

Вадим ЧЕРНОБРОВЧЕНКО¹, аспірант
Костянтин ДЯДЮРА^{1,2}, д-р техн. наук, проф.,
Павло ПРОКОПОВИЧ², студент,
Івета ПАНДОВА³, PhD

¹ Сумський державний університет, м. Суми, Україна, e-mail: v.chernobrovchenko@tmvi.sumdu.edu.ua

² Національний університет «Одеська політехніка», м. Одеса, Україна, e-mail: dyadyura.k.o@op.edu.ua, pashaprokopovich@gmail.com

³ Department of Natural Sciences and Humanities, Faculty of Manufacturing Technologies of the Technical University of Košice with the seat in Prešov, Bayerova 1, 080 01 Prešov, Slovakia, e-mail: iveta.pandova@tuke.sk

ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПОЛІМЕРНИХ КОРОНОК, НАДРУКОВАНИХ НА 3D-ПРИНТЕРІ, ЩО ЗАСТОСОВУЮТЬСЯ В ЕСТЕТИЧНІЙ СТОМАТОЛОГІЇ

Анотація. Сьогодні естетика є невід’ємним елементом в дитячій стоматології. Коронка з нержавіючої сталі є часто використовуваним виробом завдяки її вартості, простоті препарування, але вона має металевий вигляд. Коронки з діоксиду цирконію використовують для лікування молочних зубів, щоб забезпечити більш міцну та естетичну альтернативу, але вони спричиняють знос зубів-антагоністів і мають високу вартість. 3D-друк дає можливість виготовляти коронки зі смоли і мають ряд переваг. Tera Harz TC-80DP компанії Graphy – стоматологічний матеріал для постійного протезування, проходить фактичні клінічні випробування, і його ефективність вже доведена в багатьох клінічних випадках по всьому світу.

Ключові слова: коронка, 3D-друк, нержавіюча сталь, полімер, механічні властивості.

Естетична стоматологія стала невід’ємним компонентом дитячої стоматології [1, 2]. Батьки не применшують естетичну цінність молочних зубів через те, що вони скоро випадуть. Коли потрібна реставрація зруйнованого зуба, вони сподіваються, що він відновить свою початкову форму та колір. Пластикові 3D-коронки можуть бути добрим вибором для дитячих стоматологів, які планують естетичну реставрацію коронки. На сьогоднішній день найбільш широко використовуваною дитячою коронкою є коронка з нержавіючої сталі, але вона викликала незадоволення деяких батьків через металевий вигляд [3]. Така коронка рекомендується через її довговічність, меншу кількість рецидивів карієсу, низьку вартість та простоту препарування та встановлення. Останнім часом збірні коронки з діоксиду цирконію почали використовувати для лікування молочних зубів, щоб забезпечити більш міцну та естетичну альтернативу. Однак ці коронки також мають ряд недоліків, таких як висока вартість та знос зубів-антагоністів. Тому необхідні постійні зусилля щодо розробки естетичних реставраційних матеріалів для молочних зубів, які можуть вирішити проблеми попередніх коронок та задовольнити естетичні потреби. З розвитком систем автоматизованого проектування/автоматизованого виробництва (CAD/CAM) системи тривимірного (3D) стоматологічного друку стають чудовими технологіями стоматології [4].

Мета даного дослідження полягала в тому, щоб оцінити адгезійну здатність і механічні властивості смоли для 3D-друку і порівняти її з іншими непрямими полімерними матеріалами для виготовлення коронок.

Підготовлено 60 зразків із 4 типів смол: дві смоли для 3D-друку, Graphy TC80DP (GP; Graphy Inc., Сеул, Республіка Корея) та Nextdent C&B MFH (NXT; NextDent, Soesterberg, Нідерланди); наногібридна кераміка MAZIC Duro (MZ; Vericom, Chuncheon, Республіка Корея); та кераміку з органічно модифікованого поліметилметакрилату (PMMA), VIPI Block Trilux (VIPI; VIPI Indústria, Pirassununga, SP, Бразилія). Середні значення міцності зв’язку на зсув (SBS) для GP, NXT, MZ та VIPI становили відповідно $23,29 \pm 3,88$, $26,14 \pm 4,67$, $25,41 \pm 4,03$ та $18,79 \pm 4,26$ МПа. Значення SBS істотно відрізнялися між смолами ($p < 0,0001$; рис. 1) і були значно нижчими в групі VIPI, ніж у групах NXT і MZ. Однак суттєвих відмінностей між групами GP, NXT і MZ не було. Діаграми, що показують SBS кожного матеріалу, представлені на рис. 2. Усі зразки, крім тих, що входять до групи VIPI, показали когезійні

руйнування. 20 % зразків у групі VIPI показали пошкодження клею, а 80 % показали змішані пошкодження (рис. 3). Репрезентативні SEM-зображення режимів руйнування кожної групи смол показані на рис. 4. Як показано на SEM-зображеннях, усі зразки GP, NXT і MZ з когезійними руйнуваннями були розбиті всередині зразка, з характерною більшою площею руйнування, ніж з'єднання область. Зразки VIPI з дефектами адгезії показали плоску поверхню з постійною текстурою. Хоча більшість зразків VIPI показали змішані руйнування, більшість змін, які відбулися всередині зразків, були когезивними лініями тріщин. Зразки VIPI зі змішаним руйнуванням і когезійним руйнуванням всередині цементу показали неправильну поверхню з частково плоскою ділянкою (рис. 4).

Materials	Shear Bond Strength (MPa)			p value
	Mean \pm SD	95% CI	Min/Median/Max	
GP	23.29 \pm 3.88	21.32;25.25	17.60/24.36/28.67	< 0.0001
NXT	26.14 \pm 4.67	23.77;28.50	16.29/27.80/30.25	
MZ	25.41 \pm 4.03	23.37;27.45	19.03/25.73/33.01	
VIPI	18.79 \pm 4.26	16.77;21.39	13.57/18.07/25.35	

p value from a Kruskal-Wallis test.

SD: standard deviation; CI: confidence interval; GP: Graphy TC-80DP; NXT: Nextdent C&B MFH; MZ: MAZIC Duro; VIPI: VIPI Block Trilux.

Рис. 1. Міцність зв'язку на зсув між смоляним цементом і дисками з різних смоляних непрямих матеріалів

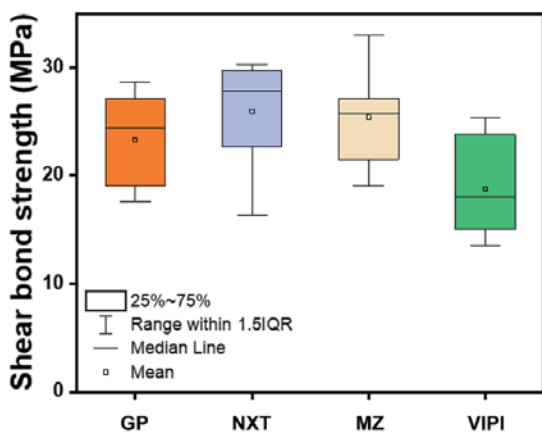


Рис. 2. Діаграми, що показують міцність зв'язку на зсув (МПа) різних смоляних матеріалів

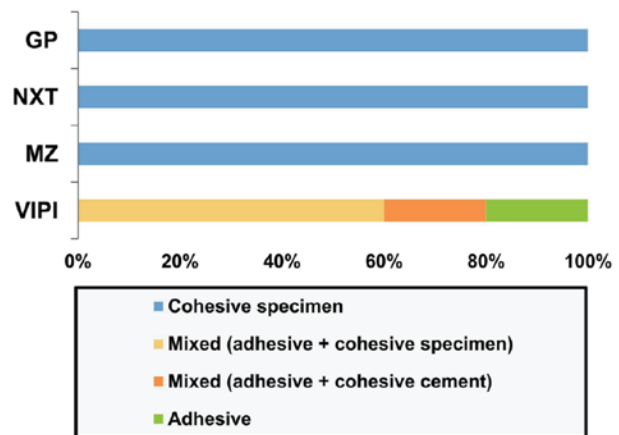


Рис. 3. Порівняння режимів руйнування різних груп смоляних матеріалів

Нижня та верхня межі кожного поля вказують на 25-й та 75-й проценти SBS у кожній групі відповідно; лінія всередині рамки позначає медіану; крапка всередині рамки позначає середнє; а нижній і верхній вуси представляють мінімальне і максимальне значення в межах 1,5-кратного міжквартильного діапазону (IQR). IQR: міжквартильний діапазон; GP: Graphy TC-80DP; NXT: Nextdent C&B MFH; MZ: MAZIC Duro; VIPI: VIPI Block Trilux.

Середні значення міцності зв'язку на зсув смоли для 3D-друку (GP і NXT) у цьому дослідженні були порівняні з середньою міцністю зчеплення при мікророзтягуванні 23,20 МПа, про яку повідомляють Pfeffer S. et al. який перевіряв міцність зв'язку на мікророзтяг між зразком смоли, надрукованим на 3D-принтері, і смолою подвійного затвердіння. Нині немає офіційних рекомендацій щодо сили зчеплення коронок. Більш того, міцність з'єднання, необхідна для фіксації ІРР, не вивчалася в клінічних лонгітюдних дослідженнях. Тим не менш, Мацумура та співавт. вважають 10...20 МПа мінімальною міцністю зчеплення, необхідною для протезів коронок. В інших дослідженнях стверджується, що для композитного ремонту SBS 18...25 МПа є клінічно прийнятним для збереження жувальної функції. Зважаючи на ці рекомендації та посилаючись на міцність зчеплення між цирконієвими коронками та полімерним цементом, виміряну в попередніх дослідженнях,

незважаючи на відсутність офіційних вимог, ми могли зробити висновок, що середні значення SBS усіх полімерних матеріалів у цьому дослідженні були в межах клінічно прийнятних значень. За винятком групи VIPI, яка мала змішані та адгезійні порушення, у всіх групах спостерігалася когезійна недостатність [5].

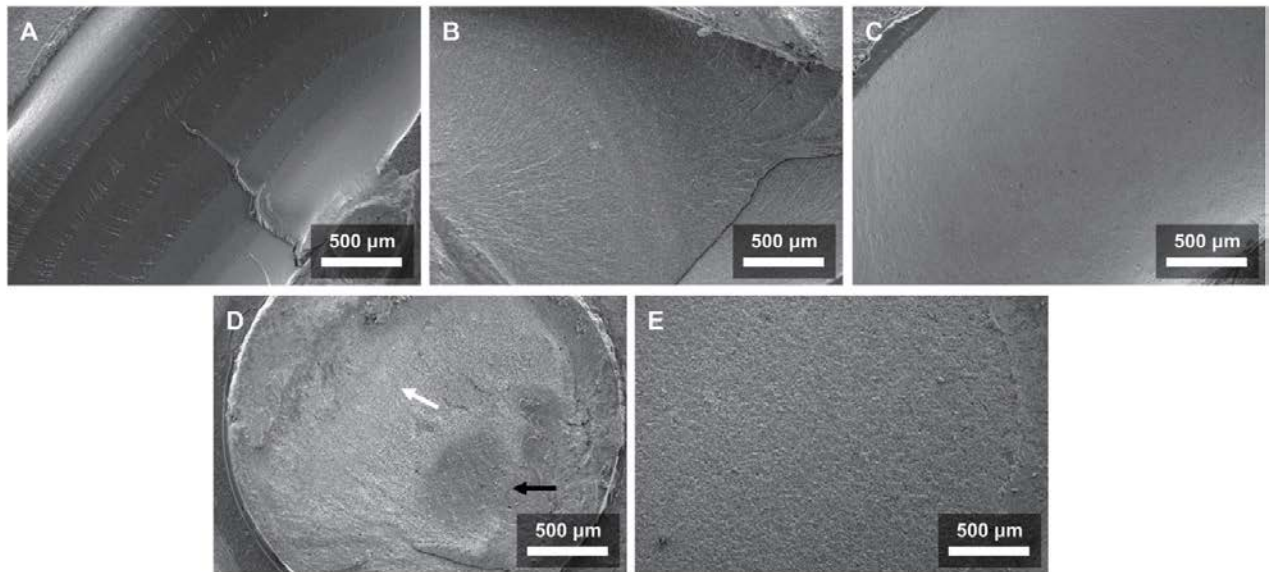


Рис. 4. Зображення зразків смоли скануючою електронною мікроскопією ($\times 50$). (A) GP з когезійним руйнуванням всередині зразка, (B) NXT з когезійним руйнуванням всередині зразка, (C) MZ з когезійним руйнуванням всередині зразка, (D) VIPI зі змішаним руйнуванням, включаючи когезійне руйнування всередині цементу (біла стрілка) і руйнування адгезиву (чорна стрілка), (E) VIPI з руйнуванням адгезиву.

В іншому дослідженні було протестовано дві смоли для 3D-друку, Graphy (GP) і NextDent (NXT), а також збірну цирконієву коронку NuSmile (NS) на стійкість до перелому, двовісну міцність на вигин (BFS) і динамічний механічний аналіз (DMA). На рис. 5 і 6 показано середній опір руйнації груп GP, NXT і NS. Однофакторний дисперсійний аналіз показав статистично значущу різницю у опорі переломів залежно від товщини коронки при GP ($F=6,215$, $p<0,005$) та NXT ($F=66,526$, $p<0,001$). Апостеріорний тест Тьюкі показав, що середнє значення групи GP було найвищим при товщині 0,4 мм і найнижчим при товщині 0,7 мм. Група NXT показала найвище середнє значення при товщині 1,0 мм і найнижче середнє при товщині 0,4 мм.

Thickness (mm)	Materials	Force Required for Fracture (N)						
		N	Mean	SD	Min	Max	95% CI	p Value
0.4	GP	15	1937.4	360.6	1326.0	2621.0	1737.7–2137.1	0.000 *
	NXT	15	1262.5	178.6	912.2	1526.4	1163.6–1361.4	
0.7	GP	15	1491.6	394.6	924.0	2197.2	1273.1–1710.2	0.103
	NXT	15	1634.4	289.3	1200.8	2025.8	1474.2–1794.7	
	NS	15	1742.3	237.5	1296.9	2151.0	1610.8–1873.9	
1.0	GP	15	1792.2	297.5	1279.1	2163.9	1627.4–1956.9	0.000 *
	NXT	15	2303.7	269.6	1848.2	2657.1	2154.4–2453.0	

* Statistically significant at $p \leq 0.05$.

Рис. 5. Середній опір руйнуванню за товщиною коронок.

Середні значення зусилля, необхідного для перелому коронок, надрукованих на 3D-принтері, у цьому дослідженні склали більше 1262,5 Н групи NXT і більше 1491,6 Н групи GP. Це свідчить про те, що опір руйнуванню 3D-друкованих полімерних коронок у цьому дослідженні перевищує природну силу прикусу, що створюється у всіх вікових групах. Порівняно коронку з діоксиду цирконію NS з 3D-надрукованими композитними коронками

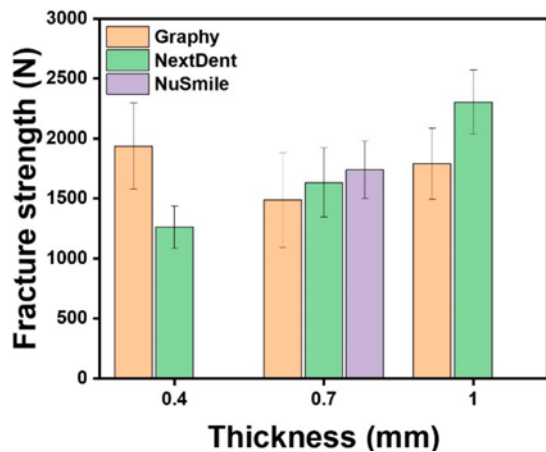


Рис. 6. Середня стійкість до руйнування різних експериментальних груп відповідно до товщини

цьому дослідженні найнижчий BFS був показаний NXT завтовшки 1,0 мм, який становив 177,8 МПа. При 50 МПа як GP, так і NXT показали можливість виживання більше 99,99 %, а при 150 МПа обидва матеріали показали можливість виживання більше 90,6 %. Таким чином, було підтверджено, що GP і NXT не руйнуються при 50 МПа, мінімальній вимозі міцності на вигин коронок на полімерній основі, а це означає, що всі зразки, що протестовані, можуть витримати необхідну клінічну міцність на вигин [4].

Таким чином, можна зробити висновок, що 3D-друковані полімерні коронки відповідають вимогам естетичної стоматології за адгезійною здатністю і механічними властивостями (стійкість до перелому, двовісна міцність на вигин (BFS), міцність зв'язку на зсув) і можуть стати новою альтернативою для відновлення молочних молярів, одночасно задовольняючи потребу в естетичності.

Література

1. Kapur A., Chawla H., Goyal A., Gaube K. An esthetic point of view in very young children. *J. Clin. Pediatr. Dent.* 2005, 30, 99–103.
2. Pani S.C., Saffan A.A., Al-Hobail S., Bin Salem F., Al-Furaih A., Al-Tamimi M. Esthetic concerns and acceptability of treatment modalities in primary teeth: A comparison between children and their parents. *Int. J. Dent.* 2016, 2016, 3163904.
3. Mathew MG, Roopa KB, Soni AJ, Khan MM, Kauser A : Evaluation of Clinical Success, Parental and Child Satisfaction of Stainless Steel Crowns and Zirconia Crowns in Primary Molars. *J Family Med Prim Care*, 9: 1418-1423, 2020.
4. Kim N. et al. Novel 3D Printed Resin Crowns for Primary Molars: In Vitro Study of Fracture Resistance, Biaxial Flexural Strength, and Dynamic Mechanical Analysis // *Children*. 2022. Vol. 9. P. 1445.
5. Kim S.Y., Shin Y., Kim I.H., & Song J.S. (2023). In Vitro Study on the Bond Strength Between 3D-Printed Resin and Resin Cement for Pediatric Crown Restoration// *Journal of the Korean academy of pediatric dentistry*. 2023.