

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧНИЙ

УДК: 616.314-018.4:616.314.13-018.1]-073

Н.Л. Чухрай, В.А. Винар

МІКРОТВЕРДІСТЬ ЕМАЛІ ЗУБІВ ІЗ РІЗНИМИ РІВНЯМИ РЕЗИСТЕНТНОСТІ

Львівський національний медичний університет імені Данила Галицького

Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України

Механічна міцність зуба забезпечується на ультра-, мікро- і макрорівнях за рахунок його будови, наявності високоміцного тонкого поверхневого шару емалі, від якого значною мірою залежить її стійкість до дії різних карієсогенних чинників. Доведено, що поверхневий шар емалі має особливі фізичні та хімічні властивості, що відрізняє його від глибших шарів [1; 3-8;10;13].

Відомо, що механічні характеристики твердих тканин зуба залежать від різних факторів (особливості будови, групова належність, ступінь мінералізації, наявність каріозного процесу та ін.). За даними Г.В. Сороченко (2015) були встановлені низькі значення мікротвердості та модуля пружності незрілої емалі постійних зубів на поверхні та в підповерхневій ділянці в зонах горбка й екватора, а особливо в пришийковій ділянці. Це свідчить про недостатній рівень карієсрезистентності таких зубів і високий рівень розвитку карієсу [8].

Водночас, незважаючи на те, що протягом десятиліть вивчалися фізичні та хімічні властивості твердих тканин зубів, досі недостатньо вивчено низку тонких механізмів, що відбуваються в емалі при розвитку каріозного процесу. Усе це свідчить про необхідність подальшого дослідження властивостей емалі з метою опрацювання ефективних профілактичних заходів. Згідно з даними Y.R. Zhang et al. (2014) одним із інформативних критеріїв, що дозволяє оцінити структурно-функціональний стан твердих тканин зубів, є визначення мікротвердості емалі [14].

На сучасному рівні найточнішим, теоретично й експериментально обґрунтованим методом дослідження структурно чутливих характеристик матеріалів є метод визначення твердості шляхом втиснення тригранного індентора Берковича з наступним ченням результату з точністю до 1 нм (наноіндентування), який використовується в численних дослідженнях [10;12-13].

Проте в опрацьованих нами літературних джерелах результатів вивчення механічних властивостей емалі залежно від її резистентності до карієсу ми не знайшли. Тому вивчення механічних властивостей емалі постійних зубів залежно від резистентності до каріозного процесу є актуальним.

Мета дослідження – оцінка мікротвердості емалі постійних зубів залежно від рівня резистентності.

Матеріал і методи дослідження

Для визначення мікротвердості емалі використано

18 інтактних постійних зубів (перші премоляри 14-17-річних дітей) після закінчення їх вторинної мінералізації, що були видалені за ортодонтичними показаннями.

Функціональну резистентність емалі пацієнтів визначали за ТЕР-тестом [5]. Зуби були розподілені на три групи, емаль яких визначена як карієсрезистентна (ТЕР-тест – 1-3 бали) - 6 зубів, умовно-резистентна - (ТЕР-тест – 4-5 балів) - 5 зубів і карієсосприйнятлива (ТЕР-тест – 6 і більше балів) – 7 зубів.

Досліджувані зразки готували таким чином: після видалення зуби очищали від м'яких тканин, промивали під струменем води, зберігали в посудині з фізіологічним розчином у холодильнику. Підготовані препарати фіксували на предметному столику мікротвердоміра для стійкого розміщення за допомогою самотвердіючої акрилової пластмаси. Дослідження мікротвердості емалі проводили в ділянці екватора коронки за такими режимами: навантаження – 50 грам, швидкість навантаження – 5 грам/секунду, крок між уколами – 50 мкм, кількість уколів на один зразок – 5. Мікротвердість визначали в поверхневих шарах емалі в ділянці екватора коронки зуба.

Для визначення мікротвердості поверхневих шарів емалі постійних зубів застосовували метод динамічного індентування (наноіндентування) [2] на приладі "Мікрон-гамма" шляхом безперервного втискування твердого індентора (алмазної 3-гранної піраміди Берковича) в поверхню емалі.

Метод ґрунтується на автоматичній реєстрації діаграми навантаження $P = f(h)$, де P - навантаження на індентор, h - глибина його проникнення в поверхню досліджуваного матеріалу (рис. 1). Основна перевага методу полягає в тому, що твердість визначається в момент максимального заглиблення наконечника (h_{max}), тобто до початку пружного відновлення матеріалу. Діаграма дає інформацію про роботу, витрачену індентором на подолання опору матеріалу Апласт (площа під гілкою навантаження), і роботу, витрачену матеріалом на відновлення своїх властивостей Апруж (площа під гілкою розвантаження) (рис. 1). За цими даними визначають ступінь пластичності поверхні ϵ за формулою $\epsilon = (Апласт - Апруж)/Апласт$. Значення мікротвердості за Меєром знаходиться як відношення максимального навантаження P_{max} до площі проекції відбитка A ; модуль Юнга визначається як $E = S / 2\sqrt{\pi A}$, де S – тангенс кута нахилу початкової

ділянки кривої розвантаження. За діаграмою також визначали напруження другого роду (мікроскопічні, в

об'ємах, співмірних із розмірами зерен зуба).

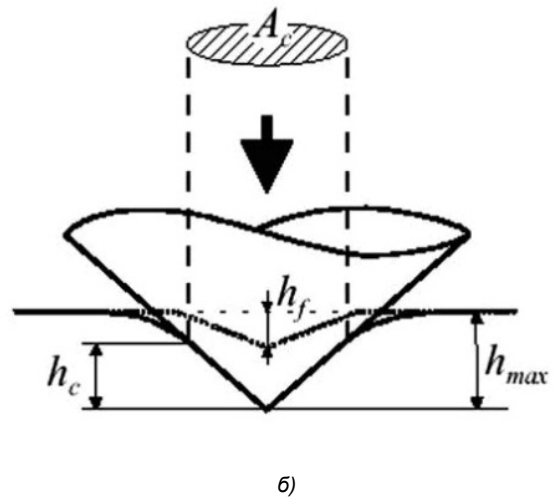
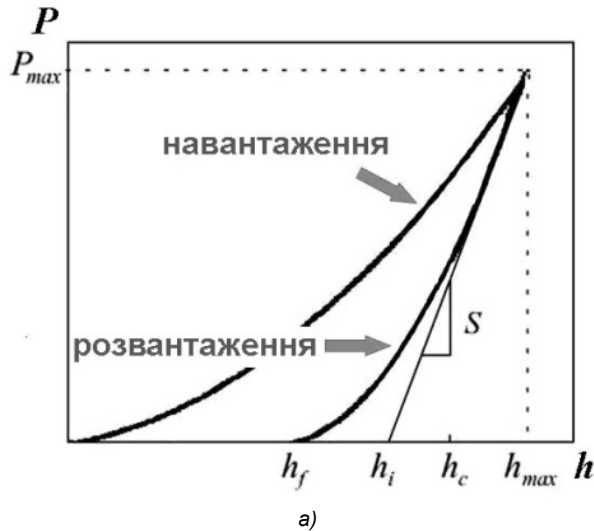


Рис. 1. Діаграма навантаження (а) і переріз відбитка (б) при динамічному інденуванні:
 h_{max} , h_c , h_f – максимальне заглиблення наконечника, пружна і пластична складові деформації;
 s – тангенс кута нахилу початкової ділянки гілки розвантаження

Дослідження виконано в науково-дослідній лабораторії Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України (зав. лабораторії, к.т.н. Винар В.А.) (м. Київ).

Для систематизації результатів дослідження використано таблиці MS Excel. Статистичне опрацювання проводили за допомогою пакета «STATISTIKA 12.0». Статистичну обробку результатів досліджень проводили з використанням t-критерію Ст'юдента.

Результати досліджень та їх обговорення

Результати проведених досліджень мікротвердості емалі зубів методом наноінденування свідчать, що середня мікротвердість емалі постійних зубів у ділянці

екватора становить $5,75 \pm 0,06$ ГПа (табл. 1). Отримані значення знаходяться в межах аналогічних показників за даними літератури [14]. При цьому виявлена різниця в показниках мікротвердості емалі залежної від рівня її резистентності. Так, значення мікротвердості карієсрезистентної емалі постійних зубів становить $7,85 \pm 0,10$ ГПа, що вище за аналогічні показники мікротвердості для умовно резистентної емалі - $6,45 \pm 0,06$ ГПа ($p < 0,001$) і суттєво вище для карієсоприйнятливої емалі ($2,95 \pm 0,22$ ГПа, $p < 0,001$). Це свідчить про взаємозв'язок резистентності емалі з мікротвердістю її поверхневих шарів.

Таблиця 1
 Мікротвердість і модуль пружності емалі зубів із різними рівнями резистентності емалі

Рівень резистентності емалі (значення ТЕР-тесту)	Hv (твердість за Мейєром), ГПа	E (модуль пружності), ГПа	Напруження 2 роду
карієсрезистентна емаль (ТЕР-тест= 1-3)	$7,85 \pm 0,10$	$119,77 \pm 1,30$	$1,42 \pm 0,02$
умовнорезистентна емаль (ТЕР-тест= 4-5)	$6,45 \pm 0,06^*$	$107,14 \pm 1,57^*$	$1,20 \pm 0,01^*$
карієсоприйнятлива емаль (ТЕР-тест=6 і більше)	$2,95 \pm 0,22^*$	$66,26 \pm 2,96^*$	$0,52 \pm 0,04^*$
Середнє	$5,75 \pm 0,06$	$97,72 \pm 0,74$	$1,05 \pm 0,01$

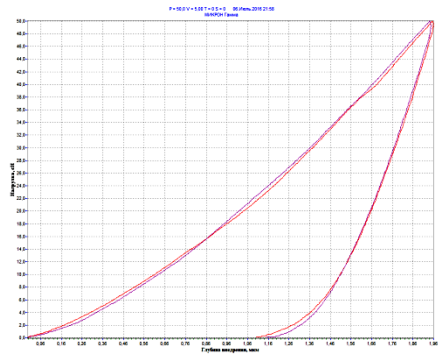
Примітка: * - $p < 0,001$.

Значення модуля пружності емалі постійних зубів дорівнювало, в середньому, $97,72 \pm 0,74$ ГПа та знаходилося в межах значень, які було отримано іншими дослідниками [14]. Найвище значення модуля пружності встановлено в зразках зубів із карієсрезистентною емаллю ($119,77 \pm 1,30$ ГПа), що на 10,54% і на 44,67% вище в порівнянні зі значенням цього показника в зразках зубів з умовнорезистентною і карієсоприйнятною емаллю ($p_1 < 0,001$, $p_2 < 0,001$). Отримані дані дають змогу зробити припущення, що модуль пружності емалі постійних зубів також залежить від

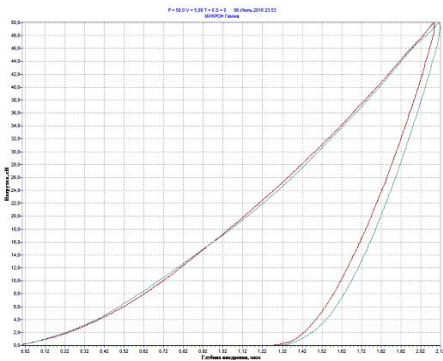
рівня резистентності емалі.

Порівняння значень напруження 2 роду (на мікrorівні) показало, що для емалі, резистентної до каріозного процесу, значення цього показника мікротвердості є лише на 15,49% вищим у порівнянні з умовнорезистентною, тоді як у порівнянні з карієсоприйнятною емаллю - на 63,38% ($p_1 < 0,001$, $p_2 < 0,001$).

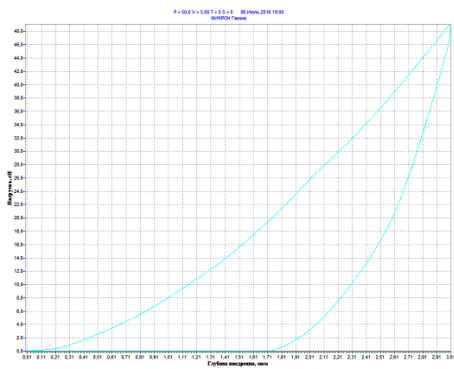
На рис. 2 представлені графічні діаграми впровадження у випадку карієсрезистентної, умовнорезистентної та карієсоприйнятної емалі.



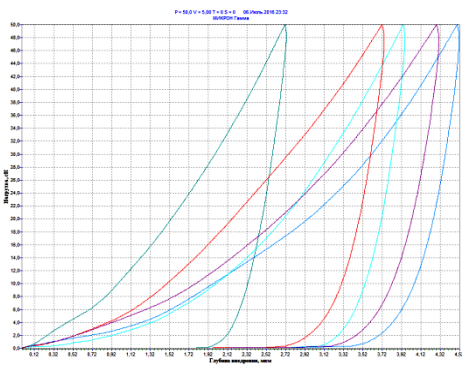
Графічна діаграма впровадження (ДВ)
у випадку карієсрезистентної емалі



Графічна діаграма впровадження (ДВ)
у випадку умовнорезистентної емалі



Графічна діаграма впровадження (ДВ)
у випадку карієсоприйнятливої емалі



Графічна діаграма впровадження (ДВ)
у випадку дуже низької резистентності емалі
(спостерігається великий розкид показників
мікротвердості емалі на діаграмі)

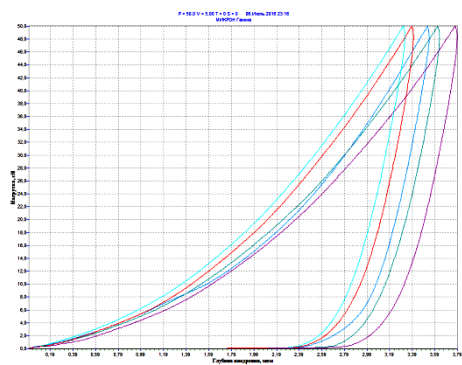


Рис. 2. - Графічні діаграми впровадження (ДВ) залежно від рівня резистентності емалі.

Висновки

Отже, результати проведеного дослідження свідчать про те, що мікротвердість емалі постійних зубів і модуль пружності за середніми значеннями становлять $5,75 \pm 0,06$ ГПа та $97,72 \pm 0,74$ ГПа, відповідно. Установлено залежність цих показників мікротвердості та модуля пружності залежно від рівня резистентності емалі. Найвищі значення мікротвердості та модуля пружності виявлено в зразках карієсрезистентної емалі, найнижчі - в зразках карієсоприйнятливої емалі. Тому з метою запобігання ураженню твердих тканин зуба з карієсоприйнятною емаллю доцільно призначати мінералізувальні засоби, які підвищують мікротвердість (карієсрезистентність) зуба.

Література

1. Вивчення мікротвердості емалі та дентину різців у нормі і при патологічних станах / [Є.В. Ковальов, М.А. Шундрік, Л.С. Шундрік, В.С. Амосова] // Український стоматологічний альманах. – 2012. - №3. – С. 1-7.
2. Головин Ю.И. Наноидентификация и механические свойства твердых тел в субмикроразмерах, тонких поверхностных слоях и пленках (обзор) // Физика твердого тела. - 2008. - Т.50, вып.12. - С.2116-2142.
3. Загорский В.А. Плотность твердых тканей / В.А. Загорский, И.М. Макеева, В.В. Загорский // Российский стоматологический журнал. – 2012. - №2. – С. 29-31.
4. Исследование механических свойств твердых тканей зуба методом наноидентификации / С.Н. Дуб, А.В. Борисенко, К.Е. Печковский [и др.] // Современная стоматология. – 2008. - №1(41). – С. 25-29.
5. Окушко В.Р. Методика выделения диспансерных групп школьников на основе донозологической диагностики кариеса / В.Р. Окушко, Л.И. Косарева // Стоматология. – 1983. - №6. – С. 8-10; Окушко В.Р., 1985.
6. Ремизов С.М. Определение микротвердости для сравнительной оценки зубной ткани здоровых и больных зубов человека / С.М. Ремизов // Стоматология. – 1965. - №3. – С. 33-37.
7. Ремизов С.М. Особенности развития кариеса в фиссурах зубов по данным микротвердости. Диагностика, лечение, профилактика кариеса зубов / С.М. Ремизов, Л.В. Звонникова, Н.А. Районов // Стоматология. – 1995. - №1. – С. 9-11.
8. Сороченко Г.В. Вивчення механічних властивостей емалі постійних зубів у період вторинної мінералізації методом наноіdentифікації / Г.В. Сороченко // Вісник наукових досліджень. - 2015. - №4. – С. 81-83.
9. Ярова С.И. Анализ показателей микротвердости эмали при различном состоянии твердых тканей и глубины микротрещин / С.И. Ярова, И.И. Заболотна // Запорожский медицинский журнал. – 2013. - №4(79). – С. 117-120.
10. Ionescu C. Nanomechanical properties of dental surfaces study as an irradiated treatment simulation / C. Ionescu, M.V. Perieanu, L.S. Craciun // Romanian Reports in Physics. – 2016. - Vol. 68, No. 2. - P. 693–701.
11. Kan Q. Oliver–Pharr indentation method in determining elastic moduli of shape memory alloys—A phase transformable material / Q. Kan, W. Yan, G. Kang // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. - 2013. – V. 61. – P. 2015–2033.
12. Milman Yu. Plasticity characteristic obtained through instrumental indentation / Yu. Milman, S. Dub, A. Golubenko // Mater. Res. Symp. Proc. — 2008. —1049. — P. 734–743.
13. Oliver W. C. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation measurements / W. C. Oliver, G. M. Pharr // J. Mater. Res. — 1992. — 7, No. 6. — P. 1564–1583.
14. Review of research on the mechanical properties of the human tooth / [Y.R. Zhang, W. Du, X.D. Zhou, H.Y. Yu] // International Journal of Oral Science. – 2014. - №6. – P. 61–69.

**Стаття надійшла
20.06.2017 р.**

Резюме

У дослідженні проведена оцінка мікротвердості емалі зубів методом наноіdentифікації. Отримані дані свідчать, що середня мікротвердість емалі постійних зубів у ділянці екватора становить $5,75 \pm 0,06$ ГПа, значення модуля пружності - $97,72 \pm 0,74$ ГПа, за середніми даними. Виявлена різниця в показниках мікротвердості емалі залежно від рівня її резистентності. Мікротвердість карієсрезистентної емалі постійних зубів становить $7,85 \pm 0,10$ ГПа, що вище за аналогічні показники мікротвердості для умовнорезистентної емалі - $6,45 \pm 0,06$ ГПа, і суттєво вище для карієсоприйнятливої емалі ($2,95 \pm 0,22$ ГПа). Це свідчить про взаємозв'язок резистентності емалі з мікротвердістю її поверхневих шарів. Найвище значення модуля пружності встановлено в зразках зубів із карієсрезистентною емаллю ($119,77 \pm 1,30$ ГПа), що на 10,54% і на 44,67% вище в порівнянні зі значенням цього показника в зразках зубів з умовнорезистентною і карієсоприйнятною емаллю. Отримані дані дають змогу зробити припущення, що модуль пружності емалі постійних зубів також залежить від рівня резистентності емалі. Тому з метою запобігання ураженню твердих тканин зуба з карієсоприйнятною емаллю доцільно призначати мінералізувальні засоби, які підвищують мікротвердість (карієсрезистентність) зуба.

Ключові слова: мікротвердість емалі, резистентність, постійні зуби.

Резюме

В исследовании проведена оценка микротвердости эмали зубов методом наноидентификации. Полученные данные свидетельствуют, что среднее значение микротвердости эмали постоянных зубов в области экватора коронки зуба составляет $5,75 \pm 0,06$ ГПа, значение модуля упругости - $97,72 \pm 0,74$ ГПа, по средним данным. Выявленная разница в показателях микротвердости эмали в зависимости от уровня ее резистентности. Микротвердость карієсрезистентной эмали постоянных зубов составляет $7,85 \pm 0,10$ ГПа, что выше аналогичных показателей микротвердости для условнорезистентной эмали - $6,45 \pm 0,06$ ГПа, и существенно выше для карієсвосприимчивой эмали ($2,95 \pm 0,22$ ГПа). Это свидетельствует о взаимосвязи резистентности эмали с микротвердостью ее поверхностных слоев.

Самое высокое значение модуля упругости получено в образцах зубов с карієсрезистентной эмалью ($119,77 \pm 1,30$ ГПа), что на 10,54% и на 44,67% выше по сравнению со значением данного показателя в образцах зубов с условнорезистентной и карієсвосприимчивой эмалью. Полученные данные позволяют предположить, что модуль упругости эмали постоянных зубов также зависит от уровня резистентности эмали. Поэтому с целью предотвращения поражения твердых тканей зуба с карієсвосприимчивой эмалью целесообразно назначать реминерализирующие средства с целью повышения микротвердости (карієсрезистентности) эмали.

Ключевые слова: микротвердость эмали, резистентность, постоянные зубы.

UDC 616.314-018.4:616.314.13-018.1]-073

MICROHARDNESS OF TOOTH ENAMEL WITH DIFFERENT LEVEL OF RESISTANCE

N.L. Chukhray, V.A. Vynar

Danylo Halytskiy Lviv National Medical University

Physics and Mechanics Institute by G.V. Karpenko of National Academy of Sciences of Ukraine

Summary

This study about the microhardness of tooth enamel is evaluated by nanoindentation. The data indicate that the average microhardness of the enamel of the permanent teeth in the region of the equator is $5,75 \pm 0,06$ Gpa, modulus of elasticity - $97,72 \pm 0,74$ GPa on average data. It was revealed difference in indices of enamel microhardness, depending on the level of its enamel. Microhardness cariesresistant enamel of the permanent teeth is $7,85 \pm 0,10$ GPa, which is higher than the corresponding mean for microhardness of relatively resistant enamel $6,45 \pm 0,06$ GPa and significantly higher than caries susceptible enamel ($2,95 \pm 0,22$ GPa). The relationship between enamel resistances with microhardness of its superficial layers is showed. The highest mean of elasticity was found in samples of teeth with enamel resistant to dental caries ($119,77 \pm 1,30$ GPa), which is on 10,54% and 44,67% higher compared with the value of the index in samples of tooth with conditionally resistant and caries susceptible enamel.

The received data make it possible to assume that the modulus of elasticity of enamel of permanent teeth also depends on the enamel resistance. Therefore, in order to prevent the injuring of hard tissues of caries susceptible enamel is advisable to appoint mineralizing means that can increase the microhardness (caries resistance) of teeth.

Key words: enamel microhardness, resistance, permanent teeth.