

## Evaluation of mechanical properties of poly (methyl methacrylate) reinforced with glass fibers\*

### Ocena właściwości mechanicznych polimetakrylanu metylu zbrojonego włóknami szklanymi\*

**Bartosz Bienias<sup>1</sup>, Wojciech Michalski<sup>2</sup>, Bartosz Mielan<sup>3</sup>, Krzysztof Pietryga<sup>3</sup>, Elżbieta Pamuła<sup>3</sup>, Marek Wasek<sup>4</sup>**

<sup>1</sup> Zakład Propedeutyki i Profilaktyki Stomatologicznej, Studenckie Koło Naukowe, Warszawski Uniwersytet Medyczny  
Department of Dental Propaedeutics and Prophylaxis, Students' Research Group, Medical University of Warsaw

<sup>2</sup> Zakład Propedeutyki i Profilaktyki Stomatologicznej, Warszawski Uniwersytet Medyczny  
Department of Dental Propaedeutics and Prophylaxis, Medical University of Warsaw  
Kierownik: dr hab. n. med. Leopold Wagner

<sup>3</sup> Wydział Inżynierii Materiałowej i Ceramiki, Katedra Biomateriałów i Kompozytów, Akademia Górniczo-Hutnicza  
Faculty of Materials Science and Ceramics, Department of Biomaterials and Composites, AGH University of Science and Technology  
Kierownik: prof. dr hab. inż. Jan Chłopek

<sup>4</sup> Zakład Bioanalizy i Analizy Leków, Warszawski Uniwersytet Medyczny  
Department of Drug Analysis, Medical University of Warsaw  
Kierownik: prof. dr hab. n. med. Piotr Wroczyński

---

---

#### KEY WORDS:

acrylic resin, glass fibers, reinforcing, strength

---

---

---

---

#### HASŁA INDEKSOWE:

tworzywo akrylowe, włókna szklane, zbrojenie, wytrzymałość

---

---

#### Summary

**Introduction.** Acrylic resin is a basic material used in preparation of partial and complete dentures. One of the methods of improving mechanical properties of removable dentures is reinforcing acrylic resin with artificial fibers. **Aim of the study.** To compare mechanical properties of acrylic material reinforced with various types of glass fibers.

**Material and method.** Heat-cured Estetic acrylic resin by Wiedent was used for denture bases. Glass mat, fiberglass fabric, long glass

#### Streszczenie

**Wprowadzenie.** Tworzywo akrylowe jest podstawowym materiałem stosowanym do wytwarzania protez częściowych i całkowitych. Jedną z metod poprawiania właściwości mechanicznych protez akrylowych jest zbrojenie akrylu włóknami sztucznymi.

**Cel pracy.** Porównanie właściwości mechanicznych tworzywa akrylowego zbrojonego różnymi formami włókien szklanych.

**Materiał i metoda.** Wykorzystano tworzywo akrylowe Estetic firmy Wiedent przeznaczone do

---

\* The study was financed by 1S16/NM1/17 minigrant of the Medical University of Warsaw resources.

\* Praca powstała w wyniku realizacji mini-grantu 1S16/NM1/17 finansowanego ze środków Warszawskiego Uniwersytetu Medycznego.

*fibers and short glass fibers were used as reinforcing phase of the acrylic resin. In total, forty specimens were prepared, of which eight samples were controls. Research samples consisted of four groups of eight specimens each. Mechanical examinations in three-point bending test were conducted by means of the Zwick 1435 universal testing machine.*

**Results.** *Specimens reinforced with short glass fibers achieved the highest values of maximum bending force ( $105.7 \pm 8.9$  N). It corresponded to the highest values of bending strength ( $126.8 \pm 10.7$  MPa). The lowest strength was found for specimens reinforced with glass mat ( $82.8 \pm 11.8$  MPa). The highest value of Young's modulus was obtained for the samples reinforced with fiberglass fabric ( $3.7 \pm 0.8$  GPa). The highest values of deflection at maximum bending force were found for the samples reinforced with long glass fibers ( $4.0 \pm 0.6$  mm).*

**Conclusions.** *The highest bending strength parameters were found for specimens reinforced with short and long glass fibers. Short glass fibers are better at improving mechanical properties of acrylic resin than long glass fibers.*

*wykonywania płyt protez polimeryzujące na gorąco. Zbrojenie stanowiły: mata szklana, tkanina szklana, włókna szklane długie oraz krótkie. Łącznie wykonano czterdzieści próbek, z czego osiem z nich stanowiło próbę kontrolną. Próba badawcza składała się z czterech grup po osiem próbek każda. Próby wytrzymałościowe w układzie trójpunktowego zginania zostały przeprowadzone przy użyciu uniwersalnej maszyny wytrzymałościowej Zwick 1435.*

**Wyniki.** *Próbki wzmocnione włóknami szklanymi krótkimi osiągnęły najwyższą maksymalną siłę zginającą ( $105,7 \pm 8,9$  N). Odpowiadało to najwyższym wartościom wytrzymałości na zginanie ( $126,8 \pm 10,7$  MPa). Najmniej wytrzymałe były próbki zbrojone matą szklaną ( $82,8 \pm 11,8$  MPa). Największą wartość modułu Younga wykazały próbki wzmocnione tkaniną szklaną ( $3,7 \pm 0,8$  GPa). Największe wartości odkształcenia przy maksymalnej sile obciążającej wykazały próbki wzmocnione włóknami szklanymi długimi ( $4,0 \pm 0,6$  mm).*

**Wnioski.** *Najlepsze parametry wytrzymałościowe uzyskały próbki wzmocnione krótkimi i długimi włóknami szklanymi. Włókna szklane krótkie lepiej poprawiają właściwości mechaniczne tworzywa akrylowego niż włókna szklane długie.*

## Introduction

Polymethyl methacrylate has been used in prosthodontics since 1947. Despite the mechanical imperfections of this material, such as limited flexural strength, average crack resistance and moderate elasticity, new technologies and sophisticated materials have failed to replace it. The risk of denture cracking due to material fatigue arises from the fact that a person brings dental arches together more than 500 thousand times a year, with the maximum masticatory force of 120 N.<sup>1-5</sup>

Very often, to minimize the risk of mechanical damage, dental practitioners ask

## Wstęp

Polimetakrylan metylu w protetyce stomatologicznej używany jest od 1947 roku. Pomimo wielu jego niedoskonałości mechanicznych takich jak ograniczona wytrzymałość na zginanie, średnia odporność na pękanie czy umiarkowana elastyczność, materiał ten nie został wyparty z użycia przez nowe technologie i bardziej zaawansowane materiały. Ryzyko złamania protezy w wyniku zmęczenia materiału wynika z faktu, iż człowiek zwiera łuki zębowe ponad 500 tysięcy razy w roku przy maksymalnej sile zgryzu osiągającej poziom 120 N.<sup>1-5</sup>

dental technicians to reinforce the base of the complete upper denture with a metal mesh. However, the study by *Murthy et al.*<sup>5</sup> has shown that the metal mesh enhances the strength of the acrylic material only by 13%. Glass fibres, which have been successfully used in other branches of dentistry, may be an alternative.<sup>6-9</sup> It is biocompatible and sufficiently aesthetic and shows high resistance to chemical and physical agents, which ensures that it is not destroyed during thermal polymerization of acrylic dentures.<sup>10</sup>

The objective of this work was to assess the mechanical properties of the acrylic material reinforced with various types of glass fibres.

## Materials and methods

In the study, the Estetic (Wiedent) acrylic material has been used to make the heat-polymerized denture bases. The reinforcing material consisted of four types of glass fibres, specification of which was provided by the manufacturer (Tab. 1).

A static bend test was performed to perform comparative analysis of mechanical properties of forty samples having the shape of 55×10×2 mm rectangular prisms meeting the requirements of the PN-EN ISO 178:2011/A1:2013-06 standard. The first batch of eight samples was a control group without glass fibre reinforcement. The test group consisted of four batches, each made up of eight samples, with the glass fibre reinforcement in various forms.

Three groups of samples were reinforced with glass mat, glass fabric and long glass fibre, which contained respectively: 5.6 mg mats, each with dimensions of 50×8 mm, 6 mg fabric with dimensions of 50×8 mm and 15 mg long glass fibre 50 mm in length each. The above reinforcements were pressed into the top layer.

In the fourth group, samples were reinforced with short glass fibre with a length of 3-4

Bardzo często, aby zminimalizować ryzyko uszkodzenia mechanicznego, lekarze dentyści proszą techników dentystrycznych o wzmocnienie płyty protezy całkowitej górnej metalową siatką. Jednak badania *Murthy'ego* i wsp.<sup>5</sup> wykazały, iż metalowa siatka poprawia wytrzymałość tworzywa akrylowego jedynie o 13%. Alternatywą mogą okazać się włókna szklane z powodzeniem stosowane w innych dziedzinach stomatologii.<sup>6-9</sup> Są one biokompatybilne i satysfakcjonujące estetycznie, dodatkowo wykazują dużą odporność na czynniki chemiczne i fizyczne, dzięki czemu nie ulegają zniszczeniu podczas polimeryzacji termicznej protez akrylowych.<sup>10</sup>

Celem pracy była ocena właściwości mechanicznych tworzywa akrylowego wzmocnionego różnymi formami włókien szklanych.

## Material i metody

W badaniach wykorzystano tworzywo akrylowe Estetic (Wiedent) do wykonywania płyt protez polimeryzowanych termicznie. Materiał wzmacniający stanowiły włókna szklane w czterech postaciach o podanej przez producentów specyfikacji (tab. 1).

Analizie porównawczej w statycznej próbie zginania poddano właściwości mechaniczne 40 próbek wykonanych w kształcie prostopadłościanów o wymiarach 55×10×2 mm spełniających wymogi normy PN-EN ISO 178:2011/A1:2013-06. Pierwsza seria 8 próbek stanowiła grupę kontrolną bez wzmocnienia włóknami. Natomiast grupę badawczą stanowiły 4 serie próbek po 8 w każdej z obecnością wzmocnienia z włókna szklanego w różnych postaciach.

Trzy grupy próbek wzmocniono matą szklaną, tkaniną szklaną oraz włóknami szklanymi długimi, które zawierały odpowiednio: po 5,6 mg maty o wymiarach 50×8 mm, 6 mg tkaniny o wymiarach 50×8 mm oraz po 15 mg długich włókien szklanych o

T a b e l a 1. Specyfikacja włókien szklanych zastosowanych w badaniach wytrzymałościowych wzmocnienia tworzywa akrylowego

Charakterystyka \ Postać włókna szklanego	Mata szklana	Tkanina szklana	Włókna szklane długie w formie rowingu	Włókna szklane krótkie w formie rowingu
Typ szkła	E	E	E	E
Gramatura [g/m <sup>2</sup> ]	140	150	200	200
Średnica włókna elementarnego [μm]	9	13	16-22	16-22
Masa liniowa pasma [tex]	11	–	–	–
Masa liniowa rowingu [tex]	–	150	200	200
Ułożenie włókien elementarnych	w różnych kierunkach	splot płócienny	pasma złączone bez skrętu	pasma złączone bez skrętu

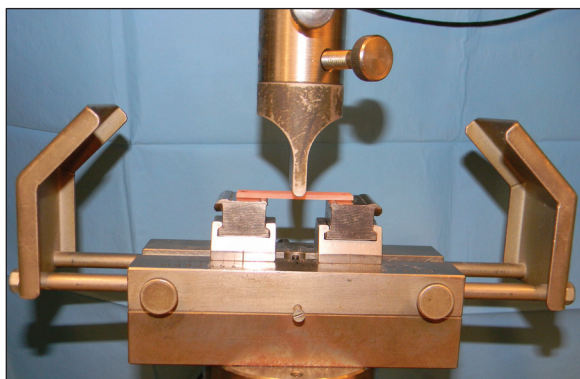


Fig. 1. Sample prepared for strength tests with the Zwick 1435 machine.

Ryc. 1. Próbką przygotowana do badań wytrzymałościowych przy użyciu maszyny Zwick 1435.

mm constituting 2% of the weight of the methyl methacrylate to be polymerized. These fibres were distributed in various directions throughout the volume of the sample. All forms of the reinforcing material had been previously moistened with methacrylate monomer.

The acrylic material was prepared and polymerized according to the manufacturer's recommendations. The flexural strength tests were carried out using the Zwick 1435 apparatus

długości 50 mm. Powyższe wzmocnienia zostały umieszczone w warstwie wierzchniej metodą wprasowania.

Czwartą grupę próbek wzmocniono włóknami szklanymi krótkimi o długości 3-4 mm o zawartości po 2% w stosunku wagowym do masy polimeryzowanego metakrylanu metylu. Włókna te zostały rozmieszczone w różnych kierunkach w całej objętości próbki. Wszystkie postacie materiału wzmacniającego zostały uprzednio zwilżone monomerem metakrylanowym.

Tworzywo akrylowe przygotowano i polimeryzowano według zaleceń producenta. Próby wytrzymałościowe na zginanie przeprowadzono przy użyciu maszyny Zwick 1435 z czujnikiem siły w zakresie pomiarowym do 0,5 kN (ryc. 1). Dopuszczalny błąd pomiaru nie przekraczał 0,02% wartości mierzonych wielkości. Prędkość zginania była stała i wynosiła 5 mm/min. Pomiar wytrzymałościowe przeprowadzono w pracowni badań właściwości mechanicznych w Katedrze Biomateriałów i Kompozytów Wydziału Inżynierii Materiałowej i Ceramiki Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie.

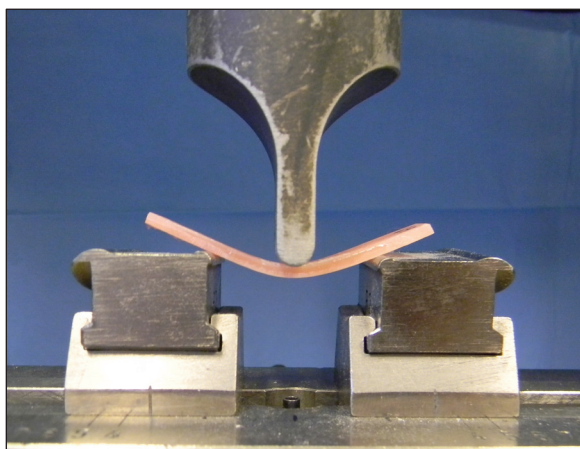


with a force sensor able to measure up to 0.5 kN (Fig. 1). The permissible measurement error did not exceed 0.02% of measured values. The bending speed was constant at 5 mm/min. Strength measurements were carried out in the laboratory for testing mechanical properties in the Department of Biomaterials and Composites at the Faculty of Material Engineering and Ceramics at the University of Mining and Metallurgy in Cracow.

Each sample was placed in a strength testing machine in such a way that the top layer with fibres was on the side opposite to the surface, to which the force was applied and positioned at 90° with respect to this surface (Fig. 1). The test was continued until the sample cracked and broken. With the testXpert software, it was possible to determine four primary strength parameters:

- maximum bending force ( $F_{\max}$ ),
- strain for the maximum bending force ( $\varepsilon F_{\max}$ ),
- the proof stress determining the bending strength ( $\sigma$ ),
- Young's modulus – an elasticity constant characterizing the material being tested.

The identified parameters enabled the determination of the polymethyl methacrylate



**Fig. 2. The sample subjected to the three-point bending strength measurement.**

Ryc. 2. Próbkę poddana pomiarom wytrzymałościowym na zginanie w trójpunktowym układzie obciążenia.

Każdą próbkę umieszczano w maszynie wytrzymałościowej w ten sposób, aby warstwa wierzchnia z włóknami znajdowała się po przeciwnej stronie do powierzchni przykładanej siły pod kątem 90° (ryc. 1). Test prowadzony był do momentu pęknięcia i złamania próbki. Użycie oprogramowania testXpert umożliwiło wyznaczenie czterech podstawowych parametrów wytrzymałościowych:

- maksymalnej siły zginającej ( $F_{\max}$ ),
- odkształcenia przy maksymalnej sile zginającej ( $\varepsilon F_{\max}$ ),
- naprężenia granicznego określającego wytrzymałość na zginanie ( $\sigma$ ),
- modułu Younga – stałej sprężystości charakteryzującej sztywność badanego materiału.

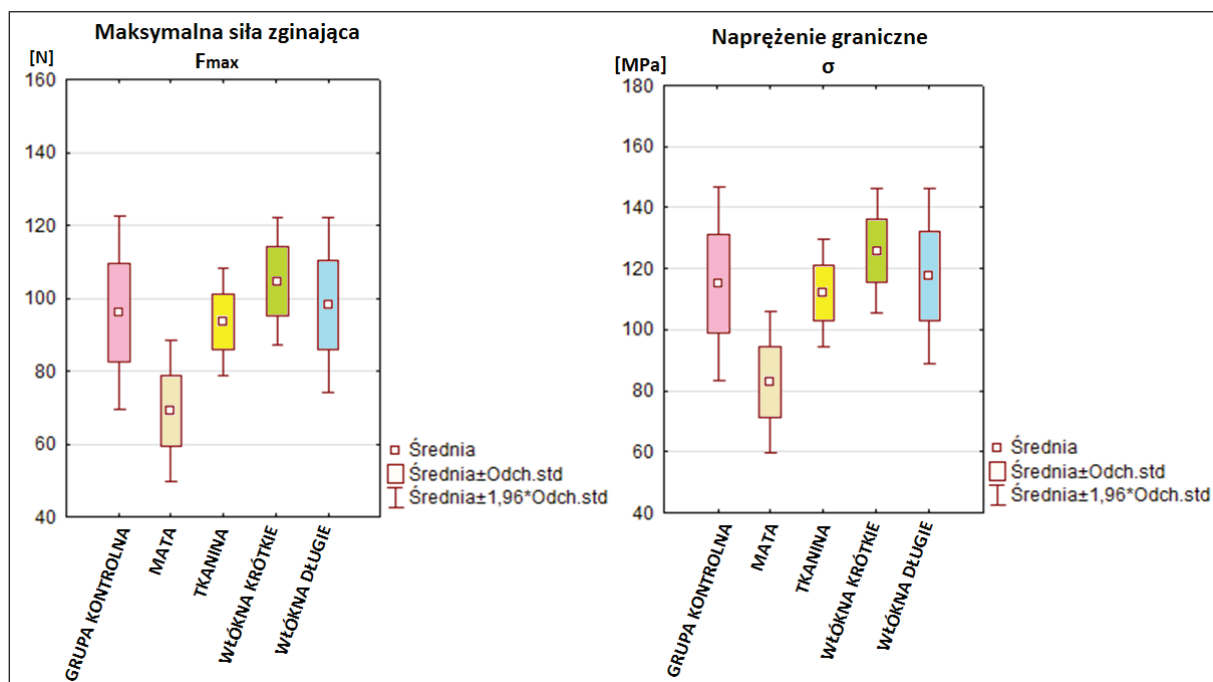
Wyznaczone parametry pozwoliły na określenie zdolności polimetakrylanu metylu do przeciwstawienia się odkształcającym siłom zgryzu podobnie jak u pacjentów użytkujących protezę całkowitą górną podczas aktu żucia.<sup>3</sup>

## Wyniki

Wartości średnie parametrów wytrzymałościowych obliczono z oszacowaniem niepewności rozszerzonej  $k = 2$ . Oznaczało to, że prawdopodobieństwo wyniku obliczeń z dowolnego pomiaru mieściło się w przedziale wartości zmiennej standaryzowanej dla rozkładu normalnego, odpowiadającej poziomowi ufności  $\alpha = 0,95$ .

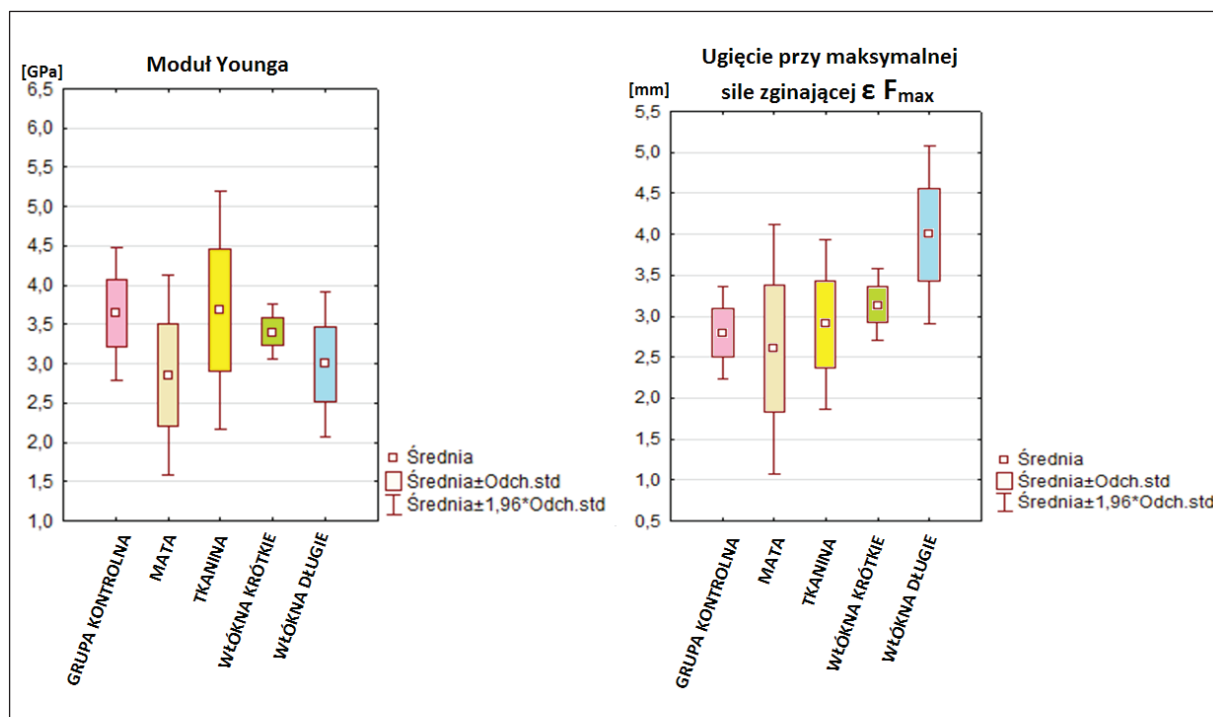
Analiza porównawcza parametrów wytrzymałościowych na zginanie wykazała, że próbki wzmocnione włóknami szklanymi krótkimi osiągnęły najwyższą maksymalną siłę zginającą ( $105,7 \pm 8,9$  N) odpowiadającą najwyższymi wartościami naprężenia granicznego w zakresie odkształceń sprężystych ( $126,8 \pm 10,7$  MPa). Najmniej wytrzymałe były próbki zbrojone matą szklaną ( $82,8 \pm 11,8$  MPa) (ryc. 3).

Największą wartość modułu Younga – stałej sprężystości, definiowanej jako granica



**Fig. 3. Comparison of the maximum bending force and the bending strength of the sample subjected to the three-point bending strength test.**

Ryc. 3. Zestawienie porównawcze wartości maksymalnej siły zginającej oraz wytrzymałości na zginanie próbek poddanych badaniom wytrzymałościowym w próbie trójpunktowego zginania.



**Fig. 4. The comparison of Young's modulus and strain for the maximum bending force of samples subjected to three-point bending strength test.**

Ryc. 4. Zestawienie porównawcze wartości modułu Younga oraz odkształcenia przy maksymalnej sile zginającej próbek poddanych badaniom wytrzymałościowym w próbie trójpunktowego zginania.

resistance to deformation by masticatory forces, as in patients using the complete top denture when chewing.<sup>3</sup>

## Results

The probability of the result from any measurement was in the range of the value of the standardized variable for normal distribution corresponding to the confidence level  $\alpha = 0,95$ .

Benchmarking of the bending strength parameters showed that the samples reinforced with short glass fibre have the highest maximum bending force ( $105.7 \pm 8.9$  N) corresponding to the highest proof stress in the elastic range ( $126.8 \pm 10.7$  MPa). The least durable samples are those reinforced with the glass mat ( $82.8 \pm 11.8$  MPa) (Fig. 3)

The highest Young's modulus – namely the elasticity constant, defined as the limit of the ratio of stress to strain, where the latter is the deflection at the maximum bending force – was present in samples reinforced with glass fabric ( $3.7 \pm 0.8$  GPa) (Fig. 4).

The highest deflection at maximum bending force was present in samples reinforced with glass fibre ( $4.0 \pm 0.6$  mm) (Fig. 4).

## Discussion

The acrylic base of the upper denture is 2 mm thick on average in the palatal area. As numerous studies have shown, it is this area that dentures break most often.<sup>4,13-16</sup> Therefore, all test samples were 2 mm high and 55 mm long to simulate the clinical conditions.

The use of glass fibre for reinforcement of polymeric resins created new possibilities to increase rigidity of the acrylic mass and, as a result, to enhance the mechanical properties of the material. Technically, the acrylic mass can be reinforced by two methods: pressing glass fibres into it and mixing the acrylic dough with cut fibres.<sup>3</sup>

proporcjonalności naprężenia do odkształcenia określonego wartością ugięcia przy maksymalnej sile zginającej, wykazały próbki wzmocnione tkaniną szklaną ( $3,7 \pm 0,8$  GPa) (ryc. 4).

Największe wartości ugięcia przy maksymalnej sile obciążającej wykazały próbki wzmocnione włóknami szklanymi długimi ( $4,0 \pm 0,6$  mm) (ryc. 4).

## Dyskusja

Akrylowa płyta protezy górnej ma w obrębie podniebienia twardego przeciętnie 2 mm grubości. Jak wykazały liczne badania, właśnie w tej okolicy najczęściej dochodzi do złamania protezy.<sup>4,13-16</sup> Dlatego wszystkie próbki poddane badaniu miały wysokość 2 mm przy długości 55 mm dla przybliżenia warunków klinicznych.

Zastosowanie włókien szklanych do zbrojenia żywic polimerowych stworzyło nowe możliwości wzmocnienia masy akrylowej, a w rezultacie podwyższenie właściwości mechanicznych tworzywa. Zbrojenie masy akrylowej wykonuje się technicznie dwiema metodami: przez wprasowanie włókien szklanych i mieszanie ciasta akrylowego z pociętymi włóknami.<sup>3</sup>

Metoda wprasowania włókien nie znalazła powszechnego zastosowania. Prawdopodobnie wynika to z faktu, iż istnieje duża obawa przed popełnieniem większej ilości błędów na etapie aplikacji tworzywa akrylowego do puszeki polimeryzacyjnej, co może skutkować niepowodzeniem przy wykonaniu uzupełnienia protetycznego.

Najczęściej stosuje się metodę mieszania ciasta akrylowego z włóknami szklanymi w całej objętości. Przeprowadzone liczne badania wskazują, że ilość dodawanego włókna szklanego do polimetakrylanu metylu ma istotny wpływ na własności mechaniczne materiału.<sup>17-22</sup> Proponowana zawartość włókna szklanego waha się w granicach 0,5-20% w

Pressing fibres into the dough has failed to become common practice. This is probably because technicians are much concerned about making more mistakes at the stage of application of acrylic material to the polymerization flask, which may result in failure of the prosthodontic restoration.

The method involving mixing the acrylic dough with glass fibre is used most commonly. Numerous studies have shown that the amount of glass fibre added to the polymethyl methacrylate has a significant impact on the mechanical properties of the material.<sup>17-22</sup> The proposed glass fibre content varies between 0.5 and 20% in its weight ratio to polymerised methyl methacrylate.<sup>4,14</sup> However, the high content of glass fibre in the acrylic material – as adopted by many authors – makes it barely formable and thus difficult to place in the polymerization flask.<sup>15,19,20,23-25</sup>

In the paper by *Nayanai et al.*<sup>26</sup> and our own studies, the short glass fibre added in the amount of up to 2% allowed the polymethyl methacrylate to retain appropriate plasticity, which made standard flasking and polymerization of samples possible. However, as noted by *Hędzelek et al.*,<sup>27</sup> although mixing short fibres with methacrylate powder is easy, these fibres are distributed randomly during pressing. In this way, their density varies locally, which lessens the strength of the acrylic. In addition, due to the superficial and irregular distribution, fibres could become an irritant that causing potential injury to the patient's mucous membrane.<sup>2</sup>

In order to improve the mechanical strength of acrylic palatal denture bases, *Kostoulas et al.*<sup>28</sup> and other authors propose the use of long glass fibres arranged in a directional pattern, such a parallelism ensuring anisotropic properties.<sup>24,29,30</sup> Additionally, the ordered arrangement of high-elasticity long fibres optimizes the strength-related parameters. Potentially, this has a positive effect on the

stosunku wagowym do masy polimeryzowanego metakrylanu metylu.<sup>4,14</sup> Jednakże przyjęta przez wielu autorów wysoka zawartość włókna szklanego w tworzywie akrylowym czyni go mało plastycznym oraz sprawia trudności podczas wprowadzania do puszki polimeryzacyjnej.<sup>15,19,20,23-25</sup>

W pracy *Nayana i wsp.*<sup>26</sup> oraz w badaniach własnych, krótkie włókno szklane dodawane w ilości 2% pozwalało na zachowanie przez polimetakrylan metylu odpowiedniej plastyczności, co umożliwiło standardowy sposób puszkowania i polimeryzacji próbek. Jednak jak zauważyli *Hędzelek i wsp.*<sup>27</sup> pomimo łatwego mieszania krótkich włókien z proszkiem metakrylanowym włókna te podczas prasowania układają się bezładnie. W ten sposób następuje miejscowe zróżnicowanie ich gęstości powodując lokalnie osłabienie wytrzymałości akrylu. Ponadto powierzchowne i nieregularne rozmieszczenie włókien mogłoby stać się czynnikiem drażniącym i uszkadzającym błonę śluzową pacjenta.<sup>2</sup>

*Kostoulas i wsp.*<sup>28</sup> oraz inni autorzy w celu poprawienia wytrzymałości mechanicznej akrylowych płyt podniebiennych protez proponują użycie długich włókien szklanych ułożonych kierunkowo, których równoległy przebieg nadaje właściwości anizotropowe.<sup>24,29,30</sup> Ponadto uporządkowany układ długich włókien optymalizuje parametry wytrzymałościowe ze względu na ich wysoką elastyczność. Potencjalnie ma to korzystny wpływ na rozkład obciążeń zgryzowych przenoszonych przez płytę protezy oraz wyrównanie nacisku na podłoże śluzówkowe w procesie inkorporacji i osiadaniu protezy na podłożu.

*Hędzelek i wsp.*<sup>25,31</sup> w kolejnych badaniach stwierdzili, że przy zastosowaniu wysokowytrzymałych włókien w postaci maty i tkaniny uzyskuje się lepsze parametry wytrzymałościowe próbek w porównaniu do próby kontrolnej. Wykonane pomiary własne nie



masticatory load distribution transmitted by the denture base and equalization of the pressure on the mucosal substrate in the process of incorporation and denture setting on the substrate.

Subsequent studies by *Hędzelek et al.*<sup>25,31</sup> revealed that with the use of high-strength fibres in the form of mat and fabric, the samples had better strength parameters than the control group. Their measurements did not confirm that the acrylic material reinforced with the fibre in the form of fabrics woven in a directional pattern is much more durable than the material with cut fibre fused throughout the volume of the sample.

According to *Murthy et al.*,<sup>5</sup> it is very important to position the fibre reinforcement properly. The photoelastic analysis performed in the bending test shows that the exterior layer placed under the load is subjected to compressive stress, and that the tensile stress occurs in the opposite, exterior part of the sample. Since most materials are more resistant to compression than to tension, a crack occurs and then the sample breaks on the side to which the tensile stress is applied. In the middle layer of the sample, there is an area in which compressive and tensile stresses are balanced. Therefore, the reinforcement of the denture placed at even distances from the external surface of the base protects it only against fragmentation and not against damage.

Strength measurements have shown the effectiveness of reinforcing the acrylic material with two types of reinforcement, namely long glass fibres pressed into the top layer and short glass fibres distributed in the entire volume of the sample. The outlook is bright for the technology beyond this kind of prosthodontic restoration reinforcement. Therefore, the method, as proposed herein, of reinforcing the acrylic material with long and short glass fibres is easy to perform in prosthodontic lab conditions.

potwierdziły, iż tworzywo akrylowe wzmocnione włóknem w postaci tkaniny o splocie kierunkowym jest znacznie bardziej wytrzymałe niż tworzywo z włóknem ciętym umieszczonym w całej objętości próbki.

Według *Murthy'ego* i wsp.<sup>5</sup> bardzo istotne jest właściwe usytuowanie wzmocnienia włóknami. Przeprowadzając analizę fotoelastyczną w teście na zginanie można stwierdzić, że w warstwie zewnętrznej, do której przykładane jest obciążenie występują naprężenia ściskające a w przeciwległym zewnętrznym obszarze próbki pojawiają się obciążenia rozciągające. Ponieważ większość materiałów jest bardziej odporna na ściskanie niż rozciąganie dochodzi do powstania pęknięcia a następnie złamania próbki od strony, w której występują naprężenia rozciągające. W warstwie środkowej próbki występuje obszar, w którym równoważą się naprężenia ściskające i rozciągające. Dlatego wzmocnienie protezy umieszczone w równej odległości od powierzchni zewnętrznych płyty chroni ją jedynie przed fragmentacją a nie przed uszkodzeniem.

Wykonane pomiary wytrzymałościowe wykazały skuteczność wzmacniania tworzywa akrylowego dwoma rodzajami zbrojenia: włóknami szklanymi długimi umieszczonymi w warstwie wierzchniej metodą wprasowania oraz włóknami szklanymi krótkimi rozmieszczonymi w całej objętości próbki. Pozytywnie rokuje to na opanowanie techniki tego rodzaju wzmacniania uzupełnień protetycznych. Wskazuje to, że zaproponowany w niniejszej pracy sposób wzmocnienia tworzywa akrylowego za pomocą długich i krótkich włókien szklanych jest łatwe do wykonania w warunkach pracowni protetycznej.

Ponadto zaobserwowano, że wprowadzenie tkaniny szklanej nie poprawia właściwości mechanicznych polimetakrylanu metylu, a nawet minimalnie obniża takie parametry jak maksymalna siła zginająca oraz wytrzymałość na zginanie w porównaniu do próby

In addition, it was noted that the introduction of glass fabric does not improve mechanical properties of polymethyl methacrylate and even slightly reduces the maximum bending force and bending strength in comparison with the control sample. Furthermore, the addition of a glass mat decreases the durability of the acrylic material by reducing the maximum bending force and strain at an identical load. In addition, the bending strength has deteriorated by 28% in relation to the control sample. It should be noted that the higher Young's modulus, the greater the rigidity of the sample tested, and thus the lesser the deformability on bending.

There is no evident improvement in the strength parameters being tested in the case of samples reinforced with glass fabric and even these parameters deteriorated in samples reinforced with glass mat, which is probably caused by insufficient penetration of the acrylic material between glass fibres. As the network of crossed fibres is very dense, the acrylic resin showed poor capacity of penetrating between the fibres of the reinforcement used. This was possible for long and short glass fibres.

The present research and those of the referenced authors confirm the advisability of further searching for new technological solutions for the application of different forms of fibres to reinforce the acrylic material. For this reason, the continuation of this research will allow for an extended assessment and selection of the best reinforcement for the poly(methyl methacrylate) in prosthodontics.

## Conclusions

The results of benchmarking analysis of the acrylic material reinforced with four types of glass fibres indicate that:

1. Samples reinforced with short and long glass fibres have the best strength parameters.
2. The glass fabric does not significantly

kontrolnej. Również dodatek maty szklanej zmniejsza wytrzymałość tworzywa akrylowego obniżając wartości maksymalnej siły zginającej oraz odkształcenia przy tej samej wartości obciążenia. Dodatkowo wytrzymałość na zginanie ulegała pogorszeniu o 28% w stosunku do próby kontrolnej. Należy zaznaczyć, że im wyższa wartość modułu Younga tym większa sztywność badanej próbki, a tym samym mniejsza podatność na odkształcenia przy zginaniu.

Brak wyraźnej poprawy badanych parametrów wytrzymałościowych w przypadku próbek wzmocnionych tkaniną szklaną lub nawet pogorszenie tych parametrów w próbkach wzmocnianych matą szklaną prawdopodobnie wynika z niedostatecznej penetracji przez tworzywo akrylowe pomiędzy włókna szklane. Ze względu na bardzo gęstą sieć skrzyżowanych włókien żywica akrylowa wykazywała słabą zdolność penetracji pomiędzy włókna zastosowanego zbrojenia. Było to natomiast możliwe w przypadku długich oraz krótkich włókien szklanych.

Wykonane badania własne oraz cytowanych autorów potwierdzają celowość dalszego poszukiwania nowych rozwiązań technologicznych w zakresie stosowania różnych postaci włókien do wzmocniania tworzywa akrylowego. Z tego względu kontynuacja rozpoczętych badań pozwoli na rozszerzoną ocenę i wybór najlepszego materiału wzmocniającego poli(metakrylan metylu) w zastosowaniach protetycznych.

## Wnioski

Wyniki analizy porównawczej tworzywa akrylowego wzmocnianego włóknami szklanymi w czterech postaciach wskazują, że:

1. Najlepsze parametry wytrzymałościowe uzyskały próbki wzmocnione włóknami szklanymi krótkimi oraz długimi.
2. Tkanina szklana nie wpływa w sposób

- improve the mechanical properties of the acrylic material.
3. Glass mat adversely affects the mechanical properties of polymethyl methacrylate, which leads to deterioration of its strength parameters, such as its bending strength and Young's modulus.
  4. Short glass fibres improve the mechanical properties of acrylic to an extent greater than the long fibres do.
- istotny na poprawienie właściwości mechanicznych tworzywa akrylowego.
3. Mata szklana wpływa negatywnie na właściwości mechaniczne polimetakrylanu metylu sprawiając, że pogorszą się jego parametry wytrzymałościowe, takie jak wytrzymałość na zginanie i moduł Younga.
  4. Włókna szklane krótkie w lepszym stopniu poprawiają właściwości mechaniczne tworzywa akrylowego niż włókna długie.

---

### Acknowledgements

Authors would like to express their gratitude to Mr. *Robert Łojczyk* from the "Cito" dental laboratory for providing reinforcement materials.

---

### Podziękowania

Autorzy wyrażają podziękowanie Panu *Robertowi Łojczykowi* z pracowni techniki dentystrycznej Cito za udostępnienie materiałów wzmacniających.

---

### References / Piśmiennictwo

1. *Woelfel JB, Paffenbarger GC, Sweeney WT*: Dimensional changes occurring in dentures during processing. *J Am Dent Assoc* 1960; 61: 413-430.
2. *Sobolewska E, Frączak B, Ey-Chmielewska H, Pamuła E*: Właściwości mechaniczne tworzywa akrylowego Vertex R. *S. Protet Stomatol* 2006; LVI, 1: 65-68.
3. *Powers J, Sakaguchi R, Craig's*: Restorative Dental Materials. Elsevier Urban and Partner, 2011.
4. *Jagger D, Harrison A, Jandt K*: The reinforcement of dentures. *J Oral Rehabil* 1999; 26: 185-194.
5. *Murthy HB, Shaik S, Sachdeva H, Khare S, Haralur SB, Roopa KT*: Effect of Reinforcement Using Stainless Steel Mesh, Glass Fibers, and Polyethylene on the Impact Strength of Heat Cure Denture Base Resin - An In Vitro Study. *J Int Oral Health* 2015; 7 (6): 71-9.
6. *Konarska-Matysiak D, Dejak B*: Porównanie właściwości zębów bocznych odbudowanych standardowymi kompozytowymi wkładami koronowo-korzeniowymi wzmacnianymi włóknami szklanymi i endokoronami – przegląd piśmiennictwa. *Protet Stomatol* 2013; LXIII, 3: 201-207.

7. *Góra K, Dejak B*: Ocena odporności na złamania zębów odbudowanych wkładami koronowo-korzeniowymi kompozytowymi wzmocnionymi włóknami szklanymi w zależności od średnicy i długości wkładów – badanie in vitro. *Protet Stomatol* 2015; LXV, 3: 233-240.
8. *Kumbuloglu O, Aksoy G*: Rehabilitation of Advanced Periodontal Problems by Using a Combination of a Glass Fiber-reinforced Composite Resin Bridge and Splint. *J Adhes Dent* 2008; 10, 1: 67-70.
9. *Nytko Ł, Książek-Bąk H, Bulek-Juranek G*: Zastosowanie szyny z włókna szklanego i materiału złożonego do unieruchamiania zębów w chorobach przyzębia. *Stomatol Współcz* 1997; 4, 5: 334-337.
10. *Mayer P, Kaczmar J*: Właściwości i zastosowanie włókien węglowych i szklanych. *Tworzywa Sztuczne i Chemia* 2008; 6: 52-56.
11. Guide to the expression of uncertainty in measurement ISO-IEC-OIML-BIPM, TAG 4/WG 3 (1995), wyd. pol. Wyrażanie niepewności pomiaru – Przewodnik. Główny Urząd Miar, Warszawa 1999.
12. Expression of the uncertainty in measurement in calibration. Wyd. Pol. Zakładu Metrologii Ogólnej Głównego Urzędu Miar ISBN 83-906546-2-8, Warszawa 2001.
13. *Takamiya AS, Monteiro DR, Marra J, Compagnoni MA, Barbosa DB*: Complete denture wearing and fractures among edentulous patients treated in university clinics. *Gerodontology* 2012; 29: 728-734.
14. *Takahashi T, Gonda T, Mizuno Y, Fujinami Y, Maeda Y*: Reinforcement in removable prosthodontics: a literature review. *J Oral Rehabil* 2017; 44: 133-143.
15. *Gajdus P, Hędzulek W, Joniak S*: Porównanie wytrzymałości mechanicznej płyt podniebnych zbrojonych włóknem szklanym. *Protet Stomatol* 2003; LIII, 3: 166-173.
16. *Goguta LM, Bratu D, Jivanescu A, Erimescu R, Marcauteanu C*: Glass fibre reinforced acrylic resin complete dentures: a 5-year clinical study. *Gerodontology* 2012; 29: 64-69.
17. *Jacob J, Shivaputrappa A, Gangadhar SA, Shah I*: Flexural strength of heat-polymerized polymethyl methacrylate denture resin reinforced with glass, aramid or nylon fibers. *J Prosthet Dent* 2001; 86: 424-7.
18. *Dogan OM, Bolayir G, Keskin S, Dogan A, Bek B, Boztug A*: The Effect of Esthetic Fibers on Impact Resistance of a Conventional Heat-cured Denture Base Resin. *Dent Mater J* 2006; 26 (2): 232-239.
19. *Nakamura M, Takahashi H, Hayakawa I*: Reinforcement of Denture Base Resin with Short-rod Glass Fiber. *Dent Mater J* 2007; 26, 5: 733-738.
20. *Yu SH, Cho HW, Oh Seunghan, Bae JM*: Effects of glass fiber mesh with different fiber content and structures on the compressive properties of complete dentures. *J Prosthet Dent* 2015; 113: 636-644.
21. *Dogan OM, Bolayir G, Keskin S, Dogan A, Bek B*: The evaluation of some flexural properties of a denture base resin reinforced with various aesthetic fibers. *J Mater Sci Mater Med* 2008; 19: 2343-2349.
22. *Farina AP, Cecchin D, Soares RG, Botelho AL, Ferreira Koyama Takahashi JM, Mazzetto MO, Mesquita MF*: Evaluation of Vickers hardness of different types of acrylic denture base resins with and without glass fibre reinforcement. *Gerodontology* 2012; 29: 155-160.
23. *Ladha K, Shah D*: An In-Vitro Evaluation of the Flexural Strength of Heat-Polymerized Poly (Methyl Methacrylate) Denture Resin Reinforced with Fibers. *J Indian Prosthodont Soc* 2011; 11 (4): 215-220.
24. *Yu SH, Lee Y, Oh S, Cho HW, Oda Y, Bae JM*: Reinforcing effects of different fibers on denture base resin based on the fiber type concentration and combination. *Dent Mater J* 2012; 31, (6): 1039-1046.
25. *Hędzulek W, Gajdus P, Leda H*: Wpływ tkaniny szklanej i nylonowej na wybrane właściwości mechaniczne polimetakrylanu metylu.



- Protet Stomatol 1998; XLVIII, 5: 277-280.
26. *Nayan K, Verma AK, Mariyam A, Kumari L, Chaturvedi S, Ahmad N*: Effect of thermocycling on the Flexural Strength of Various PMMA Resins Reinforced with Different Fibers: An In vitro Study. BJMMR 2016; 15 (9): 1-8.
27. *Kim HH, Kim MJ, Kwon HB, Lim YJ, Kim SK, Koak JY*: Strength and Cytotoxicity in Glass-Fiber-Reinforced Denture Base Resin with Changes in the Monomer. J Appl Polym Sci 2012; 126: 260-266.
28. *Kostoulas I, Kavoura T, Frangou MJ, Polyzois GL*: Fracture Force, Deflection and Toughness of Acrylic Denture Repairs Involving Glass Fiber Reinforcement. J Prosthodont 2008; 17: 257-261.
29. *Gharehchahi J, Aghdaee NA, Kermani N*: Evaluation of FRC Reinforcing on Flexural Strength of Acrylic Resin Denture Bases. NYSDJ 2010; 9: 40-43.
30. *Hędzielek W, Gajdus P, Leda H*: Możliwość zastosowania wybranych włókien sztucznych do wzmacniania tworzywa akrylowego. Protet Stomatol 1998; XLVIII, 4: 215-220.
31. *Hędzielek W, Gajdus P*: Mechanical Strength of an Acrylic Resin Palatal Denture Base Reinforced with a Mesh or Bundle of Glass Fibers. Int J Prosthodont 2007; 20 (3): 311-312.

Zaakceptowano do druku: 4.01.2018 r.

Adres autorów: 02-006 Warszawa, ul. Nowogrodzka 59.

© Zarząd Główny PTS 2018.