



**POLITECHNIKA
BYDGOSKA**

Wydział Inżynierii Mechanicznej

**RADA NAUKOWA DYSCYPLINY
INŻYNIERIA MECHANICZNA**

AUTOREFERAT ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr inż. Małgorzata Słomion

**ANALIZA WPŁYWU WARUNKÓW PRACY ELEMENTÓW STAŁYCH
APARATÓW ORTODONTYCZNYCH NA ZMIANY ICH CECH UŻYTKOWYCH
DETERMINUJĄCYCH EFEKTYWNOŚĆ RUCHU ZĘBÓW**

DZIEDZINA: NAUKI INŻYNIERYJNO-TECHNICZNE
DYSCYPLINA: INŻYNIERIA MECHANICZNA

PROMOTOR

DR HAB. INŻ. MACIEJ MATUSZEWSKI, PROF. PBŚ

KATEDRA INŻYNIERII ZARZĄDZANIA
WYDZIAŁ ZARZĄDZANIA

Bydgoszcz, 2024

Spis treści

1. WSTĘP.....	3
2. ANALIZA LITERATURY	5
2.1. ISTOTA TRIBOLOGII W ORTODONCJI	5
2.2. PROCESY TRIBOLOGICZNE W ORTODONCJI.....	6
2.3. METROLOGIA POWIERZCHNI.....	7
2.4. PODSUMOWANIE ANALIZY LITERATURY	8
3. HIPOTEZA, CEL I ZAKRES BADAŃ.....	10
4. METODYKA BADAWCZA	12
4.1. PRZEDMIOT BADAŃ	12
4.2. PLAN BADAŃ	13
4.3. METODY BADAWCZE.....	15
5. WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA.....	17
5.1. WPLYW RODZAJU MATERIAŁÓW NA UBYTKI MASY I CHROPOWATOŚCI POWIERZCHNI	18
5.2. PORÓWNANIE ZMIAN TRIBOLOGICZNYCH POWIERZCHNI ZAMKÓW ORTODONTYCZNYCH SL I SLI	21
5.3. WPLYW CZYNNIKÓW DEMOGRAFICZNYCH I KLINICZNYCH NA WYNIKI LECZENIA.....	22
6. DYSKUSJA WYNIKÓW	24
7. WNIOSKI.....	27
7.1. WNIOSKI TEORETYCZNE (POZNAWCZE).....	27
7.2. WNIOSKI PRAKTYCZNE (UTYLITARNE)	28
7.3. WNIOSKI ROZWOJOWE (KIERUNKI DALSZYCH BADAŃ)	29
8. LITERATURA.....	30

1. WSTĘP

Leczenie ortodontyczne za pomocą stałych aparatów odgrywa kluczową rolę w korekcji wad zgryzu i poprawie estetyki u pacjentów. Osiągnięcie założonych efektów leczenia wymaga uwzględnienia wielu czynników, spośród których istotną rolę odgrywają właściwości systemu tribologicznego, którego elementami są zamki oraz łuki. Postęp w dziedzinie tribologii przyczynił się do nowego spojrzenia na leczenie ortodontyczne.

W tradycyjnym podejściu, ortodontyczny ruch zębów opiera się na wykorzystaniu sił do kontrolowanej przez lekarza ortodontę przebudowy tkanki kostnej, celem uzyskania odpowiedniego ustawienia relacji zgryzowych pacjenta (okluzji). Generowane siły wpływają na wystąpienie oporów ruchu (poprzez tarcie), które mogą wpływać na ortodontyczny ruch zębów. Ponadto wzajemne oddziaływania zamków i łuków, podczas ortodontycznego ruchu zębów prowadzą do zużywania powierzchni tych elementów, co może wpływać na jakość leczenia i przyczynić się do nieprawidłowej dynamiki ruchu zębów.

Tarcie odgrywa istotną rolę w leczeniu ortodontycznym, ponieważ wpływa na efektywność ruchu zębów. Stanowi opór napotykaną pomiędzy powierzchniami slotów zamków oraz łuków podczas zmiany położenia zębów. W zależności od etapu leczenia duże wartości tarcia mogą utrudniać ruch zębów, wydłużać czas leczenia i potencjalnie prowadzić do niepożądanych skutków ubocznych, takich jak resorpcja korzenia czy dyskomfort pacjenta. Dlatego kontrolowanie wartości tarcia pozwoli na zwiększenie efektywności leczenia. Postępy w ortodontcji, takie jak rozwój systemów zamków o niskim tarcu (zamki samoligaturujące) czy stosowanie specjalistycznych stopów łuków, mają na celu zmniejszenie wartości tarcia występującego podczas leczenia. Procesy zużywania stanowiące nieodłączny aspekt współpracujących powierzchni zamków oraz łuków mogą wpływać na proces leczenia na kilka sposobów. Nadmierne zużywanie może prowadzić do zwiększonego tarcia i obniżenia sprawności ruchu zębów oraz nierównomiernego rozkładu oddziałujących sił, co potencjalnie wydłuży całkowity czas leczenia. Obniżenie zużywania powierzchni umożliwia dobór zalecanych kombinacji zamków oraz łuków, uwzględniając przy tym właściwości mechaniczne, twardość i właściwości powierzchni materiałów, co przekłada się na optymalizację terapii ortodontycznej. Elementy aparatów ortodontycznych ulegają stopniowemu zużyciu i korozji, co powoduje uwalnianie jonów metali, które mogą wchodzić w kontakt ze śliną oraz tkankami jamy ustnej. Część jonów metali w następstwie może zostać wchłonięta do krwioobiegu. Zależy to jednak od różnych czynników, w tym rodzaju oraz stężenia jonów, indywidualnej wrażliwości organizmu i ogólnego stanu zdrowia. Ponadto zużywane powierzchnie elementów aparatów ortodontycznych mogą sprzyjać tworzeniu się biofilmu, który składa się z bakterii i ich produktów metabolicznych, co może prowadzić do rozwoju próchnicy zębów, zapalenia dziąseł lub zapalenia przyzębia. Produkty zużywania mogą również wpływać na równowagę mikroflory jamy ustnej, prowadząc do powstawania stanów zapalnych, infekcji jamy ustnej, chorób przyzębia czy chorób układowych. Biofilm odgrywa istotną rolę w leczeniu ortodontycznym, wpływając na tarcie między zamkami a łukami. Biofilm na powierzchni zamków i łuków może prowadzić do zwiększonego tarcia i zużywania powierzchni, co z kolei wpływa na efektywność leczenia ortodontycznego.

Świadome wykorzystanie wiedzy z zakresu tribologii prawdopodobnie przełoży się na osiągnięcie przez lekarzy ortodontów optymalnych efektów terapeutycznych poprzez tworzenie nowych strategii leczenia w oparciu o wyniki badań tribologicznych. Kontrola wartości tarcia, stopnia zużywania oraz stanu powierzchni w układzie zamek-łuk w poszczególnych etapach leczenia, stanowi jeden z głównych celów tworzenia idealnych warunków dla ortodontycznego ruchu zębów, co uzyskać można poprzez analizę struktury powierzchni oraz identyfikację procesów zużywania. Na podstawie ubytku masy można wnioskować o procesie zużywania współpracujących kombinacji zamek-łuk, które z kolei są

ściśle związane z tarciem. W literaturze przedmiotu ubytek masy oraz zmiany struktury powierzchni przyjmowane są jako bezpośrednie miary zużycia.

Mimo prowadzonych do tej pory analiz tarcia w ortodoncji oraz zjawisk z nim związanych, procesy tribologiczne zachodzące na styku współpracujących powierzchni zamków oraz łuków ortodontycznych nie są jeszcze w pełni poznane. W związku z tym zmiany zachodzące na tych powierzchniach podczas leczenia nie są do końca wyjaśnione. Badania zawierają niepełną informację dotyczącą metodologii, sposobu przygotowania, mocowania materiałów oraz parametrów. Znaczna część prowadzonych badań nie symuluje obecności śliny, która zdaje się istotnie wpływać na uzyskiwane wyniki wartości tarcia. Uwzględnienie tych aspektów w planie badań oraz znajomość cech użytkowych powierzchni materiałów stosowanych w leczeniu może znaleźć istotne zastosowanie podczas rozważań klinicznych.

W związku z powyższym, w ramach przeprowadzonej analizy literatury podjęto próbę usystematyzowania oraz rozszerzenia wiedzy dotyczącej stanu struktur powierzchni w układzie zamek-łuk ortodontyczny przed i po zastosowaniu klinicznym. Oceniono cechy oraz zmiany cech powierzchni materiałów ortodontycznych, uwzględniając przy tym wewnętrzne warunki pracy.

Rozprawa doktorska skupia się na analizie procesów tribologicznych zachodzących w układzie zamek-łuk ortodontyczny z uwzględnieniem wpływu tych procesów na skuteczność leczenia ortodontycznego. Praca koncentruje się na ocenie właściwości warstwy wierzchniej materiałów stosowanych w produkcji zamków oraz łuków, które odgrywają kluczową rolę w kształtowaniu oporu ruchu oraz w procesach zużycia. Na podstawie prowadzonych analiz podjęto próbę usystematyzowania wiedzy z zakresu tribologii w ortodoncji, ze szczególnym uwzględnieniem wpływu tarcia i zużycia powierzchni na efektywność terapii ortodontycznej. Badania te mają na celu identyfikację kluczowych czynników eksploatacyjnych, które determinują skuteczność i bezpieczeństwo stosowania aparatów ortodontycznych w środowisku jamy ustnej. Głównym zadaniem pracy była ocena cech użytkowych materiałów ortodontycznych, takich jak chropowatość, struktura geometryczna powierzchni oraz właściwości mechaniczne, w odniesieniu do procesów tribologicznych. Wyniki badań mogą przyczynić się do optymalizacji technologicznej powierzchni elementów aparatów ortodontycznych, co potencjalnie skróci czas leczenia, poprawi komfort pacjentów i zwiększy skuteczność leczenia. Rozprawa podejmuje także próbę weryfikacji sformułowanej hipotezy badawczej, zakładającej, że stan warstwy wierzchniej współpracujących elementów aparatu ortodontycznego ma istotny wpływ na efektywność procesu leczenia. Analiza wyników badań tribologicznych oraz parametrów strukturalnych powierzchni umożliwi opracowanie praktycznych zaleceń dla lekarzy ortodontów, prowadząc do poprawy standardów leczenia.

2. ANALIZA LITERATURY

2.1. Istota tribologii w ortodencji

Tribologia jest nauką zajmującą się badaniem interakcji oraz zjawisk pojawiających się na styku współpracujących powierzchni. Dotyczy to zarówno zjawisk zachodzących w mechanizmach technicznych, jak i naturalnych. Z kolei ortodencja, będąca częścią stomatologii, skupia się na korekcji nieprawidłowości zgryzowych, co swoje odzwierciedlenie znajduje w tribologii, szczególnie w kontekście leczenia stałymi aparatami ortodontycznymi, ze względu na rodzaj interakcji zachodzących na styku współpracujących powierzchni kombinacji zamek-łuk ortodontyczny. Mechanizmy ruchu zębów, kontrolowane poprzez elementy aparatów ortodontycznych, generują siły tarcia, co wpływa na precyzyjne przemieszczanie zębów.

Podczas kontaktu dwóch powierzchni rzeczywisty styk występuje początkowo jedynie na wierzchołkach nierówności. Wraz ze wzrostem siły normalnej obszar styku ulega powiększeniu, co prowadzi do lokalnych odkształceń sprężystych, a następnie plastycznych. Procesy te generują naprężenia, które przeciwstawiają się przyłożonemu obciążeniu. Rzeczywista powierzchnia styku odgrywa kluczową rolę w układach tribologicznych, ponieważ to właśnie tam zachodzą procesy tarcia i zużycia. Ocena zjawisk tribologicznych, takich jak tarcie czy zużywanie na styku współpracujących powierzchni elementów aparatu, jest kluczowa dla planowania leczenia ortodontycznego.

System tribologiczny (tribosystem) obejmuje wszystkie oddziałujące ze sobą elementy, których funkcje oraz struktury zależą od czynników mechanicznych, chemicznych i środowiskowych. W przypadku aparatów ortodontycznych, system ten tworzą zamki i łuki, które współpracują podczas ruchów zębów. Kluczową funkcją tribosystemu jest przekształcenie wejściowych parametrów mechanicznych na wyjściowe rezultaty, takie jak siły działające na zęby. Struktura tribosystemu składa się z elementów podstawowych i współpracujących, ich właściwości materiałowych oraz wzajemnych relacji.

Dobór odpowiednich materiałów podczas leczenia jest istotny ze względu na właściwości tribologiczne oraz biokompatybilność z tkankami jamy ustnej i organizmem człowieka. Tarcie i zużywanie są właściwościami systemu, a nie samych materiałów, co oznacza, że każda modyfikacja w konstrukcji czy właściwościach elementów systemu wpływa na jego charakterystyki tribologiczne. W wyniku tarcia elementy stałego aparatu ortodontycznego mogą ulegać zużyciu w różnym stopniu. Przekłada się to na strukturę powierzchni, wytrzymałość oraz funkcjonalność.

Interakcje w układzie zamek-łuk mają bezpośredni wpływ na skuteczność leczenia ortodontycznego. Tarcie generowane na styku tych elementów wpływa na siły przenoszone na zęby, efektywność ich ruchu oraz całkowity czas leczenia. Nadmierne tarcie może wydłużać czas leczenia, powodować niepożądane efekty uboczne, takie jak resorpcja korzenia oraz obniżać komfort pacjenta. Z kolei zużywanie elementów może prowadzić do uwalniania cząstek materiału i jonów, które w środowisku jamy ustnej mogą negatywnie wpływać na zdrowie pacjenta.

Tribologia pozwala na zrozumienie tych procesów, co umożliwia optymalizację konstrukcji, odpowiedni dobór materiałów oraz zwiększenie skuteczności leczenia, poprzez tworzenie efektywnych systemów ortodontycznych oraz metod leczenia. Znajomość procesów tribologicznych zachodzących na styku współpracujących powierzchni w aparatach ortodontycznych pozwala na opracowywanie wydajniejszych i trwalszych systemów zamków i łuków. W rezultacie umożliwia to nie tylko optymalizację procesu leczenia, lecz także minimalizację potencjalnych zagrożeń zdrowotnych dla pacjenta.

2.2. Procesy tribologiczne w ortodoncji

W leczeniu ortodontycznym tarcie jest istotnym elementem wpływającym na skuteczność terapii. Występuje na styku powierzchni łuku ortodontycznego ze slotem zamka oraz ligatur używanych w zamkach konwencjonalnych lub systemu zamykającego w zamkach samoligaturujących. Można je podzielić na tarcie statyczne, występujące w stanie spoczynku oraz tarcie kinetyczne, pojawiające się podczas ruchu. Współpracujące elementy aparatu ortodontycznego tworzą system tribologiczny, w którym interakcje między powierzchniami są kluczowe dla przemieszczania zębów. Podczas przesuwania łuku w slotach zamków tarcie powstaje na styku powierzchni zamków, łuków i ligatur lub systemów zamykających, co może istotnie wpływać na efektywność leczenia.

W biomechanice ortodontycznej istotne jest zjawisko oporu ślizgowego, który obejmuje nie tylko tarcie, ale także inne mechanizmy, takie jak wklinowanie łuku w krawędzie slotu zamka czy jego wrębianie. Opór ślizgowy musi być pokonany przez siły ortodontyczne, aby umożliwić ruch zębów. Wartość tego oporu zależy od zastosowanych materiałów, metody ligacji, właściwości mechanicznych elementów aparatu oraz warunków środowiskowych, takich jak obecność śliny.

Smarowanie odgrywa kluczową rolę w redukcji tarcia na styku zamków i łuków ortodontycznych. Ślina jako naturalny środek smarujący, może zmniejszać wartość tarcia, co poprawia efektywność leczenia. Jednak jej wpływ nie jest jednoznaczny – w niektórych badaniach wykazano, że ślina może zwiększać tarcie, w zależności od jej składu chemicznego oraz właściwości zastosowanych materiałów. Ślina ludzka, w odróżnieniu od sztucznej, zawiera białka, enzymy i produkty bakteryjne, które mogą wpływać na procesy tribologiczne, dlatego jej działanie nie zawsze jest przewidywalne. Smarowanie zmniejsza również zużycie powierzchni, co pomaga utrzymać trwałość i wydajność aparatów ortodontycznych. Smarowanie odgrywa również rolę w ochronie przed uwalnianiem jonów metali ze zużywanych powierzchni. Uwalnianie jonów, takich jak nikiel, chrom czy kobalt, może powodować reakcje alergiczne, toksyczność lub inne negatywne skutki zdrowotne. Zmniejszenie tarcia poprzez odpowiednie smarowanie i kontrola zużycia powierzchni aparatów ortodontycznych może ograniczyć te zagrożenia i zwiększyć bezpieczeństwo leczenia. Oprócz smarowania naturalnego, jakim jest ślina, projektowanie aparatów ortodontycznych z myślą o redukcji tarcia stanowi kluczowy element poprawy efektywności leczenia. Na przykład zamki samoligaturujące, dzięki wbudowanym mechanizmom zamykającym, eliminują konieczność stosowania ligatur, co często prowadzi do niższego tarcia w porównaniu z zamkami konwencjonalnymi. Jednak efektywność tych systemów w rzeczywistych warunkach klinicznych nadal budzi kontrowersje, ze względu na rozbieżności wyników badań *in vitro* i badań klinicznych.

Procesy zużywania elementów aparatów ortodontycznych mają istotny wpływ na przebieg leczenia. Tarcie powoduje ścieranie powierzchni slotów zamków i łuków, co zależy od rodzaju zastosowanych materiałów, technik ortodontycznych oraz warunków środowiskowych. Materiały takie jak stal nierdzewna, stopy tytanu czy ceramika wykazują różne właściwości tribologiczne, które wpływają na trwałość i funkcjonalność aparatów. Na przykład stalowe zamki są bardziej odporne na zużycie niż ceramiczne, jednak mogą szybciej ulegać ścieraniu w kontakcie z ceramiką.

Kontrola tarcia, efektywne oraz minimalizacja zużycia są kluczowe dla zapewnienia skuteczności leczenia ortodontycznego. Świadome projektowanie aparatów oraz dobór materiałów i metod leczenia z uwzględnieniem tribologii przyczyniają się do poprawy komfortu pacjenta, skrócenia czasu leczenia i redukcji potencjalnych zagrożeń zdrowotnych.

2.3. Metrologia powierzchni

Przed analizą struktury powierzchni zamków i łuków ortodontycznych, kluczowe jest zrozumienie podstawowych pojęć dotyczących struktury geometrycznej powierzchni (SGP). Każda powierzchnia powstająca w wyniku procesu technologicznego wykazuje odstępstwa od idealnego, geometrycznego kształtu zaprojektowanego w dokumentacji technologicznej. SGP obejmuje mikronierówności – wzniesienia i zagłębienia – charakteryzujące kształt, wymiary i rozmieszczenie nierówności powierzchni. Struktura ta stanowi integralną część warstwy wierzchniej materiału (WW), będącej zewnętrzną częścią elementu, na którą wpływają procesy produkcji i zużycia.

SGP charakteryzuje powierzchnię w skali makroskopowej (falistość), mikroskopowej (chropowatość i kierunkowość) oraz submikroskopowej (nierówności o wysokości poniżej 0,01 μm). Kluczowymi parametrami opisującymi SGP są chropowatość i kierunkowość, które bezpośrednio wpływają na właściwości tribologiczne elementów współpracujących w układach ortodontycznych. Oprócz tego istotne są fizykochemiczne cechy warstwy wierzchniej, takie jak rodzaj materiału, struktura, naprężenia własne oraz twardość. Nierówności powierzchni, w tym wady powstałe na skutek korozji, erozji czy naprężeń, mogą wpływać na tarcie, zużywanie oraz przyleganie bakterii, a tym samym na skuteczność leczenia ortodontycznego.

W leczeniu ortodontycznym struktura powierzchni zamków i łuków odgrywa kluczową rolę w procesie przemieszczania zębów. Nierówności powierzchni zamków i łuków mogą wpływać na wartości sił tarcia, procesy zużywania oraz formowanie się biofilmu bakteryjnego, który może prowadzić do powikłań klinicznych. Struktura powierzchni slotów zamków jest szczególnie istotna, ponieważ bezpośrednio oddziałuje na tarcie w układzie zamek-łuk. Wzrost chropowatości powierzchni slotów zamków i łuków zazwyczaj zwiększa wartości tarcia, co może obniżać efektywność leczenia.

Dokładność wykonania elementów ortodontycznych przez producenta oraz ich powtarzalność są kluczowe dla osiągnięcia pożądaných właściwości mechanicznych i odpowiedniej struktury powierzchni. Badania wykazują, że chropowatość powierzchni zamków i łuków koreluje z wartością tarcia generowanego w układzie zamek-łuk. Również topografia powierzchni łuków, ich struktura i chropowatość wpływają na biomechanikę ruchu zębów oraz podatność na korozję i biokompatybilność materiału.

Metrologia powierzchni obejmuje analizę i pomiary nierówności powierzchni za pomocą technik stykowych i bezstykowych. W metodach stykowych końcówka przyrządu pomiarowego (np. igła diamentowa) przesuwana jest po powierzchni, odwzorowując jej nierówności. Metody bezstykowe, takie jak mikroskopia konfokalna, skaningowa mikroskopia elektronowa czy profilometria optyczna, pozwalają na bardziej precyzyjne odwzorowanie topografii powierzchni i minimalizują ryzyko uszkodzenia badanego materiału.

Analizy przeprowadzone za pomocą tych metod wskazują na znaczną złożoność struktur powierzchni zamków i łuków, zarówno w obrębie produktów tego samego producenta, jak i między różnymi producentami. Niejednorodność powierzchni, szczególnie na poziomie chropowatości, może wpływać na wartość współczynnika tarcia oraz utrudniać przekładanie wyników badań na praktykę kliniczną.

Struktura powierzchni zamków i łuków ortodontycznych ma bezpośredni wpływ na skuteczność leczenia ortodontycznego. Gładkie, jednorodne powierzchnie są pożądane, ponieważ zmniejszają wartość tarcia oraz minimalizują ryzyko tworzenia biofilmu bakteryjnego. Badania wskazują, że bardziej chropowate powierzchnie mogą sprzyjać uwalnianiu jonów metali, przyspieszać procesy korozyjne oraz zwiększać adhezję bakterii.

Podczas leczenia ortodontycznego materiały aparatu podlegają zużyciu i utracie swoich pierwotnych właściwości na skutek oddziaływań środowiska jamy ustnej oraz obciążeń mechanicznych. Dlatego kluczowe jest projektowanie elementów o odpowiednich

właściwościach mechanicznych, strukturze i biokompatybilności, aby zapewnić efektywność leczenia i bezpieczeństwo pacjenta.

Metrologia powierzchni dostarcza kluczowych informacji na temat struktury geometrycznej powierzchni zamków i luków ortodontycznych, które mają bezpośredni wpływ na proces leczenia. Dokładność pomiarów i analiza parametrów SGP, takich jak chropowatość, kierunkowość czy falistość, pozwalają na optymalizację konstrukcji elementów aparatów ortodontycznych. Dzięki temu możliwe jest osiągnięcie bardziej efektywnego leczenia, minimalizacja wartości tarcia i ryzyka powikłań klinicznych, a także zwiększenie trwałości i biokompatybilności elementów stałych aparatów ortodontycznych.

2.4. Podsumowanie analizy literatury

Na podstawie analizy literatury można wskazać kilka kluczowych luk badawczych, które utrudniają pełne zrozumienie i optymalizację procesów tribologicznych w leczeniu ortodontycznym. Luki te obejmują zarówno kwestie mechaniczne, biologiczne, jak i technologiczne, które mają bezpośredni wpływ na efektywność leczenia ortodontycznego i bezpieczeństwo pacjentów.

Dotychczasowe badania wykazują, że struktura powierzchni zamków i luków ortodontycznych wykazuje znaczne różnice nawet w obrębie produktów tego samego producenta. Brak standaryzacji w metodach produkcji prowadzi do niejednorodności parametrów takich jak chropowatość, co znacząco wpływa na tarcie w układzie zamek-luk. Niejednorodność powierzchni utrudnia przewidywanie współczynnika tarcia oraz przekładanie wyników badań na praktykę kliniczną. Zmienność ta może prowadzić do nieoptymalnych wyników leczenia oraz wydłużonego czasu terapii. Konieczne są dalsze prace nad standaryzacją metod produkcji elementów aparatów ortodontycznych. W szczególności należy opracować techniki umożliwiające uzyskanie bardziej jednorodnych powierzchni slotów zamków i luków.

Chociaż wykazuje się, że chropowatość powierzchni zamków i luków ma wpływ na wartości tarcia, brak jest kompleksowych badań łączących te wyniki z ich klinicznymi implikacjami. W szczególności brakuje analiz dotyczących zmian w strukturze powierzchni podczas rzeczywistego użytkowania aparatów w jamie ustnej. Brak wiedzy na temat zmian zachodzących w warstwie wierzchniej w warunkach klinicznych utrudnia optymalizację projektowania aparatów ortodontycznych. Ponadto, niezajomość wpływu tych zmian na ruch zębów i trwałość aparatów może prowadzić do mniej skutecznych terapii. Należy przeprowadzić badania nad zmianami struktury powierzchni zamków i luków ortodontycznych w warunkach *in vivo*. Ważne jest również stworzenie modeli, które łączą właściwości tribologiczne z efektywnością leczenia.

Wpływ struktury powierzchni na tworzenie biofilmu bakteryjnego i adhezję bakterii jest słabo poznany. Ponadto, niewiele badań koncentruje się na ocenie skutków uwalniania jonów metali, takich jak nikiel czy chrom, na zdrowie pacjentów. Biofilm może prowadzić do powikłań, takich jak próchnica czy zapalenie przyzębia, a uwalnianie jonów metali może wywoływać reakcje alergiczne lub toksyczność. Niezrozumienie tych procesów ogranicza możliwość projektowania biokompatybilnych elementów ortodontycznych. Potrzebne są dalsze badania nad wpływem struktury powierzchni na tworzenie biofilmu i uwalnianie jonów metali. W szczególności należy analizować różne materiały i ich modyfikacje pod kątem biokompatybilności i odporności na korozję.

Rola śliny jako naturalnego środka smarującego w zmniejszaniu tarcia na styku zamków i luków ortodontycznych jest niejednoznaczna. Różnice w wynikach badań *in vitro* i *in vivo* wskazują na potrzebę głębszego zrozumienia wpływu składników śliny na procesy tribologiczne. Niepewność co do wpływu śliny na tarcie i zużywanie utrudnia dokładne przewidywanie wyników klinicznych oraz ogranicza możliwość symulacji warunków

rzeczywistych w laboratorium. Należy przeprowadzić badania nad rolą śliny w zmniejszeniu tarcia i ochronie powierzchni zamków i łuków. Kluczowe jest również porównanie właściwości śliny ludzkiej i sztucznej w kontekście procesów tribologicznych.

Większość dostępnych badań koncentruje się na właściwościach mechanicznych łuków i zamków, pomijając jednoczesny wpływ konstrukcji, materiału i technik wytwarzania na biomechaniczne właściwości aparatów. Brak kompleksowego podejścia utrudnia projektowanie aparatów o optymalnych właściwościach tribologicznych, co może prowadzić do nieskutecznych lub niekomfortowych terapii. Potrzebne są interdyscyplinarne badania łączące wiedzę z zakresu materiałoznawstwa, biomechaniki i tribologii. W szczególności należy zbadać wpływ różnych konstrukcji zamków i łuków na biomechanikę ruchu zębów.

Tribologia w ortodoncji stanowi obszar o dużym potencjale badawczym, którego rozwój może znacząco wpłynąć na efektywność leczenia i komfort pacjentów. Luki w wiedzy, takie jak brak standaryzacji produkcji, niepełne zrozumienie wpływu struktury powierzchni na tarcie i zużywanie, ograniczone analizy interakcji biologicznych oraz niejednoznaczność roli śliny, wskazują na potrzebę dalszych badań w tym zakresie.

Rozwój badań tribologicznych w ortodoncji może prowadzić do:

- stworzenia bardziej efektywnych systemów ortodontycznych,
- poprawy biokompatybilności materiałów,
- zmniejszenia ryzyka powikłań klinicznych,
- skrócenia czasu leczenia.

Interdyscyplinarne podejście, łączące wiedzę z zakresu materiałoznawstwa, biologii i tribologii, może dostarczyć narzędzi niezbędnych do opracowania bardziej zaawansowanych i bezpiecznych technologii stosowanych w ortodoncji.

3. HIPOTEZA, CEL I ZAKRES BADAŃ

Autorka uważa, że istotny wpływ na skuteczność leczenia ortodontycznego ma stan warstwy wierzchniej współpracujących zamków oraz łuków ortodontycznych. Przeprowadzone badania struktury i właściwości tej warstwy mogą przyczynić się do optymalizacji technologicznej powierzchni slotów zamków oraz współpracujących z nimi łuków, co pozwoli na poprawę efektywności zachodzących interakcji tribologicznych. Optymalizacja ta może mieć również znaczenie dla lepszego zrozumienia funkcjonalności tych elementów oraz procesów ich zużywania, co jest kluczowe w kontekście ich przydatności do długotrwałego stosowania w środowisku jamy ustnej.

Na podstawie przeprowadzonego studium literaturowego sformułowano następującą hipotezę naukową:

Istotny wpływ na skuteczność leczenia ortodontycznego ma stan warstwy wierzchniej współpracujących zamków oraz łuków ortodontycznych. Badania struktury i ocena właściwości tej warstwy mogą przyczynić się do optymalizacji technologicznej warstwy wierzchniej slotów zamków oraz współpracujących z nimi powierzchni łuków, co w rezultacie poprawi efektywność zachodzących interakcji tribologicznych i wpłynie na efektywność leczenia. Ponadto, pozwoli to lepiej poznać funkcjonalność oraz zachodzący proces zużywania tych materiałów, co jest kluczowe dla oceny podatności do stosowania w dłuższym czasie w środowisku jamy ustnej.

Weryfikacja powyższej hipotezy przyczyni się do rozszerzenia stanu wiedzy w obszarach, które zostały zidentyfikowane na podstawie przeglądu literatury.

Wyniki analizy literatury pozwalają na ocenę aktualnego stanu wiedzy związanego z tematem struktury powierzchni współpracujących zamków oraz łuków ortodontycznych, a także zużywaniem się tych materiałów w warunkach pracy jamy ustnej. Identyfikują także obszary, które autorka uważa za wymagające dalszych badań i uzupełnień. Pozwoli to na poszerzenie istniejącej wiedzy oraz potwierdzenie lub poprawę już istniejących spostrzeżeń i wniosków. To z kolei może przyczynić się do lepszego zrozumienia znaczenia zagadnień tribologicznych w kontekście leczenia ortodontycznego.

Głównym celem pracy badawczej jest zweryfikowanie sformułowanej hipotezy naukowej, która zakłada, że stan warstwy wierzchniej współpracujących zamków oraz łuków ortodontycznych ma istotny wpływ na skuteczność leczenia ortodontycznego. Badania nad strukturą i właściwościami tej warstwy mają na celu przyczynienie się do optymalizacji technologicznej warstwy wierzchniej układu zamek-łuk. Ostatecznym rezultatem takiej optymalizacji ma być poprawa efektywności interakcji tribologicznych zachodzących w trakcie leczenia ortodontycznego. Dodatkowo, ta analiza pomoże w lepszym zrozumieniu funkcjonalności tych elementów oraz procesów zużywania, co jest kluczowe w kontekście oceny ich przydatności do długotrwałego stosowania w środowisku jamy ustnej. W celu osiągnięcia tego celu, zostaną dokładnie zbadane parametry SGP, uwzględniając istotne czynniki eksploatacyjne wpływające na proces zużywania. Zadany cel zostanie zrealizowany poprzez opracowanie związków pomiędzy badanymi czynnikami a zestawem czynników wpływających na proces zużywania.

Osiągnięcie głównego celu pracy wymaga, przede wszystkim przeprowadzenia szczegółowych pomiarów parametrów struktury geometrycznej powierzchni współpracujących zamków oraz łuków ortodontycznych. Należy uwzględnić istotne czynniki eksploatacyjne, które wpływają na proces zużywania tych elementów. Kolejnym krokiem będzie analiza zebranych danych i opracowanie relacji między badanymi parametrami a czynnikami wpływającymi na efektywność leczenia ortodontycznego. Optymalizacja technologicznej warstwy wierzchniej układu zamek-łuk jest kluczowym aspektem tego procesu, a jej rezultatem powinno być zwiększenie efektywności interakcji tribologicznych zachodzących podczas

leczenia. Warto również zrozumieć funkcjonalność tych elementów oraz procesy zużywania, co pozwoli na ocenę ich przydatności do długotrwałego stosowania w środowisku jamy ustnej. Wszystkie te kroki będą miały na celu weryfikację sformułowanej hipotezy i osiągnięcie głównego celu pracy badawczej.

Dla realizacji założonego celu, zakresem pracy objęto następujące etapy badań:

1. ocenę stanu wiedzy dotyczącego analizowanego zagadnienia na podstawie informacji dostępnych w literaturze obejmującej kluczowe obszary, tj. rola tarcia w ortodoncji, analiza struktury powierzchni zamków oraz łuków ortodontycznych przed i po leczeniu, badania tribologiczne związane z interakcjami na styku powierzchni oraz zagadnienia z zakresu metrologii powierzchni;
2. przeprowadzenie badań tribologicznych elementów aparatów ortodontycznych (zamków oraz łuków) obejmujących wykonanie pomiarów chropowatości powierzchni pozwalających na ocenę struktury geometrycznej powierzchni zamków oraz łuków ortodontycznych, stosowanych w leczeniu, a także pomiary zmiany masy tych elementów stanowiących miary zużywania;
3. przeprowadzenie analiz statystycznych w celu zweryfikowania założeń hipotezy badawczej.

Poziom adekwatności opracowanych modeli regresji liniowej zostanie oceniony na podstawie wyników uzyskanych w trakcie badań tribologicznych i pomiarów struktury geometrycznej powierzchni współpracujących zamków i łuków ortodontycznych, a także analiz statystycznych przeprowadzonych w celu weryfikacji postawionej hipotezy. Satysfakcjonujący poziom oznaczał będzie, że wyniki te potwierdzą założenia hipotezy, zgodnie z którą stan warstwy wierzchniej elementów aparatu ortodontycznego ma istotny wpływ na skuteczność leczenia ortodontycznego.

4. METODYKA BADAWCZA

4.1. Przedmiot badań

Wyboru przedmiotu badań Autorka dokonała na podstawie analizy literatury z zakresu tribologii, metrologii powierzchni, leczenia ortodontycznego, przeglądu materiałów stosowanych przez producentów, a także wywiadu z lekarzami ortodontami. Uwzględniono techniki leczenia oraz najczęściej stosowane materiały w praktyce klinicznej. Przedmiotem badań niniejszej pracy są zamki i łuki ortodontyczne, które wspólnie tworzą system tribologiczny, charakteryzujący się określonymi właściwościami tarcia, zużywania i współpracy.

Badania obejmują zarówno ogólnodostępne zamki samoligaturujące (SL) wykonane ze stali nierdzewnej (SS), jak i indywidualnie projektowane zamki samoligaturujące (SLI), również ze stali nierdzewnej. Zamki SL współpracowały z łukami ortodontycznymi niklowo-tytanowymi z dodatkiem miedzi (CuNiTi) oraz ze stali nierdzewnej (SS). Natomiast zamki SLI były stosowane w połączeniu z łukami CuNiTi oraz łukami beta-tytanowymi (TMA). Takie zestawienie umożliwiło ocenę różnic w skuteczności i wydajności współpracy elementów systemu w zależności od zastosowanych materiałów i konstrukcji zamków.

Pacjentów do badań rekrutowano w latach 2017–2024 z jednego gabinetu ortodontycznego. Wszyscy byli leczeni przez tego samego lekarza ortodontę, co zapewniało jednorodność stosowanych metod leczenia oraz możliwość jednoznacznej interpretacji wyników. Kryteria wykluczenia zostały określone w konsultacji z ortodontą i obejmowały m.in. pacjentów z III klasą wad zgryzowych, osoby zażywające leki wpływające na procesy kostnienia, pacjentów po radioterapii w obszarze głowy i szyi, osoby z brakami w uzębieniu lub stosujące aparaty grubołukowe, a także pacjentów z historią wcześniejszego leczenia ortodontycznego. Do badań zakwalifikowano łącznie 80 pacjentów, równomiernie podzielonych na dwie grupy (SL i SLI), po 40 osób każda. U pacjentów z każdej grupy oceniano zamki ortodontyczne dla zębów siecznych, kłów i przedtrzonowych (łącznie 20 zamków na osobę: 10 z łuku szczękowego i 10 z łuku żuchwowego). Łuki stosowane w leczeniu miały przekroje okrągłe i prostokątne oraz były wykonane z CuNiTi, SS i TMA, w zależności od fazy leczenia. Wszystkie analizowane zamki ortodontyczne pochodziły z tej samej linii produkcyjnej i zostały wytworzone metodą formowania wtryskowego (MIM – z ang. *metal injection molding*). Zamki miały taki sam rozmiar slotu (0,022 cala), różniły się natomiast preskrypcją, wynikającą z indywidualnego planu leczenia każdego pacjenta.

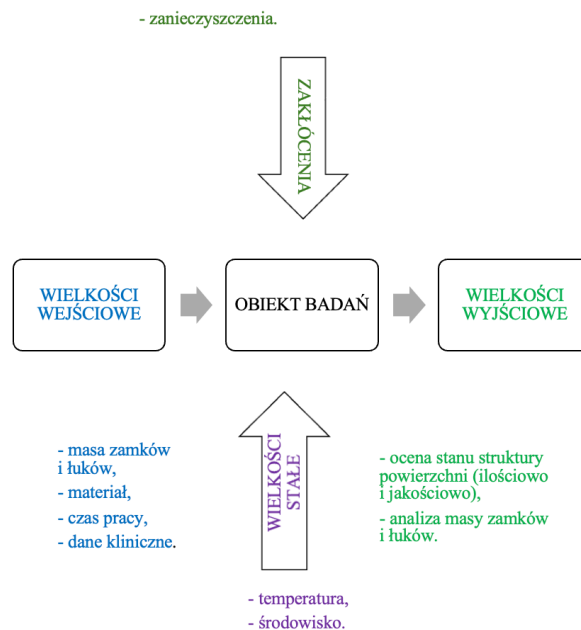
Materiały badawcze obejmowały zarówno nowe zamki i łuki, jak i elementy pozyskane po zakończonym leczeniu. Uwzględniono różne fazy leczenia ortodontycznego, analizując łuki stosowane na końcu każdej fazy jako reprezentatywne dla osiągniętych rezultatów. Analizy dotyczyły parametrów takich jak czas noszenia aparatów, różnice w zużyciu materiałów oraz współpraca poszczególnych elementów systemu.

Próba badawcza obejmowała pacjentów w dwóch grupach wiekowych: 16–18 lat oraz 25–27 lat. Wybór tych grup pozwolił na uwzględnienie biologicznych różnic związanych z procesami kostnienia i ich potencjalnym wpływem na leczenie. Średni wiek w obu grupach był zbliżony i nie wykazano istotnych różnic statystycznych między grupami pod tym względem. Rozkład płci był równomierny (50% kobiet i 50% mężczyzn), co wykluczało wpływ płci na różnice w wynikach. Czas noszenia aparatów w obu grupach wskazał istotne różnice – pacjenci z zamkami SLI mieli krótszy czas leczenia w porównaniu do grupy z zamkami SL. Wyniki te mogą sugerować, że indywidualnie projektowane zamki pozwalają na zwiększenie efektywności leczenia. Zebrane dane, uwzględniające różnorodność materiałów, technik leczenia i charakterystyki pacjentów, stanowią solidną podstawę do dalszej analizy wpływu stanu warstwy wierzchniej elementów ortodontycznych na efektywność leczenia.

4.2. Plan badań

Osiągnięcie zamierzonego celu niniejszej pracy, Autorka rozpoczęła od analizy literatury i przygotowania planu badań, który podzielono na III główne etapy. I etap obejmował ocenę powierzchni uzyskanych w wyniku procesu wytwarzania (powierzchni zamków oraz łuków ortodontycznych niestosowanych w leczeniu), która zawiera zarówno analizę ilościową SGP, a także badanie właściwości technologicznej warstwy wierzchniej (TWW). W drugim etapie przeprowadzono charakterystykę tribologiczną powierzchni wynikającą z procesu eksploatacji, tj. przekształconej TWW w eksploatacyjną warstwę wierzchnią (EWW) po przeprowadzonym leczeniu ortodontycznym. III etap obejmował weryfikację wybranych zmiennych na wyniki uzyskane w etapach I i II, poprzez przeprowadzenie analiz statystycznych oraz uwzględnienie czynników klinicznych i demograficznych z wykorzystaniem modelu ekonometrycznego.

W badaniach tribologicznych kluczowe jest określenie kontrolowanych i niekontrolowanych wielkości, zarówno wejściowych, jak i wyjściowych. Wejścia kontrolowane obejmują czynniki, które można dowolnie manipulować oraz stałe czynniki niezmiennie w trakcie badań. Wejścia niekontrolowane to zakłócenia różnego rodzaju, które wpływają losowo na system tribologiczny. Reakcją systemu na te wpływy są zmiany wielkości wyjściowych, które mogą być zarówno kontrolowane, jak i niekontrolowane. Wyjścia kontrolowane to odpowiedzi systemu tribologicznego na czynniki wejściowe, które można manipulować lub które pozostają stałe. Wyjścia niekontrolowane to przypadkowe zmiany spowodowane czynnikami, których wpływ na badane wielkości nie jest określany. Na potrzeby realizacji powyższych rozważań dokonano selekcji wielkości do uwzględnienia w modelu badań, który przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Model badań [opracowanie własne]

Czynniki wejściowe dobrano na podstawie aktualnego stanu wiedzy w dziedzinie ortodoncji i specyficznych potrzeb badawczych pracy. Analizami objęto materiały z jakich wytworzone są współpracujące elementy (kombinacja zamek-łuk), rodzaj zamków ortodontycznych (SL, SLI), parametry łuków ortodontycznych (rozmiar), czas pracy zamków oraz łuków stosowanych w leczeniu, a także dane kliniczne pacjentów, takie jak płeć, wiek

i klasa wad zgryzowych. Wybrane czynniki wejściowe stanowią podstawę przeprowadzenia badań i umożliwią osiągnięcie celów badawczych tej pracy.

Na podstawie przeglądu literatury dokonano wyboru istotnych czynników wyjściowych, które stanowią podstawę analizy procesu zużywania. Wśród tych czynników uwzględniono ubytek masy Δm , który charakteryzuje ilość materiału zużywanego w procesie. Ponadto, uwzględniono parametry chropowatości powierzchni, tj. S_q , S_{sk} , S_{ku} , które opisują zmiany w strukturze geometrycznej badanych elementów. Wybór oparto na podstawie literatury oraz przeprowadzonych analiz i selekcji. Wybrano parametry umożliwiające opracowanie charakterystyk powierzchni EWW współpracujących zamków oraz łuków ortodontycznych, które obejmują ocenę ukształtowania powierzchni oraz analizę mechanizmów i produktów zużywania.

Jako czynniki stałe przyjęto temperaturę oraz środowisko jamy ustnej, mimo że te parametry mogą podlegać pewnym krótkoterminowym wahaniom. Temperatura jamy ustnej, choć chwilowo zmienna, zazwyczaj utrzymuje się w wąskim fizjologicznym zakresie, co sprawia, że jej wpływ na wyniki badań jest ograniczony. Dlatego przyjęto ją jako czynnik stały. Środowisko jamy ustnej, choć zmienne w kontekście diety, zmienia się w sposób cykliczny i w długoterminowej perspektywie podczas leczenia ortodontycznego można uznać je za względnie stałe. Umożliwia to skoncentrowanie się na innych zmiennych mających większy wpływ na analizowane parametry chropowatości zamków i łuków ortodontycznych.

Spśród niekontrolowanych, losowych czynników, tj. zakłóceń przyjęto zanieczyszczenia. mogą prowadzić do gromadzenia się osadów na powierzchni materiałów ortodontycznych, co przekłada się na utrudnienie utrzymania właściwej higieny, sprzyjając rozwojowi bakterii i powstawaniu płytki nazębnej. Zanieczyszczenia mogą powodować również korozję lub degradację materiałów. Aspekty te przekładają się na skuteczność oraz postępy leczenia ortodontycznego, jednak w znacznym stopniu zależą od nawyków higieny, diety, produkcji śliny oraz indywidualnych reakcji na materiały ortodontyczne każdego pacjenta.

Ostatni etap badań obejmował przeprowadzenie analiz statystycznych, uwzględniających analizowane parametry oraz czynniki kliniczne i demograficzne, z zastosowaniem modeli ekonometrycznych. W pierwszej kolejności zanalizowano, jak różne materiały łuków ortodontycznych wpływają na ubytki masy oraz chropowatość powierzchni w różnych etapach leczenia. Zastosowano tu następujące analizy statystyczne:

- charakterystyki opisowe analizowanych zmiennych,
- sprawdzenie normalności rozkładów,
- sprawdzenie homogeniczności wariancji,
- dwuczynnikowa analiza wariancji ANOVA,
- testy post hoc Games-Howella.

Następnie przeprowadzono porównanie dwóch typów zamków ortodontycznych – ogólnodostępnych (SL) oraz indywidualnie projektowanych (SLI). W tej części badania także zastosowano powyższe analizy statystyczne, aby dokładnie określić różnice w efektywności obu typów zamków. W końcowej fazie przeanalizowano wpływ czynników demograficznych oraz klinicznych na wyniki leczenia. Do tego celu wykorzystano analizę regresji wielorakiej, która pozwala na jednoczesne uwzględnienie wielu zmiennych niezależnych i określenie ich wpływu na zmienną zależną.

Analizy te umożliwiły zrozumienie wpływu badanych zmiennych na wyniki leczenia, co pozwoliło na weryfikację hipotez badawczych oraz dostosowanie strategii terapeutycznych do indywidualnych potrzeb pacjentów.

4.3. Metody badawcze

W ramach prowadzonych badań, do oceny ukształtowania TWW i EWW zamków i łuków ortodontycznych nowych oraz stosowanych w leczeniu, wykorzystano różnorodne metody analizy powierzchni, a także metody oceny ubytków materiałowych.

Do oceny ukształtowania powierzchni zamków oraz łuków ortodontycznych nowych oraz stosowanych w leczeniu, wykorzystano mikroskop konfokalny LEXT OLS 4000 firmy Olympus ze względu na możliwość analizy powierzchni próbek. Ta technika pomiarowa pozwala na wizualizację powierzchni z dużą rozdzielczością oraz pomiar parametrów chropowatości w układach 2D i 3D. Zastosowanie mikroskopu konfokalnego umożliwiło przeprowadzenie analizy topografii powierzchni zamków i łuków ortodontycznych oraz pozwoliło na monitorowanie wszelkich zmian strukturalnych w trakcie i po leczeniu.

Do oceny ilościowego aspektu procesu zużywania i ubytków materiałowych wykorzystano analityczną wagę laboratoryjną AS82/220.R2 firmy Radwag o dokładności odczytu 0,01 /0,1mg. Umożliwiło to zebranie danych dotyczących ubytków masowych, poprzez pomiary masy próbek.

W ramach prowadzonych badań zastosowano szeroki zakres metod statystycznych, aby przeanalizować i zinterpretować dane dotyczące ubytków masy oraz chropowatości powierzchni zamków i łuków ortodontycznych. Analizy statystyczne przeprowadzono za pomocą oprogramowania Gretl, Statistica, SPSS oraz skryptów napisanych w języku programowania Python.

Poniżej przedstawiono schemat badań statystycznych:

1. na początku przeprowadzono analizę eksploracyjną danych, która obejmowała analizę rozkładu zmiennej zależnej (ubytki masy, parametry chropowatości) w celu oceny normalności rozkładu danych (za pomocą testu Shapiro-Wilka oraz skategoryzowanych wykresów normalności Q-Q), a także analizę zmiennych niezależnych oraz sprawdzenie homogeniczności wariancji (za pomocą testu Levene'a), aby sprawdzić, czy dane spełniają założenia wymagane do dalszych analiz statystycznych (ANOVA);
2. aby ocenić, czy istnieją istotne statystycznie różnice w ubytkach masy i wybranych parametrach chropowatości powierzchni między różnymi grupami, zastosowano dwuczynnikową analizę wariancji (ANOVA), którą podzielono na 3 etapy uzależnione od fazy leczenia;
3. w przypadku wykrycia istotnych różnic, przeprowadzono testy post-hoc Gamesa-Howella, aby zidentyfikować pary grup, między którymi występują te różnice;
4. w celu zrozumienia, jak zmienne niezależne wpływają na zmienną zależną, zastosowano modele regresji liniowej (modele ekonometryczne). Modele te uwzględniały zarówno efekty stałe, jak i losowe, w zależności od struktury danych i celów badania. Przeprowadzono diagnostykę modelu, aby upewnić się, że spełnione są założenia regresji liniowej, takie jak homoskedastyczność i brak współliniowości.

Na podstawie przeprowadzonych testów statystycznych dokonano oceny wpływu stosowanych w leczeniu ortodontycznym materiałów łuków ortodontycznych oraz dwóch typów zamków na parametry chropowatości oraz ubytki masy. Analizę uzupełniono o czynniki demograficzne i kliniczne, które oceniano za pomocą modelu ekonometrycznego, w którym zmienną zależną był czas leczenia utożsamiany z osiągnięciem zamierzonego efektu terapeutycznego.

W szczególności zwrócono uwagę na wpływ różnych materiałów łuków ortodontycznych, porównanie efektywności zamków samoligatujących ogólnodostępnych (SL) i indywidualnie projektowanych (SLI) oraz znaczenie czynników demograficznych i klinicznych. Aby zweryfikować wpływ różnych materiałów łuków na ubytki masy

i chropowatość w różnych fazach leczenia, dane podzielono na grupy w zależności od materiału (CuNiTi, SS, TMA) oraz fazy leczenia (I, II, III). Przeprowadzono statystyki opisowe, obliczając średnie, mediany i odchylenia standardowe dla ubytków masy oraz parametrów chropowatości w każdej grupie materiałów na każdym etapie leczenia. Dwuczynnikowa analiza wariancji (ANOVA) została zastosowana do oceny istotnych różnic między materiałem łuku a jego lokalizacją dla poszczególnych faz leczenia, przy czym do porównań wielokrotnych użyto testu post-hoc Gamesa-Howella. Porównanie efektywności zamków przeprowadzono poprzez podzielenie danych na grupy według typu zamka: ogólnodostępnego (SL) oraz indywidualnie projektowanego (SLI), a także lokalizacji łuku zębowego (U - górny/ L - dolny). Również w tym przypadku zastosowano dwuczynnikową analizę wariancji ANOVA w celu oceny różnic między grupami, a do porównań wielokrotnych ponownie użyto testu post-hoc Gamesa-Howella. Wpływ cech demograficznych i klinicznych na czas leczenia weryfikowano za pomocą modeli regresji liniowej. Wyniki tych analiz pozwoliły na sformułowanie wniosków dotyczących wpływu płci, klasy wad zgryzu oraz lokalizacji łuku na skuteczność leczenia ortodontycznego. Na podstawie tych wyników przedstawiono również rekomendacje dotyczące dalszych badań oraz możliwych kierunków optymalizacji procesów technologicznych determinujących cechy użytkowe technologicznej warstwy wierzchniej elementów aparatów ortodontycznych.

5. WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

Wyniki zrealizowanych badań doświadczalnych umożliwiły ocenę eksploatacyjnej warstwy wierzchniej (EWW) elementów trących, takich jak sloty zamków i łuki ortodontyczne. Analiza procesu zużywania została przeprowadzona w sposób ilościowy, uwzględniając zmiany geometryczne powierzchni badanych materiałów oraz zmiany ich masy.

Charakterystyka transformacji warstwy wierzchniej została przeprowadzona z wykorzystaniem trójwymiarowych (3D) parametrów chropowatości, takich jak S_q , S_{sk} i S_{ku} , które umożliwiają szczegółowy opis ukształtowania badanych powierzchni. Pomiarów dokonano zarówno na powierzchniach nowych łuków i zamków, jak i po zakończeniu leczenia ortodontycznego. Zmiany tych parametrów, oznaczone jako ΔS_q , ΔS_{sk} oraz ΔS_{ku} , odzwierciedlają różnicę pomiędzy pomiarami dokonanymi na powierzchniach nowych i zużytych. Taki sposób analizy pozwala na ocenę zmian topografii powierzchni w wyniku użytkowania, co ma kluczowe znaczenie dla oceny efektywności i stabilności leczenia ortodontycznego.

Wyniki badań wskazują, że parametr S_q pozwala na ogólną ocenę chropowatości powierzchni. Autorka podkreśla, że występowanie znacznych nierówności powierzchni prowadzi do zwiększenia tarcia między zamkiem a łukiem ortodontycznym, co przekłada się na większe siły potrzebne do przesunięcia łuku i może wydłużyć czas leczenia. Parametry S_{sk} (skośność) i S_{ku} (kurtoza) dostarczają dodatkowych informacji o charakterze topografii powierzchni na styku. Jak zauważono, dodatnie wartości skośności S_{sk} sugerują dominację wzniesień na powierzchni, które mogą powodować punktowe zużywanie oraz prowadzić do mikropęknięć i deformacji. Natomiast duża wartość kurtozy S_{ku} wskazuje na obecność ostrych wierzchołków, które przyspieszają ścieranie materiału i mogą działać jak „mikronarzędzia”, zwiększając zużycie zarówno zamków, jak i łuków.

Badania ujawniły także, że zużywanie materiałów, zwłaszcza warstwy wierzchniej slotu zamka i powierzchni łuku, prowadzi do powstawania mikroskopijnych wiórów. Jak zauważono, te wióry metaliczne mogą powodować uwalnianie i akumulację jonów metali, takich jak nikiel czy chrom, w jamie ustnej pacjenta. Może to prowadzić do reakcji alergicznych, stanów zapalnych oraz innych niepożądanych skutków zdrowotnych. Ponadto, gromadzenie wiórów w slocie zamka zwiększa opór podczas przesuwania łuku, co wymaga stosowania większej siły, wydłużając czas leczenia.

Autorka zauważa, że miarą zmian w warstwie wierzchniej była również zmiana masy próbek (Δm) w odniesieniu do ich masy początkowej. Taki parametr pozwala na ocenę ogólnych strat materiałowych, co ma istotne znaczenie w analizie zużywania badanych elementów.

Badania przeprowadzono w trzech etapach:

- I. Ocena właściwości nowych materiałów – analiza chropowatości i masy elementów przed leczeniem.
- II. Charakterystyka materiałów po eksploatacji – badanie zmian w warstwie wierzchniej po zakończonym leczeniu ortodontycznym.
- III. Ocena skuteczności leczenia – uwzględnienie czasu potrzebnego do osiągnięcia zamierzonych efektów terapeutycznych oraz wpływu właściwości zamków i łuków na proces leczenia.

Badania wykazały istotne różnice w zużywaniu materiałów w zależności od ich rodzaju. Łuki wykonane z różnych materiałów, takich jak CuNiTi, SS i TMA, wykazywały odmienny wpływ na efektywność leczenia. Z kolei porównanie samoligaturujących zamków standardowych (SL) i zamków o indywidualnie projektowanych parametrach (SLI) pozwoliło na ocenę ich wpływu na przebieg leczenia. Wyniki wskazują, że lokalizacja łuków

oraz właściwości materiałowe zamków i łuków znacząco wpływają na efektywność całego procesu leczenia.

Autorka podkreśla, że uzyskane wyniki pozwalają na ocenę wpływu stanu warstwy wierzchniej zamków i łuków ortodontycznych na skuteczność leczenia ortodontycznego. Badania te mogą przyczynić się do optymalizacji technologicznej warstwy wierzchniej slotów zamków, poprawiając efektywność interakcji tribologicznych oraz zwiększając skuteczność i precyzję leczenia ortodontycznego.

5.1. Wpływ rodzaju materiałów na ubytki masy i chropowatości powierzchni

W ramach badań przeanalizowano wybrane parametry charakteryzujące chropowatość powierzchni oraz ubytki masy materiałów łuków ortodontycznych stosowanych w trzech fazach leczenia. Badane materiały obejmowały stopy CuNiTi (stop niklowo-tytanowy z dodatkiem miedzi), SS (stal nierdzewna) oraz TMA (stop tytanowo-molibdenowy) dla łuków, a dla zamków samoligaturujących – SL (stal nierdzewna) oraz SLI (indywidualnie projektowane). W każdej fazie leczenia zebrano dane dotyczące ubytków masy oraz zmian parametrów chropowatości w celu oceny ich statystycznej charakterystyki.

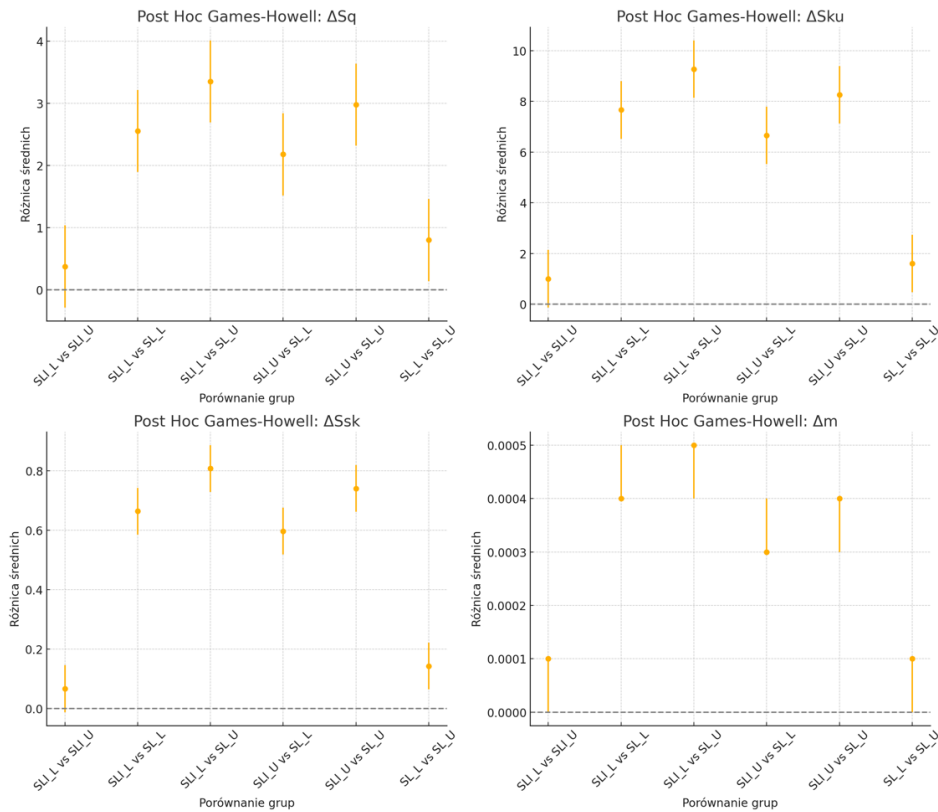
W fazie I, w której zastosowano łuki CuNiTi o przekroju okrągłym, odnotowano istotne różnice w wartościach chropowatości powierzchni w zależności od typu zamków i lokalizacji łuku. Dla zamków SLI na łuku górnym średnia wartość parametru ΔS_q wynosiła 2,767, a na dolnym 2,392, co wskazuje na mniejszą chropowatość i niższe siły tarcia. Natomiast w przypadku zamków SL, wartość ΔS_q dla łuku górnego wyniosła 5,744, co świadczy o bardziej chropowatej powierzchni i większych siłach tarcia. Parametr ΔS_{sk} wykazał dodatnie wartości, co sugeruje przewagę wzniesień na powierzchni, generujących większe tarcie i punktowe zużycie. Z kolei wartości parametru ΔS_{ku} dla zamków SLI wskazują na umiarkowaną koncentrację wierzchołków topografii, co sprzyja mniejszemu zużyciu materiału.

W fazie II, gdy zastosowano łuki CuNiTi o przekroju prostokątnym, chropowatość powierzchni ulegała dalszemu zwiększeniu. Dla zamków SLI na łuku górnym wartość ΔS_q wyniosła 3,483, natomiast dla zamków SL – aż 7,936, co wskazuje na większe siły tarcia i większe zużycie materiałów współpracujących z zamkami SL. Wzrost chropowatości wynikał ze złożonych ruchów zębów i intensywniejszych oddziaływań mechanicznych. Ubytki masy łuków były największe w tej fazie, szczególnie w przypadku materiałów CuNiTi współpracujących z zamkami SL. Parametr ΔS_{sk} wskazywał na asymetryczność powierzchni, co może prowadzić do nierównomiernego przenoszenia sił, podczas gdy parametr ΔS_{ku} potwierdzał większą koncentrację wierzchołków topografii, co przyczyniało się do intensywnego zużycia materiałów.

W fazie III, gdzie zastosowano łuki TMA i SS o przekroju prostokątnym, różnice w parametrach chropowatości i ubytkach masy były ściśle związane z zastosowanym materiałem łuku i typem zamków. Dla zamków SLI współpracujących z łukami TMA, wartość ΔS_q na łuku górnym wyniosła 2,880, co wskazuje na korzystne właściwości redukujące tarcie. W przypadku zamków SL współpracujących z łukami SS, wartość ΔS_q wyniosła 4,068, co sugeruje umiarkowaną chropowatość powierzchni. Parametr ΔS_{ku} dla zamków SLI wykazał bardziej umiarkowane zaostrenie wierzchołków topografii, co jest korzystne dla ograniczenia intensywnego zużycia w końcowych etapach leczenia. Parametr ΔS_{sk} potwierdził różnice w asymetryczności powierzchni w zależności od materiału łuku, co wpływa na sposób przenoszenia sił i zużycie materiału.

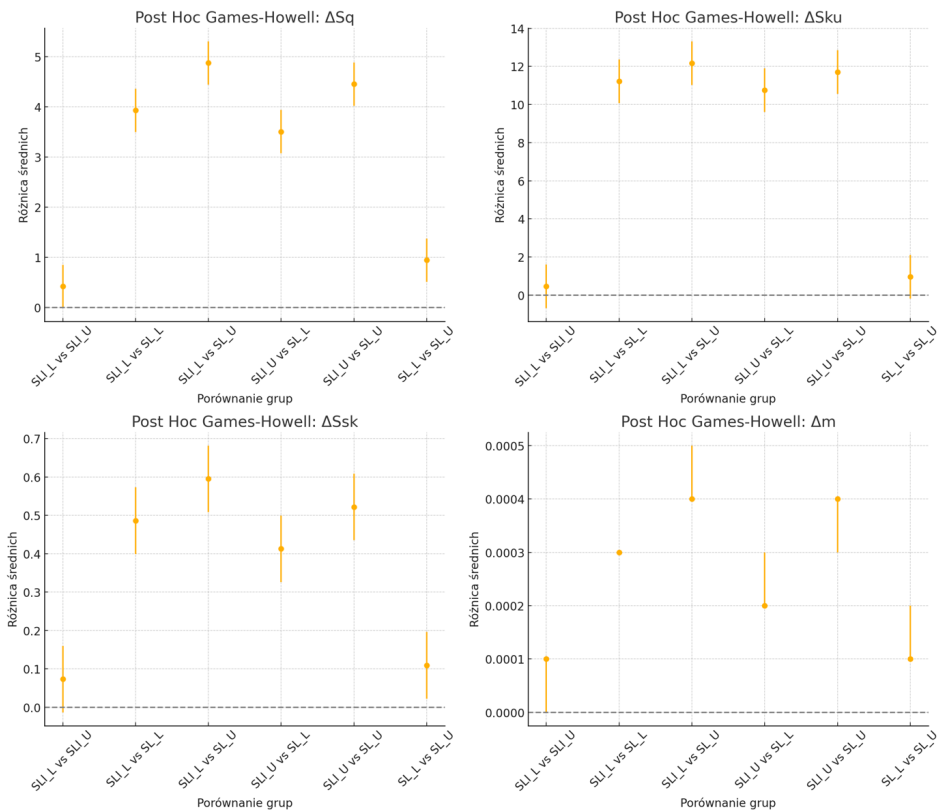
Ubytki masy Δm były największe w początkowych fazach leczenia (I i II), co wynikało z intensywniejszego użytkowania łuków w trudniejszych warunkach biomechanicznych. Materiał CuNiTi wykazywał większe wartości Δm w porównaniu do TMA i SS, szczególnie w pierwszych dwóch fazach leczenia. Zamki SL powodowały większe zużycie materiału niż zamki SLI, co potwierdza ich większy wpływ na intensywność zużycia współpracujących

elementów. Wyniki testów statystycznych, takich jak test Shapiro-Wilka i test Levene'a, wykazały odchylenia od normalności rozkładów oraz brak jednorodności wariancji dla niektórych parametrów. Zastosowanie testów post hoc Games-Howella pozwoliło na dokładne porównania między grupami. Na rysunku 2 przedstawiono cztery wykresy ilustrujące wyniki testu post hoc Games-Howella, przeprowadzonego w celu analizy wpływu materiału łuków ortodontycznych (CuNiTi o przekroju okrągłym) na parametry chropowatości powierzchni (ΔS_q , ΔS_{ku} , ΔS_{sk}) oraz ubytki masy (Δm) podczas I fazy leczenia.



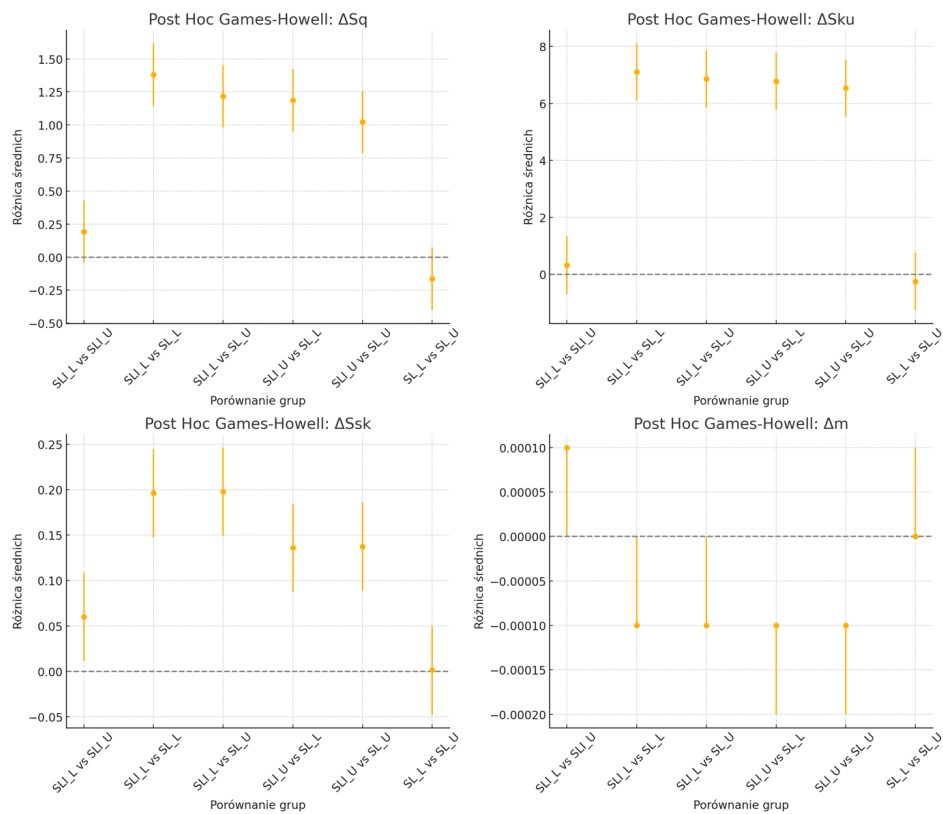
Rys. 2. Wykresy błędów standardowych dla I fazy leczenia [opracowanie własne]

Rysunek 3 przedstawia wykresy błędów standardowych dla II fazy leczenia stanowiące wyniki testu post hoc Games-Howella.



Rys. 3. Wykresy błędów standardowych dla II fazy leczenia [opracowanie własne]

Na rysunku 4 przedstawiono wyniki testu post hoc Games-Howella w postaci wykresów błędów standardowych dla III fazy leczenia.



Rys. 4. Wykresy błędów standardowych dla III fazy leczenia [opracowanie własne]

Wyniki badań jednoznacznie wskazują, że typ zamka oraz materiał łuków ortodontycznych istotnie wpływają na chropowatość powierzchni i ubytki masy. Zamki SL generowały większe wartości chropowatości i ubytków masy, co mogło prowadzić do większych sił tarcia i wydłużenia czasu leczenia. Z kolei zamki SLI, zwłaszcza w połączeniu z łukami TMA, charakteryzowały się lepszymi właściwościami tribologicznymi, co mogło przyczynić się do skrócenia czasu leczenia i poprawy jego efektywności. Uzyskane wyniki stanowią istotną podstawę do dalszych badań nad optymalizacją materiałów i strategii stosowanych w leczeniu ortodontycznym.

5.2. Porównanie zmian tribologicznych powierzchni zamków ortodontycznych SL i SLI

Zgodnie z przyjętą metodologią w kolejnym etapie przeprowadzono analizę zmiennych charakteryzujących dwa typy zamków ortodontycznych (SL i SLI) oraz lokalizację łuku zębowego (U – łuk górny, L – łuk dolny). Badania objęły parametry chropowatości powierzchni (ΔS_q , ΔS_{sk} , ΔS_{ku}) oraz ubytki masy (Δm), stanowiące podstawę dalszych analiz statystycznych. Charakterystyka tych zmiennych umożliwia lepsze zrozumienie różnic między zamkami SL i SLI, a także wpływu lokalizacji łuku na te różnice, co może przyczynić się do optymalizacji procesu leczenia ortodontycznego.

Wartości ΔS_q dla zamków SLI są stosunkowo niskie, zarówno dla łuku górnego (4,615), jak i dolnego (4,163), co wskazuje na gładką powierzchnię tych zamków. W przypadku zamków SL wartości ΔS_q są znacznie wyższe (9,104 dla łuku górnego i 8,212 dla dolnego), co sugeruje bardziej chropowatą powierzchnię i większe tarcie. Zamki SLI charakteryzują się również niższymi wartościami ΔS_{sk} (1,089 dla łuku górnego i 1,639 dla dolnego), podczas gdy zamki SL wykazują większe wartości tego parametru (2,634 dla łuku górnego i 2,387 dla dolnego). Wskazuje to, że powierzchnie zamków SL są bardziej złożone i mają bardziej zastrzone wzniesienia, co może prowadzić do większego zużycia materiału oraz większych wartości tarcia. Wartości ΔS_{ku} dla zamków SLI są stosunkowo niskie (11,912 dla łuku górnego i 11,516 dla dolnego), co świadczy o bardziej jednorodnej powierzchni. Natomiast zamki SL wykazują znacznie większe wartości ΔS_{ku} (26,344 dla łuku górnego i 25,468 dla dolnego), co wskazuje na obecność wyraźnych wzniesień i wgłębień, które mogą intensyfikować zużycie materiału i zwiększać akumulację biofilmu.

Zamki SL wykazują również większe ubytki masy (Δm) w porównaniu do zamków SLI, co można przypisać większej chropowatości powierzchni zamków SL. Różnice między ubytkami masy w łuku górnym i dolnym są niewielkie, jednak większe zużycie występuje w łuku górnym, co może wynikać z większego obciążenia i działania sił mechanicznych w tej lokalizacji.

Dla zmiennych ΔS_q , ΔS_{sk} , ΔS_{ku} oraz Δm przeprowadzono test Shapiro-Wilka. Test ten wykazał istotne odchylenia od rozkładu normalnego w kilku grupach. Na przykład, w grupach SLI_L oraz SL_L zmienna ΔS_{ku} wykazała odchylenie od normalności ($p = 0,027$, $\alpha = 0,05$), a zmienna Δm w grupie SLI_L również odbiegała od normalności ($p = 0,036$, $\alpha = 0,05$). Najbardziej znaczące odchylenia wystąpiły w grupach SLI_U oraz SL_U, gdzie zmienne ΔS_{sk} ($p = 0,00027$, $\alpha = 0,05$) oraz ΔS_{ku} ($p = 0,026$, $\alpha = 0,05$) wykazały odstępstwa od normalności.

Test Levene'a wykazał istotne różnice w wariancjach dla zmiennych ΔS_q , ΔS_{ku} oraz Δm , co sugeruje brak jednorodności wariancji między grupami. Wyjątek stanowiła zmienna ΔS_{sk} , która wykazała jednorodność wariancji na poziomie istotności 5%. Przeprowadzono również transformację logarytmiczną danych, jednak nie przyniosła ona poprawy w zakresie zgodności z rozkładem normalnym ani homogeniczności wariancji.

Dwuczynnikowa analiza wariancji wykazała istotny wpływ zarówno typu zamka, jak i lokalizacji łuku na większość badanych parametrów. W przypadku ΔS_q , typ zamka (SL/SLI) był istotny ($F = 1195,34$, $p < 0,001$), podobnie jak lokalizacja łuku ($F = 29,59$,

$p < 0,001$). Jednak interakcja między tymi czynnikami nie była statystycznie istotna ($p = 0,077$). Podobne wyniki uzyskano dla zmiennych ΔS_{ku} i ΔS_{sk} , gdzie typ zamka miał największy wpływ na wyniki. W przypadku ubytków masy (Δm) zarówno typ zamka ($F = 1070,46$, $p < 0,001$) jak i lokalizacja łuku ($F = 51,97$, $p < 0,001$) były istotne, co wskazuje, że oba te czynniki wpływają na zużycie materiału.

Testy post hoc Games-Howella wykazały istotne różnice między wieloma grupami, jednak szerokie przedziały ufności dla zmiennych, takich jak ΔS_q czy ΔS_{ku} , wskazują na dużą zmienność wyników i wymagają ostrożnej interpretacji. W przypadku zmiennej ΔS_{ku} , brak istotnych różnic odnotowano między grupami SL_L i SL_U, co sugeruje zbliżone wartości w tych lokalizacjach.

Wyniki analizy wskazały, że typ zamka (SL/SLI) ma kluczowe znaczenie dla parametrów chropowatości powierzchni oraz ubytków masy, co wpływa na efektywność i trwałość stosowanych materiałów. Lokalizacja łuku również ma znaczenie, ale jej wpływ jest mniej dominujący. Brak istotnych interakcji między typem zamka a lokalizacją łuku sugeruje, że oba te czynniki działają niezależnie od siebie. Wyniki te mogą przyczynić się do optymalizacji doboru zamków i łuków ortodontycznych, co może wpłynąć na poprawę skuteczności leczenia.

5.3. Wpływ czynników demograficznych i klinicznych na wyniki leczenia

Model regresji liniowej został wybrany jako narzędzie analizy danych dotyczących czynników demograficznych i klinicznych (wpływu płci, wieku, klas wad zgryzu oraz typu zamka) na efekty leczenia w czasie. Wybór ten jest uzasadniony w kontekście prowadzonych badań, gdzie kompleksowe modelowanie zależności między zmiennymi jest kluczowe dla precyzyjnej oceny wpływu elementów aparatów ortodontycznych na wyniki leczenia. Analiza uwzględniła wiele zmiennych jednocześnie, takich jak materiał zamka, typ łuku, wiek pacjenta czy klasa wady zgryzu, ponieważ wszystkie te czynniki mogą wpływać na skuteczność leczenia. Dodatkowo, uwzględniono parametry chropowatości powierzchni oraz ubytki masy zamków, które mogą bezpośrednio oddziaływać na efektywność leczenia ortodontycznego.

Model wielorakiej regresji liniowej pozwolił na identyfikację zmiennych o największym wpływie na zmienną zależną, czyli czas leczenia, przy jednoczesnym kontrolowaniu wpływu innych czynników. W ten sposób możliwe było lepsze zrozumienie mechanizmów wpływających na elementy aparatów ortodontycznych, co ma bezpośrednie znaczenie dla optymalizacji procesu leczenia. Celem analizy było określenie, które zmienne mają istotny wpływ na zmienną zależną oraz jaką część jej zmienności można wyjaśnić za pomocą tych zmiennych.

W modelu regresji liniowej zmienną zależną (objaśnianą) był czas leczenia, natomiast zmiennymi niezależnymi (objaśniającymi) były: wiek (zmienna ilościowa), płeć (zmienna zero-jedynkowa: 0 = kobieta, 1 = mężczyzna), typ zamka (zmienna zero-jedynkowa: 0 = SL, 1 = SLI) oraz klasa wad zgryzu (zmienna zero-jedynkowa: 0 = klasa I, 1 = klasa II). Parametry modelu oszacowano z wykorzystaniem klasycznej metody najmniejszych kwadratów (KMNK), która minimalizuje sumę kwadratów reszt, zapewniając najlepsze dopasowanie modelu liniowego do danych. Analiza objęła 80 obserwacji.

Wyniki analizy regresji liniowej wykazały, że zmienna klasa wad zgryzu nie miała statystycznie istotnego wpływu na czas leczenia ($p = 0,7491$). Sugeruje to, że zmienna ta nie wnosi istotnej wartości do modelu, dlatego została usunięta w dalszych analizach. Współczynnik determinacji R^2 wynoszący 0,6435 wskazuje, że model wyjaśnia około 64,35% zmienności w czasie leczenia, co oznacza dobre dopasowanie modelu do danych. Skorygowany R^2 wyniósł 0,6245, co jest typowe przy dodawaniu kolejnych zmiennych. Statystyka F wynosząca 33,85175 oraz jej bardzo niski poziom istotności ($p < 0,0001$) potwierdzają ogólną istotność modelu.

Po usunięciu zmiennej „klasa wad zgryzu” model został ponownie oszacowany, uwzględniając jedynie zmienne: wiek, płeć oraz typ zamka. Wyniki dla tego uproszczonego modelu wskazały, że wszystkie zmienne niezależne miały statystycznie istotny wpływ na czas leczenia. Wiek ($b_1 = 0,6764$, $p < 0,0001$) okazał się istotnym czynnikiem wpływającym na czas leczenia, z dodatnim współczynnikiem regresji, co sugeruje, że starszy wiek pacjenta wiąże się z wydłużeniem czasu leczenia. Płeć ($b_2 = 1,1662$, $p = 0,0459$) również miała istotny wpływ, przy czym dłuższy czas leczenia był związany z płcią męską. Typ zamka ($b_3 = -2,3324$, $p = 0,0001$) miał silny, ujemny wpływ na czas leczenia, co oznacza, że zamki typu SLI skracają czas leczenia w porównaniu do zamków SL. Współczynnik determinacji R^2 dla uproszczonego modelu wyniósł 0,6431, co oznacza, że wyjaśnia on około 64,31% zmienności w czasie leczenia. Skorygowany R^2 wyniósł 0,6290, co wskazuje na nieznaczną poprawę dopasowania modelu po usunięciu zmiennej „klasa wad zgryzu”. Statystyka F wynosząca 45,63995 oraz jej bardzo niski poziom istotności ($p < 0,0001$) potwierdzają ogólną istotność modelu.

W celu oceny poprawności założeń modelu regresji przeprowadzono test RESET Ramsey'a, który potwierdził liniowość przyjętej postaci modelu. Wartości empiryczne i teoretyczne zostały przedstawione na wykresach (rys. 31), które wskazują na dobre dopasowanie modelu, choć występują pewne odstępstwa. Testy normalności reszt wykazały odchylenia od rozkładu normalnego, co jest potencjalnym ograniczeniem modelu. Dodatkowo, w modelu uwzględniono zmienne związane z parametrami chropowatości powierzchni (ΔS_q , ΔS_{sk} , ΔS_{ku}) oraz ubytki masy (Δm). Dopasowanie modelu poprawiło się, co odzwierciedla współczynnik determinacji R^2 wynoszący 66,94%, co oznacza, że model wyjaśnia 66,94% zmienności w czasie leczenia. Wyniki wskazują, że mniejsze wartości ΔS_{ku} oraz Δm wiążą się z krótszym czasem leczenia, co sugeruje, że lepszy stan zamków ortodontycznych wpływa pozytywnie na efektywność leczenia.

Podsumowując, model regresji liniowej potwierdził, że wiek, płeć, typ zamka oraz parametry chropowatości powierzchni i ubytki masy mają istotny wpływ na czas leczenia ortodontycznego. Wyniki te mogą być pomocne w optymalizacji leczenia oraz doborze odpowiednich materiałów i narzędzi w terapii ortodontycznej.

6. DYSKUSJA WYNIKÓW

W pierwszym etapie prowadzonych badań skupiono się na analizie różnych materiałów łuków ortodontycznych, takich jak CuNiTi, SS i TMA, współpracujących z dwoma typami zamków samoligaturujących: o parametrach ogólnodostępnych (SL) oraz z indywidualnie dopasowanymi parametrami (SLI). Celem badania była ocena parametrów chropowatości powierzchni oraz ubytków masy, co pozwala na zrozumienie potencjalnych konsekwencji klinicznych tych cech. Wyniki badań pokazały, że chropowatość powierzchni, mierzona za pomocą parametru Sq, wzrastała w miarę postępu leczenia. Jest to szczególnie widoczne w przypadku zamków SL, które charakteryzują się ogólnodostępnymi parametrami, nieoptymalizowanymi pod kątem indywidualnych potrzeb pacjenta. Większa chropowatość powierzchni może prowadzić do zwiększonego tarcia między łukiem a zamkiem, co może wydłużać czas leczenia. Z kolei zamki SLI, dzięki indywidualnie dopasowanym parametrom (preskrypcji), wykazywały mniejsze wartości Sq, co przekładało się na mniejsze siły tarcia i bardziej precyzyjne przesuwanie zębów. Mniejsza chropowatość może również ograniczać akumulację biofilmu na powierzchniach łuków i zamków, co również zmniejsza wartości tarcia i jest korzystne dla zdrowia jamy ustnej, zmniejszając ryzyko próchnicy oraz stanów zapalnych dziąseł. Kurtoza powierzchni (Sku) była większa w przypadku zamków SL, co wskazuje na bardziej skoncentrowane wierzchołki na powierzchni łuków. Takie powierzchnie są bardziej narażone na intensywniejsze zużywanie punktowe, co może skrócić żywotność łuków ortodontycznych i wymagać ich częstszej wymiany. Co więcej, większa wartość kurtozy może sprzyjać wchłanianiu jonów metali, co jest szczególnie istotne w kontekście stosowania łuków zawierających szczególnie w składzie nikiel. Uwalnianie tych jonów może prowadzić do reakcji alergicznych lub innych niepożądanych efektów, co podkreśla znaczenie monitorowania stanu powierzchni łuków podczas leczenia. Wartości skośności, czyli parametru Ssk, były dodatnie, co oznacza, że powierzchnie łuków charakteryzowały się przewagą wzniesień. Ten efekt był bardziej wyraźny w przypadku współpracujących zamków SL, które mogą powodować większe tarcie i bardziej złożone interakcje między łukiem a zamkiem. To z kolei może wpłynąć na efektywność leczenia. Zamki SLI, dzięki swojej indywidualnie dostosowanym parametrom (preskrypcji), mogą minimalizować te niekorzystne efekty, co może przekładać się na bardziej efektywne i mniej inwazyjne przesuwanie zębów. Zmniejszenie asymetrii powierzchni może również ograniczyć adhezję bakterii, co jest istotne dla powstawania oporów ruchu w wyniku zwiększonego tarcia i utrzymania zdrowia jamy ustnej podczas długotrwałego leczenia. Analiza ubytków masy, wykazała, że największe zużywanie materiału łuków obserwowano w początkowych fazach leczenia, szczególnie w przypadku łuków CuNiTi współpracujących z zamkami SL. Większe ubytki masy mogą prowadzić do szybszego pogorszenia właściwości łuków, co wymaga ich częstszej wymiany, a tym samym może wydłużać czas leczenia. Zamki SLI, dzięki lepszemu dopasowaniu do anatomicznych warunków pacjenta, wykazywały mniejsze ubytki masy, co sugeruje mniejsze zużywanie materiału łuków i bardziej efektywne wykorzystanie sił ortodontycznych. Mniejsze zużywanie łuków zmniejsza również ryzyko uwalniania jonów metali, co jest szczególnie ważne dla pacjentów podatnych na alergię, czy akumulacji jonów w organizmie.

W drugim etapie realizowanych badań porównano dwa typy zamków ortodontycznych, samoligaturujące z ogólnodostępnymi parametrami (preskrypcją) SL oraz samoligaturujące z indywidualnie dopasowanymi parametrami (preskrypcją) SLI. W analizach uwzględniono różnice parametrów chropowatości powierzchni, ubytki masy oraz ich potencjalny wpływ na proces leczenia ortodontycznego. Wyniki wskazują na istotne różnice pomiędzy tymi typami zamków, które mogą przekładać się na efektywność leczenia. Badania wykazały, że zamki SLI, które są indywidualnie dopasowane do pacjenta, charakteryzują się mniejszymi wartościami Sq, co sugeruje, że ich powierzchnia jest gładsza w porównaniu do zamków SL

o ogólnodostępnych parametrach. Taka właściwość ma kluczowe znaczenie dla redukcji tarcia między zamkiem a łukiem ortodontycznym, co może przekładać się na bardziej efektywne przesuwanie zębów. Mniejsze wartości Ssk dla zamków SLI wskazują na mniej złożoną i bardziej jednorodną strukturę powierzchni, co dodatkowo zmniejsza tarcie oraz ryzyko mikrouszkodzeń, które mogłyby prowadzić do zwiększonego zużycia materiału zamka i łuku, co może przyczyniać się do zwiększonego wchłaniania jonów metali z zamków, co w dłuższym czasie może mieć niekorzystny wpływ na zdrowie pacjenta, zwłaszcza jeśli występuje reakcja alergiczna na metale. Duże wartości Sku dla zamków SL sugerują, że ich powierzchnia jest bardziej nierówna i zawiera wyraźne wzniesienia. Taka struktura może sprzyjać akumulacji biofilmu – warstwy bakterii, która może gromadzić się na powierzchni zamków. Akumulacja biofilmu jest niekorzystna, ponieważ może prowadzić do demineralizacji szkliwa, powstawania próchnicy oraz stanów zapalnych dziąseł. Analiza wykazała również, że zamki SLI wykazują mniejsze wartości ubytków masy, co oznacza, że ich zużywanie materiału jest mniejsze w porównaniu do zamków SL. Mniejsze ubytki masy mogą być wynikiem lepszego dopasowania zamka do indywidualnych sił działających w jamie ustnej pacjenta. Dzięki temu, zamki SLI są bardziej trwałe i mogą oferować większą stabilność w trakcie leczenia, co jest kluczowe dla utrzymania zamierzonego efektu ortodontycznego przez cały okres noszenia aparatu. W przypadku zamków SL, większe wartości ubytków masy mogą sugerować szybsze zużywanie, co nie tylko może wymagać częstszych wizyt kontrolnych i wymiany zamków, ale również może prowadzić do większych ubytków materiałowych, które z kolei mogą przyczyniać się do zwiększenia tarcia i opóźnienia postępów leczenia. Dodatkowo, większe zużywanie materiału zamka może wpływać na jego zdolność do utrzymywania łuku ortodontycznego w odpowiedniej pozycji, co jest kluczowe dla prawidłowego przesuwania zębów. Przeprowadzone analizy sugerują, że zamki SLI, dzięki swojej indywidualnej preskrypcji, mogą oferować lepsze właściwości tribologiczne w porównaniu do zamków SL. Lepsze charakterystyki chropowatości powierzchni i mniejsze zużywanie materiału zamków SLI mogą prowadzić do bardziej efektywnego leczenia, z mniejszym ryzykiem powikłań związanych z akumulacją biofilmu, demineralizacją szkliwa czy reakcjami alergicznymi. Mniejsza chropowatość powierzchni zamków SLI może również zmniejszyć ryzyko wchłaniania jonów metali, co jest szczególnie ważne dla pacjentów z wrażliwością na metale. Zamki SL mogą wymagać większej uwagi ze strony ortodonta, szczególnie w kontekście monitorowania zużycia materiału i zapobiegania akumulacji biofilmu. Potencjalne powikłania związane z większą chropowatością i szybszym zużywaniem tych zamków mogą wpływać na wydłużenie czasu leczenia oraz konieczność dodatkowych interwencji.

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że wybór odpowiedniego typu zamka ortodontycznego ma kluczowe znaczenie dla efektywności leczenia. Zamki SLI, dzięki indywidualnie dopasowanym parametrom, wykazują korzystniejsze właściwości, takie jak mniejsza chropowatość powierzchni i mniejsze zużycie materiału, co może przekładać się na bardziej efektywne przesuwanie zębów, mniejsze ryzyko powikłań oraz ogólnie lepsze wyniki leczenia ortodontycznego. Zamki SL mogą wiązać się z większym ryzykiem związanym z akumulacją biofilmu i szybszym zużywaniem, co wymaga starannego monitorowania w trakcie leczenia.

Przeprowadzona analiza regresji liniowej miała na celu ocenę wpływu czynników demograficznych, klinicznych oraz tribologicznych na czas leczenia ortodontycznego. W ramach badania rozważano różne zmienne niezależne, takie jak wiek, płeć, typ zamka oraz klasa wad zgryzu, a także dodatkowe parametry związane z chropowatością powierzchni oraz ubytkami masy, zamków z górnego łuku zębowego, stosowanych w leczeniu. W pierwszym modelu regresji liniowej uwzględniono cztery zmienne: wiek, płeć, typ zamka oraz klasę wad zgryzu. Wyniki wykazały, że klasa wad zgryzu nie miała statystycznie istotnego

wpływu na czas leczenia ($p = 0,7491$), co doprowadziło do jej eliminacji w dalszych analizach. Pozostałe zmienne, takie jak wiek, płeć i typ zamka, okazały się istotne. Wiek pacjenta miał znaczący, dodatni wpływ na czas leczenia – starsi pacjenci wymagali dłuższego leczenia ($\beta = 0,68$). Płeć męska wiązała się z dłuższym czasem leczenia niż żeńska, natomiast zastosowanie zamków SLI skutkowało skróceniem czasu leczenia w porównaniu z zamkami SL. W drugim modelu, po usunięciu zmiennej klasy wad zgryzu, uwzględniono jedynie trzy istotne zmienne: wiek, płeć i typ zamka. Model ten potwierdził istotność wszystkich zmiennych, a współczynnik determinacji R^2 wynosił 0,6431, co wskazuje, że wyjaśniał on około 64% zmienności w czasie leczenia. Skorygowany współczynnik R^2 na poziomie 0,6290 sugerował, że model jest efektywny w przewidywaniu czasu leczenia, a wszystkie zmienne miały istotny wpływ na wynik. Ponownie wiek pacjenta wydłużał czas leczenia, mężczyźni wymagali dłuższego leczenia, a użycie zamków SLI skracało jego czas. W trzecim modelu wprowadzono dodatkowe zmienne związane z właściwościami tribologicznymi zamków ortodontycznych, takie jak parametry chropowatości (ΔS_{ku}) oraz ubytki masy zamków (Δm). Wyniki analizy wykazały poprawę dopasowania modelu, a współczynnik determinacji R^2 wzrósł do 66,94%. To oznacza, że nowy model wyjaśniał większą część zmienności w czasie leczenia w porównaniu z wcześniejszymi wersjami. Mimo to, zmienne ΔS_{ku} oraz Δm osiągnęły istotność statystyczną na poziomie alfa 0,1, co sugeruje, że ich wpływ na czas leczenia nie jest jednoznaczny i wymaga dalszej weryfikacji. Wiek, płeć oraz typ zamka nadal miały istotny wpływ na czas leczenia, z wynikami zgodnymi z poprzednimi modelami. Wnioski z przeprowadzonych analiz wskazują, że najistotniejszymi czynnikami wpływającymi na czas leczenia ortodontycznego są wiek pacjenta, płeć oraz typ zamka ortodontycznego. Starsi pacjenci wymagają dłuższego leczenia, a mężczyźni wykazują tendencję do dłuższego przebiegu leczenia w porównaniu z kobietami. Zastosowanie zamków SLI znacząco skraca czas leczenia w porównaniu z zamkami SL. Włączenie zmiennych tribologicznych, takich jak parametry chropowatości powierzchni i ubytki masy zamków, przyczyniło się do lepszego dopasowania modelu, ale wymaga dalszych badań w celu dokładniejszego określenia ich wpływu na wyniki leczenia.

W praktyce klinicznej, wybór zamków o lepszych parametrach tribologicznych może zmniejszyć tarcie i zużycie, co skraca czas leczenia. Badania wykazały, że zmienne takie jak chropowatość powierzchni i ubytki masy zamków mają potencjalny wpływ na leczenie, dlatego dalsze analizy tribologiczne mogą przyczynić się do optymalizacji tych elementów aparatów ortodontycznych. W przyszłości, zamki ortodontyczne mogą być projektowane tak, aby minimalizować zużycie materiałów i maksymalizować efektywność przesuwania zębów, co pozytywnie wpłynie na efekty leczenia.

7. WNIOSKI

Przeprowadzone badania miały na celu ocenę wpływu właściwości warstwy wierzchniej zamków ortodontycznych oraz współpracujących z nimi łuków na skuteczność leczenia ortodontycznego. Analiza skoncentrowała się na kluczowych parametrach, takich jak S_q , S_{sk} , S_{ku} oraz ubytki masy zamków, które odgrywają istotną rolę w procesach tribologicznych zachodzących w trakcie leczenia. Wyniki badań umożliwiły lepsze zrozumienie interakcji między zamkami a łukami, ich wpływu na czas i efektywność leczenia ortodontycznego, a także na identyfikację potencjalnych ryzyk zdrowotnych związanych z zastosowaniem określonych materiałów.

Wnioski z przeprowadzonych analiz podkreślają znaczenie doboru odpowiednich materiałów i technologii w leczeniu ortodontycznym. Wyniki wskazują, że właściwości powierzchni zamków, takie jak chropowatość i kurtoza, mają istotny wpływ na proces leczenia, w tym na poziom tarcia i stopień zużycia materiału. Użycie zamków o lepszych parametrach tribologicznych, takich jak zamki SLI, może skrócić czas leczenia oraz zwiększyć jego efektywność. Przeprowadzone badania stanowią również punkt wyjścia do dalszych prac, które mogą przyczynić się do optymalizacji leczenia ortodontycznego. Wskazane zostały potencjalne kierunki przyszłych badań, takie jak rozwój nowych materiałów o lepszych właściwościach tribologicznych, dokładniejsza analiza wpływu poszczególnych parametrów powierzchni zamków na wyniki leczenia oraz ocena długoterminowego wpływu materiałów na zdrowie pacjentów. Wnioski z tych badań mają zarówno charakter teoretyczny, poprzez lepsze zrozumienie badanych zjawisk, jak i praktyczny, oferując cenne wskazówki dla ortodontów. Przedstawione rekomendacje mogą wspierać rozwój bardziej efektywnych rozwiązań w leczeniu ortodontycznym, które poprawią zarówno skuteczność terapii, jak i komfort pacjentów.

7.1. Wnioski teoretyczne (poznawcze)

Wnioski teoretyczne mają na celu przedstawienie kluczowych ustaleń wynikających z przeprowadzonych badań nad właściwościami powierzchni zamków ortodontycznych i łuków. Otrzymane wyniki dostarczają istotnych informacji na temat roli warstwy wierzchniej tych elementów, co ma znaczenie nie tylko dla teorii, ale również dla praktyki ortodontycznej.

1. Badania potwierdziły, że parametry chropowatości powierzchni zamków ortodontycznych mają istotny wpływ na przebieg leczenia. Większa chropowatość prowadzi do zwiększonego tarcia między łukiem a zamkiem, co może wydłużać czas leczenia ortodontycznego. Z kolei mniejsza wartość chropowatości, charakterystyczna dla zamków indywidualnie dopasowanych (SLI), sprzyja efektywniejszemu przesuwaniu zębów i zmniejszeniu ryzyka powikłań.
2. Zużywanie materiału zamków, szczególnie w początkowych fazach leczenia, jest kluczowe dla długoterminowej stabilności i skuteczności systemu ortodontycznego. Większe zużywanie materiału może prowadzić do konieczności częstszej wymiany zamków, co wpływa na wydłużenie całkowitego czasu leczenia. Zamki SLI wykazały mniejsze zużywanie, co sugeruje ich większą trwałość i stabilność.
3. Kurtoza i skośność powierzchni zamków wpływają nie tylko na proces leczenia, ale także na zdrowie pacjenta. Większa kurtoza i asymetria powierzchni mogą sprzyjać akumulacji biofilmu oraz wchłanianiu jonów metali, co zwiększa ryzyko próchnicy, stanów zapalnych dziąseł oraz wystąpienia reakcji alergicznych.
4. Badania wykazały, że zamki ortodontyczne z indywidualnie dopasowanymi parametrami (SLI) są bardziej efektywne w leczeniu niż zamki o ogólnodostępnych

parametrach (SL). Indywidualne dopasowanie zamków przekłada się na mniejsze tarcie, zużywanie materiału oraz zmniejszenie ryzyka powikłań zdrowotnych.

5. Badania wykazały, że materiały łuków ortodontycznych oraz typ zamka mają istotny wpływ na zmiany parametrów chropowatości powierzchni, co może wpływać na wartości tarcia oraz zużywanie materiałów w trakcie leczenia. Łuki CuNiTi i TMA współpracujące z zamkami SLI wykazują korzystniejsze właściwości tribologiczne, zachodzą mniej intensywnie procesy zużywania, co sugeruje bardziej efektywne leczenie ortodontyczne. Dobór materiałów łuków oraz typu zamków jest zatem kluczowy dla skuteczności leczenia i trwałości elementów ortodontycznych.
6. Lokalizacja łuku ortodontycznego również wpływa na analizowane parametry, szczególnie w przypadku ubytków masy i zmiany chropowatości powierzchni. Łuki szczękowe, zarówno w przypadku CuNiTi, TMA, jak i SS, wykazują większe zmiany wartości wielkości charakteryzujących zużywanie, co może wynikać z różnic w biomechanice sił oddziałujących na łuki w różnych lokalizacjach, a także z oddziałujących sił żucia i bardziej intensywnego kontaktu z językiem, co może przyczyniać się do szybszego zużywania materiału.
7. Istotne różnice ubytków masy w różnych fazach leczenia oraz w zależności od materiału łuków ortodontycznych wskazują na różny stopień zużywania materiałów. Łuki CuNiTi wykazują większe ubytki masy w porównaniu do łuków TMA i SS, co może sugerować ich mniejszą odporność na zużywanie w warunkach współpracy, szczególnie w początkowych fazach leczenia.

7.2. Wnioski praktyczne (użyteczne)

Przedstawione wnioski praktyczne koncentrują się na zastosowaniu wyników badań w codziennej praktyce ortodontycznej. Analiza wyników dostarcza zalecenia i wskazówki, które mogą być wykorzystane do optymalizacji leczenia ortodontycznego. Wnioski te mają na celu poprawę skuteczności terapii, skrócenie czasu leczenia oraz minimalizację ryzyka powikłań, co jest istotne zarówno dla pacjentów, jak i praktykujących ortodontów.

1. W praktyce ortodontycznej zaleca się stosowanie zamków SLI, które dzięki indywidualnie dostosowanym parametrom mogą skrócić czas leczenia i zwiększyć jego efektywność. Zamki SL mogą wymagać częstszego monitorowania i interwencji w celu minimalizacji ryzyka powikłań.
2. Ortodondi powinni regularnie kontrolować zużywanie materiału łuków ortodontycznych, szczególnie w przypadku stosowania zamków SL, aby uniknąć negatywnego wpływu na efektywność leczenia i zdrowie pacjenta. Regularna wymiana łuków może być konieczna, aby utrzymać optymalną jakość leczenia.
3. Pacjenci korzystający z zamków SL powinni być szczególnie uważni na higienę jamy ustnej, aby minimalizować ryzyko akumulacji biofilmu, co może prowadzić do zwiększonego tarcia i powikłań zdrowotnych.
4. Podczas użytkowania zamków i łuków ortodontycznych, ich warstwa wierzchnia podlega transformacji pod wpływem wymuszeń zewnętrznych, co prowadzi do zmian w topografii powierzchni. Proces ten można kontrolować poprzez odpowiednie projektowanie i dobór metod wytwarzania, odpowiednio modyfikując technologiczną warstwę wierzchnią łuków i zamków, co wpłynie na poprawę warunków współpracy, poprzez ograniczenie zużywania i zmniejszenie ryzyka komplikacji klinicznych, wynikających z gromadzenia biofilmu czy uwalniania jonów metali.
5. Cechy struktury powierzchni łuków ortodontycznych są ściśle związane z zastosowanym materiałem i technologią produkcji. Zauważalne większe zmiany chropowatości łuków CuNiTi w porównaniu do SS czy TMA podczas użytkowania sugerują, że te czynniki mogą wpływać na skuteczność leczenia ortodontycznego. Łuki

CuNiTi, ze względu na swoje właściwości, są stosowane głównie w początkowych fazach leczenia, natomiast łuki SS i TMA w fazach końcowych. W tym kontekście odpowiedni dobór materiału, technologii produkcji oraz dostosowanie ukształtowania powierzchni pod względem jej parametrów chropowatości, są kluczowe dla efektywności przesuwania zębów, czasu leczenia oraz częstotliwości wymiany łuków, co wpływa na ostateczne wyniki leczenia

7.3. Wnioski rozwojowe (kierunki dalszych badań)

Wnioski rozwojowe skupiają się na wskazaniu potencjalnych kierunków dalszych badań oraz rozwoju technologii w ortodoncji. Na podstawie przeprowadzonych analiz zidentyfikowano obszary, które mogą być udoskonalone, aby zwiększyć efektywność i bezpieczeństwo leczenia. Wnioski te podkreślają potrzebę dalszych badań nad nowymi materiałami, które mogą przynieść korzyści zarówno pacjentom, jak i specjalistom, prowadząc do innowacji i postępu w dziedzinie ortodoncji.

1. Konieczne są dalsze badania nad opracowaniem materiałów o lepszych właściwościach tribologicznych. Opracowanie nowych standardów w produkcji i projektowaniu powierzchni elementów aparatów ortodontycznych, które minimalizują zużycie oraz uwalnianie jonów metali, w szczególności dla pacjentów z alergiami, mogłoby przyczynić się do zwiększenia trwałości aparatów i poprawy ich biokompatybilności.
2. Należy przeprowadzić długoterminowe badania oceniające wpływ stosowania zamków SLI na zdrowie pacjentów. Wyniki mogą wpłynąć na tworzenie nowych standardów produkcji zamków ortodontycznych oraz doboru ich parametrów. Analiza akumulacji biofilmu, wchłaniania jonów metali i reakcji alergicznych dostarczy producentom informacji pozwalających na optymalizację procesu wytwórczego, co przyczyni się do poprawy bezpieczeństwa i jakości produktów.
3. Istnieje potrzeba dalszych badań nad spersonalizowanymi systemami ortodontycznymi, które mogłyby automatycznie dostosowywać parametry zamków do indywidualnych potrzeb pacjenta, co mogłoby zwiększyć efektywność leczenia i zminimalizować ryzyko powikłań. Rozwój takich systemów mógłby umożliwić wprowadzenie innowacyjnych rozwiązań produkcyjnych, które pozwolą na standaryzację procesów związanych z masową personalizacją, poprawiając tym samym efektywność leczenia i zmniejszając ryzyko powikłań.
4. Rozwój technologii pozwalających na bieżące monitorowanie chropowatości powierzchni zamków w trakcie leczenia może dostarczyć istotnych informacji dla ortodontów, umożliwiając szybszą reakcję na zmieniające się warunki w jamie ustnej pacjenta.

8. LITERATURA

Spis piśmiennictwa w rozprawie doktorskiej obejmuje 186 pozycji. W niniejszym autoreferacie zacytowano 114 pozycji literaturowych.

- [1] Abraham K.S., Jagdish N., Kailasam V., Padmanabhan S., 2017. Streptococcus mutans adhesion on nickel titanium (NiTi) and copper-NiTi archwires: a comparative prospective clinical study. *Angle Orthod* 87, 448-454.
- [2] Agarwal C.O., Vakil K.K., Mahamuni A., Tekale P.D., Gayake P.V., Vakil J.K., 2016. Evaluation of surface roughness of the bracket slot floor—A 3D perspective study. *Prog Orthod* 17, 3.
- [3] Ahmad M.N., Mahmud A.S., Razali M.F., Ng C.W., Razak T.A.A., 2023. Force-Deflection behavior of NiTi archwire towards frictions' effect in orthodontic levelling treatment. *AIP Conf. Proc.* 2959, 050002.
- [4] Alavi S., Tajmirriahi F., 2016. Assessment of dimensional accuracy of preadjusted metal injection molding orthodontic brackets. *Dent Res J (Isfahan)*, 13(5), 440-445.
- [5] Alfonso M.V., Espinar E., Llamas J.M., Rupérez E., Manero J.M., Barrera J.M., Solano E., Gil F.J., 2013. Friction coefficients and wear rates of different orthodontic archwires in artificial saliva. *J Mater Sci Mater Med* 24(5), 1327-1332.
- [6] Alsabti N., Bourauel C., Talic N., 2021. Comparison of force loss during sliding of low friction and conventional TMA orthodontic archwires. *J Orofac Orthop.* 82(4), 218-225.
- [7] Alsubaie M., Talic N.F., 2017. Comparison of the static frictional resistance and surface topography of ceramic orthodontic brackets: an in vitro study. *Aust. Orthod. J.* 33(1), 24-34.
- [8] Amini F., Jafari A., Amini P., Sepasi S., 2011. Metal ion release from fixed orthodontic appliances—an in vivo study. *Eur J Orthod* 34(1), 126-130.
- [9] Arango S., Peláez-Vargas A., García C., 2013. Coating and Surface Treatments on Orthodontic Metallic Materials. *Coatings* 3(1), 1-15.
- [10] Bennett J.C., 2010. *Fundamentals of orthodontic bracket selection*. London: LeGrande Publishing.
- [11] Bennett J.C., McLaughlin R.P., 1992. *Orthodontic Treatment Mechanics and the Preadjusted Appliance*. Wolf Publishing USA.
- [12] Bhushan B., 2013. *Introduction to Tribology*. John Wiley & Sons, Ltd. Print New York.
- [13] Blunt L., Jiang X. (Eds.), 2003. *Advanced Techniques for Assessment Surface Topography: Development of a Basis for 3D Surface Texture Standards "SURFSTAND"*. Kogan Page Science, London.
- [14] Brantley W.A., Eliades T., 2003. *Orthodontic Materials in Scientific and Clinical Terms*. Czelej Lublin.
- [15] Braun S., Bluestein M., Moore B.K., Benson G., 1999. Friction in perspective. *Am J Orthod Dentofac Orthop* 115, 619-627.
- [16] Burrow S.J., 2009. Friction and resistance to sliding in orthodontics: A critical review. *Am. J. Orthod. Dentofac. Orthop.* 135(4), 442-447.
- [17] Cacciafesta V., Sfondrini M., Scribante A., Klersy C., Auricchio F., 2003. Evaluation of friction of conventional and metal-insert ceramic brackets in various bracket-archwire combinations. *Am J Orthod Dentofac Orthop* 124, 403-409.
- [18] Chang H.P., Tseng Y.C., 2018. A novel β -titanium alloy orthodontic wire. *Kaohsiung J Med Sci* 34(4), 202-206.
- [19] Chang C.J., Lee T.M., Liu J.K., 2013. Effect of bracket bevel design and oral environmental factors on frictional resistance. *Angle Orthod* 83, 956-965.

- [20] Cash A.C., Good S.A., Curtis R.V., McDonald F., 2004. An evaluation of slot size in orthodontic brackets – are standards as expected? *Angle Orthod*, 74(4), 450-453.
- [21] Chaturvedi T.P., Upadhyay S.N., 2010. An overview of orthodontic material degradation in oral cavity. *Indian Journal of Dental Research*, 21(2), 275-284.
- [22] D’Andrea D., Milone D., Nicita F., Risitano G., Santonocito D., 2021. Qualitative and Quantitative Evaluation of Different Types of Orthodontic Brackets and Archwires by Optical Microscopy and X-ray Fluorescence Spectroscopy. *Prosthesis* 3(4), 342-360.
- [23] D’Antò V., Rongo R., Ametrano G., Spagnuolo G., Manzo P., Martina R., Paduano S., Valletta R., 2012. Evaluation of surface roughness of orthodontic wires by means of atomic force microscopy. *Angle Orthod* 82, 922-928.
- [24] Davim J.P. (Ed.), 2011. *Tribology for Engineers: A practical guide*. Woodhead Publishing Limited, 80 High Street, Sawston.
- [25] Del Vigna de Almeida P., Grégio A.M.T., Machado M.A.N., Soares de Lima A.A., Reis Azevedo L., 2008. Saliva composition and functions: a comprehensive review. *J Contemp Dent Pract* 9(3), 72-80.
- [26] Dittmer M.P., Fuchslocher Hellemann C., Grade S., Heuer W., Stiesch M., Schwestka-Polly R., Demling A.P., 2015. Comparative three-dimensional analysis of initial biofilm formation on three orthodontic bracket materials. *Head Face Med* 11(10), 1-6.
- [27] Doomen R.A., Nedeljkovic I., Kuitert R.B., Kleverlaan C.J., Aydin B., 2022. Corrosion of orthodontic brackets: qualitative and quantitative surface analysis. *Angle Orthod* 92(5), 661-668.
- [28] Dragomirescu A.O., Bencze M.A., Vasilache A., Teodorescu E., Albu C.C., Popoviciu N.O., Ionescu E., 2022. Reducing Friction in Orthodontic Brackets: A Matter of Material or Type of Ligation Selection? In-Vitro Comparative Study. *Materials (Basel)* 15(7), 1-12.
- [29] Eliades T., 2007. Orthodontic materials research and applications: Part 2. Current status and projected future developments in materials and biocompatibility. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 131(2), 253-262.
- [30] Eliades T., Athanasiou A., 2002. In vivo aging of orthodontic alloys: Implications for corrosion potential, nickel release, and biocompatibility. *Angle Orthod* 72, 222-237.
- [31] English J.D., Peltomaki T., Pham-Litschel K., 2009. *Mosby's Orthodontic Review*. Elsevier St. Louis.
- [32] Ehsani S., 2008. Frictional resistance in self-ligating orthodontic brackets and conventionally ligated brackets. *Am J Orthod Dentofac Orthop* 98(2), 117-126.
- [33] Fidalgo T.K., Pithon M.M., Maciel J.V., Bolognese A.M., 2011. Friction between different wire bracket combinations in artificial saliva — an in vitro evaluation. *J Appl Oral Sci* 19, 57-62.
- [34] González-Estrada E., Cosmes W., 2019. Shapiro–Wilk test for skew normal distributions based on data transformations. *J Stat Comput Simul* 89(17), 3258-3272.
- [35] Gravina M.A., Canavaro C., Elias C.N., Miranda Chaves M.G.A., Brunharo I.H.V.P., Quintão C.C.A., 2014. Mechanical properties of NiTi and CuNiTi wires used in orthodontic treatment. Part 2: Microscopic surface appraisal and metallurgical characteristics. *Dental Press J. Orthod.* 19(1), 56-63.
- [36] Grzesik W., 2015. Wpływ topografii powierzchni na właściwości eksploatacyjne części maszyn. *Mechanik* 8–9, 587-593.
- [37] Henao S.P., Kusy R.P., 2004. Evaluation of the frictional resistance of conventional and self-ligating bracket designs using standardized archwires and dental typodonts. *Angle Orthod* 74(2), 202-211.
- [38] Huang H.H., 2007. Variation in surface topography of different NiTi orthodontic archwires in various commercial fluoride-containing environments. *Dent Mater* 23, 24-33.

- [39] House K., Sernetz F., Dymock D., Sandy J.R., Ireland A.J., 2008. Corrosion of orthodontic appliances-should we care? *Am. J. Orthod. Dentofac. Orthop.* 133, 584–592.
- [40] Hutchings I., Shipway P., 2017. *Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials*, Second Edition. Elsevier.
- [41] Jäger A., Braumann B., Kim C., 2013. Systematic review on self-ligating vs. conventional brackets: initial pain, number of visits, treatment time. *Journal of Orofacial Orthopedics*, 74, 40-51.
- [42] Jiménez-Gamero M.D., Kim H.M., 2015. Fast goodness-of-fit tests based on the characteristic function. *Comput Stat Data Anal* 89, 172-191.
- [43] Jin Z., Li J., Chen Z., 2021. *Computational Modelling of Biomechanics and Biotribology in the Musculoskeletal System*. Biomaterials and Tissues. 2nd edition. Woodhead Publishing, Elsevier St. Louis.
- [44] Joo H., Cheong Y., Lee S., Kwon E., Paek J.H., Park Y.G., Park H.K., 2011. Nanostructural changes in surface of stainless steel archwires combined with orthodontic conventional and self-ligating brackets. *TechConnect Briefs*, 3, 478-481.
- [45] Karłowska I., 2016. *Zarys współczesnej ortodoncji. Podręcznik dla studentów i lekarzy dentyków*, wyd. 4. PZWL, Warszawa.
- [46] Kim H.Y., 2014. Statistical notes for clinical researchers: Two-way analysis of variance (ANOVA) - exploring possible interaction between factors. *Restor Dent Endod* 39(2), 143-147.
- [47] Kłós S., Janiszewska-Olszowska J., 2019. Precision of the dimensions of orthodontic bracket slots – systematic review. *Pomeranian J Life Sci*, 65(1), 62-71.
- [48] Kołaciński M., Kozakiewicz M., Materka A., 2015. Textural entropy as a potential feature for quantitative assessment of jawbone healing process. *Arch Med Sci* 11, 78-84.
- [49] Kotha R.S., Alla R.K., Shamma M., Rama Krishna R., 2014. An Overview of Orthodontic Wire. *Trends Biomater. Artif. Organs*, 28(1), 32-36.
- [50] Kozakiewicz M., Wach T., 2020. New Oral Surgery Materials for Bone Reconstruction- A Comparison of Five Bone Substitute Materials for Dentoalveolar Augmentation. *Materials* 13, 3967.
- [51] Kusy R.P., Whitley J.Q., 2003. Influence of fluid media on the frictional coefficients in orthodontic sliding. *Semin Orthod* 9, 281-289.
- [52] Kusy R.P., Whitley J.Q., 2007. Thermal and mechanical characteristics of stainless steel, titanium-molybdenum, and nickel-titanium archwires. *Am J Orthod Dentofac Orthop* 131(2), 229-237.
- [53] Kusy R.P., Whitley J.Q., Gurgel J.D.A. 2004. Comparisons of surface roughnesses and sliding resistances of 6 titanium-based or TMA-type archwires. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.*, 126, 589–603.
- [54] Leach R. (ed.), 2011. *Optical Measurement of Surface Topography*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- [55] Lee G.J., Park K.H., Park Y.G., Park H.K., 2010. A quantitative AFM analysis of nano-scale surface roughness in various orthodontic brackets. *Micron* 41, 775-782.
- [56] Liu X., Lin J., Ding P., 2013. Changes in the Surface Roughness and Friction Coefficient of Orthodontic Bracket Slots Before and After Treatment. *Scanning* 35, 265-272.
- [57] Mainsah E., Greenwood J.A., Chetwynd D.G. (Eds.), 2001. *Metrology and Properties of Engineering Surfaces*. Springer-Science+Business Media, B.V.
- [58] Mang T., Bobzin K., Bartels T., 2011. *Industrial Tribology: Tribosystems, Friction, Wear and Surface Engineering, Lubrication*. Wiley-VCH, Weinheim.
- [59] Marques I.S., Araújo A.M., Gurgel J.A., Normando D., 2010. Debris, roughness and friction of stainless steel archwires following clinical use. *Angle Orthod.* 80(3), 521-527.
- [60] *Engineering Mechanics 2020*, Brno, Czech Republic, November 24–25, 350-353.

- [61] Mathia T.G., Pawlus P., Wieczorowski M., 2011. Recent trends in surface metrology. *Wear* 271, 494-508.
- [62] Matuszewski M., Słomion M., Mazurkiewicz A., Pimenov D.Y., 2018. Mathematical models of changes in the surface layer of frictional pairs as a tool to optimize the wear process. *MATEC Web Conf* 182, 02008
- [63] Matuszewski M., Słomion M., Mazurkiewicz A., Pimenov D.Y., 2019. Assessment of friction pair elements condition based on changes in the geometric surface structure isotropicity degree. *MATEC Web Conf* 302, 1-8.
- [64] Matuszewski M., Słomion M., Mazurkiewicz A., Wojciechowski A., 2021. Mass wear application of cooperated elements for evaluation of friction pair components condition. *MATEC Web Conf* 351, 01006. 20th International Conference Diagnostics of Machines and Vehicles, 1-8.
- [65] Matuszewski M., Słomion M., Wojciechowski A., Mazurkiewicz A., 2020. Influence of geometric surface structure features on wearing process after electrical discharge machining.
- [66] Mendes B.A.B., Ferreira R.A.N., Pithon M.M., Horta M.C.R., Oliveira D.D., 2014. Physical and chemical properties of orthodontic brackets after 12 and 24 months: in situ study. *J Appl Oral Sci* 22(3), 194-203.
- [67] Menezes P.L., Ingole S.P., Nosonovsky M., Kailas S.V., Lovell M.R. (Eds.), 2013. *Tribology for Scientists and Engineers*. Springer, New York.
- [68] Michelberger D.J., Eadie R.L., Faulkner M.G., Glover K.E., Prasad N.G., Major P.W., 2000. The friction and wear patterns of orthodontic brackets and archwires in the dry state. *Am J Orthod Dentofac Orthop* 118(6), 662-674.
- [69] Mikołajczyk J., 2019. *Tribotestery. Budowa, przeznaczenie*. Wydawnictwo Państwowej Wyższej Szkoły Zawodowej im. Stanisława Staszica w Pile, Piła.
- [70] Mikulewicz M., Chojnacka K., Woźniak B., Downarowicz P., 2012. Release of Metal Ions from Orthodontic Appliances: An In Vitro Study. Volume 146, 272-280.
- [71] Mohammed S.A., Mahmood A.B., Al-Sheakli I.I., 2019. Measurement of Surface Roughness of Copper Nickel Titanium Arch Wires at Dry and Wet Conditions: An In vitro Study. *J Res Med Dent Sci* 7(6), 21-26.
- [72] Mundhada V.V., Jadhav V.V., Reche A., 2023. A Review on Orthodontic Brackets and Their Application in Clinical Orthodontics. *Cureus*, 15(10), 1-10.
- [73] Nalbantgil D., Ulkur F., Kardas G., Culha M., 2016. Evaluation of corrosion resistance and surface characteristics of orthodontic wires immersed in different mouthwashes. *Biomed Mater Eng* 27, 539-549.
- [74] Nanda R., 2015. *Esthetics and Biomechanics in Orthodontics*. 2nd Edition. Elsevier St. Louis.
- [75] Nordstokke D., Zumbo B.D., Cairns S.L., Saklofske D., 2011. The operating characteristics of the nonparametric Levene test for equal variances with assessment and evaluation data. *Pract Assess Res Eval* 16(5), 1-8.
- [76] Nosalik K., Kawala M., 2012. Contemporary NiTi archwires—mechanical properties. *Dent Med Probl* 49, 433-437.
- [77] Oczóś K.E., Lubimow W., 2003. *Struktura geometryczna powierzchni*. OW PRz, Rzeszów.
- [78] Oliveira D.C., Thomson J.J., Alhabeil J.A., Toma J.M., Plecha S.C., Pacheco R.R., Cuevas-Suárez C.E., Piva E., Lund R.G., 2021. In vitro *Streptococcus mutans* adhesion and biofilm formation on different esthetic orthodontic archwires. *Angle Orthod* 91, 786-793.
- [79] O'Reilly D., Dowling P.A., Lagerstrom L., Swartz M.L., 1999. An ex-vivo investigation into the effect of bracket displacement on the resistance to sliding. *Br J Orthod* 26, 219-227.
- [80] Paszczko M., Kindrachuk M., 2017. *Tribologia*. Politechnika Lubelska, Lublin.

- [81] Rahmani Del Bakhshayesh A., Asadi N., Alihemmati A., Tayefi Nasrabadi H., Montaseri A., Davaran S., Saghati S., Akbarzadeh A., Abedelahi A., 2019. An overview of advanced biocompatible and biomimetic materials for creation of replacement structures in the musculoskeletal systems: focusing on cartilage tissue engineering. *J Biol Eng* 13(85), 1-21.
- [82] Raji H., Shojaei H., Ghorani P., Rafiei E., 2014. Bacterial colonization on coated and uncoated orthodontic wires: A prospective clinical trial. *Dent Res J* 11, 680-683.
- [83] Raju A.S., Soumya K.M., Nandan H., Hegde N., 2012. Role of Saliva in Orthodontics: A Strategic Review. *A Journal of Dentistry* 3(2).
- [84] Redlich M., Mayer Y., Harari D., Lewinstein I., 2003. In vitro study of frictional forces during sliding mechanics of "reduced-friction" brackets. *Am. J. Orthod. Dentofac. Orthop.* 124(1), 69-73.
- [85] Regis S., Soares P., Camargo E.S., Guariza Filho O., Tanaka O., Maruo H., 2011. Biodegradation of orthodontic metallic brackets and associated implications for friction. *Am J Orthod Dentofac Orthop* 140(4), 501-509.
- [86] Ribeiro A., Mattos C., Ruellas A., Araújo M., Elias C., 2012. In vivo comparison of the friction forces in new and used brackets. *Orthodontics* 13, e44–e50.
- [87] Santos A.A.R., Pithon M.M., Carlo F.G.C., Carlo H.L., Lima B.A.S.G., Passos T.A., Lacerda-Santos R., 2015. Effect of time and pH on physical-chemical properties of orthodontic brackets and wires. *Angle Orthod* 85(2), 298-304.
- [88] Sarul M., Kozakiewicz M., Jurczyszyn K., 2021. Surface Evaluation of Orthodontic Wires Using Texture and Fractal Dimension Analysis. *Materials* 14(13), 3688.
- [89] Sarul M., Mikulewicz M., Kozakiewicz M., Jurczyszyn K., 2022. Surface Evaluation of Orthodontic Brackets Using Texture and Fractal Dimension Analysis. *Materials* 15(6), 2071.
- [90] Savoldi F., Papoutsi A., Dianiskova S., Dalessandri D., Bonetti S., Tsoi J.K.H., Matinlinna J.P., Paganelli C., 2018. Resistance to sliding in orthodontics: misconception or method error? A systematic review and a proposal of a test protocol. *Korean J Orthod* 48(4), 268-280.
- [91] Shingala M.C., Rajyaguru A., 2015. Comparison of Post Hoc Tests for Unequal Variance. *Int J New Technol Sci Eng* 2(5), 22-33.
- [92] Stoker P., Tian G., Kim J.Y., 2020. Analysis of Variance (ANOVA). In: *Basic Quantitative Research Methods for Urban Planners*. 1st ed. Routledge.
- [93] Stout K.J., Blunt L., 1994. *Three-Dimensional Surface Topography*, Second Edition. Kogan Page Ltd, London.
- [94] Suryavanshi S., Lingareddy U., Ahmed N., Neelakantappa K.K., Sidiqha N., Minz M., 2019. In Vitro Comparative Evaluation of Frictional Resistance of Connecticut New Arch Wires, Stainless Steel and Titanium Molybdenum Alloy Archwires Against Different Brackets. *Cureus* 11(11): e6131, 1-10.
- [95] Śmiech-Słomkowska G., 2010. *Zarys ortodoncji. Podręcznik dla techników dentystrycznych*. MTP Otwock.
- [96] Tageldin H., Cadenas de Llano-Pérula M., Thevissen P., Celis J.P., Willems G., 2016. Resistance to Sliding in Orthodontics: A Systematic Review. *Jacobs Journal of Dentistry and Research* 3(2), 1-32.
- [97] Tecco S., Festa F., Caputi S., Traini T., Di Iorio D., D'Attilio M., 2005. Friction of conventional and self-ligating brackets using a 10 bracket model. *Angle Orthod* 75, 1041-1045.
- [98] Tecco S., Tetè S., Festa F., 2009. Friction between Archwires of Different Sizes, Cross-Section and Alloy and Brackets Ligated with Low-Friction or Conventional Ligatures. *Angle Orthod* 79(1), 111-116.

- [99] Thomas A.A., Babu H., 2022. Surface Characteristics of New and Retrieved Copper NiTi Archwires of Two Passive Self Ligating Systems. *J Res Med Dent Sci* 10(5), 93-96.
- [100] Thorstenson G.A., Kusy R.P., 2001. Resistance to sliding of self-ligating brackets versus conventional stainless steel twin brackets with second-order angulation in the dry and wet (saliva) states. *Am J Orthod Dentofac Orthop* 120(4), 361-370.
- [101] Thorstenson G.A., Kusy R.P., 2002. Comparison of resistance to sliding between different self-ligating brackets with second-order angulation in the dry and saliva states. *Am J Orthod Dentofac Orthop* 121, 472-482.
- [102] Thorstenson G.A., Kusy R.P., 2002. Effect of archwire size and material on the resistance to sliding of self-ligating brackets with second-order angulation in the dry state. *Am J Orthod Dentofac Orthop* 122(3), 295-305.
- [103] Thorstenson G.A., Kusy R.P., 2003. Effects of ligation type and method on the resistance to sliding of novel orthodontic brackets with second-order angulation in the dry and wet states. *Angle Orthod* 73, 418-430.
- [104] Upadhyay D., Panchal M.A., Dubey R., Srivastava V., 2006. Corrosion of alloys used in dentistry: A review. *Mater Sci Eng* 432, 1-11.
- [105] Vartolomei A.C., Serbanoiu D.C., Ghiga D.V., Moldovan M., Cuc S., Pollmann M.C.F., Pacurar M., 2022. Comparative Evaluation of Two Bracket Systems' Kinetic Friction: Conventional and Self-Ligating. *Materials (Basel)* 15(12), 4304.
- [106] Verstryngne A., Van Humbeeck J., Willems G., 2006. In-vitro evaluation of the material characteristics of stainless steel and beta-titanium orthodontic wires. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*. 130, 460-470.
- [107] Wichelhaus A., Geserick M., Hibst R., Sander F.G., 2005. The effect of surface treatment and clinical use on friction in NiTi orthodontic wires. *Dent Mater* 21, 938-945.
- [108] Zaleski K., Matuszak J., Zaleski R., 2018. *Metrologia warstwy wierzchniej*. Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin.
- [109] Wichai W., Isarapatanapong R., Anuwongnukroh N., Dechkunakorn S., 2017. Grain Structure and Surface Roughness of Four Commercial NiTi Orthodontic Archwires. *Solid State Phenomena* 266, 257-263.
- [110] Wiczorowski M., 2013. Teoretyczne podstawy przestrzennej analizy nierówności powierzchni. *Inżynieria Maszyn* 18(3), 7-34.
- [111] Wu Z., Bao H., Xing Y., Liu L., 2021. Tribological characteristics and advanced processing methods of textured surfaces: a review. *Int J Adv Manuf Technol* 114, 1241-1277.
- [112] Yu J.H., Wu L.C., Hsu J.T., Chang Y.Y., Huang H.H., Huang H.L., 2011. Surface roughness and topography of four commonly used types of orthodontic archwire. *J Med Biol Eng* 31, 367-370.
- [113] Zhang R., Han B., Liu X., 2023. Functional Surface Coatings on Orthodontic Appliances: Reviews of Friction Reduction, Antibacterial Properties, and Corrosion Resistance. *Int J Mol Sci* 24(8), 1-58.
- [114] Ziębowicz B., Woźniak A., Ziębowicz A., Ziemińska-Buczyńska A., 2019. Analysis of the surface geometry of the orthodontic archwire and their influence on the bacterial adhesion. *J Achiev Mater Manuf Eng* 1-2, 32-40.