

## ANALIZA PROCESÓW ZACHODZĄCYCH PODCZAS ŚCISKANIA POROWATEJ STALI 316L DO ZASTOSOWAŃ BIOMEDYCZNYCH

### ANALYSIS OF THE PROCESSES OCCURRING DURING COMPRESSION OF THE POROUS 316L STEEL FOR BIOMEDICAL APPLICATIONS

*Porowate biomateriały metaliczne są atrakcyjnym materiałem implantacyjnym ze względu na większe od tradycyjnych stopów dopasowanie modułu sprężystości do kości oraz na możliwość przerastania porów tkanką kostną i zapewnienia właściwego mocowania implantu w kości. Materiałom tym stawiane są jednak wysokie wymagania, aby zagwarantować odpowiednią trwałość wszczepu. Wśród tych wymogów są m.in. właściwości mechaniczne, szczególnie wytrzymałość zmęczeniowa, a także właściwości magnetyczne. Wszystkie stosowane obecnie stopy implantacyjne (stale chromowo-niklowe, stopy kobaltu i stopy niklu) są paramagnetykami. Jednak na skutek cyklicznych obciążeń, którym poddawane są implanty podczas eksploatacji w organizmie w niektórych materiałach mogą zajść przemiany strukturalne, zmieniające także właściwości użytkowe biomateriałów. W pracy analizowano zmiany zmęczeniowe, zachodzące pod wpływem obciążeń cyklicznych w porowatych spiekach ze stali 316L, przeznaczonych na implanty biomedyczne oraz ich wpływ na właściwości magnetyczne materiałów. Na podstawie wyników badań można stwierdzić, że spieki porowate wykazują początkowe osłabienie, a następnie stabilizację zmęczeniową w badanym zakresie odkształceń. Badania magnetyczne pokazały, że wraz ze wzrostem stopnia odkształcenia rośnie wartość magnetyzacji spieków ze stali 316L, co może mieć wpływ na właściwości użytkowe tych materiałów.*

**Słowa kluczowe:** biomateriały porowate, stal 316L, wytrzymałość zmęczeniowa, właściwości magnetyczne.

*The porous metallic biomaterials are to be considered very attractive implant materials due to the matching of their elastic modulus to the bone as well as the possibility of bone tissue ingrowth into pores and assurance of good stabilization if implant. High requirements are set though to ensure proper durability. Among these are mechanical properties, especially fatigue strength and magnetic properties. All of recently used implant alloys (Cr-Ni steel, cobalt or titanium alloys) are paramagnetic. However, cyclic stress that implants must stand during exploitation, may cause structural as well as functional changes in biomaterials. In presented work, fatigue changes occurring during cyclic stresses in porous sinters of 316L steel were analyzed, as well as their influence on magnetic properties of investigated materials. The obtained results showed that initial weakening and then fatigue stabilization was observed in the whole range of analyzed strain. The magnetic research indicated magnetization increase as an effect of rising strain. This can affect functional properties of implant materials.*

**Keywords:** porous biomaterials, 316L stainless steel, fatigue strength, magnetic properties.

#### 1. Wprowadzenie

Zapewnienie właściwej niezawodności elementów i urządzeń jest jednym z ważniejszych zadań stawianych przed projektantem, szczególnie istotnym w przypadku implantów biomedycznych, gdzie utrata właściwości funkcjonalnych powoduje konieczność inwazyjnej operacji rewizyjnej. Wybór materiałów konstrukcyjnych determinują biogodność, trwałość i wytrzymałość. W ostatnich latach dużym zainteresowaniem cieszą się metaliczne materiały porowate do zastosowań biomedycznych [1, 8]. Dotyczy to głównie poprawy osteointegracji implantu z otaczającą tkanką kostną. Doświadczenia kilku dziesięcioleci implantacji wskazują, że jedną z najważniejszych przyczyn ograniczonej trwałości wszczepów jest możliwość obłuzowania, szczególnie w przypadku mocowania z użyciem tzw. cementu kostnego [9]. Zastosowanie rozwiniętej powierzchni w miejscach kontaktu sprzyja rozwojowi tkanki kostnej wokół implantu. Badania wykazały, że wytworzenie porowatej warstwy (o porowatości rzędu 20-25%) pozwala na przerastanie struktury włóknami kolagenowymi i w rezultacie - zapewnienie trwałego biomechanicznego mocowania. Inną

#### 1. Introduction

Assurance of proper reliability of elements and devices is one of the most important tasks set for design engineer, particularly in case of biomedical implants, where functional properties loss may cause need for invasive revising surgery. The choice of construction materials is determined by biocompatibility, durability and mechanical properties. In recent years metallic porous materials are object of interests for biomedical applications [1, 8]. This concerns mainly the improvement of implant osseointegration with surrounding bone tissue. Experiences of several decades of implantation indicate possibility of bilge, particularly in case of fixation using bone cement, to be one of main causes to limited durability of implants [9]. Use of developed surface on wherever is contact fosters growth of bone tissue around the implant. Research show that fabrication of porous layer (porosity ca. 20-25%) allows for structure ingrowth with collagen fibers and, as a result, assurance of durable biomechanical fixation. Another cause of hindered adaptation of bone-implant system is the difference of Young modulus value between implant alloys (100-200G Pa) and bone

przyczyną utrudnionej adaptacji układu kość-implant jest duża różnica wartości modułu Younga stopów implantacyjnych (100-200 GPa) w porównaniu z właściwościami kości (10-30 GPa) [6]. Odbudowa tkanki kostnej jest złożonym procesem fizyko-chemicznym. Do prawidłowego wzrostu kości niezbędne jest oddziaływanie obciążeń zmiennych, które jest utrudnione w przypadku obecności implantu o znacznie większej sztywności [7]. Dlatego porowate spieki metaliczne, których parametry wytrzymałościowe są zbliżone do kości, są uważane za perspektywiczne biomateriały implantacyjne.

Zapewnienie niezawodnego funkcjonowania implantu w organizmie wymaga uwzględnienia wpływu różnorodnych obciążeń zewnętrznych i odpowiedniej wytrzymałości. W wyniku działających zmiennych w czasie obciążeń ściskających w materiale, szczególnie porowatym, zachodzą złożone procesy zmęczenia [10]. Zmiany struktury materiału wywołane odkształceniami mogą powodować pojawienie się właściwości ferromagnetycznych w stalach austenitycznych, co jest zjawiskiem niepożądanym w przypadku implantów.

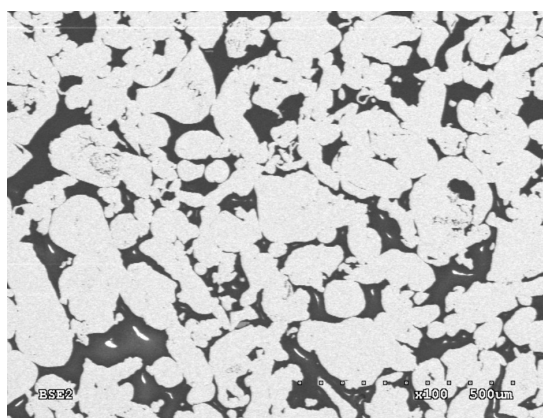
W opracowaniu podjęto próbę określenia charakteru zmian zmęczeniowych zachodzących pod wpływem obciążeń cyklicznych w porowatych spiekach ze stali 316L, przeznaczonych na implanty biomedyczne oraz ich wpływu na właściwości magnetyczne materiałów.

## 2. Materiały i metody badań

W pracy badano materiały porowate z implantacyjnej stali austenitycznej. Próbkę walcową o wymiarach  $\phi 7 \times 11$  mm wykonano metodą metalurgii proszków ze stali 316L (SANDVIK METNINOX STEEL LTD.). Do badań użyto proszki rozpylane wodą o ziarnistości 125-250  $\mu\text{m}$ . Proces technologiczny obejmował wyżarzanie proszków w temperaturze 950°C w próżni, prasowanie na zimno (ciśnienie prasowania 400MPa) i spiekanie w temperaturze 1230°C w próżni, w czasie 1 godziny. W wyniku zastosowania trzech wartości ciśnienia prasowania: 200, 400 i 600 MPa, uzyskano spieki o porowatości odpowiednio ok. 44%, 33% i 26%. Na rys. 1 przedstawiono przykładową strukturę spieku.

### 2.1. Badania wytrzymałościowe

Badania wytrzymałościowe prowadzono na uniwersalnej maszynie INSTRON 8505 ze sterowaniem 8800 Fast Track 2 w warunkach ściskania osiowego. Taki rodzaj obciążeń jest adekwatny do warunków pracy implantów stawu biodrowego w organizmie człowieka. Oceniano właściwości wytrzymałościowe spieków podczas ściskania statycznego. Prędkość obciążenia wynosiła 0,083mm/s. W celu określenia charakteru zmian zmęczeniowych walcowe próbki poddano cyklicznie zmiennym odzerotwórczym odkształceniom o stałej wartości  $\Delta\epsilon_{max}$ . Częstotliwość cykli wynosiła 10Hz. Obszar badań ograniczono do zakresu niskocyklowego



Rys. 1. Mikrostruktura spieku ze stali 316L o porowatości 41%

Fig. 1. Microstructure of powder metal steel of 316L steel – porosity 41%

properties (10-30G Pa) [6]. Bone tissue restoration is complex physical-chemical process. Variable stress impact, hindered in case of implant with higher stiffness, is necessary for proper bone growth, therefore, metallic porous sinters, which resistance parameters are similar to those of bone are taken as perspective implantation biomaterials [7].

Assurance of non-failure operation of implant in organism requires taking influence of miscellaneous external stresses and proper resistance into account. As a results of time-variable, compressive stresses in material, particularly porous one, complex fatigue processes take place [10]. Structure changes induced by strain may cause occurrence of ferromagnetic properties in austenitic steels which is objectionable for implants.

In present work trial has been taken to determine the character of fatigue changes taking place under influence of cyclic stress in porous sinters of 316L steel, destined for biomedical implants and their influence on materials magnetic properties.

## 2. Materials and methods

Porous materials of implantation austenitic steel were examined. Tubular samples of dimensions  $\phi 7 \times 11$ mm were prepared using powder metallurgy of 316L steel powders (SANDVIK METNINOX STEEL LTD.). For research water-atomized powders with grain size of 125-250  $\mu\text{m}$ . Technological process comprised heat treatment of powders in temperature of 950C in vacuum, cold compaction (pressure 400MPa) and sintering in vacuum in the temperature of 1230°C for 1 hour. As a result of using three compaction pressure values: 200, 400, 600 MPa, sinters of porosity ca. 44%, 33% and 26% correspondingly were obtained. On figure 1 exemplary sinter structure is shown.

### 2.1. Resistance research

Resistance research were led on universal machine INSTRON 8505 with steering 8800 Fast Track 2 in axial compaction. Such stress is adequate to work condition of hip joint implants in human organism. Resistance properties of sinters during static compaction were assessed. The velocity of stress was 0,083m/s. In order to determine the fatigue changes character, tubular samples were subjected to cyclic changed strains of constant value  $\Delta\epsilon_{max}$ . Cycles frequency was 10Hz. Research are was limited to low-cyclic range for strain values lower than 2%. This is relevant to values of real strengths affecting element and fact, that many dependences theore-

przy wartościach odkształcenia nie przekraczających 2%. Ma to związek z wartościami sił rzeczywistych działających na element oraz faktem, iż wiele z zależności określonych teoretycznie oraz doświadczalnie dla obszaru wytrzymałości niskocyklowej można przystosować do obliczeń wytrzymałości wysokocyklowej, a tym samym do szacowania trwałości nieograniczonej [5].

## 2.2. Badania magnetyczne

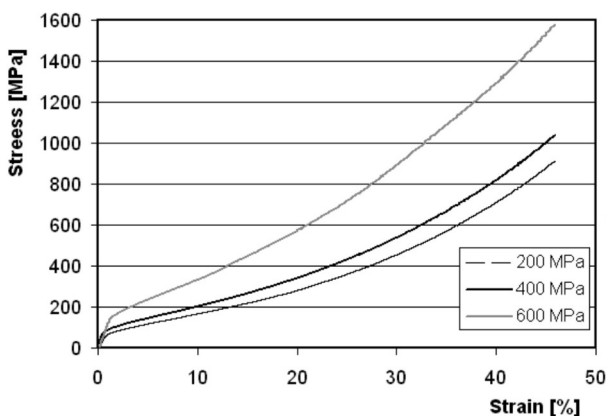
Charakterystyki magnetyczne materiałów porowatych oceniano metodą magnetometru z drgającą próbką (Vibrating Sample Magnetometer - VSM) w Instytucie Fizyki Uniwersytetu w Białymstoku. Określano wpływ odkształcenia na magnetyzację spieków. Dodatkowo przeprowadzono badania metodą spektroskopii mössbauerowskiej analizowanych spieków oraz wyjściowych proszków stali 316L.

## 3. Wyniki badań i dyskusja

### 3.1. Badania wytrzymałościowe

Na rysunku 2 przedstawiono zależności naprężeń i odkształceń badanych materiałów, zarejestrowane podczas statycznego ściskania. Można zauważyć, że w całym analizowanym zakresie obciążeń spieki porowate ze stali 316L wykazywały właściwości plastyczne. W tabeli 1 zestawiono wartości liczbowe naprężeń odpowiadających 45% odkształceniu próbek oraz wartości umownej granicy plastyczności  $R_{0,2}$ . Jak należało oczekiwać, właściwości wytrzymałościowe rosną wraz ze wzrostem ciśnienia prasowania i zmniejszeniem porowatości spieków. Dodatkowo zarejestrowano zależność naprężeń i odkształceń przy kilkakrotnym odciążeniu i ponownym obciążeniu próbki (rys. 3). Dla wszystkich badanych spieków obserwowano umocnienie plastyczne w początkowym etapie odkształcenia (odcinek AB na rys. 3). Następne cykle odciążenia i ponownego obciążenia próbek wskazują na stabilizację właściwości sprężystych porowatych spieków (odcinek CD na rys. 3). Wartości liczbowe współczynników sprężystości badanych materiałów zestawiono w tabeli 1.

W celu określenia zachowania porowatego spieku w warunkach obciążeń dynamicznych, przeprowadzono niskocyklowe badania zmęczeniowe przy stałej wartości odkształcenia  $\Delta\epsilon_{max}$ .



Rys. 2. Wykres naprężenie-odkształcenie podczas ściskania statycznego porowatej stali 316L

Fig. 2. Stress-strain curve under static compression of porous steel 316L

tically and experimentally defined for low-cyclic resistance area can be adapted for high-cyclic resistance calculations and therefore to assessment of indefinite durability [5].

## 2.2. Magnetic research

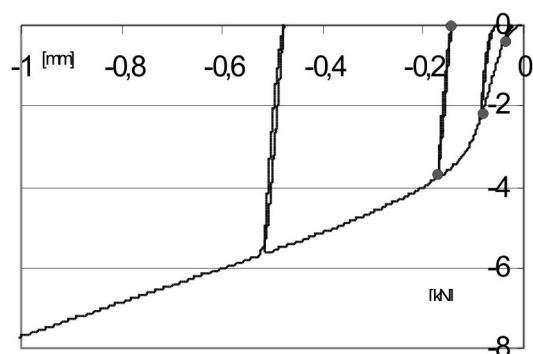
Magnetic characteristics of porous materials were assessed by use of VSM – Vibrating Sample Magnetometer in Institute of Physics University of Białystok. Influence of strain upon sinter magnetization were also determined. Additionally Mössbauer's spectroscopy research of analyzed sinters and initial 316L steel powders were done.

## 3. Results and discussion

### 3.1. Resistance research

Dependencies of stresses and strains of examined recorded during static compaction are shown on figure 2. The whole analyzed stress range porous sinters of 316L steel exhibited plastic properties. In table 1 numeric values of stresses responding to 45% strain of samples and conventional yield point are presented. Resistance properties increase along with compaction pressure increase and decrease of sinters porosity, as expected. Moreover dependence of stress and strain for cyclic loading was observed (fig. 3). For all examined sinters plastic strengthening was also observed in initial stage of strain (section AB in fig. 3). Further loading cycles indicate stabilization of elastic properties of porous sinters (section CD in fig. 3). Elasticity modulus values of examined materials are compiled in table 1.

In order to determine porous sinter behavior in dynamic stress conditions, low-cyclic fatigue research with constant strain  $\Delta\epsilon_{max}$  value were taken. Basing on recorded strengths changes responding to strains in particular cycles, graphs  $\Delta\epsilon_{max}=f(N)$  were prepared. Exemplary graph for sinter of 41% porosity is shown on figure 4.



Rys. 3. Zależność przemieszczenia od siły dla porowatego spieku ze stali 316L przy kilkakrotnym cyklu obciążenia próbki

Fig. 3. Load-strain curve of porous sintered 316L steel during repeated load

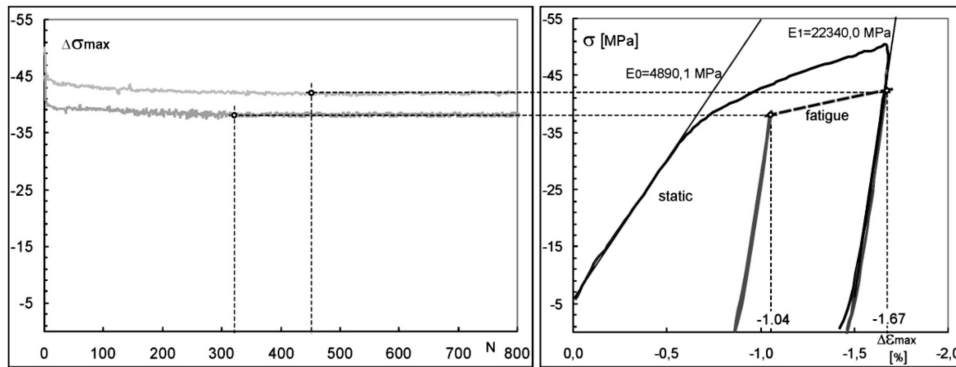
Tab. 1. Właściwości wytrzymałościowe porowatej stali 316L określone podczas statycznej próby ściskania  
 Tab. 1. Mechanical properties of porous steel 316L determined during static compression

Series №	Pressing pressure [MPa]	Porosity [%]	Coefficient of elasticity [GPa]		Resistance [MPa]	
			$E_0$	$E_1$	$R_{c_{max}}$ ( $\epsilon=45\%$ )	$R_{0,2}$
I	200	41	4.9	22.3	832	65.50
II	400	33	6.9	25.5	980	71.81
II	600	26	11.8	41.5	1462	88.04

Na podstawie zarejestrowanych zmian sił odpowiadających odkształceniom w poszczególnych cyklach sporządzono wykresy  $\Delta\sigma_{max} = f(N)$ . Przykładowy wykres dla spieku o porowatości 41% pokazano na rysunku 4.

Jak widać, wartości  $\Delta\sigma_{max}$  maleją aż do ustalenia się na poziomie nasycenia  $\sigma_n$ , co wskazuje na istnienie zjawiska cyklicznego osłabienia materiału. Osiągnięcie nasycenia i utrzymanie się poziomego przebiegu krzywej dowodzi stabilności zmęczeniowej materiału w badanym obszarze. Poziom naprężenia nasycenia istotnie zależy od wartości przyjętego odkształcenia oraz od porowatości materiału (tab. 2).

Values  $\Delta\sigma_{max}$  decrease until stabilization on saturation level  $\sigma_n$  and this indicates existence of cyclic material weakening. Reaching saturation level and maintaining horizontal course of curve proves fatigue stability of material in examined area. Saturation stress level is indeed dependent on strain value and material porosity (table 2).



Rys. 4. Zmiana zależności  $\Delta\sigma_{max} = f(N)$  podczas badań zmęczeniowych porowatej stali 316L  
 Fig. 4. Variations of the relations of  $\Delta\sigma_{max} = f(N)$  during fatigue tests of porous steel 316L

Tab. 2. Właściwości wytrzymałościowe porowatej stali 316L określone podczas ściskania cyklicznego  
 Tab. 2. Mechanical properties of porous steel 316L determined during cyclic compression

Series №	Pressing pressure [MPa]	Porosity [%]	$\Delta\epsilon_{max}$ [%]	$\sigma_n$ [MPa]
I	200	41	1.035	38.2
			1.671	41.7
II	400	33	0.663	36.8
			0.833	53.3
III	600	26	0.774	62.8
			1.098	82.5

### 3.2. Badania magnetyczne

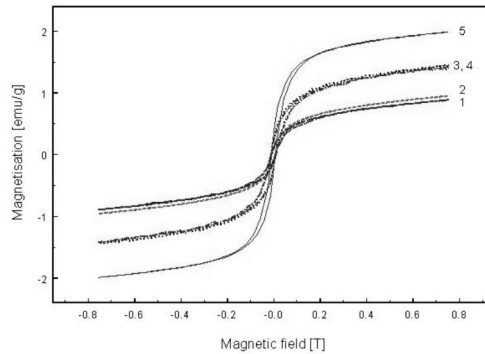
Materiały metaliczne stosowane na implanty powinny charakteryzować się właściwościami paramagnetycznymi, głównie z powodu ograniczeń metod diagnostycznych oraz ze względu na niebezpieczeństwo tworzenia zakrzepów wokół implantu (przez ferromagnetyczne składniki morfologiczne krwi). Zarówno obecność, jak też przemieszczanie zakrzepów w układzie krwionośnym mogłoby spowodować liczne komplikacje (np. zatory). Implantacyjne stale austenityczne mają właściwości paramagnetyczne. Natomiast na skutek odkształceń plastycznych może wystąpić odkształceniowa przemiana martenzytyczna [3, 4]. Celem oceny podatności porowatych spieków

### 3.2. Magnetic research

Metallic materials used for implants should be characterized by good paramagnetic properties, mainly due to diagnostic methods limitations and risk of clot creation around implants (because of ferromagnetic components of blood). Both existence and movements of blood clots in blood circulation system may cause multiple complications (e.g. congestion). Implantation austenitic steels have paramagnetic properties. However, as an effect of plastic strains, martensitic strain transformation may occur [3, 4]. In order to assess susceptibility of 316L steel porous sinters to transformations induced by exploitation strains, magnetic research were taken to examine 316L austenitic

ze stali 316L na przemiany wywołane na skutek odkształceń eksploatacyjnych, przeprowadzono badania magnetyczne próbek porowatych ze stali austenitycznej 316L, odkształconych w wyniku badań wytrzymałościowych, zarówno po ścisaniu statycznym, jak też cyklicznym ścisaniu w wąskim zakresie odkształceń. Wyniki pomiarów przedstawiono na rysunku 5, natomiast oznaczenia próbek i wyniki liczbowe – w tabeli 3.

Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że stopień magnetyzacji porowatych materiałów ze stali 316L w decydującej mierze zależy od wielkości odkształceń, którym poddano próbki (rys. 5). W przypadku badań cyklicznych, gdzie wartość odkształcenia była nieznaczna ( $\epsilon=1,67\%$ ), wartość namagnesowania jest mniejsza i praktycznie nie zależy od ilości cykli (krzywe 1 i 2 na rysunku 5). Natomiast podczas ścisania statycznego z odkształceniem 45% namagnesowanie próbek zdecydowanie wzrosło (krzywe 3-5 na rys. 5).



Rys. 5. Magnetyzacja porowatej stali 316L w funkcji zmian pola magnetycznego

Fig. 5. Magnetization of porous steel 316L vs. applied magnetic field

steel porous samples strained in consequence of resistance research, both after static compaction and cyclic loading in narrow strain range. Results are shown on figure 5, while samples marks and numeric results are in table 3.

Basing on obtained results it can be stated that magnetization level of 316L steel porous materials is mainly dependent on magnitude of strain influencing samples (fig. 5). In case of cyclic tests with insignificant strain value ( $\epsilon=1,67\%$ ), magnetization value is lower and in fact does not depend on cycles number, whereas during static compaction with 45% strain, samples magnetization increased considerably (lines 1 and 2 in fig. 5). The highest magnetization value was observed for sample no. 5 – sinter of lowest initial porosity, what might be explained by utmost strain changes in 316L steel during compaction. In case of samples with higher porosity (Series 3 and 4) in total strain magnitude  $\epsilon=45\%$  measured as

Tab. 3. Właściwości magnetyczne badanych materiałów

Tab. 3. Magnetic properties of the materials investigated

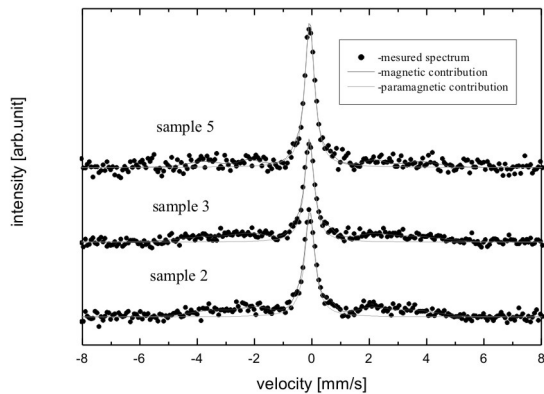
Sample №	Porosity of sinters [%]	Treatment	Strain [%]	Number of cycles	Magnetisation emu/g	Part of ferromagnetic Fe atoms
1	41	Cyclic compression	1.67	835	0.8	-
2	41			2300	0.9	45
3	41	Static compression	45	1	1.42	47
4	33			1	1.45	-
5	26			1	1.94	30

Najwyższą wartość namagnesowania zarejestrowano dla próbki 5 – spieku o najmniejszej porowatości wyjściowej, co można tłumaczyć faktem największych zmian odkształceniowych w samej stali 316L podczas ścisania. W przypadku próbek o większej porowatości (3 i 4) w całkowitej wielkości odkształcenia  $\epsilon=45\%$ , mierzonej jako względna zmiana długości próbki podczas ścisania, większy był udział zmiany wymiarów liniowych związanych z deformacją i zamykaniem porów, co nie miało wpływu na przemiany w stali. Jak wspomniano wyżej, pojawienie się momentu magnetycznego w spiekach ze stali austenitycznej 316L podczas ścisania może być spowodowane odkształceniową przemianą martenzytyczną. Jednak badania dyfrakcyjne nie potwierdziły obecności nowej fazy w badanych materiałach [2]. Próbki poddano więc dodatkowo badaniom mössbauerowskim. Wyniki tych badań wyraźnie potwierdziły, że część atomów żelaza w spiekach po próbach ścisania jest w stanie ferromagnetycznym (rys. 6), czego nie zaobserwowano w proszkach stali 316L, z których przygotowano próbki (rys. 7), gdzie wszystkie atomy żelaza znajdują się w stanie paramagnetycznym.

Ponieważ właściwości magnetyczne analizowanych materiałów są istotne ze względów aplikacyjnych, należy przeprowadzić szczegółowe badania w celu określenia konkretnego etapu procesu technologicznego otrzymywania spieków porowatych, odpowiedzialnego za pojawienie momentu magne-

relative change of sample length during compaction, share of linear dimension change connected with deformation and pores closing was greater, which has no influence on transformations in steel. As mentioned above magnetic moment occurrence in 316L austenitic steel sinters during compaction may be caused by martensitic strain transformation. However research of diffraction did not confirm existence of new phase in examined materials [2]. Samples were therefore subjected to mössbauer's tests. Results of those clearly showed that some atoms of iron in sinters are in ferromagnetic state after compaction (fig. 6), what was not observed with 316L steel powders used to prepare samples (fig. 7), where all the atoms are in paramagnetic state.

Magnetic properties of analyzed materials are important for application reasons, so detailed research towards determining specific stage of technological process of porous sinters obtaining responsible for magnetic moment occurrence is required. This would allow to avoid undesirable transformations in porous implants of porous 316L steel implants in future and would improve biofunctional properties of these materials.



Rys. 6. Widmo mössbauerowskie badanych próbek z porowatej stali 316L

Fig. 6. Mössbauer spectrum of investigated materials of porous 316L steel

tycznego. Pozwoli to uniknąć w przyszłości niepożądanych przemian w porowatych implantach ze stali 316L i poprawi właściwości biofunkcyjne tych materiałów.

#### 4. Wnioski

Na podstawie uzyskanych wyników można sformułować następujące wnioski:

- Spieki porowate ze stali implantacyjnej 316L charakteryzują się dużą plastycznością.
- Podczas próby ściskania w pierwszym cyklu następuje umocnienie plastyczne materiału, następnie współczynnik sprężystości utrzymywał się na stałym poziomie.
- Podczas badań zmęczeniowych następuje zjawisko cyklicznego osłabienia materiału. Jednak po określonej liczbie cykli wartość  $\Delta\sigma_{max}$  osiąga poziom nasycenia, co dowodzi stabilności zmęczeniowej porowatego spieku w badanym obszarze odkształceń.
- Na skutek odkształcenia w spiekach porowatych ze stali 316L pojawiają się właściwości ferromagnetyczne, przy czym wartość magnetyzacji rośnie wraz ze stopniem odkształcenia plastycznego materiału.

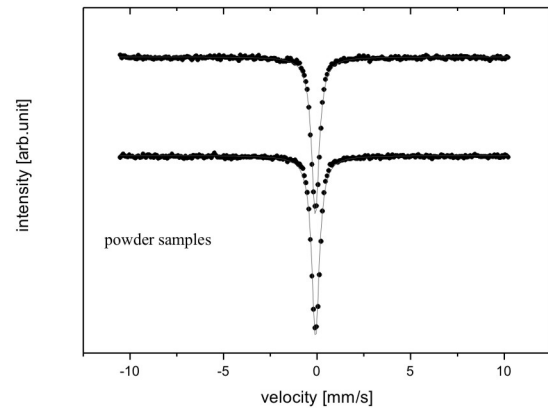
Analiza wyników badań magnetycznych wskazuje na potrzebę przeprowadzenia dodatkowych badań w celu określenia etapu procesu technologicznego otrzymywania spieków porowatych odpowiedzialnego za pojawienie momentu magnetycznego.

\*\*\*\*\*

*Praca częściowo finansowana ze środków na naukę w latach 2007-2009 jako projekt badawczy nr N N507 3834 33 oraz ze środków na badania własne Politechniki Białostockiej. Autorka wyraża podziękowania dr Januszowi Waliszewskiemu i dr Dariuszowi Satule z Instytutu Fizyki Uniwersytetu w Białymstoku za przeprowadzenie badań magnetycznych materiałów spiekanych.*

*The work was partly supported by the Polish State Committee of Scientific Research, grant № N N507 3834 33 and research project of Białystok Technical University № W/WM/2/07. Author thanks dr Janusz Waliszewski and dr Dariusz Satula from Institute of Physics University of Białystok for realization of magnetic tests of porous sinters.*

\*\*\*\*\*



Rys. 7. Widmo mössbauerowskie proszków ze stali 316L

Fig. 7. Mössbauer spectrum of 316L steel powder

#### 4. Conclusions

Following conclusions can be formulated on the base of obtained results:

- Porous sinters made of implant 316L steel are characterized by high plasticity.
- During the first cycle of compression test plastic strengthening was observed for all investigated samples, then coefficient of elasticity remained on the same level.
- The cyclic weakening of material occurred during fatigue tests. However, after defined number of cycles, the  $\Delta\sigma_{max}$  value stayed on the saturation level, and this indicates fatigue stabilization of porous sinters in the range of investigated strain.
- Ferromagnetic properties appeared in porous sinters as result of strain. The magnetization value increased with the plastic strain of material.

Analysis of magnetic test results pointed on the necessity of additional research in order to explain which step of technological process is responsible for appearing of magnetization.

## 5. References

1. Chawla N., Deng X. Microstructure and mechanical behaviour of porous sintered steels. *Materials Science and Engineering* 2005, A 390: 98-112.
2. Gradzka-Dahlke M., Waliszewski J. Analysis of Phase Transformation of Austenitic 316L Implant Steel during Compression. *Defect and Diffusion Forum* 2009, Vols. 283-286: 285-290.
3. Kaleta J. Cykliczne odkształcenie plastyczne jako przyczyna przemiany martenzytycznej w stalach austenitycznych, Wydawnictwo Uczelniane Akademii Techniczno-Rolniczej Bydgoszczy, Bydgoszcz, 1996: 99-102.
4. Kaleta J., Ziętek G. Cyclic plastic deformation - induced martensitic transformation in austenitic steels. *Proceedings of 9th International Conference on Fracture ICF-9 (1997)*, Vol. 1, Pergamon, Sydney April 1-5 1997: 275-281.
5. Kocańda S., Kocańda A. Niskocyklowa wytrzymałość zmęczeniowa metali, PWN, Warszawa, 1989.
6. Long M. Rack H.J. Titanium alloys in total joint replacement—a materials science perspective. *Biomaterials* 1998, 19: 1621–1639
7. Palissery V., Taylor M., Browne M. Fatigue characterisation of a polymer foam to use as a cancellous bone analog material in the assessment of orthopaedic devices. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine* 2004, 15: 61-67.
8. Ryan G., Pandit A., Apatsidid D.P. Fabrication methods of porous metals for use in orthopaedic applications. *Biomaterials* 2006, 27: 2651-2670.
9. Takemoto M., Fujibayashi S., Neo M., Suzuki J., Kokubo T., Nakamura T. Mechanical properties and osteoconductivity of porous bioactive titanium. *Biomaterials* 2005, 26: 6014-6023.
10. Teoh S.H. Fatigue in biomaterials: a review. *International Journal of Fatigue* 2000, 22: 825-837.

---

**Dr inż. Małgorzata GRĄDZKA-DAHLKE**  
Zakład Inżynierii Materiałowej i Biomedycznej  
Politechnika Białostocka  
Ul. Wiejska 45C, 15-351 Białystok, Polska  
e-mail: dahlke@pb.edu.pl

---