

ANALIZA STRUKTURALNA MATRYC STOSOWANYCH DO KUCIA NA CIEPŁO W ASPEKcie ICH TRWAŁOŚCI

STRUCTURAL ANALYSIS OF HOT FORGING DIES WITH REGARD TO THEIR LIFE

Na trwałość narzędzi stosowanych w procesach kucia wpływa wiele czynników mających niekiedy przeciwstawny charakter: Żywotność matryc zależy od poprawnego ich zaprojektowania i wykonania, z uwzględnieniem odpowiedniej obróbki cieplno-chemicznej oraz mechanicznej adekwatnej do wybranego materiału, kolejności przeprowadzania kolejnych zabiegów obróbki cieplnej, a także od warunków, w jakich przebiega sam proces kucia (temperatura narzędzi i wstępniaka, geometria materiału wsadowego, prędkość procesu, rodzaj i ilość środka smarnego zapewniającego optymalne warunki trybologiczne. Innym istotnym parametrem jest rodzaj zastosowanego materiału na narzędzia. Należy wziąć pod uwagę, że producenci stali stosują swoje procedury, a skład chemiczny dla tego samego materiału może się znacznie różnić. To wszystko ma istotny wpływ na końcową jakość produktu. Przykładem wyrobu, dla którego wymagana jest wysoka trwałość narzędzi, jest odkuwka obudowy przegubu homokinetycznego. Obecnie w produkcji wielkoseryjnej takiej odkuwki stosuje się metodę wielooperacyjnego kucia na ciepło i zimno w matrycach zamkniętych ze złożonym schematem odkształcania – wyciskanie współbieżne z przeciwbieżnym. Ze względu na bardzo wysokie naciski jednostkowe, wyciężenie materiału matryc jest często tak wysokie, że prowadzi to do ich przedwczesnego zużycia i niszczenia (trwałość poniżej 2000 sztuk).

Słowa kluczowe: zużycie narzędzi, kucie, trwałość narzędzi.

Many (sometimes antagonistic) factors affect the durability of tools used in forging. The life of dies depends on how well they were designed and made, including the thermochemical treatment and mechanical working, the sequence of steps in the thermal treatment and the forging process conditions (the tool and preform temperature, the charge material geometry, the process rate, the kind and amount of lubricant ensuring optimum tribological conditions). Another critical parameter is the kind of tool material. One should note that steel producers use their own procedures whereby the composition of the same steel may differ considerably between them. All this significantly affects the final quality of the product. An example of a product for which highly durable tools are required is a forging of the constant-velocity universal joint casing. Currently in large-lot production the casing is manufactured through cold and hot multioperation forging in closed dies with a complex deformation configuration (forward and backward extrusion). Because of the very high unit pressures the effort of the die material is often so high that it results in the premature wear out and failure of the dies (life below 2000 units).

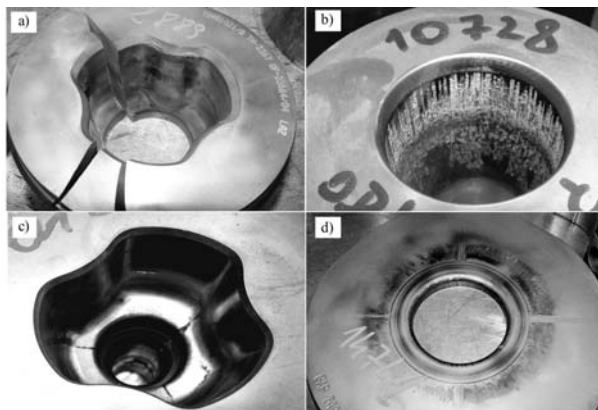
Keywords: forging, tool life, tool wear.

1. Wprowadzenie

Dane statystyczne od różnych producentów narzędzi wskazują, że w obróbce plastycznej na zimno krytyczne jest zazwyczaj pękanie zmęczeniowe narzędzi, a w obróbce plastycznej na gorąco – nadmierne zużycie ściernie, plastyczne płynięcie materiału i zmęczenie cieplne. Najtrudniejsza sytuacja jest w obróbce plastycznej na ciepło, gdzie każde z tych zjawisk może być jednakowo krytyczne. W takich warunkach narzędzia muszą przenosić bardzo duże naciski, tak jak dla kształtowania na zimno oraz jednocześnie muszą być wykonane z materiałów odpornych na temperaturę, tak jak narzędzia do pracy na gorąco. Trwałość narzędzi do pracy na ciepło jest w ogólnym przypadku zdeterminowana możliwością wystąpienia czterech zjawisk niszczących – pęknięcia (rys. 1a), zużycia ściernego (rys. 1b), zmęczenia cieplno-mechanicznego (rys. 1c) oraz odkształceń trwałych (rys. 1d). Każde z tych zjawisk może występować z różną intensywnością [22].

1. Introduction

Statistics available from different tool manufacturers indicate that in cold working usually tool fatigue cracking is critical while abrasive wear, the plastic flow of the material and thermal fatigue are critical in hot working. The most difficult situation is in hot working where each of the above phenomena may be equally critical. In such conditions the tools must bear very high pressures (as in cold forming) and they must be made of heat resistant materials (as hot working tools). The life of hot working tools is generally determined by four destructive phenomena: cracking (fig. 1a), abrasive wear (fig. 1b), thermomechanical fatigue (fig. 1c) and permanent deformations (fig. 1d). Each of the phenomena may occur with different intensity [22].



Rys. 1. Widok ogólny zużytych matryc: a) pęknięta matryca po wykonaniu 2889 odkuwek, b) intensywne zużycie ściernie matrycy, w której wykuto 10728 odkuwek, c) uszkodzenie matrycy w wyniku zmęczenia ciepłno-mechanicznego po 6045 sztukach oraz d) odkształcenie plastyczne w środkowej matrycy po wykonaniu 14741 odkuwek

Fig. 1. Shows worn out dies: a) a cracked die after 2889 forgings, b) heavy abrasive wear of a die after 10728 forgings, c) thermomechanical fatigue damage of a die after 6045 forgings and d) permanent deformation in the middle die after 14741 forgings

2. Zwiększanie trwałości matryc

W celu podniesienia żywotności narzędzi do kucia stosuje się rozmaite metody związane zarówno z doбором optymalnego materiału na narzędzia, jego obróbką ciepłno-chemiczną oraz specjalne rozwiązania konstrukcyjne. Z reguły stale narzędziowe są dostarczane z hut w wersji wyzarzonej; dalsza obróbka odbywa się u użytkownika bądź w narzędziowniach. Najczęściej stosowanym materiałem na matryce do kucia na ciepło są stale narzędziowe do pracy na gorąco typu: X38CrMoV51, X30WCrV93, 55NiCrMoV6, które charakteryzują się bardzo dobrymi własnościami mechanicznymi (duża wytrzymałość na rozciąganie, twardość, duża odporność na ścieranie, wysoka granica plastyczności 2200 MPa). Dodatkowo poprzez specjalne zabiegi: ciepłno-chemiczne, poprzez stosowanie specjalnych warstw powierzchniowych (azotowanie, powłoki PVD), czy też np. laserowe stopowanie węglikiem wolframu powierzchni można znacząco poprawić ich zużycie ściernie i zwiększyć twardość, zwłaszcza w warstwie wierzchniej. Producenci stali prześcigają się w opracowywaniu zarówno wyspecjalizowanych gatunków stali, jak i ich obróbki. Przykładem może być firma Uddeholm, która wytwarza stale specjalne, nazywając je zgodnie z ich przeznaczeniem: Alvar, Dievar, Hotvar, OrvarSupreme, VidarSupreme [12,21].

Niekiedy w celu podniesienia odporności na pęknięcie narzędzi do kucia stosuje się matryce wstępnie sprężone, czyli wzmocnione przez pojedynczy pierścień, lub większą liczbę pierścieni współśrodkowych, pomiędzy którymi istnieją połączenia skurczowe lub wtlaczone. Wytworzenie odpowiednio dużego sprężenia (dużych obwodowych naprężeń ściskających) podczas montażu powinno zrekomensować bardzo duże obwodowe naprężenia rozciągające w trakcie kucia. Taki korzystny stan naprężeń w rzeczywistości może się znacznie różnić ze względu na błędy wykonania, niewłaściwie dobrane tolerancje oraz wielokrotne stosowanie nieużytych elementów narzędzi, wobec czego może dochodzić do ich przedwczesnego zużycia [1-8,18].

Ponadto należy wziąć pod uwagę również cały proces technologiczny, bowiem dobór optymalnych parametrów procesu może znacząco podnieść żywotność narzędzi oraz jakość uzyskiwanych wyrobów. Do najważniejszych czynników wpływających na poprawny przebieg procesu kucia zaliczyć można: temperaturę narzę-

2. Extending die life

Various measures, including the selection of an optimum tool material, its thermochemical treatment and special design, are used in order to extend the life of forging tools. As a rule, tool steels supplied by steel mills are in the annealed form and further working is done by the user or in tool-rooms. Hot working tool steels: X38CrMoV51, X30WCrV93, 55NiCrMoV6, characterized by very good mechanical properties (high tensile strength, hardness, high abrasion resistance, high yield stress – 2200 MPa) are the most commonly used materials for forging dies. Moreover, their abrasive wear resistance and hardness (especially in the surface layer) can be significantly improved through thermochemical treatments, the use of surface coatings (nitriding, PVD coatings) and the laser alloying of the surface with tungsten carbide. Steel producers try to outdo one another in developing specialized grades of steel and treatments for them. For example, Uddeholm produces special-purpose steels, naming them according to their intended use: Alvar, Dievar, Hotvar, OrvarSupreme, VidarSupreme [12, 21].

Sometimes prestressed dies, i.e. reinforced with a single ring or larger number of concentric rings with thermocompression bonds or forced-in joints between them, are used in order to increase the crack resistance of forging tools. The generation of suitably high prestresses (large hoop compressive stresses) during assembly should compensate for the very large hoop tensile stresses during forging. This beneficial state of stress can be much different in practice because of workmanship errors, improper tolerances and the repeated use of unworn tool parts, which may result in their premature wear [1-8, 18].

Moreover, the whole technological process should be taken into account since the choice of optimum process parameters may significantly extend the life of the tools and improve the quality of the products. The main factors having a bearing on the forging process are: the temperature of the tools and that of the preform, the geometry of the charge material, the rate of the process, lubrication and cooling and the quality of the tools.

Thus the requirements which tool materials, their heat treatment, mechanical treatment and chemical treatment, the design and workmanship of the tools and the process conditions must meet are very high. It seems that in the selection of a suitable die material and in its optimum heat treatment there is still enormous potential for extending

dzi i wstępniaka, geometrię materiału wsadowego, prędkość procesu, smarowanie i chłodzenie oraz jakość narzędzi.

Jak to przedstawiono powyżej wymagania stawiane materiałom narzędziowym, ich obróbce cieplnej, mechanicznej i chemicznej, a także konstrukcji i dokładności wykonania narzędzi oraz warunków w jakich prowadzony jest proces są więc bardzo wysokie. Wydaje się, że ogromne możliwości podniesienia trwałości matryc stosowanych w procesie kucia tkwią jeszcze w doborze odpowiedniego materiału na matryce oraz w optymalnej jego obróbce cieplnej. Badania mikroskopowe dotychczas stosowanych materiałów wspomagane poprzez MES powinny pomóc w analizie zużycia narzędzi oraz w doborze optymalnych rozwiązań materiałowych.

Celem pracy jest analiza trwałości matryc (dla 4 operacji) wykonanych przez trzech różnych producentów stosowanych w wielooperacyjnym procesie kucia na ciepło obudowy przegubu homokinetycznego.

Aby osiągnąć założony cel pracy zdecydowano się na przeprowadzenie następujących badań:

- analizy statystycznej zużycia matryc,
- badań makro i mikroskopowych na mikroskopie metalograficznym Olympus,
- pomiarów twardości,
- badań na skaningowym mikroskopie elektronowym SEM/HITACHI S-3400 N/2007 obejmującym EDX (Energy Dispersive X-ray analysis system) oraz BSE (Backscattered Electrons), pozwalających na określenie składu chemicznego oraz rozkładu pierwiastków,
- pomiarów mikroskopowych XRD (X-ray Diffraction-proszkowej dyfraktometrii rentgenowskiej) na polikrystalicznym dyfraktometrze ULTIMA IV/Rigaku/2008 wyposażonym w lampę miedziową, pozwalających na analizę fazową materiału.

3. Analiza statystyczna zużycia matryc

Narzędzia do wielooperacyjnego kucia przegubów produkowane i dostarczane są przez różnych producentów. Z doświadczenia wiadomo, że proces wytwarzania narzędzi jest różnie przez nich realizowany. Niska żywotność narzędzi może wynikać między innymi z nieprawidłowo przeprowadzonej obróbki cieplnej jak również źle wykonanej obróbki wykańczającej oraz wielu innych przyczyn, dlatego też analiza statystyczna żywotności narzędzi dostarczanych przez poszczególnych producentów umożliwi dokładniejsze rozpoznanie problemu.

Na rys.2. przedstawiono badania statystyczne w postaci wykresu trwałości matryc stosowanych w procesie kucia na ciepło (dla 4 operacji wybranej referencji, w której występują największe obciążenia) obudowy przegubu homokinetycznego w 2008 roku. Narzędzia te zostały wykonane z tego samego materiału (stal X38CrMoV5-3) przez 3 różnych producentów. Na podstawie przeprowadzonej analizy da-

the life of forging dies. Microscopic examinations of the existing materials, aided by FEM should help in the analysis of tool wear and in the choice of optimum materials.

This paper analyzes (for four operations) the durability of dies (made by three different manufacturers) used in the multioperation hot forging of the CV joint casing.

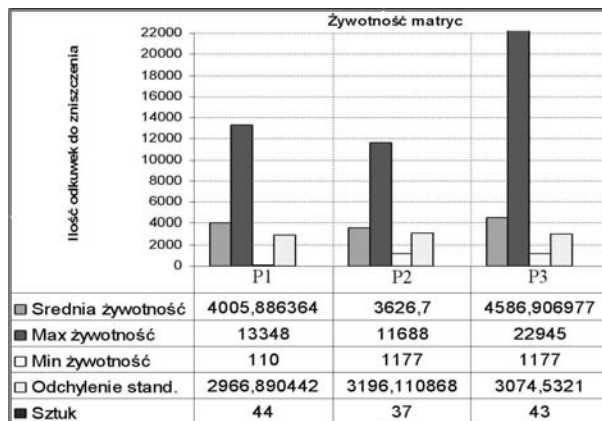
For this purpose the following investigations were carried out:

- a statistical analysis of the wear of the dies;
- macro- and microscopic examination by means of an Olympus metallographic microscope;
- hardness measurements;
- examinations by means of a SEM/HITACHI S-3400 N/2007 scanning electron microscope with AN EDX (Energy Dispersive X-ray) microanalyzer and a BSE (Backscattered Electrons) detector, making it possible to determine the chemical composition and distribution of elements;
- XRD (X-ray Diffraction) measurements by means of a ULTIMA IV/Rigaku/2008 diffractometer equipped with a copper lamp, allowing material phase analyses.

3. Statistical analysis of die wear

Tools for the multioperation forging of CV joints are manufactured and delivered by different manufacturers. It is known from experience that the tool manufacture process is differently carried out by them. Short tool life may be due to improperly performed heat treatment and finishing and to many other causes. Therefore a statistical analysis of the life of tools supplied by different manufacturers should identify the problem more closely.

Figure 2 shows the results of a statistical analysis, in the form of hot forging die life diagrams for the CV joint casing (for four operations involving highest loading), for the year 2008. The tools were made of the same material (steel X38CrMoV5-3) by three different manufacturers. The mean, maximum and minimum tool life and the standard deviation were determined on the basis of the tool life data analysis. It is apparent that the tools supplied by manufacturer P3 have the longest life.



Rys. 2. Trwałość matryc stosowanych w procesie kucia obudowy przegubu dla 4 operacji kucia na ciepło dla trzech producentów P1, P2, P3

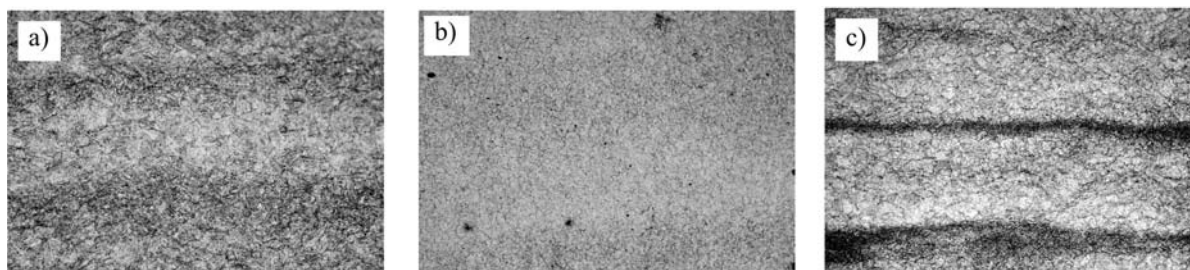
Fig. 2. Life of dies used for forging CV joint casing for four hot forging operations and three manufacturers: P1, P2 and P3

nych dotyczących trwałości narzędzi, wyznaczona została: średnia, maksymalna i minimalna żywotność oraz odchylenie standardowe. Można zauważyć, że największą trwałość posiadają narzędzia dostarczane przez producenta P3.

Na podstawie badań makro i mikroskopowych stwierdzono, że dominującymi zjawiskami niszczącymi były: zużycie ściernie, zmęczenie cieplno mechaniczne oraz wyraźnie widoczne odkształcenia trwałe, nie zaobserwowano natomiast pęknięcia. Przeprowadzone w tym kierunku dalsze badania metalograficzne zniszczonych matryc wykazały, że każdy z trzech materiałów posiada znacznie różniącą się strukturę.

4. Badania makro i mikroskopowe na mikroskopie metalograficznym Olympus

W badaniach porównano mikrostruktury zużytych narzędzi wykonanych przez trzech różnych producentów matryc. Na rys. 3 przedstawiono zdjęcia mikrostruktur (próbki pobrano ze zniszczonych matryc dla 4 operacji kucia na ciepło dla zbliżonej liczby wykonanych odkuwek do momentu zniszczenia w kierunku wzdłużnym do osi matrycy).



Rys.3. Mikrostruktura materiału X38CrMoV5-3 dla matryc stosowanych w 4 operacji kucia: a) P1, b) P2, c) P3. Przekroje wzdłużne. Pow. 200x. Trawiono Nitaliem

Fig.3. Microstructure of material X38CrMoV5-3 for dies used in four forging operations: a) P1, b) P2, c) P3. Longitudinal sections. Magnification 200x. Etched with nital

Porównując powyższe mikrostruktury można zaobserwować, że w strukturze materiału P3 widać charakterystyczne pasma, na przemian ciemne i jasne, które wg dostępnej literatury są skupiskami pasmowych wydzieleni węglików. Natomiast struktury materiałów matryc wykonanych przez P2 i P3 nie wykazują wydzieleni, jedynie w strukturze P1 (rys. 3b) można zaobserwować słabo widoczne ciemniejsze pasma; struktura P2 jest całkowicie pozbawiona ciemnych wydzieleni i przedstawia martenzyt z widocznymi drobnymi wydzieleniami skoagulowanych węglików oraz innych wydzieleni. Przeprowadzono dodatkowo pomiary twardości badanych materiałów od trzech producentów narzędzi. Dla materiału od P1 twardość wyniosła 465-515HV, dla P2 odpowiednio 520-530HV oraz dla P3 odpowiednio 470-540HV. Mimo, że producenci wykonują narzędzia z tego samego materiału przedstawione struktury są różne, co może świadczyć o innym procesie obróbki cieplnej. Przeprowadzono również badania twardości w obszarach przy powierzchniach roboczych matryc, jak i w obszarach oddalonych od powierzchni roboczych matrycy. Twardości odpowiednio wynosiły: przy powierzchni roboczej ok. 480HV, w miejscu oddalonym od powierzchni roboczej 540HV.

Macro- and microscopic examinations showed that the dominant destructive phenomena were: abrasive wear, thermo-mechanical fatigue and pronounced permanent deformations. No cracking was observed. Metallographic examinations of the damaged dies showed that three materials significantly differed in their structure.

4. Macro- and microscopic examinations by means of Olympus metallographic microscope

The microstructures of the worn out tools made by the three different die manufacturers, determined by the examinations are compared in fig. 3. The samples were taken from the worn out dies for four hot forging operations and a similar number of forgings until failure, longitudinally to the die's axis.

In the above photographs, in the structure of material P3 one can see characteristic (alternately dark and light) bands, which, according to the literature, are concentrations of bandlike carbide segregations. Whereas the structures of the materials of the dies manufactured by P2 and P3 do not show any segregations. Only in the structure of P1 (fig. 3b) there are faintly visible darker bands. The structure of P2 is totally devoid of dark segregations and shows martensite with visible fine segregations of coagulated carbides and other segregations. In addition, the hardness of the materials supplied by the three tool manufacturers was measured. The P1 material was found to have a hardness of 565-515HV, P2 – 520-530HV and P3 – 470-540HV. Even though the manufacturers make tools from the same material, the presented structures differ from each other, which may indicate differences in the heat treatment process. Hardness was also tested in regions close to the active faces of the dies and at a larger distance

5. Badania na elektronowym mikroskopie elektronowym skaningowym

W tabeli 1 podano skład chemiczny stali X38CrMoV5-3 w stanie dostawy. Analiza składu chemicznego materiału (badania na spektrometrze) w stanie dostawy wykazała niemalże identyczny skład chemiczny dla wszystkich producentów. Można zatem wykluczyć wpływ zróżnicowania składu chemicznego na mikrostrukturę omawianych materiałów. Przeprowadzone wstępne badania na elektronowym mikroskopie skaningowym wyposażonym w mikroanalizator rentgenowski EDX mogą wskazywać na mikrosegregację pierwiastków stopowych domieszek takich jak molibden i wanad. Rys. 4 przedstawia mikrostrukturę materiału (P3) oraz pola oznaczone jako 1 oraz 2 w których przeprowadzono analizę EDX. Ciemne wydzielania widoczne na rys.3c widoczne są na rys.4 jako jasne pola, odwrotnie niż na mikroskopie optycznym. Pole oznaczone jako 2 i 3 wskazują miejsca analizy chemicznej pasmowych wydzieleni.

Wyniki przeprowadzonej mikroanalizy przedstawiono w tabeli 2. Można zauważyć, że w obydwu obszarach procentowy udział krzemu oraz manganu jest bardzo zbliżony. Istotne różnice występują w ilości wanadu i molibdenu. Mniejsze różnice występują w ilości chromu oraz żelaza.

Przeprowadzono również badania przy znacznie większych powiększeniach celem dokładniejszej identyfikacji rozkładu pierwiastków w poszczególnych mikroobszarach próbek. Wyniki przeprowadzonej analizy przedstawiono na rys. 5 oraz w tabeli 3.

Można zauważyć, że w obydwu miejscach pomiarowych procentowy udział manganu jest zbliżony. Istotne różnice występują w przypadku krzemu, wanadu, chromu oraz molibdenu. W przypadku pierwszego obszaru ilość krzemu jest ok. 3 krotnie większa niż w obszarze drugim. Procentowy udział chromu jest około 5 krotnie mniejszy a molibdenu ponad 12 razy większy.

Na rys. 6 przedstawiono struktury materiału od producenta P3. Zdjęcia wykonano z użyciem detektora BSE (Backscattered Electrons).

from them. The hardness amounted to about 480HV close to the active face and to 540HV away from it.

5. SEM examinations

The chemical composition of steel X38CrMoV5-3 in delivery condition is given in table 1. A chemical composition analysis (spectrometer examinations) of the material in delivery condition showed that the materials supplied by the three manufacturers had almost the same chemical composition. Thus the effect of differences in chemical composition on the microstructure of the materials can be excluded. Preliminary examinations by means of the scanning electron microscope equipped with an EDX microanalyzer seem to indicate microsegregation of alloying elements such as molybdenum and vanadium. Figure 4 shows the microstructure of the material (P3) and areas 1 and 2 for which the EDX analysis was carried out. The dark segregations visible in fig. 3c appear as light areas in fig. 4, contrariwise than under an optical microscope. Areas 2 and 3 indicate the places for which the analysis of the chemical composition of the bandlike segregations was carried out.

The results of the microanalysis are shown in table 2. One can notice that the percentages of silicon and manganese are very similar in the two areas. There are significant differences in the amounts of vanadium and molybdenum. There are slight differences in the amounts of chromium and iron.

Examinations under much larger magnifications were also made in order to identify more closely the distribution of elements in the particular microareas of the samples. The results are shown in fig. 5 and in table 3.

One can observe that in both measuring places the percentage of manganese is similar. There are significant differences in the case of silicon, vanadium, chromium and molybdenum. In the first area the amount of silicon is about three times larger than in the second area. The percentage of chromium is about five times lower and that of molybdenum is over twelve times higher.

Tab. 1. Skład chemiczny stali X38CrMoV5-3.

Tab. 1. Chemical composition of steel X38CrMoV5-3.

Zawartość pierwiastków [%]							
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V
0,35-0,4	0,3-0,5	0,3-0,5	<0,03	<0,02	4,8-5,2	2,7-3,2	0,4-0,6

Tab. 2. Skład chemiczny stali X38CrMoV5-3 z wskazanych obszarów (punktów).

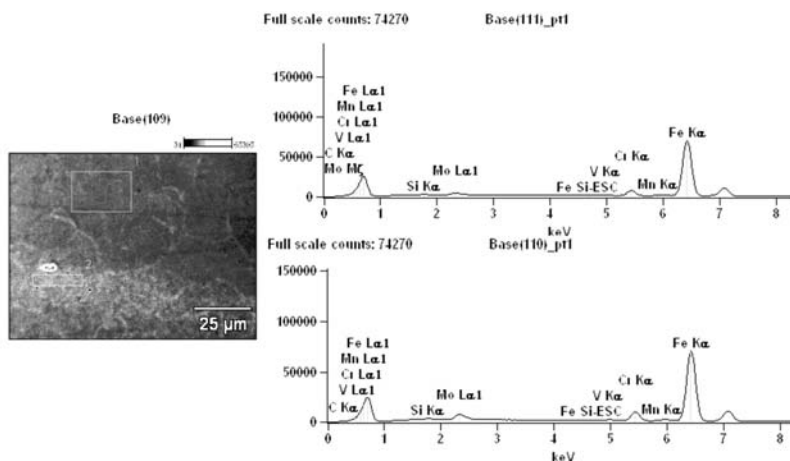
Tab. 2. Chemical composition of X38CrMoV5-3 taken from indicated areas (points).

Pole pomiarowe	Zawartość pierwiastków [%] wagowo					
	Si	V	Cr	Mn	Fe	Mo
1	0,31	0,29	12,06	0,24	78,54	1,82
2	0,33	0,58	15,13	0,28	77,16	3,55

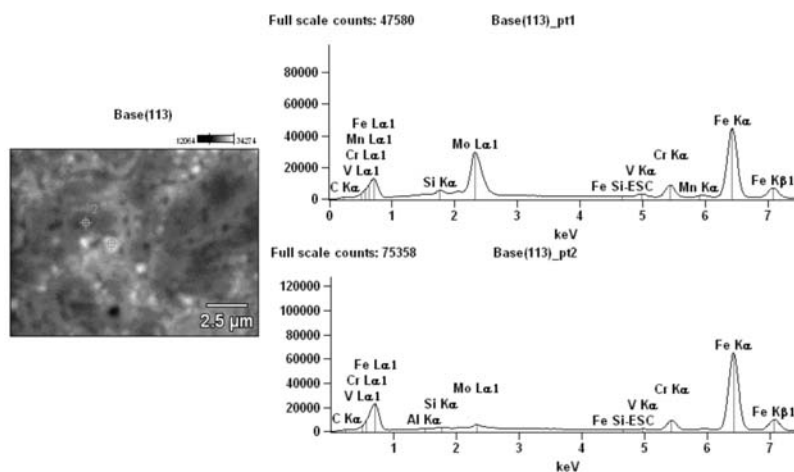
Tab. 3. Skład chemiczny stali X38CrMoV5-3 z wskazanych obszarów (punktów).

Tab. 3. Chemical composition of steel X38CrMoV5-3 taken from indicated areas (points).

Pole pomiarowe	Zawartość pierwiastków [%] wagowo					
	Si	V	Cr	Mn	Fe	Mo
1	0,99	1,57	3,62	0,33	62,87	24,45
2	0,30	0,36	15,41	0,28	75,61	2,00



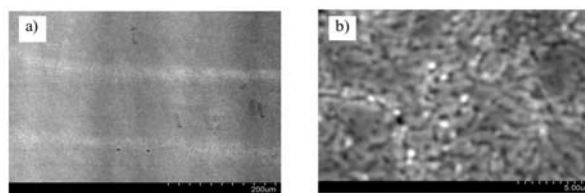
Rys. 4. Mikrostruktura stali X38CrMoV5-3. Zaznaczono pola, w których przeprowadzono mikroanalizę rentgenowską. Materiał od producenta P3
 Fig. 4. Microstructure of steel X38CrMoV5-3 with marked areas for which EDX microanalysis was performed. Material supplied by manufacturer P3



Rys.5 Mikrostruktura stali X38CrMoV5-3. Zaznaczono pola, w których przeprowadzono mikroanalizę rentgenowską. Materiał od producenta P3
 Fig.5. Microstructure of steel X38CrMoV5-3 with marked areas for which EDX analysis was performed. Material supplied by manufacturer P3

Kolejnym etapem badań było przeprowadzenie powierzchniowej analizy składu chemicznego dla tego materiału, z którego wykonano matrycę przez producenta P3 (mapping powierzchniowy). Wyniki przeprowadzonej analizy przedstawiono na rys. 7.

Z przeprowadzonych mikroanaliz EDX wynika, że w mikrostrukturze stali X38CrMoV5-3 od producenta P3 występują obszary wzbogacone w wanad oraz molibden co może wskazywać na obecność wysokotopliwych węglików tych pierwiastków. Natomiast równomierny rozkład chromu wskazywać może na prawidłowe rozmieszczenie i wielkość węglików chromu o niższej temperaturze topnienia niż węgliki wanadu i molibdenu. Mikroanalizę przeprowadzono w polach widocznych na rys. 4, jako obszary o jasniejszym zabarwieniu. W pozostałych obszarach (ciemne pola) nie stwierdzono takiego



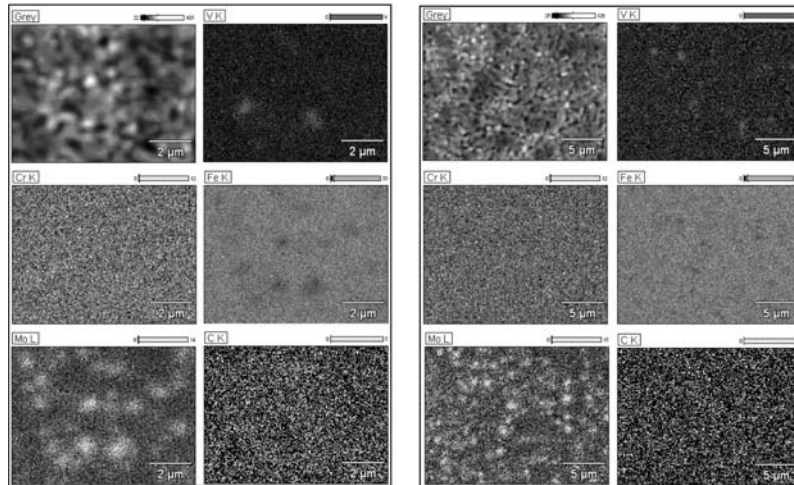
Rys.6. Mikrostruktura stali X38CrMoV5-3 a) Widoczne poziome pasma sferoidalnych wydzieleni na przekroju wzdłużnym próbki. Trawiono Nitaliem b) Fea stopowy z widocznymi drobnymi wydzieleniami skoagulowanych węglików oraz innych wydzieleni

Fig.6. Microstructure of steel X38CrMoV5-3: a) Visible horizontal bands of spheroidal segregations in longitudinal section of sample; etched with nital. b) Alloying Fea with visible fine segregations of coagulated carbides and other segregations

Figure 6 shows the structures of the material supplied by manufacturer P3. The photographs were taken by means of a BSE detector.

Then a surface chemical composition analysis (surface mapping) was carried out for the material from which the die was made by manufacturer P3. The results are shown in fig. 7.

The EDX microanalyses show that areas enriched with vanadium and molybdenum occur in the microstructure of steel X38CrMoV5-3 supplied by manufacturer P3, which may indicate the presence of high-melting carbides of these elements. Whereas the uniform distribution of chromium may indicate the correct distribution and size of chromium carbides whose melting point is lower than that of vanadium and molybdenum carbides. The microanalysis was performed in the lighter areas visible in fig. 4. In the other (dark) areas no such



Rys. 7 Wyniki przeprowadzonej analizy powierzchniowej rozkładu pierwiastków
 Fig. 7. Results of surface analysis of elemental distribution

zróżnicowania w składzie chemicznym. W obszarach o wyższym stężeniu wanadu i molibdenu wykryto obszary, w których jest znacznie mniejsza ilość żelaza.

W dalszej kolejności przeprowadzono badania dotyczące określenia składu chemicznego dla materiałów matryc dla pozostałych dwóch producentów. Na rys. 8 przedstawiono mikrostrukturę materiału od producenta P1 oraz pola oznaczone jako 1 oraz 2, w których przeprowadzono analizę EDX.

Wyniki przeprowadzonej mikroanalizy przedstawiono w tabeli 4. Można zauważyć, że w obydwu obszarach procentowy udział krzemu, chromu oraz manganu i molibdenu jest bardzo zbliżony. Istotne różnice występują jedynie w ilości węgla. Poza tym, podczas analizy wykryto śladowe ilości boru (0,71%) i niklu (0,16%).

differences in chemical composition were found. In the areas with elevated vanadium and molybdenum concentrations, subareas with a much smaller amount of iron were discovered.

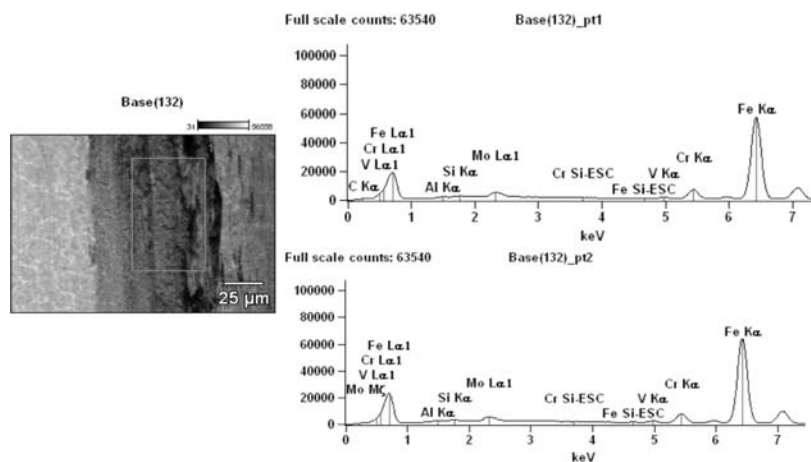
Subsequently, the chemical composition of the die materials from the other two manufacturers was determined. Fig. 8 shows the microstructure of the material from manufacturer P1 and areas 1 and 2 in which the EDX analysis was performed.

The results of the microanalysis are shown in table 4. One can observe that in the two areas the percentages of silicon, chromium, manganese and molybdenum are very similar. There are significant differences in only the amount of carbon. Apart from

Tab. 4. Skład chemiczny stali X38CrMoV5-3 z wskazanych obszarów (punktów) dla P1.

Tab. 4. Chemical composition of steel X38CrMoV5-3 taken from indicated areas (points) for P1.

Pole pomiarowe	Zawartość pierwiastków [%] wagowo					
	Si	V	Cr	Mn	Fe	Mo
1	0,35	0,34	17,94	0,33	74,93	1,83
2	0,37	0,41	16,85	0,29	72,61	1,93



Rys. 8. Mikrostruktura stali X38CrMoV5-3 oraz pola, w których przeprowadzono mikroanalizę rentgenowską. Materiał od producenta P1
 Fig. 8. Microstructure of steel X38CrMoV5-3 and areas in which EDX analysis was performed. Material from manufacturer P1

Na rys. 9 przedstawiono mikrostrukturę materiału od producenta P2 oraz pola oznaczone jako 1 oraz 2, w których przeprowadzono analizę EDX. Natomiast w tabeli 5 pokazano wyniki przeprowadzonej mikroanalizy. Można zauważyć, że w obydwu obszarach procentowy udział krzemu oraz manganu i molibdenu jest bardzo zbliżony. Istotne różnice występują jedynie w ilości węgla, ale nie tak duże jak w przypadku materiału od producenta P1 i P3. Poza tym, podczas analizy wykryto śladowe ilości boru (0,14%) i niklu (0,41%).

Przeprowadzona analiza na elektronowym mikroskopie skaningowym wyposażonym w mikroanalizator rentgenowski EDX dla materiału matryc od trzech różnych producentów wykazała pewne różnice w punktowym składzie chemicznym, w szczególności dla chromu, wanadu i molibdenu. Może to wskazywać na mikrosegregację pierwiastków stopowych domieszek takich jak molibden, wanad i chrom, które wykazują tendencje do łączenia się z węglem i powstawania trudno rozpuszczalnych węglików.

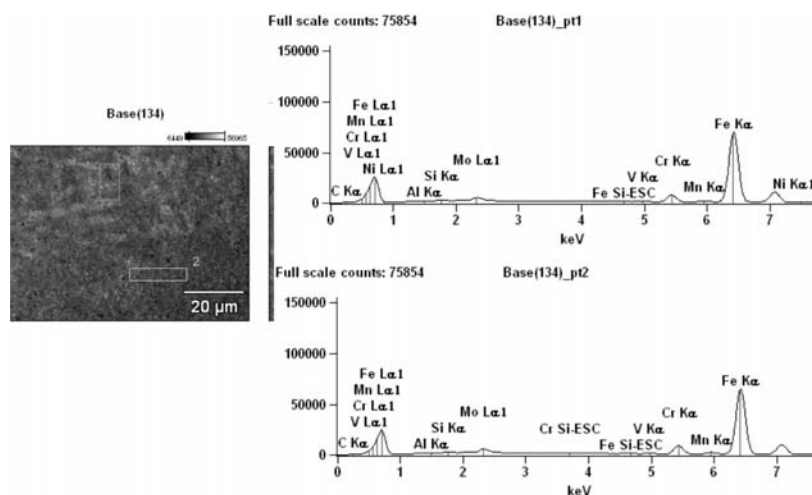
Na podstawie analizy rentgenowskiej EDX można stwierdzić, że najmniej niejednorodną strukturę pod względem składu chemicznego wykazuje materiał od P2.

that, minute quantities of boron (0.71%) and nickel (0.16%) were detected.

Figure 9 shows the microstructure of the material supplied by manufacturer P2 and areas 1 and 2 in which the EDX analysis was performed. The results of the microanalysis are shown in table 5. One can observe that the percentages of silicon, manganese and molybdenum in the two areas are very similar. There are significant differences in only the amount of carbon, but no so large as in the case of materials P1 and P2. Apart from that, minute quantities of boron (0.14%) and nickel (0.41%) were detected.

The analysis of the die material supplied by the three different manufacturers, performed by means of the scanning electron microscope equipped with an EDX microanalyzer showed certain differences in the point chemical composition, particularly for chromium, vanadium and molybdenum. This may indicate the microsegregation of alloying additions such as molybdenum, vanadium and chromium, which tend to combine with carbon, forming hardly soluble carbides.

The EDX analysis showed that as regards the chemical composition the material from P2 has the least heterogeneous structure.



Rys. 9. Mikrostruktura stali X38CrMoV5-3 oraz pola, w których przeprowadzono mikroanalizę rentgenowską (producent P2)

Fig. 9. Microstructure of steel X38CrMoV5-3 (manufacturer P2) and areas in which EDX analysis was performed

Tab. 5. Skład chemiczny stali X38CrMoV5-3 z wskazanych obszarów (punktów) dla P2
Tab. 5. Chemical composition of steel X38CrMoV5-3 taken from indicated areas (points) for P2

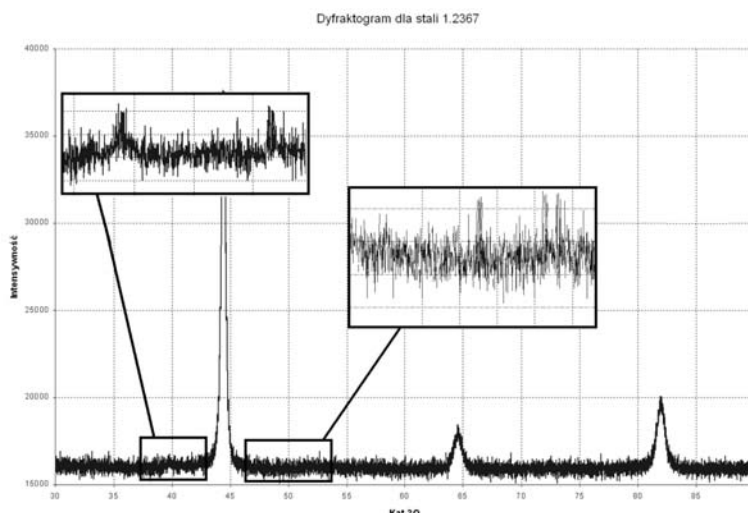
Pole pomiarowe	Zawartość pierwiastków [%] wagowo					
	Si	V	Cr	Mn	Fe	Mo
1	0,44	0,34	10,64	0,33	74,93	2,48
2	0,42	0,41	9,85	0,29	72,61	3,15

6. Pomiary dyfraktometryczne XRD

W celu określenia faz (występowania związków chemicznych) przeprowadzono rentgenowskie badania dyfraktometryczne, a w szczególności podjęto próbę zidentyfikowania sferoidalnych wydzielen w pasmowych obszarach widocznych na zglądach dla materiału od producenta P3, gdyż mimo niejednorodnego składu chemicznego matryce wykazywały największą trwałość (rys.2). Na rys. 10 przedstawiono dyfraktogram w obszarach kątowych 2θ.

6. XRD measurements

XRD examinations were performed in order to determine the phases (the occurrence of chemical compounds). In particular, an attempt was made to identify the spheroidal segregations in the bandlike areas visible in the microsections for the material from manufacturer P3 since despite the heterogeneous chemical composition, the dies showed the highest durability (fig.



Rys. 10. Dyfraktogram stali X38CrMoV5-3. Material do badań pobrano z uszkodzonej matrycy wykonanej przez producenta P1

Fig. 10. X-ray diffraction pattern of steel X38CrMoV5-3. Material for examinations was taken from damaged die manufactured by P1

Jak wskazują wyniki badań na dyfraktometrze rentgenowskim w obszarach 2θ występowania wydzieleni węglkowych od omawianych pierwiastków wchodzących w skład materiału, wykryto impulsy pochodzące najprawdopodobniej od tych wydzieleni (węgliki wanadu i molibdenu). Jak wskazują przeprowadzone dodatkowe badania składu chemicznego wykryto obecność boru w mikrostrukturze omawianych materiałów. Obecność tego pierwiastka może powodować pojawianie się w strukturze borków oraz węglkoborków. W celu potwierdzenia przypuszczeń konieczna jest wnikliwa analiza oraz szczegółowe badania dyfraktometryczne w wąskich zakresach kąta 2θ z bardzo małym posuwem kątowym. Obecność wanadu w strukturze stali wskazuje na dużą skłonność do tworzenia węglika VC, który rozpuszcza się znacznie trudniej niż Fe_3C . Nie rozpuszczony całkowicie w temperaturze austenitacji węgiel wanadu nie przejmuje węgla z austenitu koniecznego do zahartowania materiału. Podczas odpuszczania początkowy spadek twardości wywołany pojawieniem się Fe_3C , zostaje zrównoważony przez wzrost twardości wywołany drobnymi wydzieleniami węglika V_4C_3 (efekt utwardzania dyspersyjnego). Dopiero powyżej temperatury $600^\circ C$ twardość znacznie maleje z powodu koagulacji wydzieleni węglkowych. Obecność chromu powoduje obniżenie rozpuszczalności węgla w austenicie, co z kolei powoduje wzrost ilości węglków w stali [10,11,14,23,25].

7. Podsumowanie

Przeprowadzony proces obróbki cieplnej w etapie przygotowywania oraz produkcji matrycy ma istotny wpływ na rozdrobnienie i równomierne rozmieszczenie drobnych węglków w strukturze materiału, co potwierdziły przeprowadzone badania. Drugim czynnikiem mającym wpływ na rozdrobnienie i rozmieszczenie wydzieleni węglkowych w materiale jest stopień gniotu oraz czas wygrzewania materiału podczas obróbki plastycznej półfabrykatu. Nie stwierdzono istotnych różnic podczas analizy składu chemicznego materiałów pochodzących od trzech różnych producentów. Skład chemiczny stali był niemal identyczny z podawanym w normach DIN EN ISO 4957 (tabela 1). Istotne różnice występują jedynie w przypadku badania poszczególnych wydzieleni (tabela 3), w których stwierdzono zróżnicowaną ilość wanadu, chromu oraz molibdenu. Wstępnie przeprowadzone badania dyfraktometryczne

2). An X-ray diffraction pattern in angular areas 2θ is shown in fig. 10.

In areas 2θ (where carbide segregations from the considered elements present in the composition of the material occur), impulses originating most probably from the segregations (vanadium and molybdenum carbides) were detected by the XRD investigations. Additional chemical composition analyses showed the presence of boron in the microstructure of the investigated materials. The presence of this element may result in the appearance of borides and carbide borides. In order to confirm this supposition a thorough analysis and detailed XRD investigations in narrow ranges of angle 2θ at a very small angular advance were carried out. The presence of vanadium in the structure of the steel indicates a high propensity for forming vanadium carbide (VC), which dissolves much more sparingly than Fe_3C . The vanadium carbide incompletely dissolved at the austenitization temperature does not take over carbon from the austenite necessary to harden the material. During tempering the initial decrease in hardness due to the appearance of Fe_3C is counterbalanced by an increase in hardness caused by the fine segregation of V_4C_3 (the dispersion hardening effect). Only above $600^\circ C$ hardness begins to decrease because of the coagulation of the segregated carbides. The presence of chromium results in lower solubility of carbon in the austenite, which in turn causes an increase in the amount of carbides in the steel [10, 11, 14, 23, 25].

7. Conclusion

The investigations have confirmed that heat treatment at the stages of preparing and manufacturing the die has a significant effect on the refinement and uniform distribution of fine carbides in the structure of the material. Another factor having a bearing on the refinement and distribution of carbide segregations in the material is the degree of draft and the length of soaking during the plastic forming of the semifinished product. No significant differences in the chemical composition of the materials supplied by the three different manufacturers were found. The chemical composition of the steel was almost identical to the one given in standards DIN EN ISO 4957 (table 1). Significant differences (in the vanadium, chromium and molybdenum content) occur only between individual segregations

jak również analiza EDX, mapping powierzchniowy oraz badania przy użyciu detektora BSE mogą wskazywać na obecność drobnych wydzieleni węglkowych w pasmowych obszarach badanej stali X38CrMoV5-3. Pasmowe wydzielenia najbardziej widoczne są w strukturze materiału pochodzącego od producenta P3. Materiał ten wykazuje największą żywotność wśród badanej grupy materiałów od trzech różnych producentów (P1, P2, P3). Materiały pochodzące od producentów P1 oraz P2 charakteryzują się zbliżoną trwałością i zdecydowanie niższą maksymalną żywotnością w stosunku do materiału pochodzącego od P3.

Przeprowadzone pomiary twardości w różnych obszarach badanych próbek wskazują na zmniejszoną twardość w obszarach roboczych matrycy (480HV) w stosunku do obszarów oddalonych od powierzchni roboczych matrycy (550HV). Spadek twardości materiału przy powierzchniach roboczych najprawdopodobniej spowodowany jest miejscowym odpuszczeniem materiału i koagulacją węglków [3,9,15-17,20]. Temperatura w tych obszarach mogła przekroczyć 600°, ponieważ temperatura odkuwek podczas procesu kucia wynosiła ok. 900°C. Jednak obróbka stali narzędziowych do pracy na gorąco, zwłaszcza zawierających wolfram i molibden powinna być przeprowadzana w taki sposób, aby w czasie pracy narzędzia wykorzystywany był efekt twardości wtórnej [17].

Jak wskazują przeprowadzone analizy, struktura badanych materiałów ma wpływ na trwałość narzędzi do obróbki plastycznej na gorąco. Według danych literaturowych, poza właściwościami materiału w stanie dostawy, równie istotnym jest proces technologiczny wytwarzania matryc, jak i ich obróbka cieplna. Przeprowadzone badania wskazują, że badane materiały posiadały przedstawianą strukturę w całej swej objętości. Próbkę do badań pobierane były z różnych części matryc i ich struktura była niemal identyczna w każdym przypadku dla materiału pochodzącego od jednego producenta (P1, P2 oraz P3).

Należałoby przeprowadzić wnikliwe badania wpływu pasmowych wydzieleni widocznych w strukturze, ponieważ wydzielone trudno topliwe węglki mogą tworzyć niekorzystną strukturę o zróżnicowanych parametrach wytrzymałościowych, skłonności do pękania, jak również obniżyć wytrzymałość zmęczeniową w warunkach cyklicznie zmiennych naprężeń. W literaturze można spotkać niekiedy sprzeczne opinie dotyczące struktury badanej stali stosowanej do wytwarzania matryc [13,19,24]. Pomimo wydawałoby się niekorzystnej struktury materiał pochodzący od producenta P3 wykazuje bardzo dobre parametry podczas pracy i stosunkowo wysoką żywotność. Jak można wnioskować, spowodowane jest to stosunkowo dużymi wydzieleniami pasmowymi które ułożone są wzdłużnie w strukturze materiału. Przeprowadzone pomiary mikro twardości potwierdzają, że materiał z najbardziej widocznymi wydzieleniami pasmowymi (P3) posiada największe zróżnicowanie w twardości poszczególnych składników strukturalnych. Jak potwierdzają badania eksploatacyjne struktura taka doskonale sprawdza się w warunkach przemysłowych procesu kucia na ciepło obudowy przegubu homokinetycznego i charakteryzuje się najwyższą trwałością wśród badanej grupy materiałowej od trzech różnych producentów.

(table 3). The preliminary diffractometric investigations, the EDX analysis, the surface mapping and the examinations by means of the BSE detector seem to indicate the presence of fine carbide segregations in the bandlike areas of investigated steel X38CrMoV5-3. Bandlike segregations are most visible in the structure of the material supplied by manufacturer P3. This material shows the longest life among the investigated group of materials supplied by the three manufacturers (P1, P2, P3). The materials supplied by manufacturers P1 and P2 are characterized by similar durability and a much shorter maximum life than the material obtained from manufacturer P3.

The hardness measurements taken in different areas of the samples indicate a lower hardness (480HV) in the active faces of the die in comparison with the one (550HV) in the areas away from the die's active faces. The decrease in material hardness in the active faces is most likely due to the local tempering of the material and the coagulation of carbides [3, 9, 15-17, 20]. The temperature in these areas could have exceeded 600° since the temperature of the blanks during forging was about 900°C. The treatment of tool steels for hot working, particularly the ones containing tungsten and molybdenum, should be performed in such a way that the secondary hardness effect is exploited during the work of the tool [17].

The analyses have shown that the structure of the investigated materials has an effect on the durability of the hot working tools. According to the literature, besides the properties of the material in delivery condition, the process of manufacturing dies and their heat treatment are equally critical. The investigations show that the supplied materials had the given structure in their whole volume. The samples for the analysis were taken from different parts of the dies and their structure was nearly identical in each case for the material supplied by a single manufacturer (P1, P2 or P3).

In-depth studies of the effect of the bandlike segregations visible in the structure should be made since the segregated infusible carbides may form an unfavourable structure with varying strength parameters and susceptibility to cracking and lower the fatigue strength in cyclically variable stress conditions. In the literature one can find sometimes contradictory opinions about the structure of the investigated steel used for manufacturing dies [13, 19, 24]. Despite its seemingly unfavourable structure the material supplied by manufacturer P3 shows very good parameters during work and a relatively long life. As one can infer, this is owing to the quite large bandlike segregations situated longitudinally in the material's structure. The microhardness measurements confirm that the material with the most prominent bandlike segregations (P3) is characterized by the highest variation in the hardness of its particular structural components. Service tests have shown that such a structure performs very well in the industrial hot forging of the CV joint casing and has the longest life among the materials supplied by the three different manufacturers.

Prace wykonane w ramach realizacji projektu badawczego 3 T08A 018 30 finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

8. References

1. Bartnicki Z, Pater A, Gontarz A. Theoretical analysis of rolling-extrusion process of axi-symmetrical parts. Archives of civil and mechanical engineering. 2008; 02: 5-12.
2. Bobyr M, Yakhno B, Rusiński E, Harnatkiewicz P. Damage in the complex lowcycle fatigue. Archives of civil and mechanical engineering. 2008; 03: 23-32
3. Burakowski T, Wierzchom T. Inżynieria Powierzchni Metali. Warszawa: WNT, 1995.
4. Czyżewski P, Kocańda A. Computer modeling of valve lever forging with various performs. Archives of civil and mechanical engineering. 2008; 03: 33-40
5. Gronostajski Z, Hawryluk M, Jaśkiewicz K, Niechajowicz A, Polak S, Walczak S, Woźniak A. Wpływ tolerancji wykonawczych matryc sprężanych do wyciskania na ich wytrzymałość. *Plasticita materialov* 2007; 14: 87-92
6. Gronostajski Z, Hawryluk M, Jaśkiewicz K, Niechajowicz A, Polak S, Walczak S, Woźniak A. Application of physical and mathematical modelling to analysis of different forging processes of constant velocity joint body, *Computer Methods in Materials Sciences* 2007; 07: 231-236
7. Gronostajski Z, Hawryluk M, Kaszuba M, Zwierzchowski M. Analysis of forging process of constant velocity joint body. *Steel Research International* 2008; 01: 547-554.
8. Gronostajski Z, Hawryluk M. The main aspects of precision forging. Archives of civil and mechanical engineering. 2008; 02: 39-56
9. Hebda M, Wachal A. Trybologia. Warszawa: WNT, 1980.
10. Hejwowski T, Weroński A. Wytwarzanie powłok odpornych na zużycie. Lublin: WUPL, 2000.
11. Hejwowski T. Studium procesów zużycia erozyjnego, ściernego i zmęczenia cieplnego elementów maszyn oraz kształtowanie struktur o korzystnych właściwościach eksploatacyjnych. Lublin: WUPL, 2003.
12. Karwata T, Bonek M. Wpływ laserowej obróbki powierzchniowej na własności trybologiczne stali narzędziowej stopowej do pracy na gorąco. *PSKN* 2006; 08: 11-19
13. Lawrowski Z. Tribologia. Tarcie, zużywanie i smarowanie. Warszawa: PWN, 1993r.
14. Niewczas A, Czerniec M, Ignaciuk P. Badania trwałości elementów maszyn współpracujących tarcioowo. Lublin: IZT, 2000.
15. Niewczas A. Modelowanie zużycia i ocena niezawodności silników spalinowych. Lublin: WUPL, 1998.
16. Okrajni J. Laboratorium mechaniki materiałów. Gliwice WPS 2003.
17. Przybyłowicz K. Metaloznawstwo. Warszawa; WNT, 1999.
18. Skubisz P, Łukaszek-Solek A, Sińczak J, Bednarek S. Drop forging of HSLA steel with application of thermomechanical treatment. Archives of civil and mechanical engineering. 2008; 04: 93-99.
19. Suh N.P. The delamination theory of wear. *Wear* 1977; 44: 1-14
20. Szczerek M, Wisniewski M. Tribologia Tribotechnika. Radom: ITER, 2000.
21. Web page : <http://www.uddeholm.com>
22. Web page: www.gkn.automotive.com
23. Weroński A, Hejwowski T. Thermal fatigue of metals. New York: Marcel Dekker Inc, 1992.
24. Zum Gahr K.-H. Microstructure and wear of materials. New York: Elsevier, 1978.
25. Zwierzchowski M. Analiza metod badania odporności na zmęczenie cieplne. Współczesne technologie w budowie maszyn. Lublin: 2002. 147-152.

Dr inż. Marek HAWRYLUK

Dr inż. Maciej ZWIERZCHOWSKI

Instytut Technologii Maszyn i Automatykacji

Politechnika Wrocławska

ul. Ignacego Łukasiewicza 5, 50-371 Wrocław, Polska

E-mail: marek.hawryluk@pwr.wroc.pl

E-mail: maciej.zwierzchowski@pwr.wroc.pl
