 2).

The internal stress state was verified experimentally in 10 ICE poppet valve disks under well-defined process conditions (5 valves in as-worked state and 5 after deposition of chromium layer on valve stem). These disks constituted the testing set in which the state of internal tensile and compressive stresses was verified (Tab. 2).

Tab. 2. Wyniki pomiarów naprężeń własnych na talerzykach zaworów

Tab. 2. Results of internal stress measurements on valve disks

Numer zaworu / Valve number	Strona / Page	Naprężenia własne, MPa / Internal stresses, MPa				
		Odległość od krawędzi zaworu, mm / Distance from valve edge, mm				
		1,5	3	4,5	6	7,5
1S	L	356	159	67	-41	-193
	P	331	103	79	-111	-156
3S	L	229	128	-23	-104	-195
	P	312	141	-69	-145	-254
5S	L	287	178	-56	-137	-235
	P	325	127	-42	-186	-260
7S	L	311	152	-29	-119	-170
	P	310	174	-50	-156	-198

Numer zaworu / Valve number	Strona / Page	Naprężenia własne, MPa / Internal stresses, MPa				
		Odległość od krawędzi zaworu, mm / Distance from valve edge, mm				
		1,5	3	4,5	6	7,5
9S	L	320	121	-44	-139	-225
	P	264	145	33	-101	-197
2P	L	330	119	38	-80	-189
	P	226	113	-35	-135	-175
4P	L	187	71	-49	-129	-199
	P	223	78	-31	-179	-231
6P	L	334	98	12	-102	-185
	P	278	103	37	-67	-158
8P	L	318	83	-69	-117	-243
	P	350	87	-39	-132	-191
10P	L	270	77	9	-173	-249
	P	325	69	-23	-125	-229

Oznaczenia / Markings:

S – zawór bez powłoki chromowej / valve without chromium coat

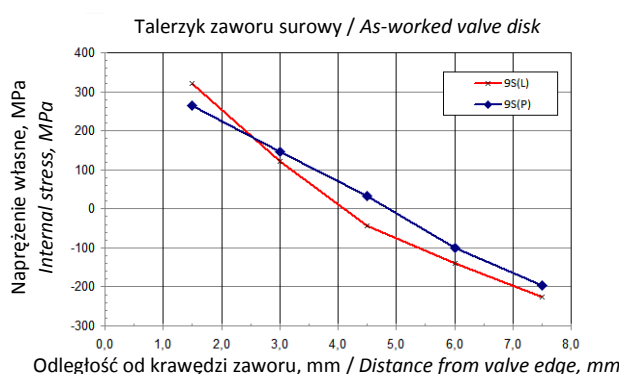
P – zawór po nałożeniu powłoki chromowej na trzonek / valve after deposition of chromium coat onto stem

Na podstawie wyników zmierzonych w tab. 2 (zawór bez powłoki chromowej i z powłoką chromową na trzonku zaworu) wynika, że wartości naprężeń własnych, mierzone wzdłuż średnicy talerzyka zaworu silnika spalinowego są niejednorodne. W warstwie, w okolicy krawędzi talerzyka zaworu 1S (rys. 5 – punkt pomiarowy 1) stwierdzono występowanie naprężeń rozciągających o maksymalnej wartości ok. 360 MPa, natomiast w warstwie środkowej (rys. 5 – punkt pomiarowy 3) naprężenia rozciągające były znacznie mniejsze, niż przy krawędzi talerzyka, albo istniały naprężenia ściskające o podobnej wartości. W dalszych warstwach występowały naprężenia ściskające o maksymalnej wartości ok. 260 MPa (dla zaworu 5S).

Rozkład naprężeń własnych w zaworach 9S i 8P przedstawiono graficznie na rys. 6 i 7.

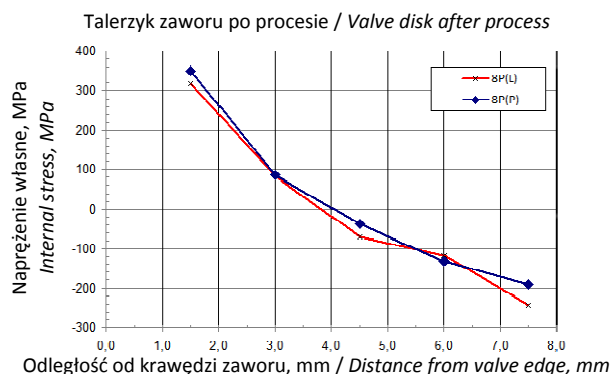
Based on the results measured in Tab. 2 (valve without chromium coat and with chromium coat on valve stem), it results that the internal stress values measured along the diameter of an ICE poppet valve disk are heterogeneous. The presence of tensile stresses with a maximum value of approx. 360 MPa was determined in the layer near the edge of the disk in valve 1S (Fig. 5 – measuring point 1), and in the central layer (Fig. 5 – measuring point 3), tensile stresses were significantly lesser than near the disk's edge or compressive stresses of a similar value were present. Compressive stresses with a maximum value of approx. 260 MPa were present in further layers (for valve 5S).

The distribution of internal stresses in 9S and 8P valves is presented graphically in Fig. 6 and 7.



Rys. 6. Naprężenia własne w talerzyku zaworu surowego

Fig. 6. Internal stress in valve disk, as-worked



Rys. 7. Naprężenia własne w talerzyku zaworu po naniesieniu powłoki

Fig. 7. Internal stress in valve disk after coat deposition

Na podstawie przedstawionych danych można stwierdzić, że nastąpiły nieznaczne różnice w rozkładzie naprężeń w próbkach 9S i 8P, mogą być one spowodowane nagrzewaniem indukcyjnym przylgni talerzyka i następującym po nim chłodzeniem. Przy nagrzewaniu indukcyjnym mogą występować przemiany strukturalne i fazowe, a podczas intensywnego chłodzenia przemiany bezdyfuzyjne. Zatem proces nanoszenia powłok na trzpień zaworu nie wpływa na stan naprężeń własnych w talerzyku zaworu. Jest on skutkiem zmian strukturalnych po hartowaniu przylgni. Naprężenia własne mają wpływ na zjawiska strukturalne w talerzykach zaworów i zmiany np. twardości (rys. 2), prędkości pęknięcia i wytrzymałości zmęczeniowej [5].

4. WNIOSKI

Z przeprowadzonych badań wynika:

- nie stwierdzono różnic w rozkładach twardości HV 0,3 na przekrojach poprzecznych badanych talerzyków w stanie przed i po naniesieniu powłoki chromowej,
- struktura talerzyka zaworu po hartowaniu indukcyjnym przylgni w warstwie zewnętrznej składa się z martenzytu i węglków stopowych, natomiast w rdzeniu zaworu z ferrytu i węglków stopowych,
- proces nanoszenia powłok na trzpień zaworu nie miał wpływu na stan naprężeń własnych w talerzykach zaworów.

Based on presented data, it can be stated that slight changes in stress distribution occurred in samples 9S and 8P, and they may be caused by induction heating of the valve seat face and the cooling following this operation. Structural and phase transitions may occur during induction heating, and non-diffusive transitions may occur during intensive cooling. Therefore, the process of depositing coats onto the valve stem does not have an impact on the internal stress state in the valve disk. This state results from structural changes after annealing of the seat face. Internal stresses have an impact on structural phenomena in valve disks and on changes of e.g. hardness (Fig. 2), crack growth rate, and fatigue strength [5].

4. CONCLUSIONS

Conducted studies allow for the statement that:

- *there are no differences between HV 0.3 hardness distributions on cross-sections of studied disks in a state before and after deposition of the chromium coat,*
- *the structure of the exterior layer of a poppet valve disk after induction quenching of the seat face consists of martensite and alloy carbides, and of ferrite and alloy carbides in the valve's core,*
- *the process of depositing coats onto the valve stem does not have an impact on the internal stress state in valve disks.*

LITERATURA

- [1] Kijewski, Jan 1978. *Silniki spalinowe*. Warszawa: Wydawnictwo Szkolne Pedagogiczne.
- [2] Ubysz, Aleksander 1998. *Współczesne silniki samochodowe*. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej
- [3] Wencelis Jan, Migdacz Henryk 2003. „Zawory bimetalowe silników spalinowych”. *Przegląd Mechaniczny* LXII (7-8) : 41-46.
- [4] Glocker, Richard 1971. *Materialprüfung mit Röntgen-strahlen unter besonderer Berücksichtigung der Rönt-genmetall-kunde*. Berlin: Springer.
- [5] Skrzypek Stanisław Jan 2002. *Nowe możliwości pomiaru makro-naprężeń własnych materiałów przy zastosowaniu dyfrakcji promieniowania X w geometrii stałego kąta padania*. Kraków: UWN-D.

REFERENCES

- [1] Kijewski, Jan 1978. *Silniki spalinowe*. Warszawa: Wydawnictwo Szkolne Pedagogiczne.
- [2] Ubysz, Aleksander 1998. *Współczesne silniki samochodowe*. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej
- [3] Wencelis Jan, Migdacz Henryk 2003. „Zawory bimetalowe silników spalinowych”. *Przegląd Mechaniczny* LXII (7-8) : 41-46.
- [4] Glocker, Richard 1971. *Materialprüfung mit Röntgen-strahlen unter besonderer Berücksichtigung der Rönt-genmetall-kunde*. Berlin: Springer.
- [5] Skrzypek Stanisław Jan 2002. *Nowe możliwości pomiaru makro-naprężeń własnych materiałów przy zastosowaniu dyfrakcji promieniowania X w geometrii stałego kąta padania*. Kraków: UWN-D.

