

lek. dent. Bartosz Bienias

Analiza porównawcza światłoutwardzalnego materiału złożonego wzmocnionego wybranymi włóknami sztucznymi

Wstęp

Obecne zalecenia małoinwazyjnej stomatologii stawiają ogromne wymagania w stosunku do światłoutwardzalnych materiałów złożonych (kompozytów). Główne kierunki badań prowadzonych w celu poprawy parametrów fizyko-chemicznych kompozytów skupiają się na wprowadzaniu włókien sztucznych (ang. *Fiber-Reinforced Composite*, FRC), stanowiących fazę wzmacniającą przy jednoczesnym zmniejszeniu ciężaru materiału złożonego. Najczęściej stosowane są włókna szklane, dużo rzadziej włókna węglowe i poliamidowe (alifatyczne, np. nylon lub aromatyczne, np. aramid). W konstrukcjach typu FRC rolę włókien jest poprawa właściwości mechanicznych polimerowej macierzy organicznej. Uzupelnienia wykonane z kompozytu wzmocnionego włóknami sztucznymi są lżejsze w porównaniu z tymi, które wykonane są z tradycyjnych materiałów, takich jak ceramika lub metal. Wysoka wytrzymałość mechaniczna sprawia, że FRC posiadają zdolność skutecznej kompensacji sił zgryzowych. Pożądana odporność na działanie sił, przy zachowaniu niewielkiej masy spoczynkowej włókien wzmacniających, sprawiają, że FRC znalazły szerokie zastosowanie w wielu dziedzinach stomatologii, takich jak protetyka, stomatologia zachowawcza, implantologia, periodontologia czy ortodoncja. Kompozyty FRC nie są jednak bez wad i podatne są na procesy zmian strukturalnych, które na ogół powodują niekorzystne zmiany właściwości mechanicznych oraz innych charakterystyk tych materiałów. W większości pozycji literatury odnoszącej się do analizy kompozytów FRC i mechanizmów ich niszczenia wyróżnia się charakterystyczne dla nich, najczęściej występujące po sobie etapy degradacji: pęknięcie osnowy (imperfekcje), delaminacje związane z pękaniem adhezyjnym (pęknięcie włókno-osnowa oraz pęknięcie warstwy) zniszczenie włókien,

które mogą prowadzić do całkowitej degradacji FRC. Z tego powodu określenie właściwości materiałów możliwych do wykorzystania w wykonawstwie uzupełnień protetycznych wydaje się zasadne.

Cel pracy

Głównym celem pracy była ocena danych dotyczących cech fizyko-mechanicznych materiałów mogących mieć zastosowanie w wykonawstwie stałych uzupełnień protetycznych wzmocnionych włóknami: klasycznych mostów wykonanych z kompozytu i mostów specjalnych (adhezyjnych), koron kompozytowych oraz wkładów koronowo-korzeniowych.

Zaplanowano cele szczegółowe pracy:

1. Ocenę parametrów wytrzymałościowych materiału złożonego wzmocnionego jednym pojedynczym pasmem włókien sztucznych.
2. Ocenę parametrów wytrzymałościowych materiału złożonego wzmocnionego dwoma pojedynczymi pasmami włókien sztucznych.
3. Analizę porównawczą parametrów wytrzymałościowych materiału złożonego wzmocnionego jednym pojedynczym a dwoma pojedynczymi pasmami włókien sztucznych.
4. Analizę mechanicznych zmian strukturalnych powstałych w wyniku badań wytrzymałościowych.
5. Ocenę wad w układzie materiał włókno sztuczne powstałych na etapie wytwarzania próbek.

Materiał i metody

Materiał do badań obejmował próbki kompozytu wzmocnionego pojedynczymi (jednym lub dwoma) pasmami włókien. Zastosowano pasma włókien: szklanych (SKL), węglowych (WGL) i aramidowych (AMD) oraz stworzonych na potrzeby tej pracy pasma hybrydowe: szklano-węglowe (SKL-WGL), węglowo-aramidowe (WGL-AMD) oraz szklano-aramidowe (SKL-AMD). W badaniach użyto światłoutwardzalny kompozyt Gradia Direct Posterior w kolorze A2 (GC Corporation, Tokyo, Japonia) oraz kompatybilny z kompozytem materiał łączący G Bond (GC Corporation, Tokyo, Japonia). Wzmocnienie kompozytu stanowiły pasma wyżej wymienionych włókien połączone ze sobą bez skrętu. Stosunek wagowy włókien we wszystkich hybrydach wynosił 1:1.

Badaniom poddano łącznie 130 próbek, w tym grupę badaną stanowiło łącznie 120 próbek kompozytu z obecnością włókien sztucznych zastosowanych jako wzmocnienie i grupę kontrolną (KONT), która obejmowała serię 10 próbek kompozytu bez dodatku włókien. Grupę badaną podzielono na dwie podgrupy, z których każda składała się z 6 serii po 10 próbek. Próbki w podgrupie pierwszej wzmocniono jednym pojedynczym pasmem włókien sztucznych (SKL 1, WGL 1, AMD 1, SKL-WGL 1, WGL-AMD 1, SKL-AMD 1), natomiast próbki w podgrupie drugiej wzmocniono dwoma pojedynczymi pasmami włókien sztucznych (SKL 2, WGL 2, AMD 2, SKL-WGL 2, WGL-AMD 2, SKL-AMD 2). Próbki do badań wytrzymałościowych zostały przygotowane zgodnie z wytycznymi Międzynarodowej Normy PN-EN ISO 4049:2019-07. Próbki poddano badaniom wytrzymałościowym w postaci testu na zginanie trójpunktowe TFS (*ang. Three Point Flexure Strength*), który umożliwił określenie maksymalnej siły zginającej, strzałki ugięcia, wytrzymałości na zginanie oraz modułu Younga. Statyczne próby na zginanie w trójpunktowym układzie obciążenia przeprowadzono przy użyciu certyfikowanej maszyny wytrzymałościowej Zwick 1435 (*Zwick/Roell GmbH & Co. KG, Niemcy*) z tensometrycznym czujnikiem głowicy pomiarowej siły w zakresie do 0,5 kN. Po przeprowadzonych badaniach wytrzymałościowych zniszczone próbki poddano analizie przy użyciu mikroskopu optycznego Keyence VHX-900F (*Keyence International, Belgia*) oraz Skaningowego Mikroskopu Elektronowego Hitachi TM 3000 (*Hitachi High Technology Corporation, Japonia*). Każdą próbkę obserwowano w powiększeniach: 100-krotnym, 200-krotnym, 400-krotnym, 500-krotnym oraz 1000-krotnym.

Wyniki

Analizując uzyskane wyniki badań wytrzymałościowych można stwierdzić, że wśród próbek wzmocnionych jednym pojedynczym pasmem włókien najwyższe wartości w zakresie czterech badanych parametrów wytrzymałościowych uzyskały próbki z grupy AMD 1. Osiągnęły one maksymalną siłę zginającą na poziomie 63 N, co w porównaniu do grupy KONT przewyższyło jej wartość trzykrotnie. Obecność jednego pojedynczego pasma włókien aramidowych spowodowało trzykrotny wzrost ugięcia, przy jednoczesnym wzroście modułu Younga o ponad 140%. W porównaniu do grupy KONT, próbki AMD 1 były ponad 280% bardziej wytrzymałe na zginanie. Gorsze rezultaty uzyskały próbki z grup SKL-AMD 1

oraz SKL 1. Najmniejszy wpływ na poprawę czterech badanych parametrów wytrzymałościowych wykazały próbki WGL 1, WGL-AMD 1 oraz SKL-WGL 1, a osiągnięte wartości badanych parametrów były na podobnym poziomie.

Przeprowadzone badania wytrzymałościowe wykazały, iż wśród próbek wzmocnionych dwoma pojedynczymi pasmami włókien zauważono wiele analogii do rezultatów osiągniętych w badaniach próbek z obecnością jednego pojedynczego pasma włókien. Najbardziej wytrzymałe na zginanie okazały się próbki z grup AMD 2 i SKL-AMD 2. Wzmocnienie dwoma pojedynczymi pasmami włókien aramidowych lub hybrydy szklano-aramidowej poprawiło wytrzymałość na zginanie blisko trzykrotnie, natomiast wartość maksymalnej siły zginającej wzrosła o około 40 N. Najmniejszą wytrzymałość na zginanie przy jednocześnie najniższych wartościach maksymalnej siły zginającej wykazały próbki z grupy WGL 2. Prawie dwukrotnie większą w stosunku do grupy KONT wartość modułu Younga, a tym samym najbardziej sztywne okazały się próbki z grup: SKL 2, AMD 2, WGL-AMD 2, SKL-WGL 2. Próbki te osiągnęły wartość modułu Younga powyżej 8 GPa.

Porównując wyniki parametrów wytrzymałościowych próbek wzmocnionych jednym pojedynczym pasmem włókien do próbek wzmocnionych dwoma pojedynczymi pasmami włókien można stwierdzić, że zawartość włókien w próbce ma wpływ na wszystkie badane parametry wytrzymałościowe, ale w największym stopniu oddziałuje na moduł Younga. Próbki wzmocnione włóknami szklanymi, aramidowymi oraz hybrydą szklano-węglową wykazywały znaczne zwiększenie sztywności. Analizując wyniki badań zaobserwowano, że największa różnica przeciętnych wartości modułu Younga wystąpiła w przypadku hybrydy szklano-węglowej, ponieważ wzrost zawartości z 2% wag. do 4% wag. spowodował wzrost modułu Younga o 2,35 GPa, a to wpłynęło na wzrost sztywności próbki o niemal 40%.

Analizy próbek przy użyciu mikroskopu optycznego oraz SEM potwierdziły, że zarówno w próbkach wzmocnionych jednym pojedynczym, jak i dwoma pojedynczymi wiązkami włókien zaobserwowano wiele podobieństw. Widoczne były degradacje, takie jak: pęknięcia warstwy granicznej włókno-kompozyt (tzw. debonding), pęknięcia osnowy kompozytowej, delaminacje oraz zniszczenia włókien. Degradacje miały charakter zarówno lokalny, jak i obejmowały duży obszar obejmujący wiele warstw lub całą próbkę. Bardzo często obserwowano różne

rodzaje degradacji w jednej próbce. Najczęściej, bo w około 90% próbek grupy badanej obserwowano zjawisko debondingu, czyli pęknięcia warstwy granicznej włókno-kompozyt.

Wnioski

Analiza uzyskanych w badaniach wyników pozwoliła na sformułowanie następujących wniosków:

1. Włókna aramidowe użyte zarówno w jednej oraz dwóch pojedynczych wiązkach ze względu na parametry wytrzymałościowe mogą być zalecane jako wzmocnienie uzupełnień protetycznych wykonanych z kompozytu.
2. W zastosowaniu klinicznym wśród próbek wzmocnionych dwoma pojedynczymi pasmami włókien może być brana pod uwagę hybryda włókien szklanych i aramidowych.
3. Zastosowanie włókien węglowych w pracy klinicznej przy zawartości wagowej 4% w materiale kompozytowym nie jest zalecane z powodu spadku wytrzymałości na zginanie i zmniejszenia sztywności materiału FRC.
4. Granica połączenia włókien z kompozytem była najslabszym punktem w układzie warstwowym jaki tworzą materiały kompozytowe wzmocnione włóknami sztucznymi.
5. Wraz ze wzrostem liczby warstw materiałów FRC wzrasta prawdopodobieństwo wystąpienia pęknięć przebiegających przez całą grubość próbki oraz pojawienia się rozwarstwień (tzw. delaminacji).
6. Metoda ręczna wykonania próbek z powodzeniem może być stosowana podczas wykonywania uzupełnień protetycznych w warunkach klinicznych, gdyż nie wpłynęła na pogorszenie uzyskanych wyników parametrów wytrzymałościowych.