

## WPLYW DYNAMICZNEGO NAGNIATANIA ROZPROSZONEGO NA TRWAŁOŚĆ ZMĘCZENIOWĄ ELEMENTÓW ZE STOPU TYTANU Ti-6Al-4V

### THE EFFECT OF SHOT PEENING ON THE FATIGUE LIFE OF PARTS MADE OF TITANIUM ALLOY Ti-6Al-4V

*W pracy przedstawiono metodę kontrolowanego dynamicznego nagniatania rozproszonego, która umożliwia kontrolę ruchu narzędzi nagniatających oraz zachowanie sposobu nanoszenia odcisków na obrabianą powierzchnię charakterystycznego dla nagniatania rozproszonego. Metoda ta umożliwiła przeprowadzenie badań wpływu energii zderzenia narzędzia nagniatającego z obrabianym przedmiotem oraz liczby zderzeń przypadających na jednostkę powierzchni obrabianej, nazywanej gęstością zderzeń, na trwałość zmęczeniową próbek ze stopu tytanu Ti-6Al-4V. Trwałość zmęczeniową badano na specjalnym stanowisku, umożliwiającym obustronne, cykliczne zginanie badanej próbki. Stwierdzono, że w przyjętym zakresie badanych parametrów energia zderzenia w większym stopniu wpływa na trwałość zmęczeniową niż gęstość zderzeń. Z porównania trwałości zmęczeniowej próbek nagniatanych i szlifowanych wynika, że obróbka nagniataniem dynamicznym powoduje kilkakrotny wzrost trwałości zmęczeniowej próbek ze stopu Ti-6Al-4V. Badania doświadczalne wykazały, że obróbka kulkowaniem wibracyjnym umożliwia uzyskanie podobnego wzrostu trwałości zmęczeniowej jak po kontrolowanym dynamicznym nagniataniu rozproszonym.*

**Słowa kluczowe:** nagniatanie dynamiczne, stop tytanu Ti-6Al-4V, trwałość zmęczeniowa.

*The study presents a method of controlled random shot peening which enables control of the movement of peening tools and preserves the manner of impacting the machined surface that is characteristic of shot peening. This method has made it possible to conduct studies of the influence of the energy with which the peening tool impacts the target workpiece and the number of impacts per unit of machined area, called impact density, on the fatigue life of specimens of titanium alloy Ti-6Al-4V. Fatigue life was examined on a special stand enabling symmetrical (double-sided) cyclic bending of the tested specimen. It was observed that within the adopted range of the tested parameters, impact energy affected fatigue life to a greater degree than did impact density. A comparison of fatigue life of shot peened and of polished specimens showed that shot peening caused a several-times increase in the fatigue life of specimens of titanium alloy Ti-6Al-4V. Experimental studies showed that vibratory ball peening allowed obtaining a similar increase in fatigue life as the one obtained for controlled shot peening.*

**Keywords:** shot peening, titanium alloy Ti-6Al-4V, fatigue life.

#### 1. Wprowadzenie

Jedną z metod zwiększania wytrzymałości zmęczeniowej elementów maszyn jest obróbka nagniataniem. W zależności od charakteru sił oddziaływania narzędzia nagniatającego na obrabianą powierzchnię rozróżnia się nagniatanie statyczne i dynamiczne. W procesie nagniatania dynamicznego narzędzia (najczęściej kulki) uderzają w obrabianą powierzchnię, powodując powstanie na niej trwałych odcisków. Jeżeli odciski tworzone są w sposób „uporządkowany” przez kulki nagniatające poruszające się w prowadnicach, to nagniatanie takie nazywane jest skoncentrowanym. Natomiast, gdy kulki nagniatające nie są ograniczone prowadnicami a uderzenia następują w sposób przypadkowy, to takie nagniatanie określane jest jako rozproszone [10].

Wiele elementów maszyn, narażonych w czasie eksploatacji na obciążenia zmienne, wytwarzanych jest ze stopów tytanu. Stopy te charakteryzują się bardzo dużą wartością wskaźnika wyrażającego stosunek wytrzymałości na rozciąganie  $R_m$  do gęstości  $\rho$ , co szczególnie predestynuje je do zastosowań w lotnictwie. Stosunek  $R_m/\rho$  dla stopu Ti-6Al-4V jest o 12% większy niż dla stopu aluminium 7075 (AlZn5,5MgCu) i o kilkadziesiąt procent większy niż dla stali [8]. Ze stopów tytanu wytwarzane są elementy samolotów pracujące w bardzo trudnych wa-

#### 1. Introduction

One of the methods of enhancing fatigue life of machine parts is peening. Depending on the character of the forces with which the tool acts on the machined surface, one distinguishes static and dynamic peening. In the process of dynamic (shot) peening, the tools (most frequently balls) bombard the machined surface imparting to it permanent indentations. If the indentations are formed in an „ordered” manner by shot moving along guides, this type of peening is called uniform peening. When, on the other hand, the shot is not limited by guides, and the impacts occur in a random fashion, this type of peening is called random peening [10].

Many machine parts that are exposed during operation to variable loads are manufactured from titanium alloys. These alloys are characterized by a very high tensile strength  $R_m$  to density  $\rho$  ratio, which makes them particularly suitable for applications in aviation. The  $R_m/\rho$  ratio for the Ti-6Al-4V alloy is 12% higher than for the 7075 aluminum alloy (AlZn5,5MgCu) and several dozen percent higher than for steel [8]. Titanium alloys are used for manufacturing aircraft parts that operate under very difficult conditions of variable loads. That is why the fatigue life of these alloys, which depends on the content of alloying elements and phase constitution, is one of the most im-

runkach obciążeń zmiennych. Dlatego wytrzymałość zmęczeniowa tych stopów, która zależy od zawartości pierwiastków stopowych i składu fazowego, jest jednym z najważniejszych kryteriów oceny przydatności tych materiałów w konstrukcjach lotniczych [11].

Wytrzymałość zmęczeniowa elementów ze stopów tytanu zależy również od właściwości ich warstwy wierzchniej. Właściwości te kształtowane są w procesie wytwarzania elementów, a następnie ulegają pewnym modyfikacjom w procesie eksploatacji [6]. Autorzy pracy [9] przedstawiają wyniki badań wpływu różnych metod obróbki stopu tytanu na wytrzymałość zmęczeniową. Widoczne są bardzo duże różnice wytrzymałości zmęczeniowej próbek obrabianych szlifowaniem, piaskowaniem i frezowaniem. Badania zmęczeniowe stopu Ti-6Al-4V prowadzili Autorzy prac [3, 13]. Wyniki badań potwierdzają występowanie zależności między warunkami obróbki próbek a ich trwałością zmęczeniową. Inicjacja pęknięcia zmęczeniowego zależy też od mikrostruktury stopu. Wzrost trwałości zmęczeniowej stopu tytanu wskutek nagniatania dynamicznego zaobserwowano zarówno podczas badań prowadzonych w temperaturze pokojowej jak i w temperaturze 423 K [4].

Znaczny wzrost trwałości zmęczeniowej (kilkunastokrotny) uzyskano w wyniku nagniatania strumieniowego (kulowania) śrutem o średnicy 0,36 mm próbek z karbem, wykonanych ze stopu tytanu Ti-10V-2Fe-3Al. Intensywność kulowania mierzona była za pomocą płytek Almena. Określona została optymalna intensywność kulowania, zapewniająca największy wzrost trwałości zmęczeniowej [1].

Korzystny wpływ nagniatania dynamicznego zauważono też na próbkach ze stopu Ti-6Al-4V odlewanych pod ciśnieniem. Zastosowanie pneumokulowania elementami z tlenku cyrkonu o średnicy 500  $\mu\text{m}$  spowodowało zwiększenie granicy zmęczenia z 350 MPa do 450 MPa [2].

L. Wagner badał wpływ pneumokulowania na wytrzymałość zmęczeniową stopów tytanu Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr i Ti-6Al-7Nb oraz stopów aluminium i magnezu. Do nagniatania stosował śrut stalowy o wymiarach 0,36 i 0,80 mm oraz kulki szklane o średnicy 0,65 mm. Widoczny jest korzystny wpływ nagniatania, chociaż w różnym stopniu, na właściwości zmęczeniowe obrabianych stopów [12].

Badania wpływu różnych odmian dynamicznego nagniatania rozproszonego na wytrzymałość zmęczeniową stopu WT3-1 (oznaczenia według norm rosyjskich) wykazały, że największy wzrost granicy zmęczenia w stosunku do próbek polerowanych nastąpił dla próbek obrabianych mikrokulowaniem (42%) i kulowaniem wibracyjnym (35,2%) [7]. Większy wzrost granicy zmęczenia, wynoszący 50%, uzyskano dla tego stopu po poddaniu go obróbce mikrokulowaniem w stanie przegrzanym [5].

Dotychczasowe badania wpływu dynamicznego nagniatania rozproszonego na trwałość zmęczeniową stopów tytanu nie uwzględniały parametrów tego procesu, do których należy zaliczyć energię zderzenia oraz liczbę zderzeń przypadających na jednostkę powierzchni obrabianej (gęstość zderzeń). Podczas obróbki dynamicznym nagniataniem rozproszonym kulki nagniatające zderzają się nie tylko z obrabianą powierzchnią, ale również ze sobą oraz, w przypadku kulowania wibracyjnego, ze ściankami komory roboczej. Taki „nieuporządkowany” ruch kulek nagniatających powoduje duże trudności w określeniu energii, z jaką kulka uderza w obrabianą powierzchnię, oraz gęstości uderzeń. Trudności te skłoniły autora do opracowa-

portant assessment criteria of the usefulness of these materials in aircraft structures [11].

Fatigue life of parts made of titanium alloys also depends on the properties of their surface layer. These properties are shaped in the process of manufacturing of parts and subsequently modified during operation [6]. The authors of study [9] present results of research on the influence of different methods of machining a titanium alloy on its fatigue life, which show very large differences in fatigue life among specimens machined by grinding, sand blasting and milling. Fatigue tests of the Ti-6Al-4V alloy were conducted by the authors of studies [3, 13]. The results of these tests confirm the existence of a relationship between the machining conditions and the fatigue life of specimens. Fatigue crack initiation also depends on the alloy's microstructure. An increase in fatigue life of a titanium alloy under shot peening was also observed during tests conducted both at room temperature and at the temperature of 423 K [4].

A significant (more than 10 times) increase in fatigue life was obtained in jet shot peening of notched specimens of the titanium alloy Ti-10V-2Fe-3Al with 0.36 mm diameter shot particles. Shot peening intensity was measured using Almen strips. An optimum Almen intensity was determined, which ensured the highest increase in fatigue life [1].

A beneficial effect of shot-peening was also observed for specimens of pressure cast Ti-6Al-4V alloy. Pneumatic shot peening with 500  $\mu\text{m}$  diameter zirconium oxide particles caused an increase in fatigue limit from 350 MPa to 450 MPa [2].

Wagner studied the influence of pneumatic shot peening on the fatigue life of titanium alloys Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr and Ti-6Al-7Nb as well as aluminum and magnesium alloys. For shot peening, he used 0.36 mm and 0.80 mm steel shot and glass beads 0.65 mm in diameter. The author observed a beneficial effect of peening, manifested to various degrees, on the fatigue properties of the machined alloys [12].

Studies of the effect of various types of shot-peening on the fatigue life of alloy WT3-1 (denotation in accordance with Russian standards) demonstrated that the highest increase in fatigue limit compared to polished specimens occurred for micro-peening (42%) and vibratory shot peening (35.2%) [7]. A larger, 50 % increase in fatigue limit was obtained for the same alloy after subjecting it to micro-peening in an overheated state [5].

Previous research on the effect of shot peening on fatigue life of titanium alloys did not take into account the parameters of this process, among which one should count impact energy and the number of impacts per unit machined area (impact density). During shot peening, the shot particles impact not only the machined surface but also collide with one another, and, in the case of vibratory shot peening, with the walls of the working chamber. Such „random” movement of the peening balls causes great difficulties in determining the energy with which the ball impacts the machined surface and the density of impacts. These difficulties induced the author to develop a shot peening method that would satisfy the conditions of random shot peening and, at the same time, ensure control of the movement of the peening tools. This process was named physical modeling of random shot peening [14, 16]. The method was used to study the process of formation of the geometrical structure of the surface of the Ti-6Al-4V alloy during random shot peening [15]. The aim of the present work is to assess the effect of impact energy and impact density on the fatigue life of shot-peened specimens of titanium alloy Ti-6Al-4V.

nia metody nagniatania dynamicznego, spełniającej warunki nagniatania rozproszonego, ale jednocześnie zapewniającej kontrolę ruchu narzędzi nagniatających. Proces taki nazwany został fizycznym modelowaniem dynamicznego nagniatania rozproszonego [14, 16]. Stosując tę metodę przeprowadzono badania procesu formowania struktury geometrycznej powierzchni stopu Ti-6Al-4V podczas dynamicznego nagniatania rozproszonego [15]. Celem niniejszej pracy jest ocena wpływu energii zderzenia i gęstości zderzeń na trwałość zmęczeniową próbek ze stopu tytanu Ti-6Al-4V obrabianych dynamicznym nagniataniem rozproszonym.

## 2. Metodyka badań

Badania przeprowadzono na próbkach, wykonanych ze stopu Ti-6Al-4V w stanie wyżarzonym. Próbkę wykonano w kształcie płaskowników o wymiarach  $4 \times 15 \times 100$  mm, w części środkowej przewężonych do szerokości równej 12 mm. W połowie długości próbki wykonywano otwór o średnicy 1 mm, spełniający rolę karbu. Skład chemiczny badanego stopu był następujący: aluminium – 6,27%, wanad – 4,1%, żelazo – 0,18%, węgiel – 0,12%, chrom – 0,03%, molibden – 0,01%, mangan – 0,01%, miedź – 0,01%, tytan – reszta.

Powierzchnie płaskie próbek (obie) poddano procesowi kontrolowanego dynamicznego nagniatania rozproszonego. Część próbek, dla porównania, obrabiono kulkowaniem wibracyjnym.

Zasadę pracy urządzenia do kontrolowanego dynamicznego nagniatania rozproszonego przedstawiono na rys. 1. Kulka nagniatająca (5), zamocowana w suwaku (3), uderza w obrabianą próbkę (6), powodując powstanie odcisku (7). Wznoszenie suwaka na wysokość  $h$  zapewnia krzywka (4) napędzana przez silnik (1) za pośrednictwem przekładni (2). Znając masę suwaka  $m$  (masa ta może być zwiększana przez stosowanie dodatkowych obciążników) oraz wysokość  $h$ , z jakiej suwak uderza w obrabianą powierzchnię, można obliczyć energię zderzenia według zależności:

$$E_z = mgh \quad (1)$$

gdzie:  $g$  – przyspieszenie ziemskie.

Obrabiana próbka zamocowana jest na stole, który przemieszcza się w kierunku osi  $x$  oraz  $y$  w taki sposób, aby zachowane były warunki nanoszenia odcisków charakterystyczne dla procesu dynamicznego nagniatania rozproszonego [16]. W pierwszym cyklu obróbki kolejne uderzenia kulki nagniatającej następują w odległościach większych od średnicy odcisku (po jego zakończeniu powierzchnia obrabiana tylko częściowo jest pokryta śladami uderzeń). W kolejnych cyklach następuje zagęszczanie śladów uderzeń tak, aby cała powierzchnia pokryta była odciskami (często wielokrotnie). W podobny sposób nanoszone są odciski na powierzchnię obrabianą strumieniem kulek (np. podczas śrutowania lub pneumatycznego kulowania), z tą różnicą, że w rzeczywistym procesie nagniatania strumieniowego niemożliwe jest określenie liczby uderzeń przypadających na jednostkę powierzchni, gdyż kulki zderzają się również ze sobą.

Próbki przeznaczone do kulkowania wibracyjnego nagniatano na stanowisku przedstawionym na rys. 2. Obrabiane próbki (2) mocowano w komorze roboczej (4), która posadowiona była na wibratorze (1). Ponadto do komory wsypywano kulki nagniatające (3). Podczas obróbki wibrator (1) wprawia

## 2. Methods

The research was conducted on annealed specimens made from the Ti-6Al-4V alloy. The specimens were made in the shape of  $4 \times 15 \times 100$  mm flat bars with the central part narrowed to 12 mm. Half way along the specimen, a 1 mm diameter hole was made which played the role of a notch. The chemical composition of the tested alloy was as follows: aluminum – 6.27%, vanadium – 4.1%, iron – 0.18%, carbon – 0.12%, chromium – 0.03%, molybdenum – 0.01%, manganese – 0.01%, copper – 0.01%, titanium – the rest.

The flat surfaces of the specimens (both of them) were subjected to controlled random shot peening. Part of the samples were subjected to vibratory shot peening for comparison.

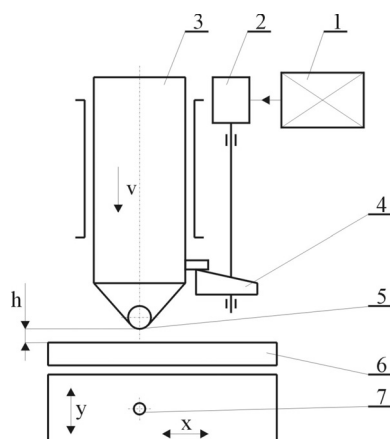
The principle of operation of the device for controlled shot peening is presented in Fig. 1. A peening ball (5), secured in a slide (3), impacts the machined specimen (6), causing the formation of an indentation (7). The slide is lifted to height  $h$  by a cam (4) driven by a motor (1) through a gear (2). Given the mass of the slide  $m$  (this mass can be increased by using additional weights) and the height  $h$  from which the slide impacts the machined surface, one can calculate the impact energy according to the equation:

$$E_z = mgh \quad (1)$$

where  $g$  is acceleration of gravity.

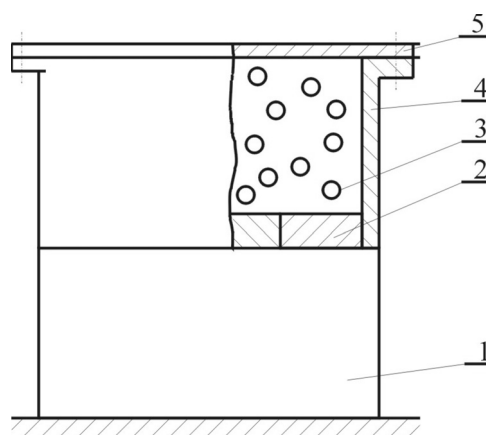
The machined specimen is mounted on a table which can be moved in the  $x$  and  $y$  directions in a way that allows preservation of the conditions of imparting indentations characteristic of the random shot peening process [16]. In the first machining cycle, the successive shot impacts occur at distances larger than the diameter of an impact dent (after the cycle the machined surface is only partly covered with indentations). In the consecutive cycles, the density of impact dents increases so that the entire surface is covered in (often overlapping) indentations. In a similar way, indentations are imparted to a surface machined with a jet of shot (e.g., in shot blasting and pneumatic ball peening), with the difference that in the actual process of jet shot peening one cannot determine the number of impacts per unit area since the shot particles also impact one another.

Vibratory shot peening specimens were peened on a test stand shown in Fig. 2. The machined specimens (2) were secured in a working chamber (4), which was mounted on a vibrator (1). Then, shot (3) was poured into the chamber. During machining the vibrator (1) set the working chamber (4) in motion, which caused the shot (3) to move in the space between the specimen surfaces (2) and the top panel (5).



Rys. 1. Schemat stanowiska do kontrolowanego dynamicznego nagniatania rozproszonego: 1 – silnik, 2 – przekładnia, 3 – suwak, 4 – krzywka, 5 – kulka nagniatająca, 6 – obrabiany przedmiot, 7 – odcisk

Fig. 1. Schematic diagram of a stand for controlled random shot peening: 1 – motor, 2 – gear, 3 – slide, 4 – cam, 5 – peening ball, 6 – machined object, 7 – indentation



Rys. 2. Schemat stanowiska do kulkowania wibracyjnego: 1 – wibrator, 2 – próbka, 3 – kulka nagniatająca, 4 – komora robocza, 5 – płyta górna

Fig. 2. Schematic diagram of a stand for vibratory shot peening: 1 – vibrator, 2 – specimen, 3 – peening ball, 4 – working chamber, 5 – top panel

w ruch drgający komorę roboczą (4), co powoduje ruch kulek (3) w przestrzeni między powierzchnią próbek (2) a płytą górną (5).

Badania porównawcze trwałości zmęczeniowej próbek przeprowadzono na stanowisku pokazanym na rys. 3. Próbką (5) poddawana była obustronnym, cyklicznym obciążeniom zginającym, wymuszonym przez układ dźwigni (6), który wprawiany jest w ruch przez cyklicznie przemieszczający się korbówód (4). Ruchy korbowodu powodowane są przez wał z mechanizmem mimośrodowym (3), który napędzany jest przez silnik (1) za pośrednictwem przekładni (2). Mechanizm mimośrodowy umożliwia bezstopniową zmianę amplitudy odkształceń badanej próbki. Miarą trwałości zmęczeniowej próbki jest liczba przegięć, przy ustalonej amplitudzie, do złamania próbki, co jest rejestrowane za pomocą licznika. Wartość amplitudy odkształceń próbek, ustalana przez zmianę wartości mimośrodu (3), dobierana była doświadczalnie w taki sposób, aby przy jednakowej amplitudzie następowało pęknięcie próbek zarówno nagniatanych jak i nienagniatanych. Podczas badań wstępnych ustalono, że zastosowanie amplitudy odkształceń próbek równej 1,02 mm umożliwia pęknięcie próbek w granicach od  $2 \times 10^5$  do  $2 \times 10^6$  cykli obciążeń, a więc w obszarze bliskim granicznej liczby cykli (dalsze zmniejszenie amplitudy prowadziło do stanu, w którym część próbek nie ulegała pęknięciu).

Badaniom trwałości zmęczeniowej poddano próbki obrobione (z obydwu stron) szlifowaniem, kontrolowanym dynamicznym nagniataniem rozproszonym oraz kulkowaniem wibracyjnym.

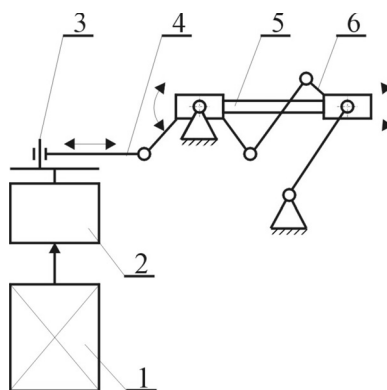
Proces kontrolowanego dynamicznego nagniatania rozproszonego przeprowadzono za pomocą narzędzia nagniatającego zakończonego kulką o średnicy  $D = 6$  mm, na dwóch zesta-

Comparative tests of the fatigue life of the specimens were performed on a testing stand shown in Fig. 3. A specimen (5) was subjected to symmetrical (double-sided) cyclic bending loads, applied by a system of levers (6) which was set into motion by a cyclically moving connecting rod (4). The movements of the connecting rod were induced by a shaft with an eccentric mechanism (3) which was driven by a motor (1) through a gear (2). The eccentric mechanism enabled stepless change of the amplitude of strains of the tested specimen. The measure of specimen fatigue life was the number of cycles to failure at constant amplitude, which was registered with a counter. The value of specimen strain amplitude, set by changing the value of the eccentric (3), was experimentally selected to ensure that both peened and unpeened specimens cracked at the same amplitude. During preliminary tests, it had been established that the use

of specimen strain amplitude of 1.02 mm allowed specimen cracking within from  $2 \times 10^5$  to  $2 \times 10^6$  loading cycles, that is in the vicinity of the limit number of cycles (further lowering of the amplitude led to a state in which part of the specimens did not crack).

Fatigue life tests were carried out on specimens that had been machined (on both sides) by grinding, controlled shot-peening, and vibratory shot peening.

The controlled shot peening process was performed using a peening tool tipped with a ball of a diameter  $D = 6$  mm, on two sets of specimens. The first set was treated at a constant impact energy  $E_z = 50$  mJ and a variable impact density  $j = 6 \div 45$  mm<sup>-2</sup>. The second set of specimens were machined at a constant impact density  $j = 16$  mm<sup>-2</sup> and a variable impact energy  $E_z = 25 \div 100$  mJ.



Rys. 3. Schemat urządzenia do badań trwałości zmęczeniowej: 1 – silnik, 2 – przekładnia, 3 – mimośród, 4 – korbówód, 5 – próbka, 6 – układ dźwigni

Fig. 3. Schematic diagram of a fatigue life testing device: 1 – motor, 2 – gear, 3 – eccentric, 4 – connecting rod, 5 – specimen, 6 – system of levers

wach próbek. Zestaw pierwszy obrabiano przy stałej energii zderzenia  $E_z = 50$  mJ i zmiennej gęstości zderzeń, która wynosiła  $j = 6 \div 45$  mm<sup>2</sup>. Drugi zestaw próbek obrabiano przy stałej gęstości zderzeń  $j = 16$  mm<sup>2</sup> i zmiennej energii zderzenia  $E_z = 25 \div 100$  mJ.

Kulkowanie wibracyjne prowadzono przy następujących parametrach stałych:

- średnica kulek  $D = 6$  mm,
- amplituda drgań wibratora  $a = 57$  mm,
- częstotliwość drgań wibratora  $\nu = 7$  Hz.

Parametrem zmiennym był czas kulkowania, który zmienił się w granicach od 1 do 30 minut.

Liczebność próbek obrabianych przy zachowaniu takich samych warunków technologicznych (rodzaj i parametry obróbki) była równa siedem.

### 3. Wyniki badań

Na rys. 4-6 zobrazowano wyniki badań trwałości zmęczeniowej. Przedstawiono wartości średnie trwałości zmęczeniowej próbek po poszczególnych rodzajach obróbki, a słupki błędów charakteryzują odchylenia standardowe.

Rezultaty badań porównawczych trwałości zmęczeniowej próbek poddanych procesowi kontrolowanego dynamicznego nagniatania rozproszonego przedstawiono na rys. 4 i 5. Zastosowana metoda obróbki próbek umożliwiła ocenę wpływu energii zderzenia narzędzia nagniatającego z obrabianym przedmiotem oraz gęstości zderzeń na trwałość zmęczeniową. W stosunku do próbek szlifowanych trwałość zmęczeniowa próbek nagniatanych zwiększyła się o (124÷406)%, w zależności od parametrów nagniatania. Zarówno wzrost energii zderzenia jak i gęstości zderzeń wpływa na zwiększenie trwałości zmęczeniowej nagniatanych dynamicznie próbek. W przyjętym zakresie badanych parametrów nagniatania dynamicznego w większym stopniu na trwałość zmęczeniową cyklicznie zginanych próbek wpływa energia zderzenia niż gęstość zderzeń narzędzia nagniatającego (4 – krotny wzrost energii zderzenia

Vibratory shot peening was performed at the following constant parameters:

- ball diameter  $D = 6$  mm,
- vibration amplitude of the vibrator  $a = 57$  mm,
- vibration frequency of the vibrator  $\nu = 7$  Hz.

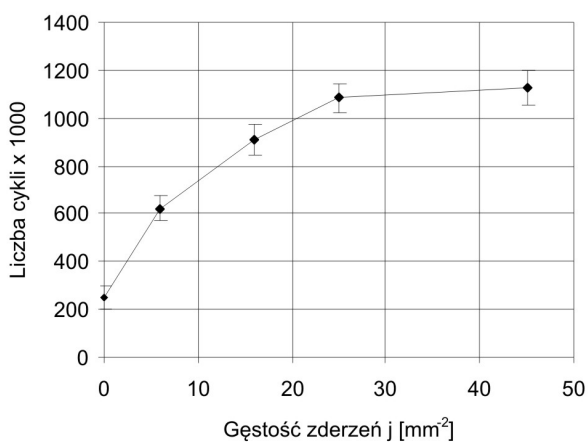
One variable parameter was peening time, which varied within the range of 1 to 30 minutes.

The number of specimens treated under the same technological conditions (type and parameters of machining) was seven.

### 3. Results

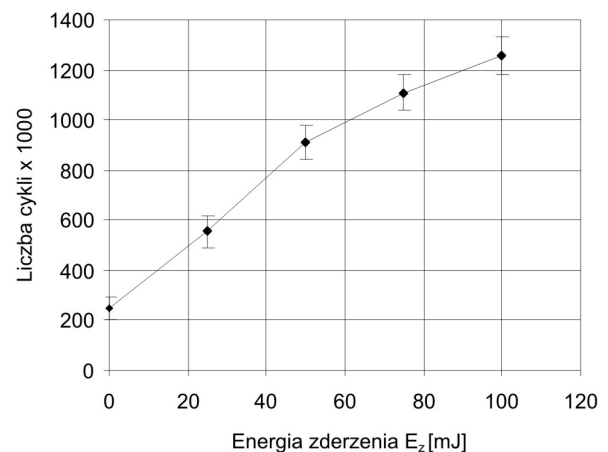
Figs. 4-6 represent graphically the results of fatigue life tests. Mean values of specimen fatigue life after the individual treatment types are shown, and the error bars represent standard deviations.

The results of the comparative studies of the fatigue life of specimens subjected to controlled random shot peening are shown in Figs. 4 and 5. The applied machining method enabled assessment of the effect of the energy of the impact of the peening machine on the workpiece and of the density of impacts on fatigue life. Compared to specimens machined by grinding, the fatigue life of the peened specimens increased by 124÷406%, depending on the peening parameters. Both an increase in impact energy and impact density influenced the fatigue life of shot peened specimens. Within the adopted range of shot peening parameters, the fatigue life of cyclically bent specimens was affected to a greater degree by impact energy than the density of the impacts of the peening tool (a four-time increase in impact energy caused a 126% increase in fatigue life, while a 7.5-time increase in impact density was accompanied by an



Rys. 4. Wpływ gęstości zderzeń na trwałość zmęczeniową próbek obrabianych kontrolowanym dynamicznym nagniataniem rozproszonym (energia zderzenia  $E_z = 50$  mJ)

Fig. 4. Effect of impact density on fatigue life of specimens machined by controlled shot peening (impact energy  $E_z = 50$  mJ)



Rys. 5. Wpływ energii zderzenia na trwałość zmęczeniową próbek obrabianych kontrolowanym dynamicznym nagniataniem rozproszonym (gęstość zderzeń  $j = 16$  mm<sup>2</sup>)

Fig. 5. Effect of impact energy on fatigue life of specimens machined by controlled shot peening (impact density =  $16$  mm<sup>2</sup>)

spowodował zwiększenie trwałości zmęczeniowej o 126%, podczas gdy 7,5 – krotnemu wzrostowi gęstości zderzeń towarzyszyło zwiększenie trwałości zmęczeniowej o 81%. Może to być związane z większym wpływem energii zderzenia niż gęstości zderzeń na głębokość zalegania ściskających naprężeń własnych [14].

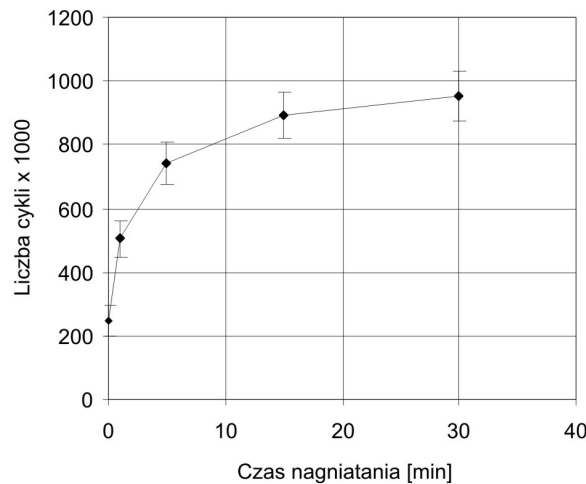
Zwiększanie energii zderzenia oraz gęstości zderzeń w zakresie małych wartości tych parametrów powoduje znaczny wzrost trwałości zmęczeniowej, natomiast zmiany parametrów w zakresie dużych ich wartości powodują niewielkie zmiany trwałości zmęczeniowej (sąsiadujące ze sobą słupki odchyliły standardowych obejmują częściowo obszar wspólny liczby cykli przegięć). Jest to szczególnie widoczne w przypadku stosowania gęstości zderzeń większej od 25 mm<sup>2</sup>, co nasuwa przypuszczenie, że dalsze zwiększanie gęstości zderzeń jest niecelowe ze względu na trwałość zmęczeniową obrabianych próbek.

Korzystny wpływ na trwałość zmęczeniową zaobserwowano także dla próbek poddanych obróbce kulkowaniem wibracyjnym. W zależności od czasu kulkowania wzrost trwałości zmęczeniowej w stosunku do próbek szlifowanych wyniósł od 103% do 283%. Z porównania wykresów przedstawionych na rys. 4 i 6 wynika, że wzrost czasu kulkowania wpływa w podobny sposób na trwałość zmęczeniową jak wzrost liczby zderzeń w procesie kontrolowanego dynamicznego nagniatania rozproszonego. Widoczny jest, zatem, związek między czasem kulkowania a gęstością zderzeń, chociaż określenie wartości liczbowej gęstości zderzeń w procesie kulkowania wibracyjnego jest bardzo trudne, gdyż kulki w czasie obróbki wypełniają całą przestrzeń komory roboczej i zderzają się nie tylko z powierzchnią obrabianą ale również ze sobą i ściankami komory roboczej.

Wzrost trwałości zmęczeniowej próbek poddanych procesowi kontrolowanego dynamicznego nagniatania rozproszonego jest zbliżony do wzrostu trwałości uzyskanego wskutek kulkowania wibracyjnego. Według informacji podanych w literaturze [1, 2], większy przyrost trwałości zmęczeniowej uzyskano w wyniku zastosowania nagniatania strumieniowego.

#### 4. Podsumowanie

Zastosowanie kontrolowanego dynamicznego nagniatania rozproszonego umożliwiło ocenę wpływu energii zderzenia narzędzia nagniatającego z obrabianym przedmiotem oraz gęstości zderzeń na trwałość zmęczeniową próbek ze stopu tytanu Ti-6Al-4V poddanych cyklicznym obciążeniom zginającym. Badania porównawcze trwałości zmęczeniowej wykazały, że liczba cykli przegięć próbek nagniatanych była kilkakrotnie większa niż próbek szlifowanych. Zarówno wzrost energii zderzenia jak i gęstości zderzeń wpływa na zwiększenie trwałości zmęczeniowej badanych próbek.



Rys. 6. Wpływ czasu nagniatania na trwałość zmęczeniową próbek obrabianym kulkowaniem wibracyjnym

Fig. 6. Effect of peening time on fatigue life of specimens machined by vibratory shot peening

aimless with regard to the fatigue life of the machined specimens.

A beneficial effect on fatigue life was also observed for specimens machined by vibratory shot peening. Depending on the peening time, the increase in fatigue life, compared to specimens machined by grinding, was from 103% to 283%. A comparison of the graphs in Figs. 4 and 6 shows that in controlled shot peening an increase in peening time has a similar effect on fatigue life as an increase in the number of impacts. There is then a noticeable relationship between peening time and impact density, though determination of the numerical value of impact density in the process of vibratory shot peening is very difficult since, the peening balls fill the entire space of the working chamber during machining and collide not only with the machined surface but also with one another as well as with the walls of the working chamber.

The increase in the fatigue life of specimens subjected to the process of controlled random shot peening was similar to the life increase obtained under vibratory shot peening. According to the data provided in the literature [1,2], a larger increase in fatigue life was obtained with the use of jet shot peening.

#### 4. Conclusion

The use of controlled random shot peening made it possible to assess the effect of impact energy and impact density on the fatigue life of specimens of titanium alloy Ti-6Al-4V subjected to cyclic bending loads. The comparative studies of fatigue life have shown that the number of bending cycles for peened specimens was several times higher than for specimens machined by grinding. Both the increase in impact energy and of impact density enhances the fatigue life of the tested specimens.

The proposed method enables a comparison of the utility effects of random shot peening under the conditions of control-

Zaproponowana metoda umożliwi porównanie użytkowych efektów dynamicznego nagniatania rozproszonego w warunkach kontrolowanego ruchu narzędzi nagniatających oraz stosowanego w praktyce kulkowania wibracyjnego. Dalsze badania powinny doprowadzić do opracowania komputerowego systemu eksperckiego, który umożliwiłby dobór warunków technologicznych dynamicznego nagniatania rozproszonego.

led movement of peening tools and of vibratory shot peening which is used in engineering practice. Further research should lead to devising a computer expert system which would enable selection of the technological conditions of shot peening.

\*\*\*\*\*

*Badania częściowo realizowane w ramach Projektu Nr POIG.0101.02-00-015/08 w Programie Operacyjnym Innowacyjna Gospodarka ( POIG ). Projekt współfinansowany przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego.*

\*\*\*\*\*

### 5. References

1. Drechsler A, Doerr T, Wagner L. Mechanical surface treatments on Ti-10V-2Fe-3Al for improved fatigue resistance. *Material Science and Engineering A* 1998; 243: 217-220.
2. Ferri O M, Ebel T, Borman R. High cycle fatigue behaviour of Ti-6Al-4V fabricated by metal injection moulding technology. *Material Science and Engineering A* 2009; 504: 107-113.
3. Ivanova S G, Biederman R R, Sisson R D. Investigation of fatigue crack initiation in Ti-6Al-4V during tensil – tensil fatigue. *Journal of Materials Engineering and Performance* 2002; 11(2): 226–231.
4. Jiang X P, Man C –S, Shepard M J, Zhai T. Effects of shot – peening and re – shot – peening on four – point bend behavior of Ti-6Al-4V. *Materials Science and Engineering A* 2007; 468-470: 137-143.
5. Korzyński M. Kulkowanie strumieniowe kulkami szklanymi i łożyskowymi jako sposób poprawy wytrzymałości zmęczeniowej. *ZN Politechniki Rzeszowskiej* 1988; 46: 25-31.
6. Legutko S, Nosal S. Kształtowanie technologicznej i eksploatacyjnej warstwy wierzchniej części maszyn. Poznań: Ośrodek Wydawnictw Naukowych PAN, 2004.
7. Lunarski J. Właściwości fizyczne i użytkowe stopów tytanu po procesie nagniatania dynamicznego. Rzeszów: Wydawnictwo Politechniki Rzeszowskiej, 1982.
8. Melechow R, Tubielewicz K, Błaszczuk W. Tytan i jego stopy. Częstochowa Wydawnictwa Politechniki Częstochowskiej, 2004.
9. Novovic D, Dewes R C, Aspinwall D K, Voice W, Bowen P. The effect of machined topography and integrity of fatigue life. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 2004; 44: 125-134.
10. Przybylski W. Technologia obróbki nagniataniem. Warszawa: WNT, 1987.
11. Sieniawski J. Badania zmęczeniowe i analiza fraktograficzna stopów tytanu. *Mechanik* 1993; 11: 383-386.
12. Wagner L. Mechanical Surface treatments on titanium, aluminum and magnesium alloys. *Materials Science and Engineering A* 1999; 263: 210-216.
13. Yang X, Liu C R, Grandt A F. An experimental study on fatigue life variance, residual stress, and their correlation of face – turned and ground Ti-6Al-4V samples. *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 2002; November: 809-819.
14. Zaleski K. Kształtowanie wybranych właściwości warstwy wierzchniej elementów metalowych w procesie dynamicznego nagniatania rozproszonego. Lublin Wydawnictwa Politechniki Lubelskiej, 2008.
15. Zaleski K. Struktura geometryczna powierzchni stopu tytanu uformowana podczas fizycznego modelowania procesu nagniatania dynamicznego rozproszonego. *ZN Politechniki Rzeszowskiej* 2006; 227: 243-249.
16. Zaleski K.: Urządzenie do fizycznego modelowania procesu nagniatania dynamicznego rozproszonego. *Przegląd Mechaniczny* 2005; 9S: 253-256.

---

**Dr inż. Kazimierz ZALESKI**

Katedra Podstaw Inżynierii Produkcji  
Wydział Mechaniczny, Politechnika Lubelska  
ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin  
Tel. +48(081)5384238  
e-mail: k.zaleski@pollub.pl

---