



Wpływ nagniatania i temperatury azotowania jonowego na właściwości warstwy dyfuzyjnej stali 38HMJ

The influence of burnishing and the temperature of ion nitriding on the properties of the diffusion layer of 38 HMJ steel

L. Berkowski*

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

Informacje o artykule

Data przyjęcia: 15.07.2014

Data recenzji: 26.10.2014

Data akceptacji: 16.03.2015

Streszczenie

Praca przedstawia wyniki badań dotyczących oceny wpływu powierzchniowego odkształcenia plastycznego i obniżonej temperatury azotowania jonowego na właściwości warstwy wierzchniej stali do azotowania 38HMJ. Do powierzchniowego umacniania warstwy wierzchniej próbek zastosowano trzy sposoby nagniatania: kulką, głowicą wielorolkową oraz nagniatanie strumieniowe. Nagniatanie kulką wałków o średnicy 17,5 mm prowadzono z pomocą specjalnego przyrządu zamocowanego na tokarce. Kulki o różnych średnicach gwarantowały różną głębokość umocnienia. Pozostałe parametry nagniatania były stałe. Nagniatanie głowicą firmy Hegenscheidt odbywało się w dwóch przejściach, przy prędkości obrotowej 450 obr/min i posuwie, zależnym od konstrukcji przyrządu. Gniot zależał od naddatków na próbkach. Nagniatanie strumieniowe prowadzono na powierzchni płaskiej próbek, wyciętych z wałka o średnicy 45 mm, z pomocą urządzenia pneumatycznego, śrutem stalowym ciętym, o zaokrąglonych krawędziach. Parametrami śrutowania były: średnica dyszy, ciśnienie powietrza i odległość próbki od dyszy. Czas ekspozycji gwarantował różną głębokość odkształcenia. Azotowanie jonowe prowadzono w piecu typu IONIMP. Skutki obróbki oceniano pod mikroskopem świetlnym oraz metodą pomiaru twardości z pomocą twardościomierza ZWICK 3212. Parametry geometrii powierzchni wyznaczano z pomocą profilometru Taylor-Hobson. Badania wykazały, że każdy w wymienionych sposobów nagniatania zmieniał geometrię powierzchni w charakterystyczny dla siebie sposób, a azotowanie jonowe powodowało: przy małej chropowatości po obróbce plastycznej – wzrost, a przy dużej (nagniatanie strumieniowe) – zmniejszenie parametrów chropowatości. Doświadczenia wykazały, że wpływ odkształcenia plastycznego zanika po azotowaniu w temperaturze 450°C; niewielki wpływ odkształcenia plastycznego na właściwości warstwy wierzchniej można zauważyć po azotowaniu jonowym w niższej temperaturze 350 i 400°C. Ponadto, w próbkach azotowanych jonowo w temperaturze 450°C, niezależnie od obróbki powierzchniowej, zaobserwowano cienką warstwę azotków.

Słowa kluczowe: nagniatanie, azotowanie jonowe, temperatura, właściwości i struktura warstwy wierzchniej

Article info

Received: 15.07.2014

Reviewed: 26.10.2014

Accepted: 16.03.2015

Abstract

The paper presents the results of investigation concerning the assessment of surface plastic deformation and reduced ion nitriding temperature on the properties of the surface layer of 38HMJ steel, traditional one for nitriding. Surface straining of the surface layer of the samples has been effected with the use of three ways of burnishing: globular burnishing, roller burnishing and shot peening. Globular burnishing of shafts with the diameter of 17.5 mm been effected by means of a special device fixed on a lathe. Balls of various diameters have guaranteed various depth of consolidation. The other parameters of burnishing were constant. Burnishing with the Hegenscheidt head has been effected in two passes with the rotational speed of 450 rpm and feed depending on the device design. The draft depended on the allowances on the samples. Shot peening has been performed on the flat surface of the samples, cut out of a 45 mm diameter shaft, flat surface of the samples, cut out of a 45 mm diameter shaft, with the use of a pneumatic device, with rounded edges cut shot. The shot peening parameters were as follows: nozzle diameter, air pressure and the sample distance from the nozzle. The time of exposure guaranteed various depth of deformation. Ion nitriding has been performed in a furnace typed IONIMP. The results of the treatment have

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

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

been assessed under an optical microscope and by the method of hardness measurement by means of a hardness tester, ZWICK 3212. The parameters of the surface geometry have been determined with the use of a Taylor-Hobson profile measurement gauge. Each of the three ways has changed the surface geometry in its own way. Ion nitriding has resulted in: in the case of low roughness after plastic treatment, increase of the roughness parameters; in the case of high roughness (shot peening), reduction of the roughness parameters. Experiments have shown that the influence of plastic deformation is none after nitriding at the temperature of 450°C; a slight influence of plastic deformation on the properties of the surface layer can be observed after ion nitriding at lower temperature of 350 and 400°C. Moreover, a thin layer of nitrides has been found in the samples ion nitrided at 450°C, regardless of the surface treatment.

Keywords: *burnishing, ion nitriding, temperature, surface layer properties and structure*

1. WSTĘP

Rozwój technologii produkcji narzędzi, elementów maszyn i pojazdów wiąże się z integracją wielu klasycznych już technik wytwarzania, zwłaszcza tych, wpływających na właściwości materiałów, jak: odlewanie, obróbka plastyczna, obróbka cieplna, i cieplno-chemiczna oraz technik nowej generacji: metalurgii proszków, technik wiązkowych i innych. W ramach pracy [1] starano się stworzyć podstawy do projektowania złożonej technologii obejmującej obróbkę plastyczną powierzchniową i azotowanie jonowe pięciu stali konstrukcyjnych. Założono przy tym, że efektem takiej technologii będą korzystne zmiany warstwy wierzchniej oraz skrócenie czasu wytwarzania wyrobów przez wyeliminowanie procesu wyżarzania i przyspieszenie procesu azotowania, skutkiem wykorzystania zgniotu powodującego generację dróg łatwej dyfuzji, zwiększenie powierzchni właściwej granic ziaren i wzrostu gęstości dyslokacji [2].

Znaczenie obróbki hybrydowej, łączącej umacnianie powierzchni i azotowanie, podkreślano w pracach [3–5]. Interesujące wyniki badań zaprezentowane w projekcie, przedstawione w publikacjach [6–10] wykazały, że powierzchniowe odkształcenie plastyczne, zależnie od gatunku stali i zastosowanej obróbki, przyspiesza dyfuzję i niewykluczone, umożliwia obniżenie temperatury procesu azotowania; ważne w przypadku obróbki stali narzędziowej i stali do ulepszania cieplnego, które charakteryzują się małą odpornością na odpuszczające działanie temperatury. W dalszych badaniach starano się pogłębić wiedzę z tego zakresu.

Mając na uwadze możliwość poszerzenia zakresu zastosowania procesu azotowania jonowego, podjęto próbę oceny wpływu powierzch-

1. INTRODUCTION

The development of the technology of producing tools, parts of machines and vehicles results in integration of many, already classical, manufacturing techniques like casting, plastic forming, heat treatment and thermochemical treatment with the new generation techniques (powder metallurgy, bunch techniques and other ones). Within work [1], attempt has been made at creating basis for designing complex technology comprising plastic forming, surface treatment and ion nitriding of five constructional steels. It has been assumed that such technology will result in advantageous changes of the surface layer and reduction of the product manufacturing time by elimination of the process of annealing and acceleration of the process of nitriding due to the utilisation of cold work causing generation of the ways of easy diffusion, increase of the surface of grain boundaries and increase of dislocation density [2].

The importance of hybrid treatment, combining surface strain and nitriding has been emphasised in works [3–5]. Interesting investigation results demonstrated in the project, presented in works [6–10] have shown that, depending on the steel grade and treatment applied, surface plastic deformation accelerates diffusion and, perhaps, makes it possible to reduce the nitriding temperature, which is important in the case of treatment of tool steel and toughening steel which are characterized by low resistance to the tempering action of temperature. In further investigation attempts have been made to gain more profound knowledge in that scope.

Considering the possibility of extending the range of applying the process of ion nitriding, assessment of the influence of surface plastic strain

niowego umocnienia plastycznego na właściwości warstwy dyfuzyjnej, otrzymanej podczas azotowania w obniżonej temperaturze. W poprzednich badaniach, opublikowanych w pracach [7–9], zastosowano trzy sposoby nagniatania, otrzymując (przed azotowaniem) próbki o różnej geometrii powierzchni. Możliwe, że stan powierzchni (metoda nagniatania) wpłynie na skutki azotowania jonowego stali 38HMJ. Badana stal jest tradycyjnym materiałem konstrukcyjnym przeznaczonym do azotowania. Niniejsze badania miały dać odpowiedź na pytania:

- Czy stan powierzchni próbek wpływa na proces azotowania?
- Czy odkształcenie plastyczne warstwy wierzchniej przyspiesza dyfuzję azotu?
- Jak dalece można obniżyć temperaturę azotowania jonowego by spowodować korzystne zmiany struktury warstwy wierzchniej?

2. ZAKRES PRACY, MATERIAŁ BADANY I JEGO OBRÓBKA

2.1. Materiał badany

Próbki ze stali 38HMJ wykonane były z prętów ulepszonych w hucie o różnej średnicy (około 20 i do śrutowania 45 mm). Skład chemiczny stali podano w tab. 1. Ponieważ pręty o większej średnicy wykazywały podwyższoną twardość 41 HRC, zastosowano dodatkowe odpuszczanie stali w temperaturze 680°C w ciągu 2 godzin (twardość końcowa wyniosła 29HRC i była równa twardości prętów o małych średnicach).

on the properties of the diffusion layer obtained during nitriding at reduced temperature has been undertaken. In previous investigations published in works [7–9], three ways of burnishing have been applied (prior to nitriding) and samples of various surface geometry have been obtained. It is possible that the surface condition (method of burnishing) will influence the results of ion nitriding of the 38HMJ steel. The steel under investigation is a traditional material intended for nitriding. The present investigation was expected to give answers to the following questions:

- Does the surface condition of the samples influence the nitriding process?
- Does plastic deformation of the surface layer accelerate nitrogen diffusion?
- How far can the temperature of ion nitriding be lowered to cause advantageous changes of the surface layer structure?

2. SCOPE OF THE WORK, MATERIAL UNDER INVESTIGATION AND ITS TREATMENT

2.1. Material under investigation

38 HMJ steel samples have been made from bars toughened by the steel mill, with diameters of about 20 and 45 mm. The chemical composition of the steel can be found in Tab. 1. Since the larger diameter bars had higher hardness of 41 HRC, additional tempering of the steel at the temperature of 680°C for 2 hours has been applied (the final hardness was 29 HRC – equal to that of the bars with small diameters).

Tab. 1. Skład chemiczny stali 38HMJ

Tab. 1. Chemical composition of the 38HMJ steel

Średnica próbki [mm] Sample diameter [mm]	Składniki stali [%] Components of the steel [%]					
	C	Mn	Si	Cr	Mo	Al
20	0,35	0,30	0,17	1,50	0,15	0,70
45	0,42	0,60	0,37	1,80	0,25	1,10

2.2. Nagniatanie próbek

Próbki ze stali 38HMJ nagniatano trzema sposobami, jak w pracy [1].

1. **Nagniatanie kulką** – przy pomocy specjalnego przyrządu zamocowanego na tokarce. Celem uzyskania warstwy umocnionej różnej grubości zastosowano kulki o różnych średnicach: 10,35 mm – do głębokiego nagniatania i 12,0 mm – do nagniatania na mniejszą głębokość. Pozostałe parametry obróbki były następujące: prędkość obrotowa próbki $n = 450$ obr/min, posuw wzdłużny $p = 0,04$ mm/obr oraz siła nacisku na kulkę $P_k = 9,8$ kN, jednakowa dla dwóch przypadków nagniatania. Próbki o średnicy 17,5 mm.
2. **Nagniatanie głowicą firmy Hegenscheidt** – w dwóch przejściach, przy prędkości obrotowej $n = 450$ obr/min i posuwie samoczynnym, zależnym od konstrukcji przyrządu. Głębokość odkształcenia zależała od wielkości naddatków na próbkach o średnicy około 15 mm.
3. **Nagniatanie strumieniowe (śrutowanie)** – na próbkach płaskich o średnicy około 45 mm, przeprowadzono na urządzeniu pneumatycznym, śrutem stalowym ciętym z zaokrąglonymi krawędziami, o wymiarach 0,6–1,2 mm. Parametry śrutowania były następujące: średnica dyszy $d = 10$ mm, ciśnienie powietrza $p = 5,066$ bar (5 atm), odległość dyszy od powierzchni obrabianej $l =$ około 400 mm. Intensywność odkształcenia regulowano czasem ekspozycji – 4 i 10 minut.

2.3. Azotowanie jonowe

Obróbkę cieplno-chemiczną próbek przeprowadzono w mieszaninie wodoru i azotu, w piecu typu JONOMP; próbki, na których oceniano parametry chropowatości azotowano w temperaturze 500°C w ciągu 6 godzin, a próbki na których badano rozkłady twardości warstwy dyfuzyjnej – w temperaturze 350, 400 i 450°C w ciągu 10 godzin. Pozostałe parametry procesu azotowania wynosiły: ilość doprowadzonego azotu 80 l/h, ilość doprowadzonego wodoru, odpowiednio – 35 i 37 l/h.

2.2. Burnishing of the samples

Samples of 38HMJH steel have been burnished in three ways as in work [1].

1. **Globular burnishing** – with the use of a special device fixed on a lathe. In order to obtain a strengthened layer of various thickness, balls with various diameters have been used: 10.35 mm for deep burnishing and 12.0 mm for smaller depth burnishing. The other parameters of the treatment were as follows: rotational speed of the specimen, $n = 450$ rpm, longitudinal travel, $t = 0.04$ mm/ rev. and ball pressure force, $P_b = 9.8$ kN, the same for two burnishing cases. Samples with the diameter of 17.5 mm.
2. **Roller burnishing** by means of a head made by Hegenscheidt – on two passes, with the rotational speed of $n = 450$ rpm and automatic travel depending on the design of the device. The depth of deformation depended on the size of the allowances on the samples with the diameter of about 15 mm.
3. **Shot peening** has been effected on flat samples with the thickness of about 45 mm. It has been performed with steel shot with rounded edges, with dimensions of 0.6–1.2 mm. The shot peening parameters were as follows: nozzle diameter, $d = 10$ mm, air pressure, $p = 5.066$ bar (5 atm), nozzle distance from the treated surface, $l =$ about 400 mm. Deformation intensity has been adjusted by means of the exposure time – 4 and 10 minutes.

2.3. Ion nitriding

Thermochemical treatment has been performed in a mixture of hydrogen and nitrogen in a furnace type JONOMP; samples, on which roughness parameters were assessed, were nitrided at 500°C for 6 hours; the ones, on which hardness distributions in the diffusion layer were examined, were nitrided at the temperature of 350, 400 and 450°C for 10 hours. The other parameters of the nitriding process were as follows: quantity of supplied nitrogen 80 l/h, quantity of supplied hydrogen 35 and 37 l/h respectively.

3. METODY BADAWCZE

Badania obejmowały badanie chropowatości powierzchni oraz ocenę skutków nagniatania (różnymi metodami) i azotowania jonowego, na strukturę i właściwości stali 38HMJ. Geometrię powierzchni oceniano z pomocą profilografometru Talysurf firmy Taylor-Hobson przez porównanie parametrów R_a , R_t i S . Skutki obróbki plastycznej i azotowania jonowego w różnej temperaturze analizowano pod mikroskopem świetlnym oraz metodą pomiaru twardości z pomocą twardościomierza firmy ZWICK 3212, stosując penetrator Knoopa i obciążenie 0,981 N (0,1 kG).

4. WYNIKI BADAŃ

Badania obejmowały ocenę zmian geometrii powierzchni próbek skutkiem nagniatania i azotowania jonowego. Zmiany strukturalne po nagniataniu w pewnym stopniu określały stan warstwy wierzchniej przed obróbką cieplno-chemiczną i mogły wpłynąć na proces dyfuzji. W drugiej części oceniono zmiany profilów twardości pod wpływem azotowania jonowego w obniżonej temperaturze.

4.1. Wpływ sposobu nagniatania na właściwości warstwy wierzchniej

Jak wykazały wcześniejsze badania [1, 7–9], nagniatanie istotnie zmienia parametry geometryczne powierzchni obrabianych próbek. W tab. 2 podano parametry geometryczne powierzchni próbek ze stali 40H, przed i po nagniataniu w różny sposób. Próbki o różnych kształtach jak w pracy [1] miały na wstępie (po szlifowaniu) różną chropowatość, która zmieniła się zależnie od rodzaju obróbki. Nagniatanie kulką lub głowicą wielorolkową spowodowało zmniejszenie parametrów chropowatości, natomiast nagniatanie strumieniowe – wyraźny ich wzrost. Zwiększenie intensywności odkształcania spowodowało na ogół zwiększenie nierówności powierzchni.

3. INVESTIGATIONS METHODS

The investigation included examination of the surface roughness and assessment of the effects of burnishing (by various methods) and ion nitriding on the structure and properties of the 38HMJ steel. The surface geometry has been assessed by comparison of the R_a , R_t and S parameters with the use of a Talysurf profile measurement gauge made by Taylor-Hobson. The results of plastic forming and ion nitriding at various temperatures were analysed under an optical microscope and by the method of hardness measurement with the use of a ZWICK 3212 hardness tester, applying Knoop penetrator and a load of 0.981 N (0.1 kG).

4. INVESTIGATION RESULTS

The investigation included assessment of the specimen surface geometry changes as result of burnishing and ion nitriding. To a certain extent, the structural changes after burnishing have defined the condition of the surface layer prior to thermochemical treatment and could influence the process of diffusion. In the second part, changes of the hardness profiles under the influence of ion nitriding at lowered temperature have been assessed.

4.1. The influence of the way of burnishing on the surface layer properties

As shown in earlier investigations, [1, 7–9], burnishing significantly changes the geometrical parameters of the treated samples. In Tab. 2, one can find geometrical parameters of 40H steel samples before and after burnishing in various ways. At the beginning (after grinding), samples of various shapes as in work [1] had various roughness which was changing depending on the kind of treatment. Globular burnishing or roller burnishing has resulted in a reduction of the roughness parameters; shot peening, on the other hand, resulted in clear increase of those parameters. Increase of the deformation intensity has, in general, resulted in a growth of the surface unevenness.

Tab. 2. Parametry chropowatości powierzchni próbek ze stali 40H po różnych obróbkach powierzchniowych [1]
 Tab. 2. Surface roughness parameters of 40H steel samples after various surface treatments [1]

Rodzaj obróbki powierzchniowej / Type of surface treatment		R _a [μm]	R _t [μm]	S [μm]	
nagniatanie kulką / globular burnishing	szlifowana / ground	0,74	5,91	18,99	
	nacisk / pressure	mały / small	0,14	2,04	27,18
		duży / large	0,31	3,01	24,51
nagniatanie głowicą roller burnishing	szlifowana / ground	0,29	2,41	17,6	
	nacisk / pressure	mały / small	0,08	0,98	19,02
		duży / large	0,06	1,48	23,84
nagniatanie strumieniowe shot peening	szlifowana / gGround	0,12	1,19	14,91	
	czas ekspozycji time of exposure	krótki / short	5,45	46,24	103,05
		długi / long	8,27	54,19	79,80

4.2. Wpływ sposobu nagniatania na skutki azotowania jonowego stali 38HMJ

Badania obejmowały pomiary twardości oraz ocenę wpływu nagniatania różnymi metodami na strukturę i twardość warstwy wierzchniej stali 38HMJ. Wstępnie oceniono geometrię powierzchni, mierząc i porównując parametry chropowatości po różnych obróbkach powierzchniowych, oraz wpływ temperatury azotowania na jednostkowy przyrost masy. Ponadto, wyznaczono profile twardości i przeprowadzono obserwacje struktury stali po różnych obróbkach.

4.2.1. Wpływ sposobu nagniatania na geometrię powierzchni i efekt przyrostu masy po azotowaniu jonowym

Próbki obrobione nagniataniem, trzema sposobami (nagniatanie kulką, głowica wielorolkową i nagniatanie strumieniowe) azotowano jonowo w temperaturze 350, 400 i 450°C w ciągu 10 godzin. Zmiany powierzchni próbek po takiej obróbce przedstawiono w tab. 3 oraz na rys. 1. Z badań wynika, że kierunek zmian geometrii powierzchni zależy od metody nagniatania; od parametrów chropowatości powierzchni próbek po wstępnej obróbce mechanicznej. W przypadku małych wartości R_a, R_t i S – po nagniataniu głowicą – azotowanie powoduje wzrost chropowatości, a w przypadku dużych wartości tych parametrów – po nagniataniu strumieniowym – parametry chropowatości R_a, R_t i S, po azotowaniu, są znacznie mniejsze, powierzchnia jest mniej chropowata. Azotowanie próbek nagnia-

4.2. The influence of the way of burnishing on the results of 38HMJ steel ion nitriding

The investigation included hardness measurements and assessment of the influence of various methods of burnishing on the structure and hardness of the surface layer of the 38HMJ steel. The surface geometry was initially assessed by measuring and comparing the roughness parameters after surface treatments and the influence of nitriding temperature on the specific mass increase. Furthermore, hardness profiles have been determined and the steel structure after various treatments has been observed.

4.2.1. The influence of the way of burnishing on the surface geometry and the effect of mass increase after ion nitriding

The samples subjected to burnishing in the three ways (globular, roller and shot peening) have been ion nitrided at the temperature of 350, 400 and 450°C for 10 hours. The changes of the specimen surface after such treatment have been shown in Tab. 3 and in Fig.1. The tests show that the direction of the changes of the surface geometry depends on the burnishing method, on the specimen roughness parameters after initial machining. In the case of low R_a, R_t and S values (after roller burnishing), nitriding results in roughness increase; in the case of low values of those parameters (after shot peening), the roughness parameters, R_a, R_t and S, are much lower after nitriding, the surface is less rough. Nitriding of samples after globular burnishing

tanych kulką daje efekt mieszany; powoduje zwiększenie parametru R_a i zmniejszenie pozostałych.

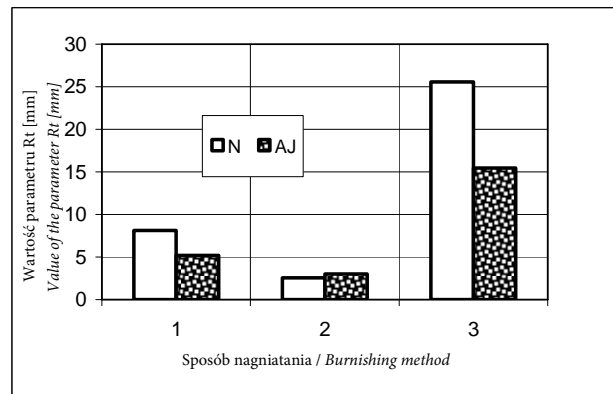
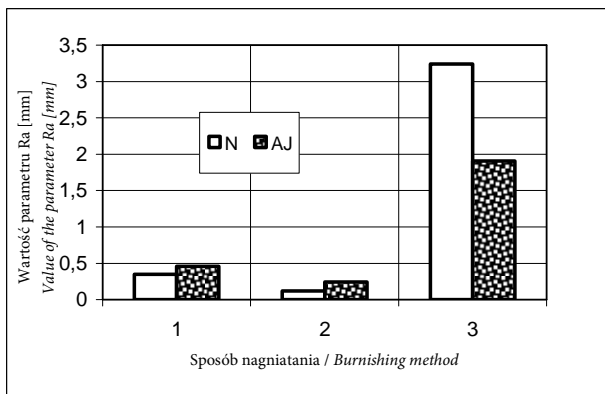
renders the effect of an increase of the R_a parameter and reduction of the other ones.

Tab. 3. Parametry chropowatości powierzchni (R_a , R_t i S) po różnych obróbkach powierzchniowych i azotowaniu jonowym próbek ze stali 38HMJ [1]

Tab. 3. Surface roughness parameters (R_a , R_t and S) after various surface treatments and ion nitriding of the 38HMJ steel samples [1]

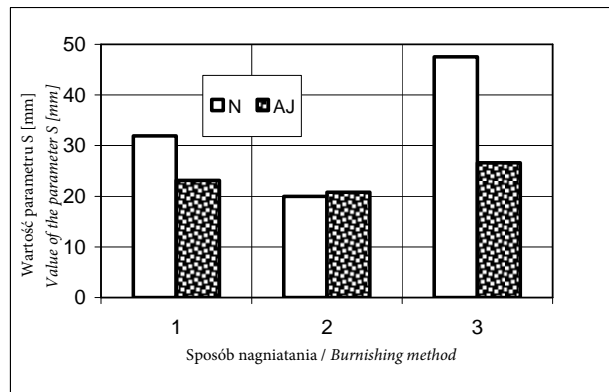
Sposób nagniatania Type of burnishing	Sposób obróbki Method of treatment	R_a [μm]	R_t [μm]	S [μm]
nagniatanie kulką globular burnishing	N	0,35	8,13	31,95
	N+AJ	0,46	5,18	23,11
nagniatanie głowicą roller burnishing	N	0,12	2,56	20,01
	N+AJ	0,24	3,03	20,79
nagniatanie strumieniowe shot peening	N	3,24	25,58	47,48
	N+AJ	1,91	15,46	26,60

N – nagniatanie; AJ – azotowanie jonowe
N – burnishing; AJ – ion nitriding



a)

b)



c)

Rys. 1. Wpływ sposobu nagniatania i azotowania jonowego (jak w pracy [1]) na wartość chropowatości powierzchni stali 38HMJ: a – R_a ; b – R_t ; c – S ; nagniatanie: 1 – kulką; 2 – głowicą, 3 – strumieniowe

Fig. 1. The influence of the way of burnishing and ion nitriding (as in work [1]) on the value of surface roughness of the 38HMJ steel: a – R_a ; b – R_t ; c – S ; burnishing methods: 1 – globular burnishing; 2 – roller burnishing; 3 – shot peening

W tab. 4 przedstawiono wyniki pomiarów przyrostu masy próbek po azotowaniu jonowym w różnej temperaturze. Z tablicy wynika, że po

In Tab. 4, one can find the results of the measurements of mass increase of the samples after ion nitriding at various temperatures. The table

azotowaniu w niższej temperaturze 350 i 400°C przyrost masy jest niezauważalny; stwierdzono jedynie śladowe jej ubytki. Wzrost przyrostu masy wykazano w próbkach azotowanych w temperaturze 450°C, co potwierdziły obserwacje struktury i pomiary twardości.

shows that, after nitriding at lower temperature, 350 and 400°C, the mass increase is imperceptible; only slight mass losses have been detected. Increase of mass growth has been found in samples nitrided at the temperature of 450°C, which has been proved by structure observations and hardness measurements.

Tab. 4. Jednostkowy przyrost masy próbek ze stali 38HMJ nagniatanych, po azotowaniu jonowym w różnej temperaturze
Tab. 4. Specific mass increase in 38HMJ steel samples burnished, after ion nitriding at various temperatures

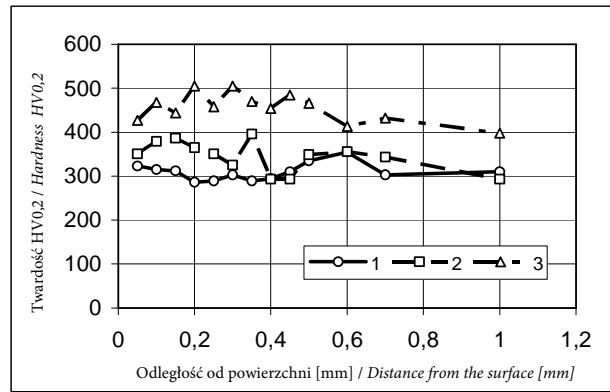
Temperatura azotowania [°C] <i>Nitriding temperature [°C]</i>	Sposób obróbki <i>Method of treatment</i>	Jednostkowy przyrost masy [10^{-4}g/cm^2] <i>Specific mass increase [10^{-4}g/cm^2]</i>
350	bez nagniatania / <i>no burnishing</i>	*-3,5 / -2,2
	nagniatanie kulką / <i>globular burnishing</i>	-1,5
	nagniatanie głowicą / <i>roller burnishing</i>	-9,7
	nagniatanie strumieniowe / <i>shot peening</i>	-3,3
400	bez nagniatania / <i>no burnishing</i>	*0,1 / -0,5
	nagniatanie kulką / <i>globular burnishing</i>	1,1
	nagniatanie głowicą / <i>roller burnishing</i>	-1,6
	nagniatanie strumieniowe / <i>shot peening</i>	-3,9
450	bez nagniatania / <i>no burnishing</i>	*16,7 / 10
	nagniatanie kulką / <i>globular burnishing</i>	12,9
	nagniatanie głowicą / <i>roller burnishing</i>	7,2
	nagniatanie strumieniowe / <i>shot peening</i>	11,4
*Próbki przed nagniataniem kulką i głowicą / przed nagniataniem strumieniowym <i>*Samples prior to globular and roller burnishing / prior to to shot peening</i>		

4.2.2. Wpływ temperatury azotowania jonowego na właściwości warstwy dyfuzyjnej

Oceniano wpływ „obniżonej temperatury” azotowania jonowego na twardość (rozkłady twardości) oraz na strukturę stali 38HMJ po różnych zabiegach nagniatania. Profile twardości warstwy wierzchniej próbek w stanie przed azotowaniem pokazano na rys. 2. Z rozkładów tych wynika, że zmiany twardości próbek w strefie odkształconej są bardzo nieregularne, a umocnienie trudno zauważalne; niewielki wzrost twardości wykazywały próbki po nagniataniu strumieniowym.

4.2.2. The influence of the ion nitriding temperature on the properties of the diffusion layer

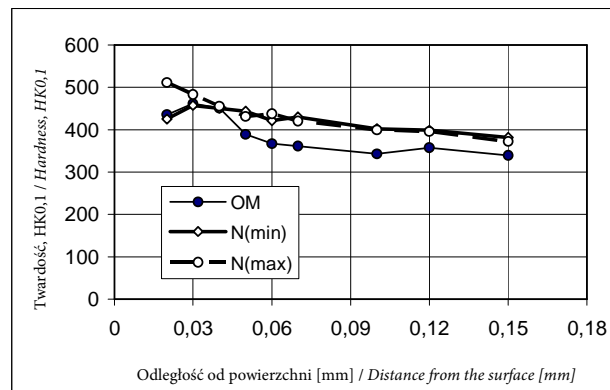
The influence “reduced temperature” of ion nitriding on the hardness (hardness distributions) and on the structure of the 38HMJ steel after various burnishing operations has been assessed. Hardness profiles of the surface layer in the samples prior to nitriding are shown in Fig. 2. The distributions indicate that the changes of the sample hardness in the deformed zone are very irregular and consolidation hardly perceptible; slight hardness increase has been found in the samples after shot peening.



Rys. 2. Rozkłady twardości po nagniataniu stali 38HMJ: 1 – kulką; 2 – głowicą; 3 – strumieniowym
 Fig. 2. Hardness distributions after the 38HMJ steel burnishing: 1 – globular burnishing; 2 – roller burnishing; 3 – shot peening

Skutki azotowania jonowego w temperaturze 350°C, niezależnie od obróbki powierzchniowej, były nieznaczne. Przykładem mogą być rozkłady twardości próbek nagniatanych głowicą wielorolkową (rys. 3). Większą twardość próbek nagniatanych, w całym ocenianym przedziale, niezależnie od stopnia odkształcenia, spowodowana jest umocnieniem zgniotowym. Z rysunku wynika ponadto minimalny wpływ procesu azotowania na profil twardości, a twardość w badanym przedziale zależy przede wszystkim od sposobu nagniatania; w przypadku nagniatania strumieniowego była największa – przekraczała 500 HK0,1.

There were only inconsiderable results of ion nitriding at the temperature of 350°C, regardless of surface treatment. An example can be found in the hardness distributions in the samples subjected to roller burnishing (Fig. 3). The higher hardness of the burnished samples, in the whole assessed range, regardless of the degree of deformation, is a result of strain hardening. The Figure also shows a minimum influence of the nitriding process on the hardness profile and hardness in the range under examination depends, first of all, on the method of burnishing; the highest one was in the case of shot peening and it exceeded 500 HK0.1.



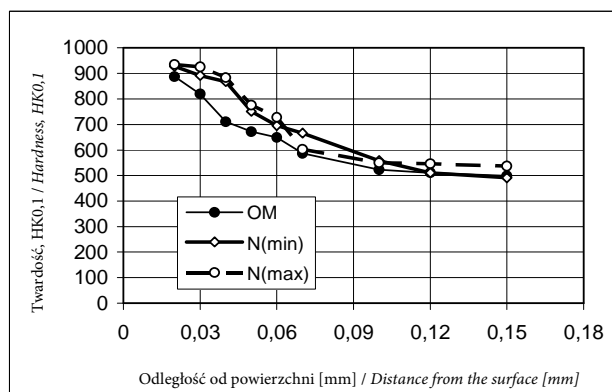
Rys. 3. Rozkłady twardości po nagniataniu głowicą wielorolkową różnym gniotem i po azotowaniu jonowym w temperaturze 350°C; OM – obróbka mechaniczna (bez nagniatania), nagniatanie z gniotem: małym (N_{min}) i dużym (N_{max})
 Fig. 3. Hardness distributions after roller burnishing with various draft and after ion nitriding at the temperature of 350°C; OM – machining (without burnishing), burnishing with small draft (N_{min}) and large one (N_{max})

W próbkach azotowanych jonowo w temperaturze 400°C skutki dyfuzji azotu, w próbce nagniatanej strumieniowo, były wyraźniejsze; wzrost twardości o około 400 jednostek HK0,1. Na większej głębokości, niezależnie od stopnia odkształcenia, twardość była zbliżona (rys. 4). Podobne wyniki uzyskano po nagniataniu kulką

In the samples ion nitrided at 400°C, the results of nitrogen diffusion were more clear; hardness increase by about 400 HK0.1 units. At a larger depth, hardness was similar regardless of the degree of deformation (Fig. 4). Similar results have been obtained after globular burnishing and roller burnishing; in the latter case, burnishing

i głowicą; w tym drugim przypadku intensywność nagniatania spowodowała większe umocnienie warstwy wierzchniej.

intensity resulted in more consolidation of the surface layer.

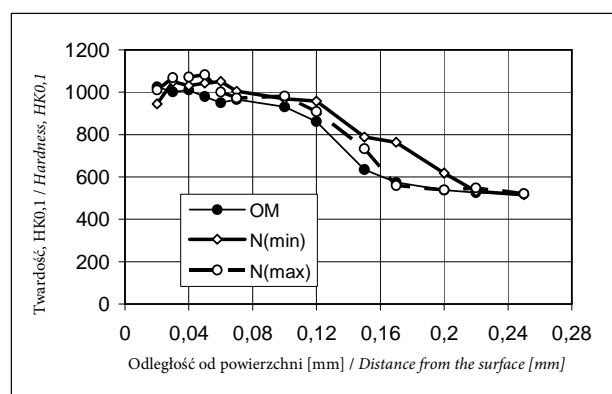


Rys. 4. Rozkłady twardości próbek nagniatanych strumieniowo z różną intensywnością i azotowanych jonowo w temperaturze 400°C; OM – obróbka mechaniczna (bez nagniatania), nagniatanie z gniotem: małym (N_{\min}) i dużym (N_{\max})

Fig. 4. Hardness distributions of samples subjected to shot peening with various intensity and ion nitrided at 400°C; OM – machining (without burnishing), burnishing with small draft (N_{\min}) and large one (N_{\max})

Dalszy wzrost temperatury azotowania jonowego do 450°C spowodował, że odkształcenie stali 38HMJ nie wpłynęło istotnie na twardość warstwy dyfuzyjnej. Na rys. 5, przedstawiającym rozkłady twardości próbek nagniatanych strumieniowo, można zauważyć, że profile twardości prawie się pokrywają, a więc temperatura 450°C niszczy w znacznym stopniu skutki umocnienia zgniotowego.

Further increase of the ion nitriding temperature up to 450°C has resulted in that deformation of the 38HMJ steel has not significantly influenced hardness of the diffusion layer. In Fig. 5 showing hardness distributions of shot peened samples, one can notice that the hardness profiles are almost identical, therefore the temperature of 450°C destroys the effects of strain hardening to a large extent.



Rys. 5. Rozkłady twardości próbek nagniatanych strumieniowo z różną intensywnością i azotowanych jonowo w temperaturze 450°C; OM – obróbka mechaniczna (bez nagniatania), nagniatanie z gniotem: małym (N_{\min}) i dużym (N_{\max})

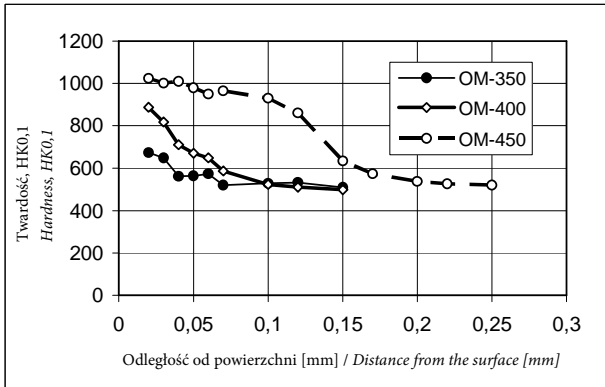
Fig. 5. Hardness distributions of samples subjected to shot peening with various intensity and ion nitrided at 450°C; OM – machining (without burnishing), burnishing with small draft (N_{\min}) and large one (N_{\max})

Na rys. 6 porównano rozkłady twardości próbek ze stali 38HMJ, obrobionych mechanicznie (bez nagniatania) oraz po nagniataniu strumieniowym z dużą intensywnością (w tych doświadczeniach najbardziej umocnionych), azoto

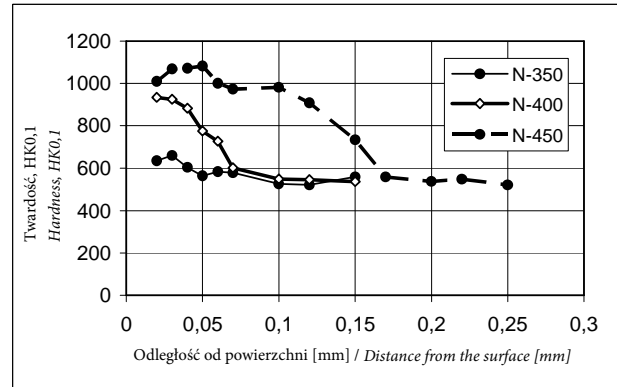
In Fig. 6, hardness distributions of 38HMJ steel samples after machining (without burnishing) are compared to those after shot peening with much intensity (most consolidated in these experiments), nitrided at various temperatures

wanych w różnej temperaturze (350, 400 i 450°C). Z porównania charakterystyk wynika, że wpływ nagniatania na właściwości warstwy dyfuzyjnej jest niewielki; twardość w próbkach nagniatanych nieco wzrasta, grubość warstwy – podobnie.

(350, 400 and 450°C). The comparison of the characteristics shows that the influence of burnishing on the properties of the diffusion layer is insignificant; hardness slightly increases in the burnished samples and so does the diffusion layer thickness.



a)



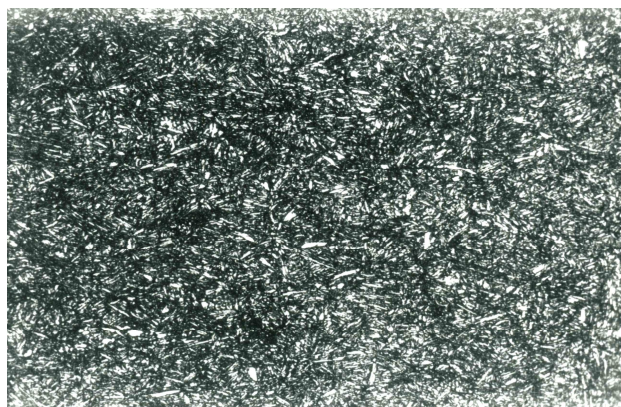
b)

Rys. 6. Rozkłady twardości próbek ze stali 38HMJ po azotowaniu w różnej temperaturze: a – próbki po obróbce mechanicznej (bez nagniatania), b – próbki nagniatane strumieniowo z dużą intensywnością

Fig. 6. Hardness distributions of 38HMJ steel samples after ion nitriding at various temperatures: a – samples after machining (without burnishing), b – samples subjected to shot peening with high intensity

Obserwacja struktury stali 38HMJ wykazała niewielkie zmiany przy powierzchni próbek azotowanych w temperaturze 450°C. W próbkach azotowanych w niższej temperaturze nie zauważono (pod mikroskopem świetlnym) zmian strukturalnych zachodzących przy nagniataniu i azotowaniu jonowym. Strukturę stali w stanie dostawy pokazano na rys. 7; zawiera drobny cementyt rozmieszczony równomiernie na tle ferrytu.

Inspection of the 38HMJ steel structure has shown slight changes at the surface of the samples nitrided at 450°C. In the samples nitrided at lower temperature, no structural changes taking place when burnishing and ion nitriding have been found (under an optical microscope. The structure of the steel as supplied can be seen in Fig.7; it contains fine cementite evenly distributed on the background of ferrite.



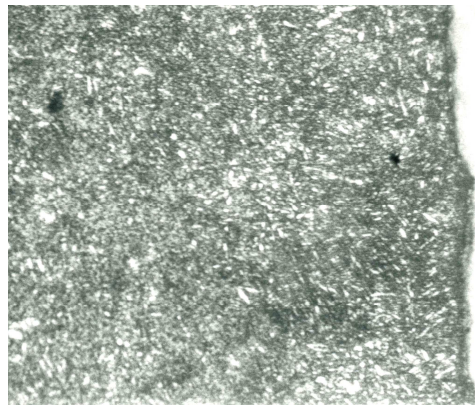
Rys. 7. Struktura próbki ze stali 38HMJ w stanie dostawy (wyzarzonym); powiększenie: 500x
Fig. 7 Structure of a sample of the 38HMJ steel as supplied (annealed); magnification: 500x

W próbkach azotowanych w niższej temperaturze 350 i 400°C nie zaobserwowano (wyraźnie) warstwy dyfuzyjnej. Na rys. 8 pokazano

In the samples nitrided at lower temperatures of 350 and 400°C, diffusion layer has not been (clearly) detected. Fig. 8 shows the structure of the

strukturę warstwy wierzchniej próbki nagniatanej kulką z małym gniosem i azotowanej w temperaturze 350°C.

surface layer of a sample subjected to globular burnishing with small draft and nitrided at the temperature of 350°C.

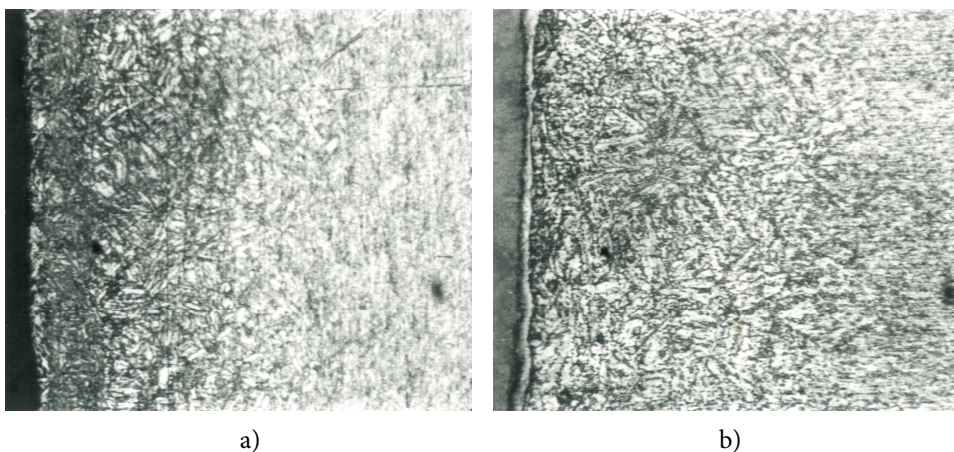


Rys. 8. Struktura przy powierzchni próbki ze stali 38HMJ nagniatanej kulką i azotowanej w temperaturze 350°C; powiększenie: 500x

Fig.8 Structure of a 38HMJ steel sample at its surface, subjected to globular burnishing and nitrided at the temperature of 350°C; Magnification 500x

W próbkach azotowanych w temperaturze 450°C, niezależnie od sposobu obróbki, warstwa dyfuzyjna pod mikroskopem świetlnym była widoczna. Na rys. 9 porównano warstwy dyfuzyjne próbek nagniatanych głowicą wielorolkową z małym gniosem (a) i strumieniowo z dużą intensywnością (b). W drugim przypadku można zaobserwować cienką warstwę azotków przy powierzchni próbki; w pozostałych przypadkach (bez nagniatania i po nagniataniu kulką) warstwy azotków nie stwierdzono.

In the samples nitrided at 450°C, the diffusion layer was visible regardless of the method of treatment. In Fig 9, the diffusion layers of the samples subjected to roller burnishing with small draft (a) have been compared to those subjected to shot peening with high intensity (b). In the latter case, one can find a thin layer of nitrides at the sample surface; in the other cases (without burnishing and after globular burnishing) the layer of nitrides has not been found.



Rys. 9. Struktura przy powierzchni próbki ze stali 38HMJ azotowanej w temperaturze 450°C: a – nagniatanej głowicą z minimalnym gniosem, b – strumieniowo z maksymalną intensywnością; powiększenie: 500x

Fig. 9. Material structure near the surface of a 38HMJ steel sample nitrided at the temperature of 450°C: a – subjected to roller burnishing with minimum draft, b – subjected to shot peening with maximum intensity; magnification: 500x

5. PODSUMOWANIE

Skutki obróbki nagniataniem i azotowania jonowego w różnej, obniżonej temperaturze można ocenić porównując rozkłady twardości. Z porównania profilów twardości wynika, że umocnienie zgmiotowe nie wpływa istotnie na właściwości warstwy wierzchniej próbek; rozkłady twardości próbek umocnionych nie różnią się wyraźnie od profilów próbek obrabowanych tylko metodą obróbki ubytkowej. Ponadto, obserwacja mikroskopowa nie wykazała istotnych różnic, zmian strukturalnych w warstwie wierzchniej po nagniataniu. Nie zaobserwowano znaczących zmian po azotowaniu w obniżonej temperaturze 350 i 400°C; w próbkach azotowanych jonowo w temperaturze 450°C, niezależnie od sposobu obróbki powierzchniowej, zaobserwowano cienką warstwę azotków.

Badania wykazały, że:

- wpływ azotowania jonowego na chropowatość próbek wstępnie nagniatanych zależy od metody powierzchniowej obróbki plastycznej; w przypadku małych wartości parametrów chropowatości R_a , R_t i S (nagniatanie głowicą wielorolkową) azotowanie powoduje zwiększenie chropowatości powierzchni, azotowanie próbek nagniatanych strumieniowo, o większej chropowatości – odwrotnie, spowodowało zmniejszenie parametrów geometrycznych powierzchni.
- Wykazano, że jednostkowy przyrost masy próbek po azotowaniu nie jest odpowiednim wskaźnikiem do oceny skutków azotowania jonowego w obniżonej temperaturze.
- Nagniatanie kulką i głowicą wielorolkową nie powoduje wyraźnych zmian warstwy wierzchniej próbek, nagniatanie strumieniowe – niewielki wzrost twardości w obszarze badanym (rys. 2).
- Wpływ odkształcenia plastycznego na skutki azotowania jonowego stwierdzono na próbkach azotowanych w niższej temperaturze, zwłaszcza azotowanych w temperaturze 400°C.
- Azotowanie w temperaturze 450°C niszczy skutki umocnienia; profile twardości

5. SUMMARY

The results of burnishing and ion nitriding at various, lowered temperatures can be assessed by comparing hardness distributions. Comparison of the hardness profiles shows that strain hardening does not significantly influence the properties of the surface layer of the samples; the hardness distributions of the strain hardened samples differ clearly from the profiles of the samples subjected only to machining. Furthermore, microscopic observation has not shown significant differences, structural changes in the surface layer after burnishing. No significant changes have been detected after nitriding at the lower temperatures of 350 and 450°C; in the samples ion nitrided at 450°C, a thin layer of nitrides has been found, regardless of the kind of surface treatment.

The investigation has shown that:

- The influence of ion nitriding on the roughness of initially burnished samples depends on the method of surface plastic working; in the case of low values of the roughness parameters, the R_a , R_t and S (roller burnishing), nitriding results in an increase of the surface roughness; on the other hand, nitriding of the samples subjected to shot peening, ones with higher roughness, has resulted in a reduction of the geometrical parameters of the surface.
- It has been shown that the specific mass increase of the samples after nitriding is not an adequate criterion for the assessment of the results of ion nitriding at lowered temperature.
- Globular burnishing and roller burnishing does not result in clear changes of the surface layer of the samples. Shot peening causes slight increase of hardness in the area under examination (Fig. 2).
- The influence of plastic deformation on the effects of ion nitriding has been found on the samples nitrided at the lower temperature, especially those nitrided at the temperature of 400°C.
- Nitriding at the temperature of 450°C destroys the effects of consolidation; hard-

próbek śrutowanych niewiele się różnią od profilów próbek nienagniatanych, obrabionych skrawaniem (rys. 5). Zatem, nagniatanie okazało się procesem zbędnym. Porównanie charakterystyk, rozkładów twardości próbek azotowanych w różnej temperaturze (rys. 6) wykazało niewielki wpływ powierzchniowego odkształcenia plastycznego na skutki azotowania jonowego; bez znaczenia dla praktyki przemysłowej.

ness profiles of the samples after shot peening do not differ much from the profiles of the not burnished samples, subjected to machining (Fig. 5). Therefore, burnishing turned out to be an unnecessary process. Comparison of the characteristics, hardness distributions of the samples nitrided at various temperatures (Fig. 6) has shown a slight influence of plastic surface deformation on the effects of ion nitriding; insignificant for industrial practice.

LITERATURA

- [1] Berkowski L. [i in.]: *Obróbka cieplno-chemiczna odkształconych plastycznie wyrobów*. Projekt badawczy KBN nr 7 0973 91 01 z załącznikiem BC 002. 32. 080. 94. 443C – INOP Poznań 1994.
- [2] Przybyłowicz K.: *Metaloznawstwo teoretyczne*. AGH Kraków 1978, s. 433.
- [3] Łupicka O., Warcholiński B.: *Kształtowanie warstwy wierzchniej w połączonych procesach kulowania i azotowanie na przykładzie stali 40HM (42CrMo4)*. *Inżynieria Powierzchni* nr 4 (2011), s. 43–49.
- [4] Nakonieczny A. [i in.]: *Powierzchniowa obróbka plastyczna materiałów twardych*. *Archiwum Technologii Maszyn i Automatykacji* vol. 30 nr 1 (2010), s. 135–142.
- [5] Nakonieczny A. [i in.]: *Możliwości umacniania warstw azotowanych metoda dynamicznej powierzchniowej obróbki plastycznej*. *Inżynieria Materiałowa* nr 6 (2008), s. 605–607.
- [6] Berkowski L.: *Wpływ powierzchniowej obróbki plastycznej na wynik azotowania stali konstrukcyjnych*. *Archiwum Technologii Maszyn i Automatykacji* vol. 25 nr 1 (2005), s. 119–128.
- [7] Berkowski L., Rybak Z., Majchrzak W.: *Azotowanie stali konstrukcyjnych obrabionych plastycznie. Część 4. Wpływ nagniatania głowicą wielorolkową na skutki azotowania stali konstrukcyjnych*. *Obróbka Plastyczna Metali* t. 14 nr 1 (2003) s. 5–15.
- [8] Berkowski L., Rybak Z., Majchrzak W.: *Azotowanie stali konstrukcyjnych obrabionych plastycznie. Część 5. Wpływ nagniatania naporowego kulką na skutki azotowania stali konstrukcyjnych*. *Obróbka Plastyczna Metali* t. 14 nr 3 (2003), s. 5–15.
- [9] Berkowski L., Rybak Z., Majchrzak W.: *Azotowanie stali konstrukcyjnych obrabionych plastycznie. Część 6. Wpływ nagniatania strumieniowego (śrutowania) na skutki azotowania stali konstrukcyjnych*. *Obróbka Plastyczna Metali* t. 14 nr 4 (2003), s. 15–25.
- [10] Berkowski L., Rybak Z., Majchrzak W.: *Azotowanie stali konstrukcyjnych obrabionych plastycznie. Część 7. Wpływ metody obróbki plastycznej powierzchniowej na skutki azotowania*. *Obróbka Plastyczna Metali* t. 15 nr 1 (2004), s. 11–21.
- [11] Wachowski M.: *Wpływ temperatury azotowania na dyfuzyjne warstwy wierzchnie odkształcone plastycznie*. Praca dyplomowa. Politechnika Poznańska, Wydział Maszyn i Transportu, Poznań 1995.

REFERENCES

- [1] Berkowski L. [et al.]: *Obróbka cieplno-chemiczna odkształconych plastycznie wyrobów*. Research project of the Committee of Scientific Research no. 7 0973 91 01 with enclosure BC 002. 32. 080.94. 443C – INOP, Poznań 1994.
- [2] Przybyłowicz K.: *Metaloznawstwo teoretyczne*. AGH Krakow 1978, p. 433.
- [3] Łupicka O., Warcholiński B.: *Forming of surface layer of 42CrMo4 in connected processes of shot peening and nitriding*. *Surface Engineering* no. 4 (2011), pp. 43–49 (article in Polish).
- [4] Nakonieczny A. [et al.]: *Surface cold working – shot peening of hard materials*. *Archive of Mechanical Technology and Automation* vol. 30 no. 1 (2010), pp. 135–142 (article in Polish).
- [5] Nakonieczny A. [et al.]: *Possibilities of strengthening of nitrided layers by dynamic surface cold working*. *Inżynieria Materiałowa* no. 6 (2008), pp. 606–607 (article in Polish).
- [6] Berkowski L.: *Influence of the surface plastic forming on the results of ion nitriding of constructional steels*. *Archive of Mechanical Technology and Automation* vol. 25 no. 1 (2005), pp. 119–128 (article in Polish).
- [7] Berkowski L., Rybak Z., Majchrzak W.: *Azotowanie stali konstrukcyjnych obrabionych plastycznie. Część 4. Wpływ nagniatania głowicą wielorolkową na skutki azotowania stali konstrukcyjnych*. *Metal Forming* vol. 14 no. 1 (2003), pp. 5–15.
- [8] Berkowski L., Rybak Z., Majchrzak W.: *Azotowanie stali konstrukcyjnych obrabionych plastycznie. Część 5. Wpływ nagniatania naporowego kulką na skutki azotowania stali konstrukcyjnych*. *Metal Forming* vol. 14 no. 3 (2003), pp. 5–15.
- [9] Berkowski L., Rybak Z., Majchrzak W.: *Azotowanie stali konstrukcyjnych obrabionych plastycznie. Część 6. Wpływ nagniatania strumieniowego (śrutowania) na skutki azotowania stali konstrukcyjnych*. *Metal Forming* vol. 14 no. 4 (2003), pp. 15–25.
- [10] Berkowski L., Rybak Z., Majchrzak W.: *Azotowanie stali konstrukcyjnych obrabionych plastycznie. Część 7. Wpływ metody obróbki plastycznej powierzchniowej na skutki azotowania*. *Metal Forming* vol. 15 no. 1 (2004), pp. 11–21.
- [11] Wachowski M.: *Wpływ temperatury azotowania na dyfuzyjne warstwy wierzchnie odkształcone plastycznie*. Thesis. Poznań University of Technology, Department of Machines and Transportation Poznań 1995.