

УДК 616.314-002.4-089.23:620.17

DOI <https://doi.org/10.35220/2523-420X/2025.2.2>**Ю.В. Лахтін,**

доктор медичних наук, професор,
професор кафедри стоматології,
Сумський державний університет,
вул. Харківська, 116, м. Суми, Україна, індекс 40007,
y.lahutin@med.sumdu.edu.ua

Д.Г. Григор'єв,

аспірант кафедри стоматології,
Сумський державний університет,
вул. Харківська, 116, м. Суми, Україна, індекс 40007,
katsumoto2018@gmail.com

АДГЕЗИВНИЙ ПОТЕНЦІАЛ МІКРОРЕЛЬЄФУ ПОВЕРХОНЬ ЕМАЛІ І ДЕНТИНУ ПРИ РІЗНИХ ПРОТОКОЛАХ ПРЕПАРУВАННЯ

Мета дослідження. Оцінити адгезивний потенціал мікрорельєфу поверхні твердих тканин зубів при різних протоколах препарування і адгезивної підготовки. **Матеріали та методи дослідження.** Видалені імпакті треті моляри сепарували в медіо-дистальному напрямку, отримували дві половини коронкової частини, з яких в залежності від протоколів препарування і адгезивної підготовки формували 4 групи: 1 – препарування ротаційними інструментами без протравлення тканин, 2 – препарування ротаційними інструментами з протравленням 37% гелем фосфорної кислоти, 3 – препарування повітряно-абразивним методом без протравлення, 4 – препарування повітряно-абразивним методом протравленням. Поверхню зразків вивчали під оптичним мікроскопом, фотографували з наступною екстраполяцією зображень в програму з відкритим вихідним кодом для аналізу та обробки зображень ImageJ. Аналізували 2D- та 3D- зображення поверхні (профілю мікрорельєфу) за типом поверхні, її структурою, рельєфом, оптичними характеристиками. **Результати.** В 1-й групі зразків рельєф поверхні емалі з глибокими борозенками і задирками, нерівномірна мікроструктура, мінімальна шорсткість, відсутність мікропор, пригладжена структура. Гладка поверхня дентину з мінімальними мікротріщинами, обмежена відкритість дентинних каналців, наявність змащеного шару. Помірний потенціал адгезії через відсутність мікрOMEХАНІЧНОЇ ретенції і обмежену відкритість каналців у дентині. В 2-й групі – більш виражений мікрорельєф емалі з численними мікропорами і порожнинами. Відкриті дентинні каналці та колагенова мережа. Високий адгезивний потенціал завдяки мікрOMEХАНІЧНІЙ ретенції та наступної гібридизації дентину. В 3-й групі – менш агресивний рельєф поверхні емалі, проте з чіткою мікрошорсткістю. Однорідна, шорстка поверхня дентину з частково відкритими каналцями. Помірно високий адгезивний потенціал через однорідність і помірну мікрOMEХАНІЧНУ ретенцію. в 4-й групі – виражений мікрорельєф емалі і наявність мікропор.

Рівномірне відкриття дентинних каналців, чітка пориста структура дентину. Найвищий адгезивний потенціал серед досліджених протоколів. **Висновки.** Найкращі умови мікрорельєфу для адгезії спостерігаються у зразків 4-ї групи. Мікрорельєф поверхні зразків 2-ї групи також показує хороші умови для зчеплення, але структура тканин зуба менш відкрита. Мікрорельєф поверхні 3-ї групи зразків демонструє задовільний потенціал до адгезії, хоча кислота могла б його посилити. Мікрорельєф поверхні 1-ї групи є найменш сприятливим для зчеплення: мінімальна шорсткість, відсутність мікропор, пригладжена структура.

Ключові слова: стоматологія, зуби, карієс зубів, препарування, мікрорельєф, адгезія.

Yu. V. Lakhtin,

Doctor of Medical Sciences, Professor,
Professor of the Department of Dentistry,
Sumy State University,

116 Kharkivska street, Sumy, Ukraine, postal code 40007,
y.lahutin@med.sumdu.edu.ua

D. H. Hryhoriev

Postgraduate Student of the Department of Dentistry,
Sumy State University,

116 Kharkivska street, Sumy, Ukraine, postal code 40007,
katsumoto2018@gmail.com

ADHESIVE POTENTIAL OF ENAMEL AND DENTIN SURFACE MICRORELIEF UNDER DIFFERENT PREPARATION PROTOCOLS

Aim. To assess the adhesive potential of the surface microrelief of dental hard tissues under different cavity preparation and adhesive protocols. **Materials and Methods.** Extracted impacted third molars were sectioned mesiodistally to obtain two halves of the crown. Depending on the preparation and conditioning protocols, four experimental groups were formed: Group 1 – rotary instrumentation without acid etching; Group 2 – rotary instrumentation with etching using 37% phosphoric acid gel; Group 3 – air-abrasion preparation without etching; Group 4 – air-abrasion preparation with acid etching. Sample surfaces were examined under an optical microscope, photographed, and imported into the open-source ImageJ software for image processing and analysis. Two-dimensional and three-dimensional surface images (microrelief profiles) were analyzed based on surface type, structure, relief features, and optical characteristics. **Results.** In Group 1, enamel surfaces exhibited deep grooves, burrs, and an irregular microstructure with minimal roughness and absence of micropores. The dentin surface appeared smooth with limited microcracks and partially open dentinal tubules, with a persistent smear layer. Adhesive potential was moderate due to lack of micromechanical retention and restricted tubule openness. In Group 2, enamel surfaces displayed a more pronounced microrelief with numerous micropores and voids. Dentin showed open tubules and visible collagen networks. High adhesive potential was noted due to pronounced micromechanical retention and subsequent hybridization

of dentin. Group 3 showed a less aggressive enamel surface relief but with noticeable micro-roughness. Dentin surfaces were homogeneous and rough, with partially open tubules. Moderate-to-high adhesive potential was observed due to the uniformity and moderate micromechanical retention. Group 4 demonstrated the most distinct enamel microrelief with visible micropores and uniformly open dentinal tubules with a clear porous structure. This group exhibited the highest adhesive potential among all protocols. Conclusions. The most favorable microrelief conditions for adhesion were observed in Group 4. Group 2 samples also demonstrated good bonding conditions, although with less tissue openness. Group 3 samples showed satisfactory adhesive potential, which could be improved with additional etching. Group 1 surfaces were the least favorable for bonding due to minimal roughness, absence of micropores, and a smooth surface structure.

Key words: dentistry, teeth, dental caries, preparation, microrelief, adhesion.

Відновлення форми і функції зуба, що були порушені внаслідок утворення дефекту (каріозна порожнина, некаріозні ураження) є головною задачею адгезивної реставраційної стоматології. Основною метою будь-якої реставрації за адгезивною технологією є досягнення щільної та тривалої адаптації реставраційного матеріалу до твердих тканин каріозної порожнини [1]. На стан цих параметрів впливає багато технологічних факторів під час відновлення зубів: полімеризаційна усадка композитного матеріалу [2], інкрементна техніка внесення композиційного матеріалу в каріозну порожнину [3], протоколи препарування і адгезивної підготовки емалі і дентину [4, 5]. Вирішальне значення для адгезії реставрацій до тканин зубів має відповідна попередня обробка поверхонь склеювання [6].

Сучасна стоматологія постійно вдосконалюється завдяки появі нових матеріалів і вдосконаленню методів видалення уражених карієсом тканин та препарування каріозної порожнини. Використання ротаційних інструментів при препаруванні часто призводить до надмірного видалення емалі і дентину, викликає у пацієнта неприємні відчуття. Тому для мінімізації надмірного видалення тканин були розроблені і запропоновані нові підходи і методи препарування [7, 8]. Впровадження принципів мінімального інтервенційного препарування при лікуванні карієсу передбачає малоінвазивний реставраційний підхід з використанням консервативних методів видалення уражених карієсом тканин, мінімального дизайну каріозних порожнин та використання адгезивних реставраційних матеріалів [9].

Для малоінвазивного препарування порожнини запропоновані різні методики, серед яких

одну з лідируючих позицій поступово займає повітряно-абразивна [10]. В клініці її застосовують для екскавації емалі та дентину при препаруванні малих каріозних порожнин всіх класів за Блекум під композитні матеріали [11]. Повітряну абразію визначають як метод доставки абразивного матеріалу під різним тиском для видалення відкладень і плям на зубах, модифікації поверхні стоматологічних матеріалів або структури зуба. Цей метод також називають мікроповітряною абразією, пневмоабразією, кінетичним препаруванням порожнини або прискореною абляцією частинок [12].

Інтерфейс поверхонь емалі і дентину, отриманий після використання різних протоколів препарування, може впливати на ступінь адгезії між твердими тканинами зуба і реставраційним матеріалом. Вважають, що повітряна мікроабразія збільшує параметри шорсткості емалі і дентину, змінює мікрорельєф і тим самим може впливати на адгезію реставраційних матеріалів [5, 13, 14]. Як стверджують, повітряна адгезія на дентині виконується для збільшення площі поверхні, покращення поверхневої енергії та сприяння кращому мікромеханічному зчепленню адгезивів. Цей фокус на з'єднанні дентину має значні наслідки для адгезивної стоматології, оскільки безпосередньо впливає на довгострокову клінічну ефективність адгезивних реставрацій [15]. За допомогою скануючої електронної мікроскопії було виявлено нерівномірний адгезивний інтерфейсів в емалі і дентині при використанні повітряної абразії, який відрізнявся від інтерфейсу, отриманому при обробці ротаційними інструментами [16].

Попри значних напрацювань в певних дослідженнях, відомі дані свідчать про неоднозначність і неповну вивченість порівняльного впливу різних методів препарування на мікрорельєф твердих тканин зуба з огляду на його адгезивний потенціал. Зокрема, залишається недостатньо з'ясованою інтегральна характеристика мікрорельєфу емалі і дентину і їх адгезивний потенціал як цілісного зуба, що має важливе значення для рекомендацій і розробки ефективних клінічних протоколів препарування.

Мета дослідження. Оцінити адгезивний потенціал мікрорельєфу поверхні твердих тканин зубів при різних протоколах препарування і адгезивної підготовки на підставі аналізу 2D- та 3D- зображень.

Матеріали та методи дослідження. Дослідження мікрорельєфу емалі і дентину проводили

на 5 третіх молярах, видалених у осіб з приводу імпації (МКХ-10: K01.1 – Імпактний зуб) без ознак каріозного ураження. Кожний зуб сепарували в медіо-дистальному напрямку на дві половини і формували зразки на 4 групи залежно від протоколів препарування і адгезивної підготовки (рис. 1).

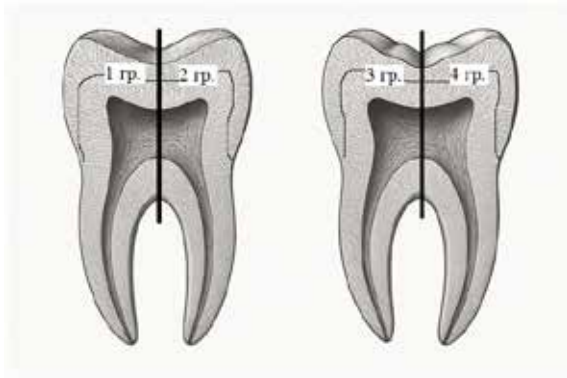


Рис. 1. Схема сепарації зуба і формування груп зразків

Протоколи підготовки зразків. В групах 1 ($n = 5$) і 2 ($n = 5$) поверхню обробляли методом препарування ротаційними інструментами (ПРІ) із застосуванням кулястого крупнозернистого діамантового бора (розмір абразивних зерен 100–125 мкм) у високошвидкісному наконечнику з розпилювачем води. Нові бори використовували після кожних п'яти зразків. Підготовлені порожнини промивали шприцом, висушували повітрям без масла. Для зразків груп 3 ($n = 5$) і 4 ($n = 5$) використовували техніку повітряно-абразивного препарування (ПАП) частинками Al_2O_3 розміром 50 мкм під кутом 45° під тиском повітря 0,41 МПа на відстані 2 мм за допомогою піскоструминної установки Sandman Futura (Данія). В зразках 1-ї та 3-ї групи попереднього протравлення тканин зуба не проводили. В групах 2 та 4 поверхню після препарування протравлювали 37% гелем фосфорної кислоти. Емаль протравлювали відповідно до інструкцій виробника протягом 30 секунд, а дентин – 15 секунд. Зуби ретельно промивали протягом 30 секунд і висушували повітрям без мастила.

Рельєф поверхні зразків вивчали за допомогою мікроскопа Olympus BH-2 (Японія) при збільшенні – окуляр $\times 7$, об'єктив $\times 40$, фотографували. Фотографії екстраполювали у програму з відкритим вихідним кодом для аналізу та обробки зображень ImageJ з використанням функції побудови тривимірної поверхні (Surface Plot), де інтенсивність пікселів зображення трансформовано у висотні координати для візуалізації топографії зразка та двовимірного графіка профілю (Plot Profile) інтенсивності розподілу пікселів на виділенні, на якому визначали висоту мапа (height map), де яскравість пікселя була перетворена у «висоту» рельєфу. Висоту рельєфу виражали у вигляді Ra (мкм) – середнє арифметичне відхилення профілю поверхні від ідеальної прямої, яке характеризує шорсткість поверхні, тобто ступінь нерівностей та шорсткості. Чим менше значення Ra , тим гладкішою і менш шорсткою є поверхня. Rz (мкм) – висота нерівностей профілю по 10 точках (сума середніх абсолютних значень висот п'яти найбільших виступів і глибин п'яти найбільших впадин профілю в межах базової довжини) [17].

Рівні шорсткості поверхні визначали відповідно до ISO, які були адаптовані для стоматологічних досліджень [18, 19]. Аналізували 2D- та 3D- зображення поверхні (профілю мікрорельєфу) за типом поверхні, її структурою, рельєфом, оптичними характеристиками. Статистичний аналіз не проводили, оскільки результати дослідження мали лише якісний описовий характер.

Дослідження схвалено комісією з питань дотримання біоетики при проведенні експериментальних та клінічних досліджень навчально-наукового медичного інституту Сумського державного університету (протокол № 1/05 від 01.05.2025 р.)

Результати дослідження та їх обговорення. Отримані результати аналізу зображень показують, що мікрорельєф поверхні емалі і дентину має свої особливості в залежності від методу препарування.

Аналіз мікрорельєфу поверхні емалі і дентину 1-ї групи зразків наведений нижче.

Аналіз 2D-зображення поверхні емалі: поверхня матова, відносно однорідна за кольором і контрастом, що вказує на однорідний матеріал або однаковий спосіб обробки, з контамінацією залишків елементів емалі (змащений шар).

Має виражену текстуру з помітною анізотропією рельєфу і амплітудою мікронерівностей з добре візуалізованими піками й западинами. Груба, з переважно численними регулярними паралельними борознами та вершинами, які мають регулярну геометрію у формі виражених витягнутих структур та западин з орієнтацією у напрямку обертання інструмента. Борозни йдуть під кутом близько 45° до горизонталі поверхні, що є типовою картиною після контактного механічного

пошкодження внаслідок шліфування абразивом з однорідним зерном. Призмові структури змиті.

Аналіз 3D-зображення поверхні емалі (рис. 2а): поверхня емалі характеризується щільним нерівномірним мікрорельєфом, який утворюється численними паралельними борознами і мікровиступами з регулярним рисунком. Помітна амплітуда мікронерівностей, виражені піки й западини, що відповідають напрямку дії роторного інструмента з абразивним ефектом, але без полірування. Вершини і западини розташовані щільно, візуалізується висока густина мікроструктур. Висотний профіль в межах шкали яскравості (0–255), різко не змінюється, але є локальні піки, які можна верифікувати як артефакти шліфування. Відсутність глибоких кратерів або розривів вказує на однорідність обробки поверхні. Така текстура характерна для шорсткої поверхні ($R_a \approx 1\text{--}3\text{ мкм}$). Мікрорельєф свідчить про помірний, але достатній для адгезії, рівень текстурованості поверхні.

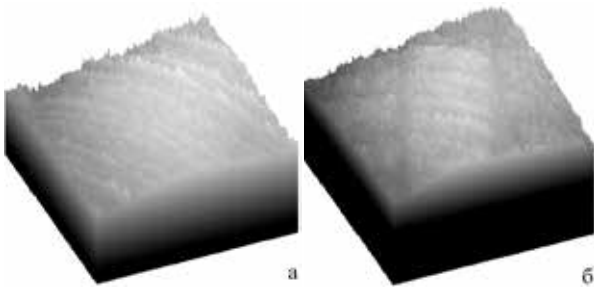


Рис. 2. Мікрорельєф поверхні при традиційному роторному препаруванні без протравлення: а – емаль, б – дентин

Аналіз 2D-зображення поверхні дентину: оптичні зображення показують рівномірний сірий фон з незначною кількістю мікроскопічних слідів обробки. Спостерігається відсутність вираженої мікрорельєфності чи пористості. Іноді візуалізуються мікроскопічні нерівності та глибокі чіткі борозенки, утворені роботою ріжучих частин інструмента. Поверхня на мікрорівні виглядає відносно однорідною. Має відносно рівномірний гладкий вигляд, без чітко виражених подряпин або борозен, з видимими рисками і слідами роторної обробки у вигляді легких лінійних структур а також фрагментованими зруйнованими частками дентину (змащений шар). Такий тип поверхні характерний для клінічної практики препарування зубів без додаткової обробки протравлюючими агентами.

Аналіз 3D-зображення поверхні дентину (рис. 2б): профіль поверхні складається з числен-

них нерівномірно розподілених мікроскопічних виступів та западин, які утворюють характерний хвилястий рельєф. Висота піків незначна, але спостерігається помітна текстура, що свідчить про мікрорельєф, створений роторним інструментом. Поверхня загалом виглядає досить однорідною, без різких змін висоти рельєфу. Відсутні локальні западини чи виступи, які могли б свідчити про дефекти препарування. Візуально оцінюється середня шорсткість ($R_a \approx 0,5\text{--}1,0\text{ мкм}$), оскільки висоти піків помірні та не перевищують характерних значень для дентину після роторної обробки. Параметр R_z (максимальна висота профілю) також становить візуально до 5 мкм. Подібний рельєф є типовим для дентину після роторного препарування. Через наявність лише механічної ретенції потенціал рельєфу дентину до адгезії має низький рівень.

Аналіз мікрорельєфу поверхні емалі і дентину 2-ї групи зразків наведений нижче.

Аналіз 2D-зображення поверхні емалі: на мікрофотографії видно змінену топографію поверхні емалі внаслідок кислотного травлення після механічного препарування. Раніше помітні паралельні борозни, характерні для дії роторного інструмента, суттєво згладжені або частково зруйновані. Поверхня набуває менш регулярного вигляду, із нерівномірною зернистістю та дифузною текстурою. Це свідчить про селективну демінералізацію призм емалі, типовий ефект дії 37% фосфорної кислоти. Структура поверхні виглядає матовою, неоднорідною, з нечітко вираженим рисунком структури і ознаками часткового оголення емалевих призм. Це підвищує мікропористість і потенціал для мікромеханічного зв'язування з адгезивом. Загальний профіль поверхні демонструє зменшення вираженого рельєфу, на відміну від необробленого кислотами зразка, де борозни зберігають високу чіткість.

Аналіз 3D-зображення поверхні емалі (рис. 3а): на 3D-реконструкції поверхні чітко візуалізується суттєва зміна мікрорельєфу емалі внаслідок дії протравлювання. У порівнянні з необробленою кислотою емаллю, профіль став менш агресивно вираженим, рельєф м'якший: глибина і різкість борозен, сформованих бором, значно знижені, амплітуда менша. Поверхня виглядає більш розмитою, згладженою, з хвилястим мікрорельєфом, що свідчить про нерівномірну демінералізацію і часткову деструкцію призм емалі. Рельєф характеризується зниженням контрастності пікселів за висотою, що вказує на загальну згладженість поверхні. Однак зберігається певна

текстурна напрямленість, яка є рудиментом механічної обробки. Візуально оцінюється середня шорсткість ($R_a \approx 0,5-1,0$ мкм) з максимальною висотою профілю (R_z) до 5 мкм. Такий профіль сприятливий для утворення мікромеханічного ретенційного рельєфу, має високий потенціал адгезії.

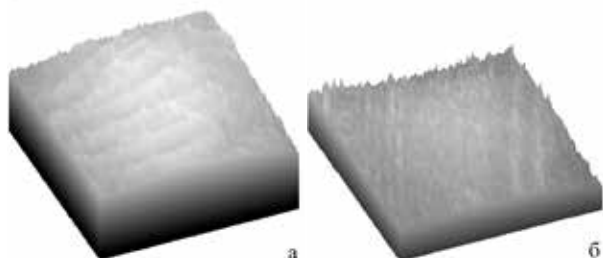


Рис. 3. Мікрорельєф поверхні при традиційному роторному препаруванні з протравленням: а – емаль, б – дентин

Аналіз 2D-зображення поверхні дентину: поверхня зразка характеризується вираженим мікрорельєфом. Протравлення призвело до відкриття дентинних каналців та посилення вираженості структури поверхні. Спостерігаються численні заглиблення та нерівності, проте поверхня має відносну однорідність, зберігаючи напрямні сліди роторного інструмента, але з більш вираженим розкриттям структурних елементів унаслідок травлення. В деяких ділянках візуалізуються більш глибокі заглиблення та неоднорідна текстура.

Аналіз 3D-зображення поверхні дентину (рис. 3б): на поверхні виявляються помітні мікрорельєфи та заглиблення, що створюють загальний профіль із значною амплітудою варіації висоти. У структурі профілю переважають виступи, що чергуються із западинами, що візуально формує «хвилястий» мікрорельєф. Поверхня з більш вираженою мікрошорсткістю, пориста і нерівномірна через часткове розчинення мінеральної фази з вираженими мікроструктурними деталями, із численними мікропорами та виступами, відмічається зменшення товщини змазаного шару. Мікрорельєф стає більш вираженим і менш регулярним. Протравлення фосфорною кислотою значно посилило вираженість рельєфу порівняно з препаруванням без протравлювання. Візуально оцінюється шорстка поверхня ($R_a \approx 1,0-3,0$ мкм) з максимальною висотою профілю (R_z) до 15 мкм, що свідчить про значно вищий потенціал для мікромеханічної ретенції адгезивних матеріалів.

Аналіз мікрорельєфу поверхні емалі і дентину 3-ї групи зразків наведений нижче.

Аналіз 2D-зображення поверхні емалі: поверхня має матову, дифузну, рівномірно шорстку структуру з більш рівномірним розподілом дефектів без виражених подряпин чи ліній, без глибоких борозен або орієнтованих мікроподряпин, характерних для роторного препарування. На мікрофотографії спостерігається дифузна зерниста структура, що свідчить про однорідне мікрозняття (мікроерозія) поверхневого шару емалі з частковим оголенням меж призм внаслідок мікроударів абразивних частинок. Пошкодження структури емалі має менш виражену орієнтацію, ніж при роторному препаруванні, а поверхня виглядає рівномірніше зміненою, без глибоких борозен. Це підтверджує м'якіший, але дифузний характер абляції при повітряно-абразивній техніці. Візуально відзначається потенційно краща біосумісність такої поверхні з адгезивними матеріалами – за рахунок мікропористої структури, що може сприяти помірній мікромеханічній фіксації.

Аналіз 3D-зображення поверхні емалі (рис. 4а): на поверхні візуалізуються хаотично розподілені нерівності з помірною висотною амплітудою. Висотна карта вказує на наявність множинних локальних піків та западин без чітко вираженої направленості, що свідчить про стохастичний характер дії повітряно-абразивного потоку. Візуально оцінюється середня шорсткість поверхні ($R_a \approx 0,5-1,0$ мкм) з максимальною висотою профілю (R_z) до 5 мкм. Такий рельєф створює сприятливу мікромеханічну основу для ретенції адгезивних матеріалів. Обробка цього типу, на відміну від роторної, не спричиняє формування змазаного шару, а отже, потенційно покращує адгезивну взаємодію з композитними реставраціями.

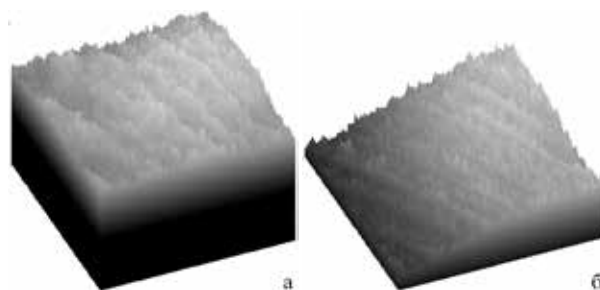


Рис. 4. Мікрорельєф поверхні при повітряно-абразивному препаруванні без протравлення: а – емаль, б – дентин

Аналіз 2D-зображення поверхні дентину: поверхня має виражений рельєф із числен-

ними мікро- та макронерівностями. Мікронерівності більш пологі, без чіткої лінійної орієнтації. Спостерігається загальна однорідність з мікрошорсткістю, менш вираженими борозенками за рахунок рівномірного розподілу абразивних часток у процесі обробки, зменшений або відсутній змащений шар. Візуально відсутні значні відхилення у висоті мікронерівностей, що свідчить про ефективність обробки.

Аналіз 3D-зображення поверхні дентину (рис. 4б): профіль поверхні має гострі мікрровершини і западини різної глибини, які утворилися внаслідок інтенсивного мікροабразивного впливу часток. Поверхня характеризується хаотичним розташуванням нерівностей, без чіткої лінійної орієнтації, що відрізняє її від структурованих профілів після роторного препарування. Мікроструктура виглядає зернистою і рельєфною, з численними слідами мікрорізання та відриву поверхневого шару дентину. Візуально можна зробити припущення про високу шорсткість ($R_a \approx 1\text{--}3$ мкм) і значну висотну амплітуду ($R_z \approx 5\text{--}15$ мкм) рельєфу поверхні. Глибина западин і висота мікрровершин варіюється, але загалом зберігається загальний патерн рівномірного мікропошкодження. Ці особливості можуть бути оцінені як помірно-високий потенціал адгезивної взаємодії з реставраційними матеріалами, який може забезпечити стабільну адгезію.

Аналіз мікрорельєфу поверхні емалі і дентину 4-ї групи зразків наведений нижче.

Аналіз 2D-зображення поверхні емалі: поверхня має нерівномірну текстуру з вираженими смугами та зонами підвищеної зернистості із вираженими хвилюподібними або дугоподібними структурами – це, ймовірно, результат дії кислоти. Спостерігаються численні дрібні поглиблення і зморшкуваті ділянки, що може свідчити про часткову демінералізацію верхнього шару емалі після кислотної обробки. Загальний рельєф має більш «матовий» вигляд, із меншою кількістю віддзеркалюючих ділянок, що відповідає збільшенню шорсткості. Помітний складніший і виразний, менш рівномірний, зі слідами мікроерозії і глибшими порами, максимальною мікрошорсткістю рельєф поверхні в порівнянні зі зразками 3-ї групи, що потенційно забезпечує найвищий рівень адгезії до реставрацій.

Аналіз 3D-зображення поверхні емалі (рис. 5а): поверхня має високу варіабельність висоти мікроструктур. В порівнянні з 2-ю групою наявна середня текстурність, піки менш виражені, але через сумарний ефект дії абразиву та кислоти

загалом відмічається високий рельєф. Порівняно зі зразками 3-ї групи спостерігається збільшення кількості та глибини «піків» і «впадин», глибина рельєфу помітно вища – є різкіші зміни по вертикальній осі (255 шкала яскравості), що узгоджується з впливом фосфорної кислоти і візуально підтверджує більшу шорсткість поверхні. Візуально оцінюється середня шорсткість ($R_a \approx 0,5\text{--}1,0$ мкм) з максимальною висотою профілю (R_z) до 5 мкм. Такий профіль сприятливий для утворення мікромеханічного ретенційного рельєфу, має високий потенціал адгезії.

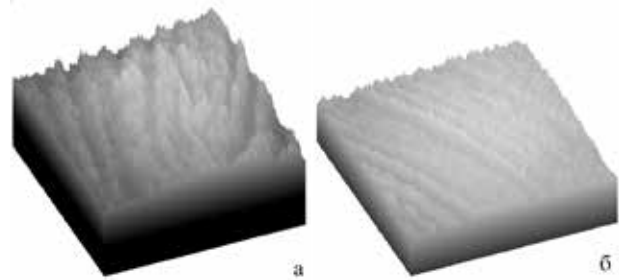


Рис. 5. Мікрорельєф поверхні при повітряно-абразивному препаруванні з протравленням: а – емаль, б – дентин

Аналіз 2D-зображення поверхні дентину: поверхня однорідна, з менш вираженими нерівностями, але з вираженою зернистою структурою та борозенками. Визначаються чіткі паралельні лінії від впливу абразиву з численними порами, відсутній змащений шар.

Аналіз 3D-зображення поверхні дентину (рис. 5б): рельєф з підвищеннями та заглибленнями, більш розвинений мікрорельєф після протравлення. Поверхня більш гладка, з менш вираженими нерівностями, рельєф пом'якшений, мікронерівності менше виражені. Виражена мікросероховатість з численними мікропорами. Візуально оцінюється середня шорсткість ($R_a \approx 0,5\text{--}1,0$ мкм) з максимальною висотою профілю (R_z) до 5 мкм. Такий профіль сприятливий для утворення мікромеханічного ретенційного рельєфу, має дуже високий потенціал адгезії.

Порівняльна характеристика узагальнюючого потенціалу адгезії мікрорельєфу твердих тканин зуба до реставраційного матеріалу представлена в таблиці.

Ротаційні інструменти утворюють характерний мікрорельєф та змащений шар (smear layer), який впливає на адгезію [6, 20]. Тому дослідники вказують на необхідність видалення змащеного шару з метою покращення зв'язку реставраційного матеріалу з дентином [21]. Результати

Таблиця 1

Порівняльна характеристика потенціалу адгезії мікрорельєфу твердих тканин зуба до реставраційного матеріалу

Зразок групи	Протокол		Потенціал адгезії мікрорельєфу		
	препарування	протравлення	емалі	дентину	інтегровано тверді тканини
1	ПРІ	-	помірний	низький	помірно-низький
2	ПРІ	+	високий	високий	високий
3	ПАП	-	помірно-високий	помірно-високий	помірно-високий
4	ПАП	+	високий	дуже високий	дуже високий

нашого дослідження узгоджується з даними, на підставі яких автори вказують на важливість використання технології протравлення тканин [4], оскільки воно закладає основи для мікрOMEХАнічної ретенції та хімічної взаємодії між адгезивними системами та зубними субстратами [6]. Фосфорна кислота призводить до гомогенної демінералізації емалі та сприяє відкриттю дентинних каналців [22]. Розуміння впливу кислот на внутрішні властивості дентину є клінічно важливим для отримання інформації про те, як ці ефекти впливають на адгезію до дентину, довготривалу стабільність реставрацій [23].

Що стосується повітряно-абразивної підготовки поверхні твердих тканин зубів, то автори вказують на різний характер рисунку обробленої повітряним абразивом і протравленої емалі на користь останньої. Піскоструминна обробка емалі давала нерівну поверхню з клиноподібною шорсткістю та відсутністю чіткого малюнка. А коли емаль додатково протравлювали 35% фосфорною кислотою, це призводило до неоднорідного малюнка з нерівностями, оголенням кристалів і незначним розчиненням у периферійній області призм [24]. Наші результати підтверджують такі висновки стосовно емалі і доповнюють відомості щодо характеру поверхні дентину під додатковою дією кислот. Це, безумовно, мусить збільшувати можливість щільного контакту між адгезивом і тканинами зуба.

Повітряно-абразивна підготовка поверхні без протравлення на відміну від ротаційних інструментів призводить до збільшення площі поверхні, покращення поверхневої енергії і сприяє кращому мікрOMEХАнічному зчепленню адгезивів за рахунок глибшого їх проникнення в дентин [15, 25]. Такі висновки опосередковано підтверджують результати нашого дослідження. Отже, для оптимальної адгезії рекомендуються системи травлення та промивання не тільки при використанні методів препарування ротаційними інструментами, а ще і повітряно-абразивним.

Поточне дослідження було проведено в лабораторних умовах, *in vitro*. Проте реставровані зуби постійно знаходяться в оточенні хімічного і механічного середовища ротової порожнини, іноді агресивного. Тому виникає очевидна потреба проводити подальші дослідження щодо ефективності використання різних протоколів препарування і адгезивної підготовки твердих тканин зубів в клініці.

Висновки. 1. Найкращі умови мікрорельєфу для адгезії спостерігаються у зразків 4-ї групи, де поєднано повітряно-абразивну обробку з протравленням фосфорною кислотою. Така комбінація формує глибоку мікрошорсткість і значно збільшує площу контакту для зв'язування з адгезивом.

2. Мікрорельєф поверхні зразків 2-ї групи після препарування ротаційними інструментами з наступним протравленням також показує гарні умови для зчеплення, але структура тканин зуба менш відкрита.

3. Мікрорельєф поверхні 3-ї групи зразків (повітряно-абразивне препарування без протравлення) демонструє задовільний потенціал до адгезії, хоча кислота могла б його посилити.

4. Мікрорельєф поверхні 1-ї групи зразків (препарування ротаційними інструментами без протравлення) є найменш сприятливим для зчеплення: мінімальна шорсткість, відсутність мікропор, пригладжена структура.

Література:

1. Perdigão J. Current perspectives on dental adhesion: (1) Dentin adhesion—not there yet. *Japanese Dental Science Review*. 2020. Vol. 56, №1. P. 190–207. DOI: 10.1016/j.jdsr.2020.08.004.
2. Noenko I., Pavlenko O., Mochalov I. Comparative study of polymerization depth of three photocomposite dental filling materials for bulk fill restoration. *Eastern Ukrainian Medical Journal*. 2023. Vol. 11, №2. P. 205–213. DOI:10.21272/eumj.2023;11(2):205-213.
3. Ferracane J.L., Lawson N.C. Probing the hierarchy of evidence to identify the best strategy for placing

class II dental composite restorations using current materials. *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry*. 2021. Vol. 33, №1. P. 39–50. DOI:10.1111/jerd.12686.

4. Ayla Y., Pişkin B., Şen B.H. In vitro evaluation of microleakage properties of etched/non-etched air-abraded and conventionally prepared cavities: A scanning electron microscopy study. *Acta Stomatologica Cappadocia*. 2021. Vol. 1, №1. P. 52–67. DOI:10.54995/ASC.1.1.5.

5. Kui A., Buduru S., Labuneţ A., Sava S., Pop D., Bara I., Negucioiu M. Air particle abrasion in dentistry: an overview of effects on dentin adhesion and bond strength. *Dentistry Journal*. 2024. Vol. 13, №1. P. 16. DOI:10.3390/dj13010016.

6. Saikaew P., Sattabanasuk V., Harnirattisai C. et al. Role of the smear layer in adhesive dentistry and the clinical applications to improve bonding performance. *Japanese Dental Science Review*. 2022. Vol. 58. P. 59–66. DOI: 10.1016/j.jdsr.2021.12.001.

7. Frascaria M., Casinelli M., Mauro S. et al. Aesthetic rehabilitation in a young patient using a minimally invasive approach. A multidisciplinary case report. *European Journal of Paediatric Dentistry*. 2016. Vol. 17, No. 3. P. 234–238.

8. Yu H., Zhao Y., Li J. et al. Minimal invasive microscopic tooth preparation in esthetic restoration: a specialist consensus. *International Journal of Oral Science*. 2019. Vol. 11, No. 3. Article 31. DOI:10.1038/s41368-019-0057-y.

9. Brostek A.M., Walsh L.J. Minimal intervention dentistry in general practice. *Oral Health Dent Manag*. 2014. Vol. 13, No. 2. P. 285–294.

10. Fatima N., Mustilwar R., Paul R. et al. Minimal invasive dentistry: a review. *International Journal of Health Sciences*. 2022. Vol. 6, Suppl. 1. P. 13062–13077. DOI: 10.53730/ijhs.v6nS1.8280.

11. Graeber J.J. Microinvasive dentistry: clinical strategies and tools. London: JP Medical Ltd, 2020. 212 p.

12. Majeed M.M., Al-Tae L.A. Microinvasive treatment modalities in operative dentistry. University of Baghdad College of Dentistry, 2023. 32 p. URL: <https://codental.uobaghdad.edu.iq/wp-content/uploads/sites/14/2023/12/Maha-Maaroof.pdf>.

13. Szerszeń M., Higuchi J., Romelczyk-Baishya B. et al. Physicochemical properties of dentine subjected to microabrasive blasting and its influence on bonding to self-adhesive prosthetic cement in shear bond strength test: an in vitro study. *Materials*. 2022. Vol. 15, No. 4. Article 1476. DOI:10.3390/ma15041476.

14. Kruse A.B., Burkhardt A.S., Vach K. et al. Impact of air-polishing with erythritol on exposed root dentin: a randomized clinical trial. *International journal of dental hygiene*. 2025. Vol. 23, No. 1. P. 63–72. DOI:10.1111/idh.12835.

15. Lima V.P., Soares K.D.A., Caldeira V.S. et al. Airborne-particle abrasion and dentin bonding: systematic review and meta-analysis. *Operative dentistry*. 2021. Vol. 46, No. 1. P. E21–E33. DOI:10.2341/19-216-L.

16. Levartovsky S., Ferdman B., Safadi N., Hanna T., Dolev E., Pilo R. Effect of silica-modified aluminum oxide abrasion on adhesion to dentin, using total-etch and self-etch systems. *Polymers*. 2023. Vol. 15, No. 2. Article No. 446. DOI:10.3390/polym15020446.

17. Метрологія, стандартизація та управління якістю : навч. посіб. / Л. П. Клименко та ін. Миколаїв : Вид-во ЧДУ ім. Петра Могили, 2011. 243 с.

18. International Organization for Standardization. ISO 21920-2:2021. Geometrical Product Specifications (GPS) – Surface texture: Profile: Part 2: Terms, definitions and surface texture parameters. 2021. URL: <https://www.iso.org/standard/74157.html>.

19. International Organization for Standardization. ISO 21920-1:2021. Geometrical Product Specifications (GPS) – Surface texture: Profile – Part 1: Indication of surface texture. 2021. URL: <https://www.iso.org/standard/74156.html>.

20. Özcan M., Volpato C.A.M. Current perspectives on dental adhesion:(3) Adhesion to intraradicular dentin: Concepts and applications. *The Japanese Dental Science Review*. 2020. Vol. 56, № 1. P. 216–223. DOI:10.1016/j.jdsr.2021.12.001.

21. Soliman A., Rabie M., Hassan H.Y. Smear layer removal by 1% phytic acid after root canal preparation with three different rotary systems. *Open Access Macedonian Journal of Medical Sciences*. 2022. Vol. 10(D). P. 267–273. DOI:10.3889/oamjms.2022.9524.

22. Darzé F.M., Bridi E.C., França F.M.G., Amaral F.D., Turssi C.P., Basting R.T. Enamel and dentin etching with glycolic, ferulic, and phosphoric acids: demineralization pattern, surface microhardness, and bond strength stability. *Operative Dentistry*. 2023. Vol. 48, № 2. P. E35–E47. DOI:10.2341/21-143-L.

23. Anastasiadis K., Nassar M. The effect of different conditioning agents on dentin roughness and collagen structure. *Journal of Dentistry*. 2024. Vol. 148. Article ID 105222. DOI:10.1016/j.jdent.2024.105222.

24. Rifane T.O., Hirata R., Araújo-Neto V.G. et al. Effect of phosphoric acid etching and blasting with aluminum oxide on the enamel topography and adhesion of resin composite to intact or abraded enamel. *Dental Materials*. 2024. Vol. 40, № 11. P. e102–e111. DOI:10.1016/j.dental.2024.08.003.

25. Nihalani H., Borkar A.C., Shetty S.S. et al. Comparative evaluation of different surface pretreatment methods on the depth of penetration of adhesive resin in sandwich technique: A confocal laser scanning microscopy study. *Journal of Conservative Dentistry and Endodontics*. 2024. Vol. 27, № 6. P. 644–648. DOI:10.4103/JCDE.JCDE_329_23.

References:

1. Perdigão, J. (2020). Current perspectives on dental adhesion:(1) Dentin adhesion–not there yet. *Japanese Dental Science Review*, 56(1), 190–207. DOI:10.1016/j.jdsr.2020.08.004.

2. Noenko, I., Pavlenko, O., & Mochalov, I. (2023). Comparative study of polymerization depth of three photocomposite dental filling materials for bulk fill restoration. *Eastern Ukrainian Medical Journal*, 11(2), 205-213. DOI: 10.21272/eumj.2023;11(2):205-213.
3. Ferracane, J.L., & Lawson, N.C. (2021). Probing the hierarchy of evidence to identify the best strategy for placing class II dental composite restorations using current materials. *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry*, 33(1), 39-50. DOI: 10.1111/jerd.12686.
4. Ayla, Y., Pişkin, B., & Şen, B.H. (2021). In Vitro Evaluation of Microleakage Properties of Etched/Non-Etched Air-Abraded and Conventionally Prepared Cavities: A Scanning Electron Microscopy Study. *Acta Stomatologica Cappadocia*, 1(1), 52-67. DOI: 10.54995/ASC.1.1.5.
5. Kui, A., Buduru, S., Labuneţ, A., Sava, S., Pop, D., Bara, I., & Negucioiu, M. (2024). Air particle abrasion in dentistry: an overview of effects on dentin adhesion and bond strength. *Dentistry Journal*, 13(1), 16. DOI: 10.3390/dj13010016.
6. Saikaew, P., Sattabanasuk, V., Harnirattisai, C., Chowdhury, A.F.M.A., Carvalho, R., & Sano, H. (2022). Role of the smear layer in adhesive dentistry and the clinical applications to improve bonding performance. *Japanese Dental Science Review*, 58, 59-66. DOI:10.1016/j.jdsr.2021.12.001.
7. Frascaria, M., Casinelli, M., Mauro, S., Gatto, R., & Marzo, G. (2016). Aesthetic rehabilitation in a young patient using a minimally invasive approach. A multidisciplinary case report. *European Journal of Paediatric Dentistry*, 17(3), 234-238.
8. Yu, H., Zhao, Y., Li, J., Luo, T., Gao, J., Liu, H., & Zhou, X. (2019). Minimal invasive microscopic tooth preparation in esthetic restoration: a specialist consensus. *International journal of oral science*, 11(3), 31. DOI: 10.1038/s41368-019-0057-y.
9. Brostek, A.M., & Walsh, L.J. (2014). Minimal intervention dentistry in general practice. *Oral Health Dent Manag*, 13(2), 285-94.
10. Fatima, N., Mustilwar, R., Paul, R., Chauhan, P.S., Mostafa, D., & Dhopte, A. (2022). Minimal invasive dentistry: a review. *International Journal of Health Sciences*, 6(S1), 13062-13077. DOI: 10.53730/ijhs.v6nS1.8280.
11. Graeber, J.J. (2020). Microinvasive dentistry clinical strategies and tools. Microinvasive dentistry: clinical strategies and tools. *JP Medical Ltd*, 212 p.
12. Majeed, M.M., & Al-Tae, L.A. (2023). Microinvasive treatment modalities in operative dentistry. *University of Baghdad College of Dentistry*, 32 p. URL: (<https://codental.uobaghdad.edu.iq/wp-content/uploads/sites/14/2023/12/Maha-Maaroof.pdf>).
13. Szerszeń, M., Higuchi, J., Romelczyk-Baishya, B., Górski, B., Łojkowski, W., Pakieła, Z., & Mierzwińska-Nastalska, E. (2022). Physicochemical properties of dentine subjected to microabrasive blasting and its influence on bonding to self-adhesive prosthetic cement in shear bond strength test: an in vitro study. *Materials*, 15(4), 1476. DOI: 10.3390/ma15041476.
14. Kruse, A.B., Burkhardt, A.S., Vach, K., Hellwig, E., Woelber, J.P., Schlueter, N., & Ratka-Krüger, P. (2025). Impact of air-polishing with erythritol on exposed root dentin: a randomized clinical trial. *International journal of dental hygiene*, 23(1), 63–72. DOI: 10.1111/idh.12835.
15. Lima, V.P., Soares, K.D.A., Caldeira, V.S., Fariae-Silva, A.L., Loomans, B.A.C., & Moraes, R.R. (2021). Airborne-particle abrasion and dentin bonding: systematic review and meta-analysis. *Operative dentistry*, 46(1), E21-E33. DOI: 10.2341/19-216-L.
16. Levartovsky, S., Ferdman, B., Safadi, N., Hanna, T., Dolev, E., & Pilo, R. (2023). Effect of silica-modified aluminum oxide abrasion on adhesion to dentin, using total-etch and self-etch systems. *Polymers*, 15(2), 446. DOI:10.3390/polym15020446.
17. Klymenko, L.P., Pizintsali, L.V., Aleksandrovska, N.I., Yevdokymov, V.D. (2011). Metrologiia, standartyzatsiia ta upravlinnia yakistiu: navchalnyi posibnyk [Metrology, Standardization and Quality Management]. Mykolaiv: Vyd-vo ChDU im. Petra Mohyly, 243 [in Ukrainian].
18. International Organization for Standardization. (2021). ISO 21920-2:2021. Geometrical Product Specifications (GPS) – Surface texture: Profile: Part 2: Terms, definitions and surface texture parameters. ISO. URL: <https://www.iso.org/standard/74157.html>.
19. International Organization for Standardization. (2021). ISO 21920-1:2021. Geometrical product specifications (GPS) – Surface texture: Profile : Part 1: Indication of surface texture. ISO. URL: <https://www.iso.org/standard/74156.html>.
20. Özcan, M., & Volpato, C.A.M. (2020). Current perspectives on dental adhesion:(3) Adhesion to intraradicular dentin: Concepts and applications. *The Japanese Dental Science Review*, 56 (1), 216–223. DOI:10.1016/j.jdsr.2021.12.001.
21. Soliman, A., Rabie, M., & Hassan, H.Y. (2022). Smear layer removal by 1% phytic acid after root canal preparation with three different rotary systems. *Open Access Macedonian Journal of Medical Sciences*, 10(D), 267–273. DOI:10.3889/oamjms.2022.9524.
22. Darzé, F.M., Bridi, E.C., França, F.M.G., Amaral, F.D., Turssi, C.P., & Basting, R.T. (2023). Enamel and dentin etching with glycolic, ferulic, and phosphoric acids: demineralization pattern, surface microhardness, and bond strength stability. *Operative Dentistry*, 48(2), E35-E47. DOI:10.2341/21-143-L.
23. Anastasiadis, K., & Nassar, M. (2024). The effect of different conditioning agents on dentin roughness and collagen structure. *Journal of Dentistry*, 148, 105222. DOI:10.1016/j.jdent.2024.105222.

24. Rifane, T.O., Hirata, R., Araújo-Neto, V.G. et al. Effect of phosphoric acid etching and blasting with aluminum oxide on the enamel topography and adhesion of resin composite to intact or abraded enamel. *Dent Mater.* 2024;40(11):e102-e111. DOI: 10.1016/j.dental.2024.08.003.

25. Nihalani, H., Borkar, A.C., Shetty, S.S. et al. Comparative evaluation of different surface pretreatment methods on the depth of penetration of adhesive resin in sandwich technique: A confocal laser scanning microscopy study. *Journal of Conservative Dentistry and Endodontics.* 2024;27(6):644-648. DOI: 10.4103/JCDE.JCDE_329_23.