

Krzysztof PAŁKA
Andrzej WEROŃSKI

STEREOLOGIA STRUKTURY ELEMENTÓW ZE STALI AUSTENITYCZNYCH Z DOGNIATANĄ WARSTWĄ WIERZCHNIĄ

THE STEREOLOGY OF THE MICROSTRUCTURE OF STAINLESS STEEL'S ELEMENTS WITH BURNISHED SURFACE LAYER

W referacie opisano zmiany strukturalne w warstwie wierzchniej elementów ze stali austenitycznych, związane z procesem dogniatania rotacyjnego. Obróbka ta, efektywna i ekonomiczna, w sposób istotny podwyższa właściwości mechaniczne tych elementów, ponadto zwiększa gładkość powierzchni, bardzo istotną w odporności korozyjnej. Do scharakteryzowania stereologii struktur wykorzystano oprogramowanie Image-Pro Plus. W charakterystyce ilościowej przyjęto następujące parametry: powierzchnia ziarna, kąt między główną osią ziarna i pionem, średnica ziarna, średnica Fereta, obwód ziarna, okrągłość. Na podstawie uzyskanych wyników przeanalizowano wpływ dogniatania na zmiany parametrów stereologicznych.

Słowa kluczowe: stereologia, stal austenityczna, dogniatanie, warstwa wierzchnia

In this paper there were presented structural changes in surface layers of austenitic stainless steels after rotary burnishing process. The rotary burnishing process is effective and economical method of strengthening and smoothing stainless steels, it's also increases the corrosion resistance. The characterization of structures has been made with the Image-Pro Plus software. Such stereological parameters as: area, angle, diameter, Feret, perimeter and roundness has been used to quantitative description of influence of burnishing on the steel structure.

Keywords: stereology, austenitic stainless steel, burnishing, surface layer

Wprowadzenie

Dogniatanie jest jedną z metod umacniania stali austenitycznych. Obróbka plastyczna na zimno w całej objętości jest często niecelowa i zbyt kosztowna, natomiast umocnienie samej warstwy wierzchniej pozwala m.in. na zwiększenie wartości granicy plastyczności z 230 MPa do ok. 450 MPa [3,4]. Ponadto stosując dogniatanie uzyskuje się znaczne wygładzenie powierzchni [3,7], co ma bardzo istotne znaczenie w odporności korozyjnej [3,4] i wytrzymałości zmęczeniowej [4]. Proces ten wywołuje bardzo niewielkie zmiany wymiarowe [4,7]. Jest to więc bardzo korzystna obróbka wykańczająca, o bardzo

Introduction

The burnishing process is a method of strengthening the stainless steel. The cold work in whole volume is often aimless and too expensive. The surface layer's strengthening enables increasing of yield stress from 230 MPa to 450 MPa. [3,4]. Moreover, it's possible to obtain a smooth surface [3,7] which is very important in corrosion resistance [3,4] and fatigue strength [4] besides dimensional changes are minimal [4,7]. Therefore, this finishing process is very advantageous on maintenance, durability and reliability of machine elements (fig. 1) especially working

pozytywnym wpływie na eksploatacyjne cechy elementów oraz ich trwałość i niezawodność (rys. 1).

Celem badań było ilościowe określenie zmian stereologii struktury w wyniku obróbki powierzchniowej dogniataniem. Wyniki analizy pozwolą w dalszym etapie badań na powiązanie cech strukturalnych z parametrami procesu obróbki.



Rys. 1. Dogniatany zawór homogenizujący

Fig. 2. Burnished homogenizing valve

Metodyka badań

Materiałem do badań była stal gatunku X5CrNi 18-10 w postaci płytek o wymiarach 15×150 mm i grubości 4 mm. Dogniatanie wykonano na frezarce górnwrzecionowej z zamontowaną głowicą obrotową z dwoma kulkami stalowymi hartowanymi, przy następujących parametrach: siła dogniatająca: 1600 N i 3000 N, posuw 20 mm/min, obroty wrzeciona 60 obr/min. Wykonano dogniatanie dwukrotne w kierunkach wzajemnie prostopadłych.

Próbki do badań mikrostrukturalnych wycięto poprzecznie do głównej osi elementu, mikrostrukturę ujawniono stosując trawienie wodą królewską. Badania mikrostruktur pod kątem charakterystyk ilościowych i jakościowych wykonano wykorzystując oprogramowanie Image-Pro Plus. Do oceny mikrostruktur przyjęto następujące parametry [1,2,5,6]:

- powierzchnia ziarna,
- kąt między główną osią ziarna i pionem,
- średnica ziarna – określona jako średnia wartość długości odcinków przechodzących przez środek ziarna, poprowadzonych w odstępach co 2°,
- Feret – największy lub najmniejszy wymiar prostokąta opisanego na ziarnie, wyznaczono wartość średnią,
- obwód ziarna,
- okrągłość – określona jako stosunek kwadratu obwodu do powierzchni pomnożonej przez 4π; wartość 1 oznacza idealny okrąg.

Fotografie mikrostruktur poddane były obróbce, mającej na celu wyróżnienie granic ziarn. Dokonano skalowania, umożliwiającego pomiar parametrów w jednostkach długości (μm). Do analizy wybrano fragment fotografii zawierający kilkaset ziarn. Jako wyniki przedstawione zostały wartości średnie analizowanych parametrów. Charakteryzowano tylko warstwy przypowierzchniowe, ponieważ w tych rejonach obserwowano największe różnice w stosunku do struktury podstawowej. Zaprezentowano

in conditions of intense wear, e.g. in food processing industries.

The quantitative description in microstructure changes was the main aim of this study. Obtained results will make possible in following studies to know the correlation between stereology parameters and burnishing parameters.

The research methodology

The object of research was the stainless steel type X5CrNi 18-10 used as plates 15×150 mm and 4 mm thick. The burnishing process was conducted on milling machine with rotation head equipped with 2 hardened balls. Parameters of the process were: burnishing load 1600N and 3000 N, feed 20 mm/min; head rotation 60 rpm. Specimens were burnished twice in reciprocally perpendicular direction.

Microstructural specimens were cut out crosswise to major axis, then grinded, polished and etched with nitrohydrochloric acid. The quantitative study of microstructures was performed using the Image-Pro Plus software. In studies there were used following parameters [1,2,5,6]:

- the area of the grain,
- the angle between the major axis and the vertical,
- the diameter of the grain – specified as the average length of diameters measured at 2 degree intervals and passing through object centroid;
- the Feret – average caliper length
- the perimeter of the grain,
- the roundness – specified as $\text{area}^2/4\pi \cdot \text{perimeter}$; value “1” means perfect circle.

Micrographs were processed to discriminate grains boundaries. Also the calibration was performed to obtain results in length units (μm). A fragment contain a few hundreds of grains was chosen to analyze. Average values of stereology parameters were presented as a result. Only subsurface layers were characterized, because there were greatest changes in this area in comparison to basic structure. There were presented the quantitative and the qualitative effects of burnishing the steel X5CrNi 18-10 with load of 1600N and 3000N. As a comparison there were shown results obtained for the same type steel after hyperquenching.

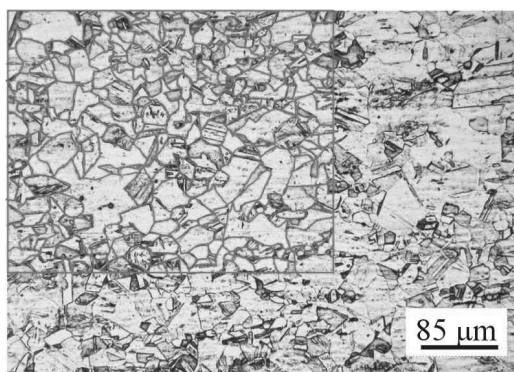
ilościowe i jakościowe efekty dogniatania dla stali X5CrNi 18-10 przy zastosowaniu dwóch wartości sił dogniatających: 1600N i 3000N. Dla porównania przedstawiono wyniki analizy dla stali przesycaanej.

Wyniki badań i ich analiza

Fotografie mikrostruktur wraz z obszarem pomiarowym i ekstrakcją granic ziarn oraz klasyfikacją wielkości ziarn przedstawiono na rysunkach: na rys. 2 – stali przesycaanej, rys. 5 – dogniatanej z siłą 1600 N i na rys. 8 – dogniatanej z siłą 3000 N. Wyniki analiz ilościowych wraz z odziałem na klasy wg wielkości powierzchni zamieszczono w tablicach, odpowiednio 1, 2 i 3.

W stanie przesyconym widoczny jest nieodkształcony austenit z wydzieleniami pierwotnymi oraz bliźniakami (rys. 2). Widoczny jest pewien rozrzut wielkości ziarn spowodowany obróbką cieplną. Po umocnieniu obserwuje się wydłużenie i odkształcenie ziarn oraz bliźniaki odkształcania (rys. 5 i 8) Ponadto obserwowano wzrost ilości pasm poślizgu i gęstości dyslokacji w odkształconych ziarnach.

Przesycaana stal X5CrNi 18-10 (rys. 2) charakteryzuje się średnią wielkością ziarna $213,7 \mu\text{m}^2$, przy czym występuje duży rozrzut wielkości – od ok. $3 \mu\text{m}^2$ do ponad $3000 \mu\text{m}^2$. Ziarna nie posiadają określonej orientacji przestrzennej, kąt między główną osią i pionem zawiera się w zakresie $0,15 \div 179^\circ$. Większość ziarn charakteryzuje się równoosiowością, wskaźnik okrągłość przyjmuje wartości



Rys. 2. Mikrostruktura stali X5CrNi 18-10 po przesycaaniu z obszarem pomiarowym wraz z ekstrakcją granic ziarn

Fig. 2. Microstructure of X5CrNi 18-10 stainless steel after hyperquenching with measure area and grain boundaries extraction

Results and discussion

Micrographs with area of interest and grain boundaries extraction and also grain size classification were presented on figures: fig. 2 – steel after hyperquenching, fig. 5 – steel after rotary burnishing with load of 1600 N and fig. 8 – steel after rotary burnishing with load of 3000 N. Results of quantitative analysis with class partition by area size were presented in tables 1, 2 and 3 respectively.

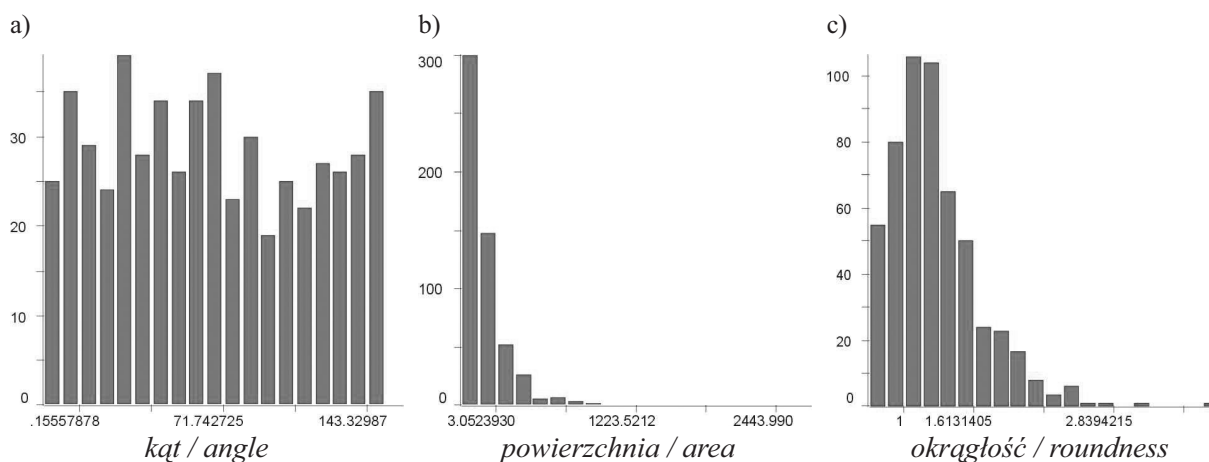
After hyperquenching in the structure there were observed equiaxial grains of austenite with primary precipitations and annealing twins (fig. 2). After strengthening there was observed elongation and deformation of grains and also deformation twins (fig. 5 and 8). Moreover, increasing of slip bands and dislocation density there were revealed in deformed grains.

The average size of grains in the steel after hyperquenching (fig. 2) had a value of $213,7 \mu\text{m}^2$ with the range from about 3 to over $3000 \mu\text{m}^2$. Grains had not been spatial oriented, the angle between major axis and the vertical had a range $0.15 \div 179^\circ$. Most of grains were equiaxial, the roundness had a value between 1.43 and 1.66. Geometrical parameters such as the diameter, the perimeter and the Feret had approximately the

Tab. 1. Wyniki pomiarów dla przesycaanej stali X5CrNi 18-10 (wymiar w μm)

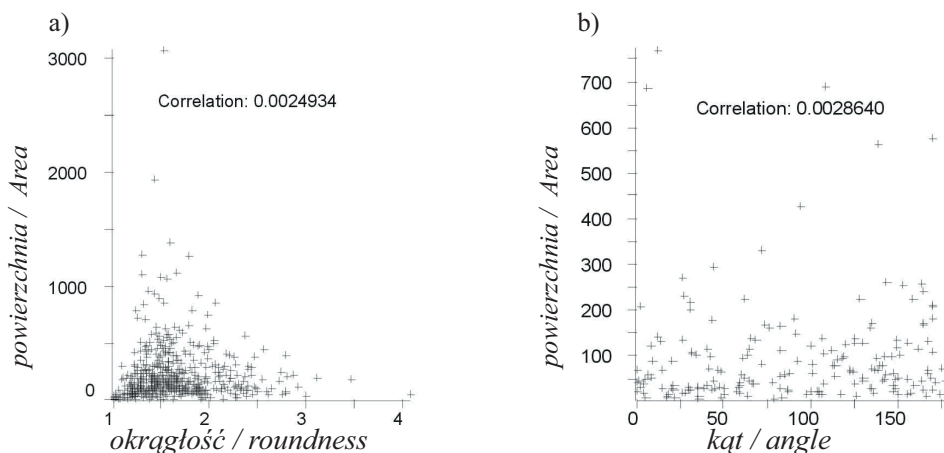
Tab. 1. Measurements for hyperquenching X5CrNi 18-10 stainless steel (dimensions in μm)

Klasa	Ilość ziarn	% ziarn	Powierzchnia		Kąt	Średnica	Obwód	Okrągłość	Feret
			średnia	% udziału					
Class	number of grains	% of grains	Area		Angle	Diameter	Perimeter	Roundness	Feret
			average	%					
1	152	27,839	88,610	11,54	74,049	9,631	39,260	1,572	11,432
2	133	24,359	171,818	19,58	22,692	13,574	55,182	1,619	15,887
3	136	24,909	135,288	15,76	152,583	11,974	48,798	1,585	14,135
4	3	0,549	1304,186	3,35	52,165	40,381	159,438	1,558	44,068
5	120	21,978	442,523	45,50	102,952	22,702	92,547	1,661	25,946
6	1	0,183	1933,386	1,66	88,584	48,805	186,431	1,431	56,574
7	1	0,183	3054,224	2,61	126,802	61,448	241,648	1,521	70,011
suma total	546	100	116 722,6	100					



Rys. 3. Histogramy kąta, powierzchni i okrągłości dla przesycanej stali X5CrNi 18-10

Fig. 3. Histograms of the angle, the area and the roundness for hyperquenched X5CrNi 18-10 steel



Rys. 4. Wybrane zależności parametrów stereologicznych dla przesycanej stali X5CrNi 18-10

Fig. 4. Selected relationships of stereological parameters for hyperquenched X5CrNi 18-10 steel

z zakresu 1,43 do 1,66. Parametry geometryczne – średnica, obwód, Feret wykazują rozkład zbliżony do rozkładu Gaussa (rys. 3). Okrągłość ziarn wykazuje maksimum przy wartości ok. 1,6, jednakże największa część analizowanego zbioru zawiera się w zakresie zbliżonym do idealnie okrągłego (wartość bliska 1 – rys. 3). Można stwierdzić, że badana stal posiada równoosiowe ziarna o średniej średnicy 14,38 μm i pewnym rozrzucie wielkości spowodowanym obróbką cieplną – szczególnie w przypadkach 5 największych ziarn.

Wykresy zależności pomiędzy kątem głównej osi a powierzchnią oraz okrągłością a powierzchnią, zaprezentowano na rys. 4. Analiza uzyskanych wyników wskazuje na brak korelacji pomiędzy tymi parametrami. Brak jest jednoznacznej orientacji przestrzennej ziarn oraz związku między powierzchnią ziarna i jego okrągłością. Kształt ziarn jest zatem przypadkowy i nie związany z wielkością (rys. 4).

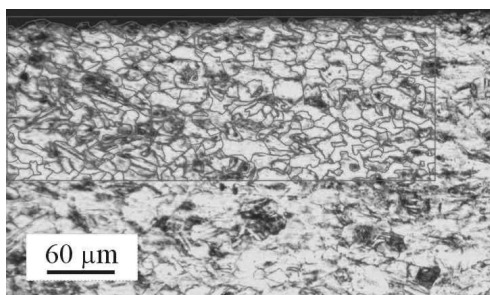
Stal X5CrNi 18-10 poddana dogniataniu z siłą 1600N (rys. 5) w warstwie podpowierzchniowej charakteryzuje się średnią wielkością ziarna 53,38 μm^2 ,

Gaussian distribution (fig. 3). The roundness had a maximum sample size at value of 1.6, but the largest analyzed range had values near 1 (grain looks like almost a perfect circle – fig. 3). It may be said, that examined steel had an equiaxial grains with average diameter of 14.38 μm and a little dispersion of averages caused by heat treatment – especially in cases of the 5 largest grains.

Charts of relationships between the angle and the area and also the roundness and the area were presented on fig. 4. Analysis of results showed a lack of correlation between those parameters. Grains weren't unequivocally spatial oriented. Grains shapes were not dependent from the area, so the shape was quite random (fig. 4).

The steel after burnishing with the load of 1600N (fig. 5) had an average grain area of 53,38 μm^2 with the range from 2.1 μm^2 to 455 μm^2 in subsurface layer. Over 96% of analyzed section has been created of grains with the area less than 143.599 μm^2 . The wide range of angle was observed: from 0° to 178°, besides

przy czym rozrzut wielkości wynosi od $2,1 \mu\text{m}^2$ do $455 \mu\text{m}^2$. Ponad 96% powierzchni stanowią ziarna o polu nie większym niż $143,599 \mu\text{m}^2$. Obserwuje się szeroki zakres wartości kąta między osią główną ziarna i pionem – od 0° do 178° , przy czym ponad 75% analizowanych ziarn jest wydłużona w kierunku poziomym (w kierunku odkształcania). Kąt głównej osi ma rozkład Gaussa z maksimum przy ok. 90° , ziarna są więc odkształcone w kierunku równoległym do powierzchni elementu obrabianego (rys. 6). Jest to również widoczne na zamieszczonej na rys. 5 fotografii struktury – ziarna są wyraźnie odkształcone i wydłużone w poziomie. Średnica, Feret i obwód wykazują rozkład zbliżony do roz-



Rys. 5. Mikrostruktura stali X5CrNi 18-10 po dogniataniu z siłą 1600 N z naniesionym obszarem pomiarowym i ekstrakcją granic ziarn

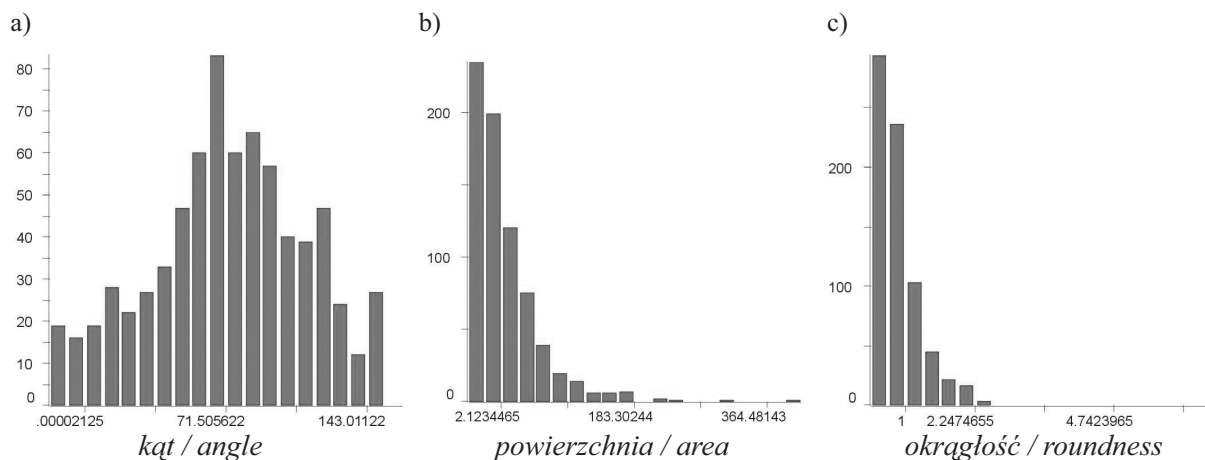
Fig. 5. Microstructure of X5CrNi 18-10 stainless steel after rotary burnishing with load of 1600 N with measure area and grain boundaries extraction

over 75% of analyzed grains was horizontally elongated. The angle of major axis had the Gaussian distribution with the maximum at 90° , so grains were deformed in parallel to treated surface. It was also shown on fig. 5 – grains were deformed and horizontally elongated. Diameter, Feret and perimeter had approximately the Gaussian distribution with the maximum moved to lower values (Fig. 6). Rest of stereological parameters distribution, such as area and roundness had maximums for the least grains and the distribution hyperbolically decreasing. Roundness had a values in range from 1.42 to 2.266, which show the deformation range in comparison to basic structure.

Tab. 2: Wyniki pomiarów dla stali X5CrNi 18-10 dogniatanej z siłą 1600 N (wymiary w μm)

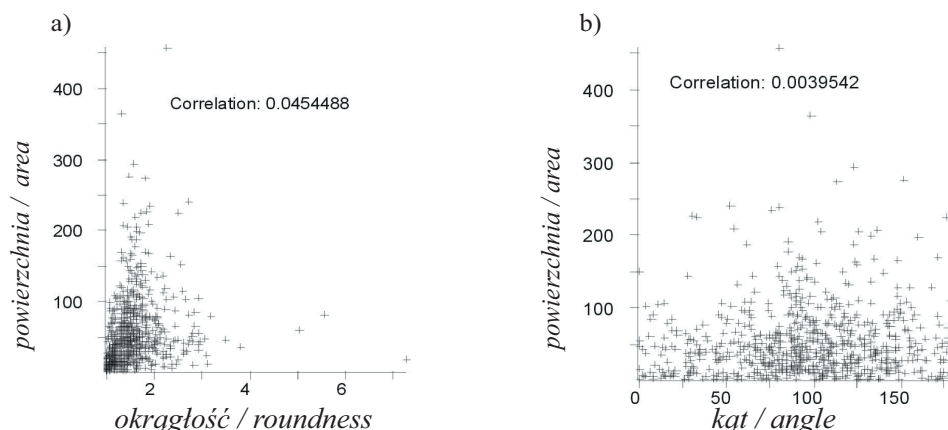
Tab. 2: Measurements for burnished X5CrNi 18-10 stainless steel (load of 1600 N; dimensions in μm)

Klasa	Ilość ziarn	% ziarn	Powierzchnia		Kąt	Średnica	Obwód	Okrągłość	Feret
			średnia	% udziału	średnia	średnia	średnia	średnia	średnia
Class	number of grains	% of grains	Area		Angle	Diameter	Perimeter	Roundness	Feret
			mean	%	mean	mean	mean	mean	mean
1	345	47,586	26,008	23,18	71,697	5,280	20,703	1,474	6,323
2	2	0,276	225,249	1,16	31,927	16,419	78,022	2,164	20,305
3	91	12,552	143,599	33,76	95,306	13,445	54,476	1,701	15,854
4	111	15,310	72,352	20,76	90,074	9,367	38,519	1,694	11,368
5	174	24,000	42,301	19,02	144,936	6,708	26,047	1,420	7,901
6	1	0,138	365,069	0,94	98,389	20,847	77,742	1,317	23,387
7	1	0,138	455,071	1,18	80,727	23,865	113,827	2,266	28,422
suma total	725	100	38 702,35	100					



Rys. 6. Histogramy kąta, powierzchni i okrągłości dla dogniatanej stali X5CrNi 18-10 (siła 1600 N)

Fig. 6. Histograms of the angle, the area and the roundness for burnished X5CrNi 18-10 steel (load 1600 N)



Rys. 7. Wybrane zależności parametrów stereologicznych dla dogniatanej stali X5CrNi 18-10 (siła 1600 N)
 Fig. 7. Selected relationships of stereological parameters for burnished X5CrNi 18-10 steel (load 1600 N)

kładu Gaussa z maksimum przesuniętym w kierunku niskich wartości. Pozostałe parametry geometryczne – *powierzchnia* i *okragłość* mają maksimum dla najmniejszych ziarn, a rozkład hiperbolicznie malejący. *Okragłość* ziarn przyjmuje wartości z zakresu 1,42 do 2,266, co świadczy o znacznym odkształceniu ziarn w stosunku do struktury podstawowej.

Dogniatanie rotacyjne z siłą 1600 N powoduje znaczne rozdrobnienie ziarn, średnia powierzchnia ziarna jest 4-krotnie mniejsza niż w przypadku stali przesycaanej. Ziarna w strefie podpowierzchniowej są odkształcone wzdłużnie do powierzchni elementu, jednakże odkształcenie nie jest znaczne, na co wskazują wyniki pomiaru okragłości ziarn.

Wykresy przedstawione na rys. 7 przedstawiają zależności pomiędzy *kątem* głównej osi a *powierzchnią* oraz *okragłością* a *powierzchnią*. W porównaniu do stali przesycaanej obserwuje się nieznacznie lepszą korelację analizowanych parametrów. Duży rozrzut wyników wskazuje na przypadkowość rozkładu powierzchni w funkcji kąta (rys. 7). Jednakże histogram kąta jednoznacznie wskazuje na zorientowanie przestrzenne ziarn.

Stal X5CrNi 18-10 poddana dogniataniu z siłą 3000 N w warstwie podpowierzchniowej charakteryzuje się średnią powierzchnią ziarna $110,7 \mu\text{m}^2$, przy czym rozrzut wielkości wynosi od $3,35 \mu\text{m}^2$ do $1129 \mu\text{m}^2$, a ponad 57% powierzchni stanowią ziarna o średniej *powierzchni* $203,349 \mu\text{m}^2$. Obserwuje się szeroki zakres wartości *kąta* między osią główną ziarna i pionem – od 1° do 179° . *Kąt* głównej osi ma rozkład Gaussa z maksimum przy ok. 90° przy czym ponad 98% ziarn (23% więcej niż w przypadku dogniatania z siłą 1600 N) jest odkształconych równoległe do powierzchni obrabianego elementu (rys. 9). Jest to również widoczne na zamieszczonej na rys. 8 fotografii struktury – ziarna są wyraźnie odkształcone i wydłużone w poziomie. Histogram *kąta* jest płaski z maksimum dla wartości ok. 90° , wskazuje

The burnishing process conducted with load of 1600 N caused considerably size reduction. The average grain *area* is 4 times less than in hyperquenched steel. In subsurface layer there were observed longitudinal deformation of grains, however this deformation wasn't meaningful, which was proved in *roundness* results.

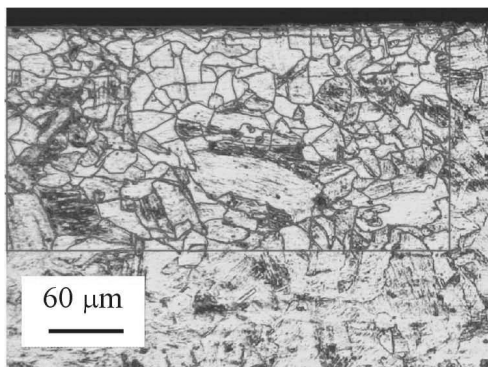
Charts presented on fig. 7 showed relations between *the angle* and *the area* and also *the roundness* and *the area*. In comparison to hyperquenched steel there were observed insignificant better correlation of analysed parameters. A large dispersion of results indicated that there was a random distribution of *the area* as a function of *the angle* (fig. 7). However, *the angle* histogram unequivocally pointed on orientation of grains.

The structure of steel after burnishing with the load of 3000 N (fig. 8) in subsurface layer had an average grain *area* of $110.7 \mu\text{m}^2$ with the range from $3.35 \mu\text{m}^2$ to $1129 \mu\text{m}^2$, beside over 57% of analyzed section has been created of grains with the average *area* $203.349 \mu\text{m}^2$. The wide range of *angle* was observed: from 1° to 179° . *The Angle* had the Gaussian distribution with the maximum at 90° (fig. 9), beside over 98% of analyzed grains was horizontally elongated (it was 23% more in comparison to burnishing with 1600 N load). It was also shown on micrograph on fig. 8 – grains were deformed and horizontally elongated. *The angle* histogram was flat in shape with max values for 90° . It showed that grains were variously oriented with dominant direction in parallel to the surface. Such a dispersion of *the angle* values pointed at two-directional deformation of grains as effect of rotary burnishing.

The diameter, *Feret* and *perimeter* had approximately the Gaussian distribution with the maximum moved to lower values. Rest of stereological parameters – *the area* and *roundness* had maximums for the least grains and the distribution hyperbolicly

to różne zorientowanie przestrzenne ziarn z dominującym kierunkiem równoległym do powierzchni. Taki rozrzut wartości kąta świadczy o dwukierunkowym odkształceniu ziaren w wyniku rotacyjnego dogniatania.

Średnica, Feret i obwód wykazują rozkład podobny do rozkładu Gaussa z maksimum przesuniętym w kierunku niskich wartości. Pozostałe parametry geometryczne – powierzchnia i okrągłość mają maksimum dla najmniejszych ziarn i rozkład hiperbolicznie malejący. Okrągłość ziarn wykazuje maksimum przy wartości bliskiej 1,0 (największa liczność zbioru), natomiast wartość średnia wynosi 1,547.



Rys. 8. Mikrostruktura stali X5CrNi 18-10 po dogniataniu z siłą 3000 N z naniesionym obszarem pomiarowym i ekstrakcją granic ziarn

Fig. 8. Microstructure of X5CrNi 18-10 stainless steel after rotary burnishing with load of 3000 N with measure area and grain boundaries extraction

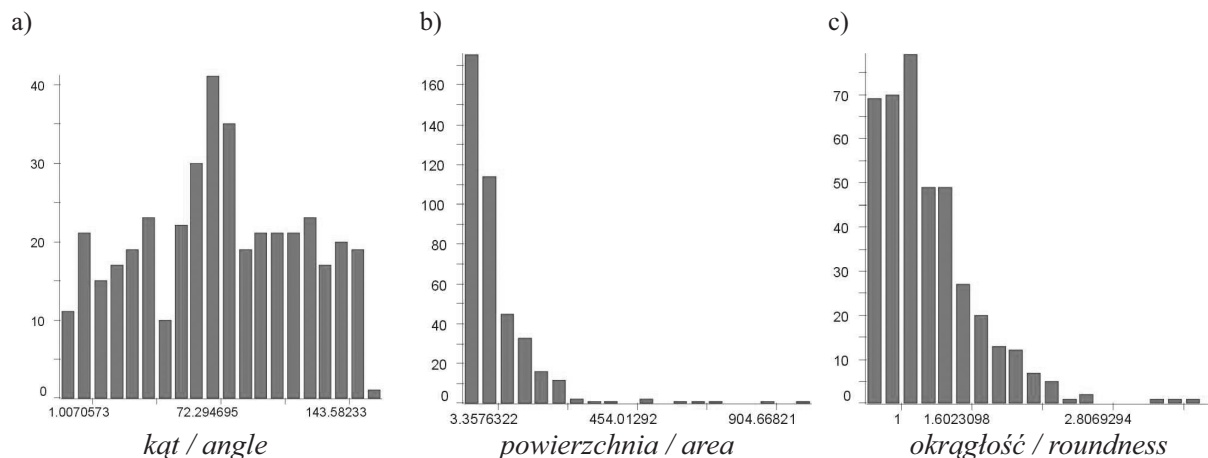
decreasing. The roundness distribution had a maximum value near 1.0 (greatest sample size), whereas the average value was 1.547.

Charts presented on fig. 10 showed relations between selected stereological parameters. There were observed insignificant correlation between the roundness and the area, which points at relation between the shape and the size of grains. A large dispersion of results indicated that there was a random distribution of the area as a function of the angle (fig. 10). However, the angle histogram unequivocally pointed on orientation of grains.

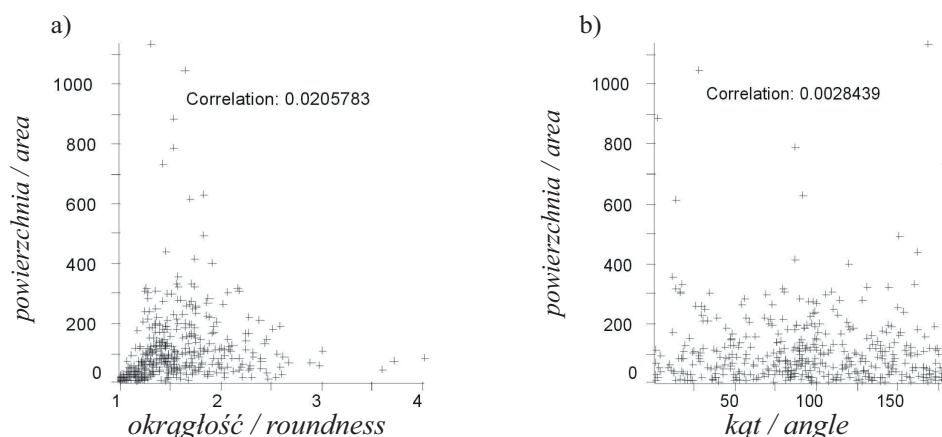
Tab. 3. Wyniki pomiarów dla stali X5CrNi 18-10 dogniatanej z siłą 3000 N (wymiar w μm)

Tab. 3. Measurements for burnished X5CrNi 18-10 stainless steel (load of 3000 N, dimensions in μm)

Klasa	Ilość ziarn	% ziarn	Powierzchnia		Kąt	Średnica	Obwód	Okrągłość	Feret
			średnia	% udziału	średnia	średnia	średnia	średnia	średnia
			Area		Angle	Diameter	Perimeter	Roundness	Feret
Class	number of grains	% of grains	mean	%	mean	mean	mean	mean	mean
1	273	67,242	51,519	31,27	96,734	7,389	29,583	1,493	8,744
2	1	0,246	610,479	1,36	14,108	27,152	114,107	1,697	31,098
3	1	0,246	627,267	1,39	91,595	27,448	119,997	1,827	31,858
4	127	31,282	203,349	57,43	89,007	15,526	63,464	1,660	18,121
5	1	0,246	788,128	1,76	86,555	31,648	123,437	1,538	34,153
6	1	0,246	882,752	1,96	2,866	32,964	130,632	1,538	38,960
7	1	0,246	1042,697	2,32	27,446	36,850	146,391	1,636	42,289
8	1	0,246	1129,996	2,51	168,898	37,874	136,700	1,316	41,340
suma total	406	100	44 971,33	100					



Rys. 9. Histogramy kąta, powierzchni i okrągłości dla dogniatanej stali X5CrNi 18-10 (siła 3000 N)
Fig. 9. Histograms of the angle, the area and the roundness for hyperquenched X5CrNi 18-10 steel



Rys. 10. Wybrane zależności parametrów stereologicznych dla przesycającej stali X5CrNi 18-10 (siła 3000 N)
 Fig. 10. Selected relationships of stereological parameters for for burnished X5CrNi 18-10 steel (load 3000 N)

Wykresy przedstawione na rys. 10 przedstawiają zależności wybranych parametrów stereologicznych. Pomiedzy *okrągłością* a *powierzchnią* zaznacza się nieznaczna korelacja, co świadczy o pewnym powiązaniu kształtu z wielkością. Natomiast brak jest istotnego związku pomiędzy *kątem* głównej osi a *powierzchnią*, czyli występuje przypadkowość rozkładu powierzchni w funkcji kąta (rys. 10).

Podsumowując można stwierdzić, że dogniatanie z siłą 3000 N powoduje mniejsze rozdrobnienie ziarn niż dogniatanie z siłą 1600 N. Średnia powierzchnia ziarna w przypadku siły dogniatania 3000 N jest 2-krotnie mniejsza niż w przypadku stali przesycającej. Ziarna w strefie podpowierzchniowej są odkształcone wzdłużnie do powierzchni elementu, jednakże odkształcenie nie jest znaczne, na co wskazuje histogram *okrągłości* ziarn.

Dogniatanie rotacyjne głowicą z dwoma kulkami powoduje dwukrotne odkształcenie powierzchni w kierunkach wzajemnie prostopadłych, przy czym prawdopodobnym jest zniwelowanie uzyskanego w pierwszym przejściu odkształcenia, w wyniku czego ziarna odzyskują częściowo pierwotny kształt (mała zmiana wskaźnika *okrągłość*). Ponadto duże siły dogniatania podczas dwukrotnego oddziaływania głowicy na materiał powodują zmniejszenie ilości granic ziarn, w efekcie czego powstają duże równoosiowe ziarna, odkształcone i ukierunkowane równoległe do powierzchni. Prawdopodobnie rozdrobnienie ziarn następuje w pierwszym przejściu głowicy, natomiast w drugim przejściu drobne ziarna łączą poprzez zanikanie granic ziarn na skutek silnego gniotu. W przypadku stali dogniatanej z siłą 3000 N ponad 57% udziału powierzchni stanowią ziarna o średniej powierzchni ok. $203 \mu\text{m}^2$, a więc 4-krotnie większej niż pozostałe i niemal 2-krotnie większej niż ziarna o największym udziale w stali dogniatanej siłą 1600 N – odpowiednio

Summarize, it might be said that burnishing with 3000 N load causes less size reduction than burnishing with 1600 N load. The average *area* of grain in case of 3000 N load is twice less than in the hyperquenched steel. Grains in subsurface layer were horizontally deformed; however deformation wasn't big which was shown on *the roundness* histogram.

The burnishing process conducted with rotation head equipped in 2 balls caused twice deformation in reciprocally perpendicular direction. The probability is that the first pass deformation is liquidated by the second pass in which grains recover its original shape (small change of *roundness*). Moreover, big loads in double impact of rotation head causes reduction of grain borders, as effect of this there are created big equiaxial grains slightly deformed and oriented parallel to surface. It's most probably that grain size reduction occurs in first pass of burnished head, in second pass small grains join by boundaries decay. In case of steel burnished with 3000 N load over 57% of analyzed section has been created of grains with the average *area* $203.349 \mu\text{m}^2$ – it's 4 times more than the rest and almost twice more than the bigger fraction of grains in steel burnished with 1600 N load – 33.76% of analyzed section has an *area* of $143.599 \mu\text{m}^2$ respectively.

33,76% udziału stanowią ziarna o średniej powierzchni 143,599 μm^2 .

Wnioski

Na podstawie analizy wyników badań i obliczeń sformułowano następujące wnioski:

- Rozdrobnienie ziarn jest bardziej intensywne przy dogniataniu z mniejszą siłą. Przy sile 1600 N średnia średnica ziarna była 2-krotnie mniejsza niż przy dogniataniu z siłą 3000 N.
- Dogniatanie rotacyjne powoduje odkształcenie ziarn w kierunku równoległym do powierzchni obrabianej, przy czym ze wzrostem siły obserwuje się większe ukierunkowanie ziarn.
- Dogniatanie rotacyjne z dużą siłą sprzyja procesowi łączenia drobnych ziarn, w wyniku czego powstają ziarna o kształcie zbliżonym do równoosiowego, przy czym obserwuje się niejednorodne ukierunkowanie tak odkształconych ziarn.
- Wskazana jest optymalizacja procesu dogniatania ze względu na wymagane właściwości wytrzymałościowe i odporność korozyjną, ważną szczególnie w przypadku elementów maszyn pracujących w środowisku korozyjnym.

Literatura

- [1] Kurzydłowski K.J., Ralph B.: *The quantitative description of the microstructure of materials*. Boca Raton, CRC Press, 1995.
- [2] Latała Z., Wojnar L.: *Computer-aided versus manual grain size assessment in a single phase material*. *Materials Characterization* 46 (2001) 227– 233.
- [3] Pałka K., Weroński A.: *Efekty stosowania powierzchniowej obróbki plastycznej stali austenitycznych w budowie maszyn spożywczych*. Inżynieria Rolnicza, nr 9, PAN, Warszawa 2002.
- [4] Przybyłowicz K.: *Strukturalne aspekty odkształcania metali*. WNT Warszawa 2002.
- [5] Ryś. J.: *Stereologia materiałów*. Wyd. Fotobit Design, Kraków 1995.
- [6] Wojnar L. *Image analysis. Applications in materials engineering*. Boca Raton, CRC Press, 1998.
- [7] Wyrzykowski J., Pleszakow E., Sieniawski J.: *Odształcanie i pękanie metali*. WNT Warszawa 1999.

Summary

On the analyze of the results the following conclusions have been made:

- The size reduction is more intensive in burnishing with less load. The average diameter was twice less in burnishing with 1600 N load in comparison to 3000 N.
- The rotary burnishing process causes deformation of grains in parallel to treated surface, besides increasing of load causes bigger orientation of grains.
- A big loads during burnishing causes joining of small grains; as effect of this there are created big and almost equiaxial grains, besides there was inhomogeneous orientation of grains of that deformation.
- There's a need an optimisation of burnishing process to obtain require properties and corrosion resistance, which is important especially in case of elements working in corroding medium.

Dr inż. Krzysztof PAŁKA
Prof. zw. dr hab. inż. Andrzej WEROŃSKI

Katedra Inżynierii Materiałowej
Politechnika Lubelska
ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin
e-mail: k.palka@pollub.pl
