

Мочалов Юрій Олександрович,
доктор медичних наук, професор, професор кафедри хірургічної стоматології та клінічних дисциплін,
ДВНЗ «Ужгородський національний університет»
ORCID ID: 0000-0002-5654-1725
м. Ужгород, Україна

Куліш Андрій Сергійович,
аспірант кафедри хірургічної стоматології та клінічних дисциплін,
ДВНЗ «Ужгородський національний університет»
ORCID ID: 0009-0006-0045-1145
м. Ужгород, Україна

Корнієнко Лариса Василівна,
кандидат медичних наук, доцент, доцент кафедри терапевтичної та дитячої стоматології,
Національний університет охорони здоров'я імені П.Л. Шупика
ORCID ID: 0000-0003-3469-4998
м. Київ, Україна

Шупяцький Ілля Михайлович,
кандидат медичних наук, професор, завідувач кафедри хірургічної,
ортопедичної стоматології та ортодонції,
ПЗВО «Київський міжнародний університет»
ORCID ID: 0009-0009-9562-760X
м. Київ, Україна

ПОРІВНЯННЯ ТІКСОТРОПНОСТІ РІЗНИХ КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ФІКСАЦІЇ НЕЗНІМНОЇ ОРТОДОНТИЧНОЇ АПАРАТУРИ ПРИ НАКЛАДАННІ БРЕКЕТ-ЗАМКІВ В УМОВАХ ЕКСПЕРИМЕНТУ

Вступ. Застосування незнімної ортодонтичної апаратури для лікування різних аномалій прикусу є поширеним методом лікування. Застосування спеціальних композитних матеріалів для фіксації брекет-систем до поверхні зуба вторинно є регулярним явищем у практичній стоматології. Явище неконтрольованого розтікання ортодонтичних композитів під час фіксації брекет-замків слід розглядати як ключовий реологічний фактор, що визначає якість адгезії та точність позиціонування ортодонтичної апаратури.

Мета дослідження – порівняти в експериментальних умовах тіксотропні властивості ряду сучасних ортодонтичних фотокомпозитних матеріалів для фіксації за рівнем «drift effect» брекет-замків.

Методологія та методи дослідження. Металеві брекети (атачмени) тимчасово фіксували до пластинки з органічного скла з використанням неполімеризованих матеріалів «JenOrtho», «GC Ortho Connect», «Orthocem», «Biofix», «Enlight» та «BracePaste»; по шість зразків для кожного з матеріалів. Пластинки з брекетами у вертикальному положенні витримували протягом 30 хв у термостаті при температурі 37,0 °С, після чого тіксотропні властивості матеріалів оцінювали за рівнем вторинного зміщення брекетів («drift effect»). **Виклад основного матеріалу дослідження.** Аналіз обсягів вторинного зміщення брекет-замків («drift effect») показав, що переважна кількість матеріалів не допускала таких змін, і тільки у двох представників з обраного переліку композитів виявлялося таке зміщення. Матеріал «GC Ortho Connect» давав статистично значущо більший рівень вторинного зміщення брекет-замків, порівняно з усіма іншими композитними матеріалами ($p < 0,001$). Матеріал «Orthocem» теж продемонстрував статистично вірогідну різницю від груп матеріалів, які не мали зміщення ($p < 0,05$). Для брекетів, фіксованих на матеріал «Biofix», де спостерігали мінімальне зміщення, статистично значущих відмінностей не було виявлено.

Висновки. Найвищий рівень зміщення спостерігався для «GC Ortho Connect», тоді як «JenOrtho», «Enlight» та «BracePaste» продемонстрували повну позиційну стабільність. Тип матеріалу пояснює більшу частину варіабельності показників, що підкреслює його ключову роль у забезпеченні точності фіксації брекетів.

Ключові слова: стоматологія, ортодонтичне лікування, брекет-система, фотокомпозитні матеріали, «drift effect».

© Мочалов О. Ю., Куліш А. С., Корнієнко Л. В.,
Шупяцький І. М., 2026



Стаття поширюється на умовах ліцензії
відкритого доступу CC BY 4.0

Mochalov Iurii Oleksandrovykh, Doctor of Medical Sciences, Professor, Professor at the Department of Surgical Dentistry and Clinical Disciplines, Uzhhorod National University; ORCID ID: 0000-0002-5654-1725, Uzhhorod, Ukraine

Kulish Andrii Serhiyovych, Postgraduate Student at the Department of Surgical Dentistry and Clinical Disciplines, Uzhhorod National University; ORCID ID: 0009-0006-0045-1145, Uzhhorod, Ukraine

Kornienko Larysa Vasylivna, Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Therapeutical and Pediatric Dentistry, Shupyk National Healthcare University of Ukraine; ORCID ID: 0000-0003-3469-4998, Kyiv, Ukraine

Shupiatskyi Illia Mykhailovych, Candidate of Medical Sciences, Professor, Head of the Department of Surgical, Orthopedic Dentistry and Orthodontics, Kyiv International University; ORCID ID: 0009-0009-9562-760X, Kyiv, Ukraine

COMPARISON OF THE THIXOTROPIC PROPERTIES OF DIFFERENT COMPOSITE MATERIALS FOR BONDING FIXED ORTHODONTIC APPLIANCES DURING EXPERIMENTAL BRACKET PLACEMENT

Introduction. The use of fixed orthodontic appliances for the treatment of various malocclusions is a widely applied therapeutic approach in modern dental practice. The application of specialized composite materials for bonding bracket systems to the tooth surface is consequently a routine procedure in clinical dentistry. The phenomenon of uncontrolled flow of orthodontic composites during bracket placement should be considered a key rheological factor that determines the quality of adhesion and the accuracy of orthodontic appliance positioning.

The aim of the study was to compare, under experimental conditions, the thixotropic properties of several contemporary orthodontic light-cured composite materials based on the level of bracket “drift effect.”

Methodology and methods of the study. Metal brackets (attachments) were temporarily bonded to an organic glass plate using non-polymerized materials: «JenOrtho», «GC Ortho Connect», «Orthocem», «Biofix», «Enlight», and BracePaste, with six samples per each material. The plates with bonded brackets were positioned vertically and maintained at 37.0 °C for 30 minutes in a thermostat. The thixotropic properties of the materials were assessed based on the degree of secondary bracket displacement (“drift effect”).

Summary of the primary study material. The analysis of secondary bracket displacement (“drift effect”) showed that most materials did not exhibit measurable displacement, while only two did. «GC Ortho Connect» demonstrated a statistically significantly higher level of secondary displacement compared to all other composite materials ($p < 0.001$). «Orthocem» also showed a statistically significant difference compared to the groups without displacement ($p < 0.05$). For brackets bonded with Biofix, where only minimal displacement was observed, no statistically significant differences were identified.

Conclusions. The highest level of displacement was observed for «GC Ortho Connect», whereas «JenOrtho», «Enlight», and «BracePaste» demonstrated complete positional stability. The type of material accounts for the majority of variability in the observed outcomes, highlighting its key role in ensuring the accuracy of bracket fixation.

Key words: dentistry, orthodontic treatment, bracket system, composite materials, drift effect.

Вступ. В сучасній стоматологічній практиці застосування незнімної ортодонтичної апаратури для лікування різних аномалій прикусу та положення окремих зубів (як і вторинних зубощелепних деформацій) є поширеним та відносно доступним для пересічного пацієнта методом лікування [1,2]. Найпоширенішим варіантом незнімної ортодонтичної апаратури є брекет-системи різного виду конструкцій, які мають бути жорстко зафіксовані на поверхні зуба, та активовані шляхом накладання різних дуг, що дозволяє виконувати переміщення окремих зубів та їх груп, відповідно до плану лікування [3, 4]. Тому застосування спеціальних «ортодонтичних» композитних матеріалів для фіксації замків брекет-систем до поверхні зуба вторинно теж є поширеним та регулярним явищем у практичній стоматології [5-7]. Загалом, до таких композитних матеріалів у міжнародних стандартах висуваються аналогічні загальні вимоги (подібно до пломбувальних та реставраційних фотокомпозитних матеріалів), хоча умови їх застосування дещо відрізняються [8, 9].

Реологічні властивості «ортодонтичних» фотокомпозитних матеріалів. Явище неконтрольованого розтікання ортодонтичних композитів під час фіксації брекет-замків слід розглядати як ключовий реологічний фактор, що визначає якість адгезії та точність позиціонування ортодонтичної апаратури [10, 11]. Окремі джерела інформації свідчать, що тіксотропна поведінка неполімеризованих таких композитів,

зокрема їх здатність до різкого зниження в'язкості під дією зсувних напружень, зумовлює інтенсивний перерозподіл матеріалу саме в момент притискання брекета до поверхні емалі зуба. Загалом, це узгоджується з сучасними уявленнями про ньютонівську псевдопластичну поведінку текучих стоматологічних композитів, де різке порушення внутрішньої структури органічної матриці та фрагментів наповнювача призводить до тимчасової втрати структурної цілісності матеріалу [11, 12]. Макроскопічно це проявляється у вигляді периферичного витікання композиту за межі бази брекета з формуванням надлишків матеріалу та з одночасним витонченням шару композиту в центральній зоні брекет-замка. Подібний градієнт товщини адгезиву має принципове значення, оскільки саме центральна зона визначає ефективність передачі механічних сил від дуги до брекета та до емалі [8, 13]. Надмірне зменшення товщини шару фотокомпозитного матеріалу може призводити до підвищення концентрації напружень та формування слабких ділянок, схильних до швидкого руйнування, що підтверджується даними досліджень з мікромеханіки адгезивних з'єднань у стоматології.

Крім того, формування нерівномірного шару композита внаслідок неконтрольованого розтікання може обумовлювати нерівномірний розподіл ортодонтичних сил, що може негативно впливати на точність реалізації «запрограмованого» просторового поло-

ження брекет-замка. Відомо, що навіть незначні відхилення у товщині адгезиву можуть змінювати кутові параметри позиціонування, що особливо критично для сучасних систем із попередньо запрограмованими параметрами торку та ангуляції зубів. Окремої уваги дослідників заслуговує вплив розтікання неполімеризованого фотокомпозита на первинну стабільність брекета. У момент прикладення тиску на брекети фотокомпозит функціонує як низьков'язкий прошарок, що знижує коефіцієнт тертя між базою брекета та емаллю, створюючи умови для мікродислокації до моменту полімеризації. Цей феномен у літературі також має назву «drift-effect», і потенційно він має суттєве клінічне значення, оскільки навіть мінімальні зміщення брекета можуть впливати на кінцевий результат ортодонтичного лікування [14–16].

Разом з тим, слід зазначити, що певний ступінь текучості композиту є необхідним для його адекватної адаптації до мікрорельєфу протравленої ортофосфорною кислотою емалі та до мікроструктури (решітки) бази брекета. Таким чином, проблема неконтрольованого розтікання полягає не у самій наявності тіксотропії, а у її надмірній вираженості та відсутності клінічного контролю. Це загалом узгоджується з концепцією «оптимальної реології» композитних стоматологічних матеріалів, де баланс між текучістю та стабільністю є критичним для досягнення максимальної адгезивної ефективності. З позиції стоматологічного матеріалознавства, важливим напрямом є модифікація складу «ортодонтичних» фотокомпозитів шляхом введення до складу стабілізаторів реології та оптимізації співвідношення матриці та неорганічного наповнювача. Використання високов'язких або тіксотропно-стабілізованих систем дозволяє зменшити неконтрольоване розтікання без втрати здатності до адаптації, що підтверджується експериментальними дослідженнями сучасних ортодонтичних адгезивів [3, 4, 14–18].

Вторинне зміщення брекет-замків («drift effect»). Вторинне зміщення брекета до моменту остаточної полімеризації адгезивного шару (так званий «drift effect») доцільно розглядати як наслідок залежних від часу змін реологічних властивостей ортодонтичних фотокомпозитів у неполімеризованому стані [2, 12, 14, 19]. На відміну від початкового етапу позиціонування брекет-замка, де переважає миттєве зниження в'язкості матеріалу під дією зсувних напружень та стискання об'єму матеріалу, після зникнення навантаження спостерігається повільне відновлення внутрішньої структури матеріалу (структурна релаксація), що підтримує стан зниженої в'язкості протягом значного періоду часу. Саме в цей період брекет-замок може залишатися недостатньо стабілізованим і може малопомітно дрейфувати під впливом мінімальних зовнішніх або внутрішніх сил [12].

З позицій реологічних властивостей неньютонівської рідини (яку собою нагадує текучий фотокомпозит), це явище поєднує тіксотропію та в'язкоеластичність: після припинення навантаження матеріал не повертається миттєво до початкового структурованого стану, а демонструє часову затримку відновлення модуля зсуву. Подібна поведінка була

описана для ортодонтичних фіксаційних стоматологічних композитів із високим вмістом органічної матриці. У таких матеріалів внутрішні зв'язки між макромолекулами потребують часу для реорганізації. На клінічному рівні це означає, що навіть після корекції положення брекета та припинення тиску матеріал ще певний час функціонує як шар з низькою в'язкістю, що не забезпечує достатнього опору зсуву брекет-замка [12, 14]. Клінічно «drift effect» проявляється як повільне ковзання або ротаційне зміщення брекета-замка по поверхні емалі до моменту світлової полімеризації. Вказане зміщення може бути викликане наступними мінімальними механічними факторами:

- контакт інструментів або пальців оператора;
- напруження в шарі композита, які виникають під час його розтікання;
- гравітаційні сили (особливо у фронтальній ділянці зубного ряду);
- еластичні деформації ортодонтичної дуги при непрямій фіксації [2, 14, 19].

Важливо пам'ятати, що навіть субміліметрові зміщення брекет-замків можуть мати клінічно значущі наслідки. З огляду на сучасні концепції «pre-adjusted appliances», де положення брекета визначає вираження торку та ангуляції окремого зуба, навіть незначна дислокація замка здатна змінювати біомеханіку лікування та потребувати подальших компенсаційних вигинів дуги або ребондингу брекет-замка. Таким чином, «drift effect» брекет-замка можна розцінювати як приховане джерело систематичних похибок позиціонування.

З позицій біомеханіки, ключовим механізмом розвитку «drift effect» є низький коефіцієнт тертя в системі «брекет–композит–емаль», особливо у фазі до початку гелеутворення. У цей період рідкий фотокомпозит не має достатньої когезивної міцності, а контакт між базою брекета та емаллю відбувається через тонкий шар матеріалу зі знизеним модулем пружності. Це створює умови для мікрозсувів навіть при мінімальних тангенціальних навантаженнях. Аналогічні явища були описані при дослідженнях адгезивних систем, де початкові стадії полімеризації асоціюються з підвищеною чутливістю до механічних збурень. Додатковим фактором розвитку зміщення є нерівномірна товщина шару композиту, що формується внаслідок попереднього розтікання. Зони з більшою товщиною зберігають текучість довше, тоді як тонкі ділянки швидше переходять у більш жорсткий стан. Така неоднорідність створює внутрішні градієнти напружень в неполімеризованому фотокомпозиті, які можуть сприяти самовільному переміщенню брекета у напрямку зменшення енергії системи. Описане явище згоджується з концепціями в'язкоеластичної релаксації та перерозподілу напружень у полімерних матеріалах [20, 21].

З практичного погляду, «drift effect» особливо критичний при:

- роботі з низьков'язкими композитами;
- тривалому позиціонуванні брекет-замків без негайної полімеризації;
- фіксації у важкодоступних ділянках, де контроль стабільності є обмеженим;

• використанні непрямих технік бондингу, де можливі додаткові механічні впливи.

Водночас результати попередніх досліджень вказують, що швидка початкова полімеризація («task-curing») здатна суттєво зменшити ризик вторинного зміщення шляхом раннього формування жорсткої полімерної сітки, яка фіксує положення брекета. Крім того, матеріали з підвищеною структурною стабільністю (зокрема, з оптимізованим співвідношенням матриці та наповнювача) демонструють меншу схильність до «drift effect» завдяки вищому початковому модулю зсуву [20–23].

Таким чином, вторинне зміщення брекета є складним мультифакторним явищем, що виникає на перетині реології фіксаційного матеріалу та клінічної техніки. Клінічне значення «drift effect» полягає у формуванні прихованих похибок позиціонування, які можуть впливати на ефективність ортодонтичного лікування, і дані щодо потенційно можливого рівня «drift effect» у сучасних ортодонтичних фотокомпозитів для фіксації брекет-систем є неповними.

Мета дослідження – порівняти в експериментальних умовах тіксотропні властивості ряду сучасних ортодонтичних фотокомпозитних матеріалів для фіксації за рівнем «drift effect» брекет-замків.

Матеріали та методи. Для дослідження було обрано наступний перелік фотокомпозитних матеріалів, призначених для фіксації брекет-замків до поверхні зуба:

- 1) вітчизняний фотокомпозитний матеріал для фіксації ортодонтичної апаратури «JenOrtho» (ТОВ «Джендентал-Україна»)
- 2) фотокомпозитний ортодонтичний адгезив «GC Ortho Connect» («GC Corporation», Японія)
- 3) самоадгезивний фотополімерний матеріал «Orthocem» («FGM», Бразилія)
- 4) самоадгезивний фотополімерний цемент для фіксації брекетів «Biofix» («Biodinamica Química e Farmacêutica», Бразилія)
- 5) композит подвійного тверднення для фіксації брекетів «Enlight» («Ormco», США)
- 6) адгезив для брекетів «BracePaste» («American Orthodontics», США).

Модель для дослідження була сконструйована наступним чином – окремі металеві брекет-замки (атачмени) «Mini Diamond» («Ormco», США) для премолярів, які конструкційно були подібними у високій мірі, після нанесення на них досліджуваного фотокомпозитного матеріалу прикладали до поверхні прозорої пластинки з органічного скла на одному рівні, який фіксували за допомогою маркера. Для кожного матеріалу було використано по шість брекет-замків. Після накладання пластинку переводили в позицію 90° (строго вертикально) та фіксували в такому положенні в термостаті при температурі 37,0°C на 30 хв (рис. 1). Для уникнення ймовірної полімеризації фіксаційного матеріалу всі етапи експерименту виконували у мовах фільтрованого помаранчевого освітлення (з блокуванням спектра блакитного кольору). Після завершення експозиції пластинки з прифіксованими на композит брекетами діставали з термо-

стата та візуально оцінювали зміщення брекет-замка за допомогою калібрувальної лінійки «Microscope Micrometer Calibrating Ruler». Отримані дані переносили в електронні таблиці MicroSoft Excel, де проводили їх статистичну обробку. Для простого аналізу були застосовані методи описової статистики. З огляду на невелике число дослідних зразків в кожній підгрупі дослідження, для порівняльної статистики було використано непараметричний критерій Краскела–Уолліса, для постхок-аналізу застосували тест Данна з поправкою Бонферроні. За рівень вірогідності різниці між підгрупами було прийнято значення показника $p = 0,05$.



Рис. 1. Брекет-замки з ортодонтичним композитом, фіксовані до пластини з органічного скла до експозиції в термостаті

Результати дослідження та їх обговорення. Аналіз обсягів вторинного зміщення брекет-замків («drift effect») показав, що переважна кількість матеріалів не допускала таких змін, і тільки у двох представників з обраного переліку композитів виявлялося таке зміщення (табл. 1). Проведений міжгруповий аналіз результатів вимірювань за критерієм Краскела-Уолліса виявив статистично значущі відмінності між матеріалами ($H = 24,8; p < 0,001$).

Таблиця 1

Результати вимірювання вторинного зміщення брекет-замків на різних матеріалах, мм

Матеріал	Mean ± SD	Median (IQR)	Min–Max
JenOrtho	0,00 ± 0,00	0,00	–
GC Ortho Connect	4,00 ± 0,94	4,00 (3,00–4,50)	3,00–5,50
Orthocem	0,83 ± 0,49	1,00 (0,50–1,00)	0,00–1,50
Biofix	0,05 ± 0,08	0,00 (0,00–0,10)	0,00–0,20
Enlight	0,00 ± 0,00	0,00	–
BracePaste	0,00 ± 0,00	0,00	–

Подальший постхок-аналіз (тест Данна з поправкою Бонферроні) показав, що матеріал «GC Ortho Connect» давав статистично значущо більший рівень вторинного зміщення брекет-замків, порівняно з усіма іншими композиційними матеріалами ($p < 0,001$). Матеріал «Orthocem» теж продемонстрував статистично вірогідну різницю від груп матеріалів, які не мали зміщення ($p < 0,05$). Для брекетів, фіксованих на матеріал «Biofix», де спостерігали мінімальне зміщення, статистично значущих відмінностей не було виявлено (табл. 2).

Таблиця 2
Результати порівняльного аналізу величини «drift effect» брекет-замків у різних фотокомпозитів для фіксації (Post-hoc аналіз, Dunn test, Bonferroni correction)

Пари для порівняння	p	Висновок
GC Ortho Connect / JenOrtho	< 0,001	значущо
GC Ortho Connect / Enlight	< 0,001	значущо
GC Ortho Connect / BracePaste	< 0,001	значущо
GC Ortho Connect / Biofix	< 0,001	значущо
GC Ortho Connect / Orthocem	< 0,01	значущо
Orthocem / JenOrtho	< 0,05	значущо
Orthocem / Enlight	< 0,05	значущо
Orthocem / BracePaste	< 0,05	значущо
Biofix / інші	> 0,05	незначущо

Розрахований ефект ($\eta^2 \approx 0,68$) відповідає великому розміру ефекту, що свідчить про те, що приблизно 68% варіабельності дрейфу брекет-замків можна пояснити типом фіксаційного матеріалу. Отримані результати вказують на те, що «drift effect» брекетів можна вважати матеріал-залежним явищем: матеріал «GC Ortho Connect» показав найнижчу позиційну стабільність замків, тоді як «JenOrtho», «Enlight» та «BracePaste» – повну стабільність (рис. 2 та рис. 3). Найвищі показники «drift effect» для «GC Ortho Connect» вказують на низьку первинну стабільність адгезиву та тривалу фазу зниженої в'язкості до полімеризації. Натомість відсутність зміщення у «JenOrtho», «Enlight» та «BracePaste» свідчить про високу структурну стабільність цих матеріалів у докритичній фазі.

Отримані нами результати демонструють чітко виражену матеріал-залежну природу вторинного зміщення брекет-замків в умовах експерименту («drift effect»). І це може вказувати на ключову роль реологічних властивостей «ортодонтитичних» фотокомпозитів для фіксації у забезпеченні первинної позиційної стабільності [14, 19]. Найвищі показники вторинного зміщення, зафіксовані для «GC Ortho Connect», можуть свідчити про тривалу фазу зниженої в'язкості матеріалу після припинення механічного навантаження, що створює умови для мікродислокацій замка на поверхні емалі до моменту полімеризації [11, 14]. Така «поведінка» фіксаційного матеріалу узгоджується з концепцією тіксотропії та в'язкоеластичної релаксації полімерних систем, згідно з якою відновлення внутрішньої структури після зсуву відбувається із деякою затримкою [12, 15].

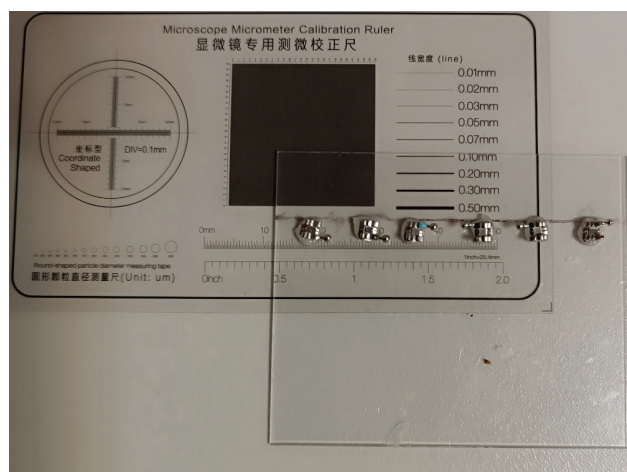


Рис. 2. Брекет-замки з ортодонтитичним фотокомпозитом на пластині з органічного скла після експозиції в термостаті (вторинне зміщення відсутнє)

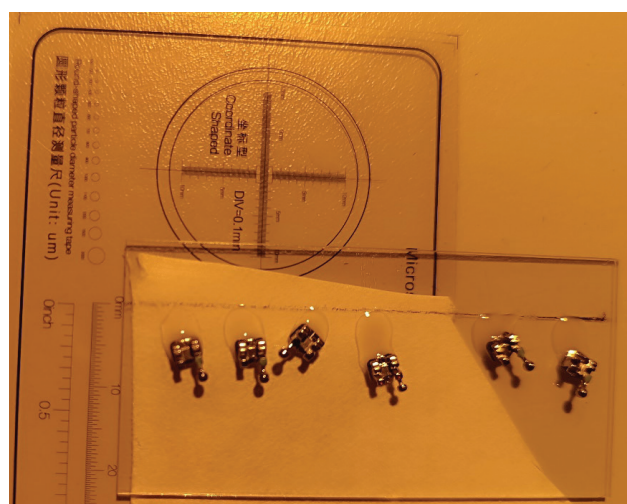


Рис. 3. Виразений «drift effect» брекет-замків з ортодонтитичним фотокомпозитом після експозиції в термостаті

На противагу цьому, повна відсутність вторинного зміщення у матеріалів «JenOrtho», «Enlight» та «BracePaste» може свідчити про їх високу структурну стабільність у докритичній фазі полімеризації. Це може бути пояснено або підвищеною початковою в'язкістю матеріалу, або ж швидким відновленням внутрішньої структури шару композита після зняття навантаження, що забезпечує достатній опір зсуву навіть до досягнення гел-точки у системі. Подібні виявлені властивості є клінічно бажаними, оскільки вони мінімізують ризик неконтрольованого переміщення брекет-замка та підвищують точність його позиціонування [16, 17].

Особливий інтерес становить матеріал «Orthocem», який продемонстрував помірний рівень «drift effect» ($0,83 \pm 0,49$). Це свідчить про його потенційні проміжні реологічні характеристики, при яких матеріал частково зберігає текучість після припинення тиску, але вже має певну здатність до структурного відновлення. Така «поведінка» композиту може розглядатися як компроміс між адаптаційною здатністю до мікро-

рельєфу емалі та стабільністю положення накладеного брекет-замка [5, 24].

Отриманий великий розмір ефекту ($\eta^2 \approx 0,68$) підкреслює, що тип матеріалу є домінантним фактором, який визначає варіабельність зміщення. Це має важливе практичне значення, оскільки дозволяє розглядати вибір фотокомпозита для фіксації як ключовий інструмент контролю точності фіксації брекетів. Водночас не можна ігнорувати вплив окремих оператор-залежних факторів, таких як сила притискання замка, тривалість позиціонування та час до полімеризації, які можуть додатково модифікувати прояв «drift effect» [21, 23].

З позиції клінічної практики, результати цього дослідження обґрунтовують доцільність використання матеріалів з високою структурною стабільністю або ж застосування технік швидкої попередньої полімеризації (tack-curing), що дозволяє зменшити часове вікно потенційного зміщення брекет-замка.

Обмеження дослідження. Серед обмежень, які потенційно могли б вплинути на результати експерименту можна виділити наступні позиції:

- металеві брекети фіксували до поверхні органічного скла, а не до емалі зубів;
- використана особлива форма брекет-замків, яке не має плоскої форми бази і є менш адаптованою до рівної поверхні;
- кількість дослідних зразків була мінімальною необхідною для проведення статистичних тестів.

Висновки. Отримані результати підтверджують, що тіксотропні властивості різних композитних матеріалів для фіксації ортодонтичної апаратури мають суттєві відмінності, що проявилось у вигляді вторинного зміщення брекетів («drift effect»). Таке явище є вираженням матеріалозалежним явищем і визначається реологічними властивостями ортодонтичних композитів. Найвищий рівень вторинного зміщення спостерігався для матеріалу «GC Ortho Connect», тоді як брекет-замки на «JenOrtho», «Enlight» та «BracePaste» продемонстрували повну позиційну стабільність. Тип матеріалу пояснює більшу частину варіабельності показників ($\eta^2 \approx 0,68$), що підкреслює його ключову роль у забезпеченні точності фіксації брекетів. Використання фотокомпозитних матеріалів для фіксації ортодонтичної апаратури з високою структурною стабільністю та застосування ранньої полімеризації є ефективними стратегіями мінімізації «drift effect» у клінічній практиці.

Перспективи подальших досліджень. Подальші дослідження можуть полягати в кількісній оцінці взаємодії між реологічними параметрами матеріалів, товщиною адгезивного шару композиту та величиною зміщення з використанням багатофакторних статистичних моделей, що дозволить сформулювати стандартизовані клінічні протоколи мінімізації «drift effect» для ортодонтичної практики.

REFERENCES

1. Mandall NA, Millett DT, Mattick CR, Hickman J, Worthington HV, Macfarlane TV. Orthodontic adhesives: a systematic review. *J Orthod.* 2002;29(3):205-10; discussion 195. doi: 10.1093/ortho/29.3.205.
2. Thiara S, Sood S, Mahajan M, Negi S, Negi KS, Chainta D, Negi N. Orthodontic bonding in transition: Materials, techniques, and clinical applications. *IP Indian Journal of Orthodontics and Dentofacial Research.* 2026;12(1):6-13. doi: 10.18231/j.ijodr.13185.1763549759
3. Altmann AS, Degrazia FW, Celeste RK, Leitune VC, Samuel SM, Collares FM. Orthodontic bracket bonding without previous adhesive priming: A meta-regression analysis. *Angle Orthod.* 2016;86(3):391-8. doi: 10.2319/041615-255.1.
4. Vicente A, Bravo LA, Romero M, Ortiz AJ, Canteras M. A comparison of the shear bond strength of a resin cement and two orthodontic resin adhesive systems. *Angle Orthod.* 2005;75(1):109-13. doi: 10.1043/0003-3219(2005)075<0109:ACOTSB>2.0.CO;2.
5. Abuljadayel R. Effect of bioactive adhesives on shear bond strength at the enamel-orthodontic bracket interface. *J Pioneering Med Sci.* 2025;14(S01):26-33. doi:10.47310/jpms202514S0105
6. Bhuvaneshwaran T, Vimala G, Rao GU, Anbarasu P. Comparative Evaluation of orthodontic bonding systems for ceramic brackets on zirconia crowns: A shear Bond Strength and Adhesive remnant Index study. *The Journal of Indian Orthodontic Society.* 2024;59(1):62-8. doi: 10.1177/03015742241275353
7. Jain D, Chopra SS, Thakur VK, Sewda SK. Comparative evaluation of bonding failure rate with two light cure orthodontic adhesives: a cross-arch split-mouth prospective study. *Dental Press J Orthod.* 2025;30(2):e2524214. doi: 10.1590/2177-6709.30.2.e2524214.oar.
8. Cramer NB, Stansbury JW, Bowman CN. Recent advances and developments in composite dental restorative materials. *J Dent Res.* 2011;90(4):402-16. doi: 10.1177/0022034510381263.
9. Ferracane JL. A Historical Perspective on Dental Composite Restorative Materials. *J Funct Biomater.* 2024;15(7):173. doi: 10.3390/jfb15070173.
10. Jeconias N, Fischer P, Tauböck TT. Viscosity-Dependent Shrinkage Behavior of Flowable Resin Composites. *Polymers (Basel).* 2025;17(24):3292. doi: 10.3390/polym17243292.
11. Lee JH, Um CM, Lee IB. Rheological properties of resin composites according to variations in monomer and filler composition. *Dent Mater.* 2006;22(6):515-26. doi: 10.1016/j.dental.2005.05.008.
12. Papadogiannis D, Iliadi A, Bradley TG, Silikas N, Eliades G, Eliades T. Viscoelastic properties of orthodontic adhesives used for lingual fixed retainer bonding. *Dent Mater.* 2017;33(1):e22-e27. doi:10.1016/j.dental.2016.09.041
13. Scribante A, Vallittu PK, Özcan M. Fiber-reinforced composites for dental applications. *Biomed Res Int.* 2018;2018:4734986. doi:10.1155/2018/4734986.
14. Szczesio-Wlodarczyk A, Garoushi S, Vallittu P, Bociog K, Lassila L. Polymerization shrinkage stress of contemporary dental composites: Comparison of two measurement methods. *Dental Materials Journal.* 2024;43(2):155-63. doi: 10.4012/dmj.2023-192.

-
15. Condò R, Mampieri G, Cioffi A, Pirelli P, Giancotti A, Maiolo L, Maita F, Convertino A, Lucarini I, Notargiacomo A, Rau JV, Fosca M, Marzo G. Relationship between Reflectivity, Chemical Composition and Mechanical Behaviour of Orthodontic Bonding Nanofiller Resin Materials: A Proposal of an Alternative Method of Investigation. *Applied Sciences*. 2022;12(24):12538. doi: 10.3390/app122412538
 16. Namura Y, Takamizawa T, Uchida Y, Inaba M, Noma D, Takemoto T, Miyazaki M, Motoyoshi M. Effects of composition on the hardness of orthodontic adhesives. *J Oral Sci*. 2020;62(1):48-51. doi: 10.2334/josnurd.19-0035.
 17. Chanachai S, Chaichana W, Insee K, Benjakul S, Aupaphong V, Panpisut P. Physical/Mechanical and Antibacterial Properties of Orthodontic Adhesives Containing Calcium Phosphate and Nisin. *J Funct Biomater*. 2021;12(4):73. doi: 10.3390/jfb12040073.
 18. Owens SE Jr, Miller BH. A comparison of shear bond strengths of three visible light-cured orthodontic adhesives. *Angle Orthod*. 2000;70(5):352-6. doi: 10.1043/0003-3219(2000)070<0352:ACOSBS>2.0.CO;2.
 19. Schneider LF. Light and viscosity effects on curing potential of composites. OHI-S. 2023. URL: <https://ohi-s.com/articles-videos/light-and-viscosity-effects-on-the-curing-potential-of-bulk-fil-composites-placed-in-deep-cavities/>
 20. Mirzakouchaki B, Kimyai S, Hydari M, Shahrabaf S, Mirzakouchaki-Boroujeni P. Effect of self-etching primer/adhesive and conventional bonding on the shear bond strength in metallic and ceramic brackets. *Medicina Oral, Patología Oral Y Cirugía Bucal*. 2012;17(1):e164-70. doi: 10.4317/medoral.17024
 21. Sharma S, Tandon P, Nagar A, Singh GP, Singh A, Chugh VK. A comparison of shear bond strength of orthodontic brackets bonded with four different orthodontic adhesives. *J Orthod Sci*. 2014;3(2):29-33. doi: 10.4103/2278-0203.132892.
 22. Staehle HJ, Sekundo C. 75 Years Ago: Discovery of Resin Adhesion to Acid-etched Enamel – A Comparison of the 1949 and 1955 Methods. *J Adhes Dent*. 2024;26:87-92. doi: 10.3290/j.jad.b5057135.
 23. Pseiner BC, Freudenthaler J, Jonke E, Bantleon HP. Shear bond strength of fluoride-releasing orthodontic bonding and composite materials. *Eur J Orthod*. 2010;32(3):268-73. doi: 10.1093/ejo/cjp116.

Дата першого надходження статті до видання: 20.04.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 11.05.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026