

Key words: DNA fragmentation rare, DNA integrity, DNA damage, cryopreservation, rapid freezing, vitrification, human spermatozoa.

ORCID and contributionship:

Petrushko M. P.: [0000-0002-9608-0919](#)^{ADEF}
 Pugovkin A. Yu.: [0000-0003-4765-8849](#)^{ACDEF}
 Shevchenko O. S.: [0000-0001-6472-9456](#)^{BDF}
 Panasovskyi M. O.: [0000-0001-7152-0204](#)^{AEF}
 Babiychuk L. V.: [0000-0002-9380-6745](#)^{BF}
 Gapon G. O.: —^{BF}
 Yurchuk T. O.: [0000-0002-4993-9129](#)^{ADF}

Conflict of interest:

The Authors declare no conflict of interest.

Corresponding author

Petrushko Maryna Pavlivna
 Institute for Problems of Cryobiology and Cryomedicine of the National Academy of Sciences of Ukraine
 Ukraine, 61016, Kharkiv, 23 Pereyaslavskaya str.
 Tel.: +380506054605
 E-mail: petrushkomarina@gmail.com

A – Work concept and design, B – Data collection and analysis, C – Responsibility for statistical analysis, D – Writing the article, E – Critical review, F – Final approval of the article

Received 27.03.2023

Accepted 28.08.2023

DOI 10.29254/2077-4214-2023-3-170-98-109

UDC 616.314-085-74

Pompii O. O., Kerimova T. M., Pompi E. S.

MODERN ADHESIVE SYSTEMS AND TECHNIQUES OF THEIR APPLICATION FOR DIRECT RESTORATION OF HARD DENTAL TISSUES DEFECTS

Luhansk State Medical University (Rivne, Ukraine)

stifler2637@gmail.com

The widespread use of adhesive systems in many branches of modern dentistry is often accompanied by complications associated with their physical, mechanical and biological characteristics, mistakes at the stages of adhesive preparation, and the irrational choice of bonding agents for individual clinical situations. The work aimed to study the known physical, mechanical and clinical properties of modern adhesive systems, the latest trends and approaches to their improvement, and prospects for the further development of restorative dentistry. The most popular adhesive systems for direct photocomposite restorations remain bonds of the V and VII generations, which are used according to the classic protocols of total etching or self-etching, respectively. The obtained results of laboratory and clinical studies of these adhesive systems are often contradictory and emphasize the problem of creating a reliable connection between the photocomposite and the dentin of the teeth. In order to increase the clinical effectiveness of direct photocomposite restorations, universal adhesive systems and self-adhesive composites were developed, which have extended indications for use in certain clinical situations and significantly simplify adhesive preparation. However, the existing experience of using these new materials also demonstrates the development of complications, even in the short period of operation of restorations. To date, no adhesive systems have an optimal set of physico-mechanical and clinical characteristics for the direct restoration of defects in the hard tissues of teeth with photocomposite materials. The known results of laboratory and clinical studies of similar adhesive systems demonstrate significant discrepancies regarding the indicators of adhesive strength, the tightness of the dentin-photocomposite interface, the success of restorations, which is explained by the lack of standardized methods of their testing and clear criteria for evaluating clinical effectiveness.

Key words: adhesive systems, photocomposite restorations, adhesive preparation technique, clinical effectiveness, adhesive strength.

Connection of the publication with planned research works.

This work was carried out as part of the SRW of the Department of Stomatology, «Optimization of approaches to the diagnosis, treatment and prevention of dental diseases», state registration number 0120U104631.

Introduction.

In order to restore the anatomical shape of the teeth, photocomposite materials are widely used. A reliable connection of restorations and hard tooth tissues is provided by adhesive systems (AS), which are monomers of organic resins with small inorganic filler content. Several requirements are put forward to AS. In particular, they must be bioinert, have high physical and

mechanical characteristics in terms of creating a strong adhesive bond between heterogeneous substrates, reliably seal the dentinal tubules, not affect the quality of polymerization of the restorative material, provide good marginal fit, be convenient in work, etc. [1].

Despite the many-year history of developing AS and restorative materials, complications in the form of increased sensitivity, pulp inflammation, secondary caries, impaired marginal fit and photocomposite fixation are often registered after tooth restoration. The reasons for such cases are non-compliance with adhesive preparation protocols, excessive ingress of moisture on the hard tissues of the teeth or, on the contrary, their drying, shrinkage of filling materials, the destructive effect of dentin enzymes, bacteria, saliva on the hybrid layer [2, 3, 4].

Today, the main techniques of adhesive preparation before restorative treatment remain the total etching of hard tooth tissues with orthophosphoric acid solutions followed by washing with water or the use of self-etching ASs, which does not involve additional application of acid solutions on the surface of enamel and dentin [5, 6]. Reducing the number of stages of the adhesive protocol due to the use of AS VII generation reduces the risks of postoperative sensitivity of the teeth. It shortens the treatment time, but the strength of the adhesive connection is lower compared to ASs V generation, which, due to their physical and mechanical properties, remain the most popular in daily dental practice [3]. The effectiveness of AS V generation, in turn, depends more on the precise execution of the stages of adhesive preparation following the instructions of the manufacturing companies, which increases the risks of developing negative consequences for the dental pulp [7].

In view of modern scientific knowledge, one of the main problems of restoring the anatomical shape of teeth with direct restorations is creating a durable and reliable connection between the composite and the dentin of the teeth [6, 7, 8]. Further improvement of AS aims to ensure high integration of their monomers into the structures of hard dental tissues, simplifying the technique of working with them, improving physical and mechanical properties and reducing the harmful effect on dental pulp. Determining the optimal AS and its application protocol will allow the restoration of defects of hard dental tissues with photocomposite materials with a reliable prognosis, long service life and minimal risks of developing complications.

The aim of the study.

To analyze the known physico-mechanical and clinical properties of modern adhesive systems, the latest trends and approaches to their improvement, and prospects for the further development of restorative dentistry.

Main part.

Various laboratory studies are used, regulated by the international standard ISO 11405:2015 [9, 10], to determine AS's physical and mechanical characteristics. First of all, for AS testing, samples of extracted teeth are studied with photocomposite cylinders fixed on their surfaces, on which the strength of the adhesive bond to the hard tissues of the teeth is recorded by the methods of detachment and shear, the tightness of the restorations, the line of the adhesive connection and the created hybrid layer are examined by chromatography,

scanning electron, infrared or stereomicroscopy [5, 9, 11, 12].

Standardized methods of studying the physico-mechanical characteristics of AS are not without certain shortcomings, the main of which is the inconsistency of the sample sizes or the geometry of the adhesive connection line with clinical conditions, which leads to the unreliability of the obtained results [12]. To eliminate such discrepancies, microtensile tests were developed to determine the strength of the adhesive bond by tensile and shear methods, which make it possible to study the mechanical characteristics of small samples [12, 13]. In addition, they use technologies of artificial «ageing» of samples together with cyclic loading until their complete destruction [5, 12]. According to the ISO standard, the protocol for testing dental materials also includes 500 cycles of temperature changes from +5°C to +55°C, while in the oral cavity, temperature fluctuations occur, on average, 10,000 times during the year [12]. To optimize the conditions of laboratory studies to bring them closer to clinical samples, it is also possible to place the samples in an aggressive environment, for example, solutions of alcohol, sodium hypochlorite or artificial saliva. Acceleration of the artificial ageing process is achieved through mechanical and chemical influences and constant changes in the temperature of the environment in which the samples are located [12].

One of the debatable aspects affecting the reliability of restorations is the method of adhesive preparation of hard tooth tissues [14]. With the development of modern ASs, the issue of adhesion of photocomposite material to tooth enamel is almost solved because existing ASs ensure reliable retention of photocomposite materials to this substrate. The enamel etching time recommended by manufacturers is from 15 to 30 seconds, which, in turn, affects the strength of the adhesive bond. In addition, manufacturers' instructions on dental materials do not describe the need for preliminary enamel grinding before adhesive preparation [15]. However, a laboratory study proved that preliminary grinding with finely dispersed enamel burs increases the strength of the adhesive bond by 2.2 times [15]. At the same time, increasing the exposure time of orthophosphoric acid to 30 s allows for improving the marginal adhesion of restorations to enamel by 15% compared to similar etching for 15 s [1].

The dentin-photocomposite interface is considered to be a more problematic link in the restoration of tooth defects with direct restorations, because the leakiness of the adhesive connection in this area quickly leads to complications in the form of the development of secondary caries, impaired fixation of restorations, and pulp inflammation [12]. It is known that the reliability of this interface depends on the quality of the organization of the hybrid layer, which is formed by AS monomers and collagen fibres of dentin teeth. The result of the combined effect of cyclic chewing load, violation of the technique of adhesive preparation, and chemical degradation of AS under the influence of bacterial enzymes and saliva is the gradual degradation of the hybrid layer and a decrease in the strength of restorations [12].

In a laboratory study using a stereomicroscope, the width of the gap between the restoration and the dentin

was studied, which for modern ASs, according to the ISO standard, can vary from 1 μm to 18 μm [10]. In this study, domestic AS VII generation Jen-Unibond SE, Jendental, was used, and the average size of the gap between the restorative material and dentin was $3.89 \pm 0.58 \mu\text{m}$ [9]. In addition, the authors investigated the degree of microleakage when using the same adhesive system. They found that after exposure to the dye for 24 hours on samples of extracted teeth with restored cavities, no dye penetration at the photocomposite-hard tooth tissue interface was observed, which meets the requirements of the standard [9, 10].

Scanning electron microscopy (SEM) makes it possible to study the quality of contact of the photocomposite with dentine and tooth enamel in more detail when using different ASs [11]. Thus, in one study, it was determined that V and VII generation ASs can create uniform hybrid layers on the surface of normal dentin of samples of extracted teeth, while the penetration depth of ASs in the samples of both groups did not differ reliably and ranged from 2.5 μm to 5.1 μm in dentinal tubules and from 5.2 μm to 9.3 μm in enamel pores [11]. While the study of the marginal fit of the restorations used to restore Class V defects according to Black in laboratory conditions, the researchers determined microleakage of a 2% methylene blue solution at the photocomposite-cement interface, which was greater than the similar indicator in the photocomposite-enamel area after 200 thermocycles [16]. The average indicators of dye penetration along the gingival border of restorations were 2.63 ± 0.92 points for AS V generation and 2.66 ± 1.06 points for AS VII generation, while these values differed from each other unreliably ($p > 0.05$). In the area where the photocomposite adheres to the enamel, a smaller depth of microleakage was registered precisely for restorations made with the use of AS VII generation - 1.23 ± 1.04 points, while the indicators of AS V generation were unreliably ($p > 0.05$) higher and amounted to 1.36 ± 1.35 points [16].

With the help of confocal laser microscopy of samples of removed premolars with restored cavities of Class V, according to Black, the severity of microleakage in points for using different ASs was also determined. The samples using the V generation AS received the lowest number of points after a week of storage in an isotonic solution - 46.65 points, and the samples from the VII generation AS - 51.69 points [17]. It is worth noting that no microleakage was found in any of the samples studied in the study, which, in turn, determines the use of laser microscopy for the laboratory study of AS properties.

Regarding the tightness of the adhesive connection, the study results of samples formed from fragments of extracted teeth and AS of V, VI and VII generations are known. The degree of dye penetration, namely 50% silver nitrate solution, along the dentin-photocomposite interface after 24 hours of storage was, on average, $0.2506 \pm 0.023 \mu\text{m}$, $0.0611 \pm 0.028 \mu\text{m}$, and $0.2869 \pm 0.017 \mu\text{m}$ for AS V, VI and VII generations, respectively. However, after three months of storage, the smallest values were determined in the samples made using AS VII generation - $0.5544 \pm 0.017 \mu\text{m}$. This indicator was significantly ($p < 0.001$) lower than in the samples from AS V and VI generations - $0.7313 \pm 0.054 \mu\text{m}$ and $0.9113 \pm 0.031 \mu\text{m}$ [18].

The clinical effectiveness of applying nano-filled AS V generation according to the criteria of «marginal fit» and «marginal staining» of restorations in patients with carious lesions of II class, according to Black, within six months was 90.0% and 92.0%, respectively. At the same time, the success rate of restorations with AS VII generation according to the same criteria was 78.7% and 87.2%. After 12 months, the effectiveness of treatment in the same patients predictably decreased and amounted to 80.0% and 84.4% for restorations with AS V generation and with AS V generation - 62.2% and 67.6% [19].

Studying the strength characteristics of various ASs in laboratory conditions through microtensile tests also shows rather ambiguous results. The indicators of the maximum adhesive tensile strength of samples from AS V and VII generations obtained in the study after 24 hours differed unreliably ($p > 0.05$). They were, on average, $31.48 \pm 9.67 \text{ MPa}$ and $28.02 \pm 7.17 \text{ MPa}$, respectively. After six months of artificial ageing of the samples, similar values were equal to $28.94 \pm 5.57 \text{ MPa}$ and $31.44 \pm 5.57 \text{ MPa}$ and also did not show a significant ($p > 0.05$) difference [5].

Other researchers in laboratory conditions proved that dentin samples of extracted teeth with photocomposite cylinders adhesively fixed on them have significantly ($p < 0.05$) different adhesive strength, the indicators of which depend on the used AS. The maximum tensile strength index was recorded in the samples made using the VII generation AS, namely 21.7 MPa, which was 7.63 MPa higher than the corresponding value of the V generation AS samples [20].

The authors obtained opposite results in a similar work, where they determined the strength of the adhesive bond by the tensile method between dentin and flowable, universal and bulk-fill photocomposite materials using AS V and VII generations [6]. In addition, the influence of the polymerisation method of the filling material (Turbo Program or Soft-Start) on the strength of the bond with the dentin of the removed teeth was studied. According to the obtained data, the samples made using V generation AS showed significantly ($p < 0.05$) higher adhesive strength, regardless of group membership and photocomposite polymerization program [6].

Other scientists believe that the maximum clinical effectiveness of restoration of defects of hard dental tissues with direct restorations can be achieved using AS, both by the technique of total etching and self-etching [21]. According to the authors, the treatment result depends on a combination of several factors, in particular, double application of AS on the surface of dentin, immediate polymerization of AS after its application to the walls and bottom of the formed cavity, the use of additional substances to inhibit the action of dentin enzymes and strengthen the network of collagen fibres [21].

Contradictory results of laboratory studies of the characteristics of the most popular AS V and VII generations and a rather low level of success of tooth restorations in clinical conditions determine the need to develop the latest AS, which should combine the positive properties of bonds of previous generations, have a simple application technique and ensure a reliable adhesive bond in the long term using.

The result of this direction of development of restorative dentistry technologies was the creation of universal ASs. Depending on the clinical situation, these materials allow adhesive preparation, both in the concept of total etching and self-etching [21]. In cases requiring preferential adhesion of the photocomposite material to the enamel, it is recommended to use a complete etching of the tooth surfaces with a 30-40% solution of orthophosphoric acid, followed by careful washing with water and applying AS. At the same time, reliable retention to the dentin surface with a low probability of developing postoperative sensitivity will be ensured using AS without prior etching, similar to the VII generation adhesives. A significant number of universal ASs are represented on the Ukrainian dental market: Tetric Bond Universal, Ivoclar Vivadent; Universal Bond Quick, Kuraray Noritake; Prime&Bond Universal, Dentsply; Single Bond Universal, 3M ESPE; Kerr Optibond Universal, Kerr. Known research results confirming the clinical effectiveness of universal ASs after 36 months of operation of restorations in the lateral areas of the tooth rows at the level of 100% for the total etching technique and 95.2% for self-etching, on the other hand, restoration of teeth with AS V generation in the same period had no violations only in 76.2% of cases [22].

When studying the strength of the adhesive bond by the shear method and the presence of nanoleakage in the interfaces created by universal ASs in laboratory conditions, it was found that the use of these ASs according to the self-etching protocol provides the average strength of the dentin-photocomposite connection - 36.71 ± 4.87 MPa, which is 1.67 times greater than the similar indicator for total etching - 22.79 ± 4.68 MPa. In addition, with the help of scanning microscopy, nanoleakage was recorded in the area of the hybrid layer in all samples made using the total etching technique, unlike the other group, where cases of nanoleakage were not recorded at all [23]. The collapse of collagen fibres can explain a similar phenomenon after applying an orthophosphoric acid solution, which, in turn, does not allow AS monomers to infiltrate the collagen network fully. In addition, under the action of an acidic environment, a significant amount of matrix metalloproteinases are released, which contribute to the degradation of the hybrid layer and the disruption of the edge fit of the photocomposite.

During the laboratory study of the strength of the adhesive bond using microtensile tests of two universal ASs with different pH levels, it was established that the indicators of the samples made according to the protocols of total and self-etching did not differ reliably ($p > 0.05$) and amounted to 13.78 ± 5.11 MPa and 12.41 ± 3.71 MPa for AS with ultra-low acidity, 8.09 ± 2.33 MPa and 7.85 ± 2.27 MPa for AS with low acidity [24]. Also, the composition of monomers in universal AS significantly impacts the strength of adhesion to dentin. The average values of the adhesive bond strength of AS containing 10-methacryloyloxyethyl dihydrogen phosphate and 4-methacryloyloxyethyl trimellitate anhydride in laboratory conditions were more than two times higher, namely 17.55 ± 9.47 MPa, relative to the values of AS with traditional monomers - 7.88 ± 8.83 MPa [25].

In another work, the use of universal ASs using the total etching technique provided higher indicators of the

microtensile strength of the samples compared to similar ASs used according to the self-etching protocol [26]. After 24 hours after production, the samples formed using the etching gel (group I) showed tensile strength at 33.9 ± 3.2 MPa. On the other hand, in the samples made only with the use of universal AS (group II), this indicator was reliably ($p < 0.05$) lower and was 24.1 ± 2.6 MPa. However, the indicators of nanoleakage were also higher for the samples of the I group. In particular, they were $15.0 \pm 1.2\%$, and for the II group - $9.5 \pm 0.9\%$. Electron micrographs obtained with the help of SEM show a greater penetration of the adhesive into the dentinal tubules precisely in the sections of the samples prepared according to the total etching protocol [26].

Increasing the strength of the adhesive bond when using universal ASs can be ensured by using protocols of selective etching of dentin for 3 seconds and active rubbing of ASs into its surface. In the experiment, the average adhesive tensile strength of samples with photocomposite cylinders fixed on their surface using the self-etching technique after six months was 38.4 ± 5.3 MPa. However, when applying selective etching and active rubbing of AS for 15, 20 and 35 s, the same indicator was 45.6 ± 4.2 MPa, 47.9 ± 5.7 MPa and 48.3 ± 4.7 MPa, respectively [27]. Such results can be explained by forming a more pronounced hybrid layer due to deeper dentin demineralization.

In order to simplify the preparation of hard dental tissues for restoration and shorten the treatment period, universal ASs have been developed, which can be used in the "without waiting" mode, i.e., their polymerization is conducted immediately after application to the surface of the cavity [28]. According to the results of a randomized study, it was found that the clinical effectiveness of such tooth restorations after six months of use did not differ significantly ($p > 0.05$) from restorations made using universal AS, the polymerization of which was performed after 20 seconds, regardless of the adhesive preparation technique. After 18 months of operation, the proportion of successful restorations without disruption in patients in whom polymerization of AS was performed immediately was 100% and 90.9% for adhesive preparations in the mode of total etching and self-etching, respectively. At the same time, the efficiency of restorations with universal AS before polymerization, which was expected for 20 seconds, was found at 95.5% for total etching and 90.9% for the self-etching technique [28].

Self-adhesive composites (AS VIII generation) became minimally sensitive to the technique of adhesive preparation and the most convenient for everyday clinical use [21]. These composites are already widely represented on the Ukrainian market of dental materials, in particular, Vertise Flow, Kerr; Xeno IV, Dentsply; Filtek Supreme Plus Flow, 3M ESPE; Tetric EvoFlow, Ivoclar Vivadent. Using such materials involves the one-time application of photocomposite to the restorative surfaces of the teeth without the prior application of any additional solutions, which makes it impossible to make mistakes and shortens the treatment time. This technology determines the use of these materials not only as an adaptive part of direct restorations but also for fixation of orthopaedic structures and orthodontic devices, repair of ceramics, sealing of fissures and independent restoration of small carious cavities in permanent and

temporary teeth [29]. A significant disadvantage of self-adhesive composites is low adhesive strength to dentin, which is associated with imperfect formation of the hybrid layer. An increase in the strength of the adhesive bond with the use of similar ASs is achieved by pre-etching the hard tissues of the teeth [14]. In a laboratory study, it was established that treatment of dentin with orthophosphoric acid for 15 seconds increases the average adhesive strength by three times - 17.01 ± 5.02 MPa, compared to the standard use of a self-adhesive composite - 5.59 ± 3.34 MPa [14]. However, the use of pre-conditioning of the hard tissues of the teeth negates the advantages of self-adhesive composites and creates prerequisites for complications from the pulp.

In a similar study, the adhesive strength of a self-adhesive composite was studied under conditions of additional use of only etching gel (I group of samples), only primer (II group) or alternate application of orthophosphoric acid, primer and adhesive (III group) on the dentin surface of samples [30]. Indicators of microtensile strength after 24 hours of artificial ageing differed significantly ($p < 0.05$) and were 2.4 ± 0.8 MPa, 8.8 ± 0.8 MPa and 22.4 ± 0.3 MPa for I, II and III groups of samples, respectively. In the electron micrographs of the 1st group, a significant number of exposed collagen fibres, not impregnated with monomers of the self-adhesive composite, were determined, which creates conditions for their enzymatic and hydrolytic degradation and explains the lower strength of the adhesive bond. In other groups, on the contrary, free collagen fibres were not recorded. Instead, the formation of an organized hybrid layer with significant penetration of adhesive resins into the dentinal tubules was recorded [30].

Another factor affecting the clinical effectiveness of restorations is the AS polymerization mode [31]. In a clinical study, the authors recorded the lowest number of complications and the highest clinical efficiency at the level of 93.3% after 24 months in patients in whom AS polymerization was performed by stepwise light exposure to each wall and bottom of the formed cavities using a special nozzle on the light guide of the photopolymerizer [31]. The clinical efficiency of restorations performed using one-time light exposure or under the "soft start" mode on AS was 69.2% and 57.4%, respectively.

In order to reduce the polymerization stress in the photocomposite-dentin interface, simultaneous polymerization of AS and the first layer of the flowable photocomposite is proposed [1]. However, a laboratory study proved a significantly ($p < 0.001$) lower strength of the adhesive bond using this method of polymerization compared to the standard step-by-step method using AS V generation (by 8.14 MPa), VII generation (by 7.63 MPa) and universal AC (by 3.65 MPa) [20].

For a long time, the "gold standard" in adhesive dentistry has been considered a two-component AS V generation, which is used according to total etching [21]. At the same time, treatment of the dentin surface with orthophosphoric acid leads to the formation of a non-uniform hybrid layer and, as a result, a leaky line of the adhesive connection, a violation of the marginal fit, the development of postoperative sensitivity, secondary caries, etc. The efforts of manufacturing companies, aimed at preventing excessive demineralization of dentin by acid solutions and simplifying the adhesive preparation protocol, made it possible to develop self-

etching two- and one-component ASs of the VI and VII generations, which, at the same time, demonstrated significantly lower fixation strength of photocomposite materials to hard tissues teeth. The search for a material with an optimal balance between the strength of adhesion to dentin and the creation of a reliable hybrid layer with hermetic isolation of dentinal tubules is the main direction of further improvement of AS. The most famous results of this search were the introduction of universal AS and self-adhesive composites into clinical practice. However, the clinical effectiveness of these new materials remains controversial, even in studies with short follow-up periods.

Promising ways to improve the physicochemical and biological properties of AS appear to be changes in their application protocols, for example, selective etching of enamel and dentin, reduction of orthophosphoric acid exposure time, active application of adhesive, new polymerization modes, etc. On the other hand, a meaningful way to increase the clinical effectiveness of direct photocomposite restorations is the influence on the structural components and enzymes of the dentin itself, which are responsible for the structure of the hybrid layer when using any AS. Due to the modification of the AS composition or the preliminary application of substances to the dentin surface that can deactivate matrix metalloproteinases of dentin or improve the configuration of the collagen network, it is possible to create a highly organized hybrid layer that is not prone to catalytic esterase degradation, especially during the significant period of operation of the restorations.

Conclusions.

To date, no adhesive systems have an optimal set of physico-mechanical and clinical characteristics for restoring defects in hard dental tissues with photocomposite materials. The known results of laboratory and clinical studies of similar adhesive systems demonstrate significant discrepancies regarding the indicators of adhesive strength, the tightness of the dentin-photocomposite interface, the success of restorations, which is explained by the lack of standardized methods of their testing and clear criteria for evaluating clinical effectiveness.

Modern universal adhesive systems and self-adhesive composite materials make it possible to effectively restore the anatomical shape of teeth in specific clinical situations using defined protocols and require further study to expand the indications for their use and improve the prognosis of restorative treatment in the long term of use.

Prospects for further research.

Modifications of the composition of adhesive systems or protocols of adhesive preparation can improve the physical, mechanical and biological characteristics of the hybrid layer on the surface of the dentin, which, in turn, will increase the efficiency of restoration of defects in the hard tissue of teeth by photocomposite restorations and requires further study in laboratory and clinical conditions.

**СУЧАСНІ АДГЕЗИВНІ СИСТЕМИ ТА ТЕХНІКИ ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ ДЛЯ ПРЯМОГО
ВІДНОВЛЕННЯ ДЕФЕКТІВ ТВЕРДИХ ТКАНИН ЗУБІВ****Державний заклад «Луганський державний медичний університет» (м. Рівне, Україна)****stifler2637@gmail.com**

Широке використання адгезивних систем у багатьох галузях сучасної стоматології нерідко супроводжується виникненням ускладнень, пов'язаних з їх фізико-механічними та біологічними характеристиками, помилками на етапах адгезивної підготовки, нераціональним вибором бондингових агентів для окремих клінічних ситуацій. Метою роботи стало вивчення відомих фізико-механічних та клінічних властивостей сучасних адгезивних систем, новітніх тенденцій та підходів щодо їх удосконалення, перспектив подальшого розвитку реставраційної стоматології. Найбільш популярними адгезивними системами для прямих фотокомпозиційних реставрацій залишаються бонди V та VII поколінь, які використовують за класичними протоколами тотального протравлення або самопротравлення, відповідно. Отримані результати лабораторних та клінічних досліджень цих адгезивних систем нерідко мають суперечливий характер і підкреслюють проблему створення надійного зв'язку між фотокомпозитом та дентином зубів. З метою підвищення клінічної ефективності прямих фотокомпозиційних реставрацій були розроблені універсальні адгезивні системи та самоадгезивні композити, що мають розширені показання до застосування в певних клінічних ситуаціях і суттєво спрощують адгезивну підготовку. Однак наявний досвід використання цих новітніх матеріалів також демонструє розвиток ускладнень, навіть у короткі терміни експлуатації реставрацій. На сьогоднішній день відсутні адгезивні системи, які мають оптимальний набір фізико-механічних та клінічних характеристик для прямого відновлення дефектів твердих тканин зубів фотокомпозиційними матеріалами. Відомі результати лабораторних та клінічних досліджень аналогічних адгезивних систем демонструють суттєві розбіжності щодо показників адгезивної міцності, герметичності інтерфейсу дентин-фотокомпозит, успішності реставрацій, що пояснюється відсутністю стандартизованих методів їх випробувань та чітких критеріїв оцінювання клінічної ефективності.

Ключові слова: адгезивні системи, фотокомпозиційні реставрації, техніка адгезивної підготовки, клінічна ефективність, адгезивна міцність.

Зв'язок публікації з плановими науково-дослідними роботами.

Дана робота виконана в рамках НДР кафедри стоматології «Оптимізація підходів щодо діагностики, лікування та профілактики стоматологічних захворювань», № державної реєстрації 0120U104631.

Вступ.

З метою відновлення анатомічної форми зубів широко використовують фотокомпозиційні матеріали. Надійне з'єднання реставрацій та твердих тканин зубів забезпечують адгезивні системи (АС), які представлені мономерами органічних смол із невеликим вмістом неорганічного наповнювача. До АС висувають низку вимог, зокрема, вони повинні бути біоінертними, мати високі фізико-механічні характеристики в частині створення міцного адгезивного зв'язку між різнорідними субстратами, надійно герметизувати дентинні канальці, не впливати на якість полімеризації відновлювального матеріалу, забезпечувати гарне крайове прилягання, бути зручними в роботі тощо [1].

Незважаючи на багаторічну історію розвитку АС та реставраційних матеріалів після відновлення зубів нерідко реєструють ускладнення у вигляді підвищеної чутливості, запалення пульпи, виникнення вторинного карієсу, порушення крайового прилягання та фіксації фотокомпозита. Причинами таких випадків вважають недотримання протоколів адгезивної підготовки, надмірне потрапляння вологи на тверді тканини зубів або, навпаки, їх пересушування, усадку

пломбувальних матеріалів, руйнівну дію ферментів дентину, бактерій, слини на гібридний шар [2, 3, 4].

На сьогодні основними техніками адгезивної підготовки перед реставраційним лікуванням залишаються тотальне протравлення твердих тканин зубів розчинами ортофосфорної кислоти з подальшим промиванням водою або застосування самопротравлюючих АС, що не передбачає додаткової аплікації розчинів кислот на поверхні емалі та дентину [5, 6]. Зменшення кількості етапів адгезивного протоколу за рахунок використання АС VII генерації знижує ризики постопераційної чутливості зубів, скорочує час лікування, але міцність адгезивного з'єднання є нижчою в порівнянні з АС V покоління, які завдяки своїм фізико-механічним властивостям залишаються найбільш популярними на щоденному стоматологічному прийомі [3]. Ефективність АС V генерації, в свою чергу, більше залежить від прецизійного виконання етапів адгезивної підготовки, відповідно до інструкцій фірм-виробників, що підвищує ризики розвитку негативних наслідків для пульпи зубів [7].

З огляду на сучасні наукові знання, однією з основних проблем відновлення анатомічної форми зубів прямими реставраціями постає створення довговічного та надійного зв'язку між композитом і дентином зубів [6, 7, 8]. Подальше вдосконалення АС спрямоване на забезпечення високої інтеграції їх мономерів до структур твердих тканин зубів, спрощення техніки роботи з ними, підвищення фізико-механічних властивостей та зменшення шкідливого впливу на пульпу зубів. Визначення оптимальної АС

та протоколу її застосування дозволить відновлювати дефекти твердих тканин зубів фотокомпозиційними матеріалами з надійним прогнозом, тривалими термінами експлуатації та мінімальними ризиками розвитку ускладнень.

Мета дослідження.

Проаналізувати відомі фізико-механічні та клінічні властивості сучасних адгезивних систем, новітні тенденції та підходи щодо їх удосконалення, перспективи подальшого розвитку реставраційної стоматології.

Основна частина.

Для визначення фізико-механічних характеристик АС використовують різноманітні лабораторні дослідження, які регламентовані міжнародним стандартом ISO 11405:2015 [9, 10]. Насамперед з метою тестування АС проводять вивчення зразків видалених зубів з зафіксованими на їх поверхнях фотокомпозиційними циліндрами, на яких реєструють міцність адгезивного зв'язку до твердих тканин зубів методами відриву та зсуву, герметичність реставрацій, досліджують лінію адгезивного з'єднання та створений гібридний шар шляхом хроматографії, скануючої електронної, інфрачервоної або стереомікроскопії [5, 9, 11, 12].

Стандартизовані методи вивчення фізико-механічних характеристик АС не позбавлені певних недоліків, основними з яких називають невідповідність розмірів зразків або геометрії лінії адгезивного з'єднання клінічним умовам, що призводить до недостовірності отриманих результатів [12]. Для усунення подібних розбіжностей були розроблені мікротензивні тести для визначення міцності адгезивного зв'язку методами розтягу та зсуву, які дають змогу вивчити механічні характеристики зразків малого розміру [12, 13]. Крім того, використовують технології штучного «старіння» зразків разом з циклічним навантаженням до моменту їх повного руйнування [5, 12]. Відповідно до стандарту ISO, протокол тестування стоматологічних матеріалів також включає 500 циклів зміни температури від +5 °C до +55 °C, у той час, як у порожнині рота протягом року коливання температур проходить, у середньому, 10000 раз [12]. Для оптимізації умов лабораторних досліджень з метою їх наближення до клінічних зразки також можливо розташовувати в агресивному середовищі, наприклад, розчинах спирту, гіпохлориту натрію або штучній слині. Прискорення процесу штучного старіння досягається шляхом поєднання механічного, хімічного впливів та постійної зміни температури середовища в якому перебувають зразки [12].

Одним з дискусійних аспектів, що впливає на надійність реставрацій, вважають спосіб адгезивної підготовки твердих тканин зубів [14]. З розробкою сучасних АС майже вирішені питання адгезії фотокомпозиційного матеріалу до емалі зубів, адже існуючі АС забезпечують надійну ретенцію фотокомпозиційних матеріалів до цього субстрату. Рекомендований фірмами-виробниками час протравлення емалі складає від 15 с до 30 с, що, в свою чергу, впливає на міцність адгезивного зв'язку. До того ж в інструкціях виробників стоматологічних матеріалів не описана необхідність попереднього шліфування емалі перед проведенням адгезивної підготовки [15]. Втім, у лабораторному дослідженні було доведено, що

попереднє шліфування дрібнодисперсними борами емалі підвищує міцність адгезивного зв'язку у 2,2 рази [15]. Водночас збільшення до 30 с часу експозиції ортофосфорної кислоти дозволяє покращити крайове прилягання реставрацій до емалі на 15% відносно аналогічного протравлення протягом 15 с [1].

Більш проблемною ланкою відновлення дефектів зубів прямими реставраціями вважають інтерфейс дентин-фотокомполімер, адже негерметичність адгезивного з'єднання в цій ділянці швидко призводить до ускладнень у вигляді розвитку вторинного карієсу, порушення фіксації реставрацій та запалення пульпи [12]. Відомо, що надійність цього інтерфейсу залежить від якості організації гібридного шару, який утворюють мономер АС та колагенові волокна дентину зубів. Наслідком поєднаного впливу циклічного жувального навантаження, порушення техніки адгезивної підготовки, хімічної деградації АС під впливом ферментів бактерій та слини стає поступова деградація гібридного шару та зниження показників міцності реставрацій [12].

У лабораторному дослідженні за допомогою стереомікроскопа вивчали ширину проміжку між реставрацією та дентином, яка для сучасних АС, відповідно до стандарту ISO, може коливатися від 1 мкм до 18 мкм [10]. У цьому дослідженні використовували вітчизняну АС VII покоління Jen-Unibond SE, Jendental, і середня величина проміжку між відновлювальним матеріалом та дентином складала $3,89 \pm 0,58$ мкм [9]. Крім того, автори дослідили ступінь мікропідтікання при застосуванні цієї ж адгезивної системи та встановили, що після впливу барвника упродовж 24 годин на зразки видалених зубів з відреставрованими порожнинами, не було помічено проникнення барвника на межі фотокомполімер-тверді тканини зубів, що відповідає вимогам стандарту [9, 10].

Скануюча електронна мікроскопія (СЕМ) дозволяє більш детально вивчити якість контакту фотокомполімеру з дентином і емаллю зубів при застосуванні різних АС [11]. Так, в одному дослідженні було визначено, що АС V та VII поколінь здатні створювати рівномірні гібридні шари на поверхні нормального дентину зразків видалених зубів, при цьому глибина penetрації АС в зразках обох груп достовірно не відрізнялася та складала від 2,5 мкм до 5,1 мкм у дентинних каналцях та від 5,2 мкм до 9,3 мкм у порах емалі [11]. Протягом вивчення крайового прилягання реставрацій, якими відновлювали дефекти V класу за Блеку в лабораторних умовах, дослідники визначили мікропідтікання 2% розчину метиленового синього по межі фотокомполімер-цемент, яка була більшою за аналогічний показник у ділянці фотокомполімер-емаль після 200 термоциклів [16]. Середні показники penetрації барвника по ясенній межі реставрацій складала $2,63 \pm 0,92$ бали для АС V генерації та $2,66 \pm 1,06$ бали для АС VII генерації, при цьому між собою ці значення відрізнялись недостовірно ($p > 0,05$). У ділянці прилягання фотокомполімеру до емалі менша глибина мікропідтікання була зареєстрована саме для реставрацій, зроблених з застосуванням АС VII покоління – $1,23 \pm 1,04$ бали, а показники АС V покоління були недостовірні ($p > 0,05$) вищими та становили $1,36 \pm 1,35$ бали [16].

За допомогою конфокальної лазерної мікроскопії зразків видалених премолярів з відновленими порожнинами V класу за Блемом також визначили вираженість мікропідтікань в балах за використання різних АС. Зразки, виготовлені з застосуванням АС V генерації, отримали найменшу кількість балів через тиждень зберігання в ізотонічному розчині – 46,65 бали, зразки з АС VII покоління – 51,69 балів [17]. Звертає увагу, що в жодному зразку, які вивчали в дослідженні, не було встановлено відсутності мікропідтікань, що, в свою чергу, обумовлює застосування лазерної мікроскопії для лабораторного вивчення властивостей АС.

Стосовно герметичності адгезивного з'єднання відомі результати дослідження зразків, сформованих з фрагментів видалених зубів та АС V, VI та VII генерацій. Ступінь проникнення барвника, а саме 50% розчину нітрату срібла, по межі інтерфейсу дентин-фотокомпозит через 24 години зберігання складала, в середньому, $0,2506 \pm 0,023$ мкм, $0,0611 \pm 0,028$ мкм та $0,2869 \pm 0,017$ мкм для АС V, VI та VII поколінь, відповідно. Однак через 3 місяці зберігання найменші значення визначили в зразках, виготовлених з використанням АС VII покоління – $0,5544 \pm 0,017$ мкм. Цей показник був достовірно ($p < 0,001$) нижче, ніж у зразках з АС V та VI поколінь – $0,7313 \pm 0,054$ мкм та $0,9113 \pm 0,031$ мкм [18].

Клінічна ефективність застосування наноаповненої АС V генерації за критеріями «крайове прилягання» і «крайове забарвлення» реставрацій у пацієнтів з каріозними ураженнями II класу за Блемом у термін 6 місяців складала 90,0% та 92,0%, відповідно. У той же час, успішність відновлень з АС VII генерації за тими ж критеріями становила 78,7% та 87,2%. Через 12 місяців ефективність лікування у цих же пацієнтів прогнозовано знизилась і складала для реставрацій з АС V генерації 80,0% та 84,4%, з АС V генерації – 62,2% та 67,6% [19].

Вивчення характеристик міцності різних АС у лабораторних умовах шляхом мікротензивних випробовувань також демонструє доволі неоднозначні результати. Отримані в дослідженні показники максимальної адгезивної міцності на розтяг зразків з АС V та VII генерацій через 24 години відрізнялись недостатньо ($p > 0,05$) і становили, в середньому, $31,48 \pm 9,67$ МПа і $28,02 \pm 7,17$ МПа, відповідно. Після 6 місяців штучного старіння зразків аналогічні значення вже дорівнювали $28,94 \pm 5,57$ МПа та $31,44 \pm 5,57$ МПа і також не демонстрували достовірної ($p > 0,05$) різниці [5].

Інші дослідники в лабораторних умовах довели, що зразки дентину видалених зубів з адгезивно зафіксованими на них фотокомпозитними циліндрами мають достовірно ($p < 0,05$) різну адгезивну міцність, показники якої залежать від використаної АС. Максимальний показник міцності на розтяг зафіксували в зразках, виготовлених з застосуванням АС VII генерації, а саме 21,7 МПа, що на 7,63 МПа перевищував відповідне значення зразків з АС V генерації [20].

Протилежні результати отримали автори в схожій роботі, де визначили міцність адгезивного зв'язку методом розтягу між дентином та текучим, універсальним і «bulk-fill» фотокомпозиційними матеріалами за використання АС V та VII генерацій [6]. До того ж був вивчений вплив способу полімеризації плом-

бувального матеріалу (Turbo Program або Soft-Start) на силу зв'язку з дентином видалених зубів. Відповідно до отриманих даних, зразки, виготовлені з використанням саме АС V покоління, демонстрували достовірно ($p < 0,05$) вищі показники адгезивної міцності, незалежно від групової приналежності та програми полімеризації фотокомпозита [6].

Інші науковці вважають, що максимальної клінічної ефективності відновлення дефектів твердих тканин зубів прямими реставраціями можна досягти з використанням АС, як за технікою тотального протравлення, так і самопротравлення [21]. На думку авторів, результат лікування залежить від поєднання деяких факторів, зокрема, подвійного нанесення АС на поверхню дентину, негайної полімеризації АС після її аплікації на стінки та дно сформованої порожнини, використання додаткових речовин для інгібіції дії ферментів дентину та зміцнення сітки колагенових волокон [21].

Суперечливі результати лабораторних досліджень характеристик найбільш популярних АС V та VII генерацій і доволі низький рівень успішності відновлень зубів в клінічних умовах обумовлює необхідність розробки новітніх АС, які повинні поєднати позитивні властивості бондів попередніх поколінь, мати просту техніку застосування та забезпечити надійний адгезивний зв'язок у тривалі терміни експлуатації.

Результатом цього напрямку розвитку технологій реставраційної стоматології стало створення універсальних АС. Застосування цих матеріалів дозволяє проводити адгезивну підготовку, як у концепції тотального протравлювання, так і самопротравлення, залежно від клінічної ситуації [21]. У випадках, що потребують переважної адгезії фотокомпозиційного матеріалу до емалі, рекомендовано застосування тотального протравлення поверхонь зуба 30-40% розчином ортофосфornoї кислоти з наступним дбайливим промиванням водою та нанесенням АС. Водночас надійну ретенцію до поверхні дентину з низькою вірогідністю розвитку постопераційної чутливості забезпечить аплікація АС без попереднього протравлення, аналогічно адгезивам VII генерації. На стоматологічному ринку України представлена значна кількість універсальних АС: Tetric Bond Universal, Ivoclar Vivadent; Universal Bond Quick, Kuraray Noritake; Prime&Bond Universal, Dentsply; Single Bond Universal, 3M ESPE; Kerr Optibond Universal, Kerr. Відомі результати дослідження, що підтверджують клінічну ефективність універсальних АС через 36 місяців експлуатації реставрацій у бічних ділянках зубних рядів на рівні 100% для техніки тотального протравлення та 95,2% для самопротравлення натомість відновлення зубів з АС V покоління в той же термін не мали порушень лише в 76,2% випадків [22].

При вивченні міцності адгезивного зв'язку методом зсуву та наявності нанопідтікань в інтерфейсах, створених універсальними АС в лабораторних умовах з'ясували, що використання цих АС за протоколом самопротравлення забезпечує середню силу з'єднання дентин-фотокомпозит – $36,71 \pm 4,87$ МПа, яка в 1,67 рази більше аналогічного показника за тотального протравлення – $22,79 \pm 4,68$ МПа. Крім того, за допомогою скануючої мікроскопії зафіксували нано-підтікання в ділянці гібридного шару в усіх зраз-

ках, виконаних з застосуванням техніки тотального протравлення, на відміну від іншої групи, де випадків нанопідтікання не реєстрували зовсім [23]. Подібне явище можливо пояснити колапсом колагенових волокон після аплікації розчину ортофосфорної кислоти, що, в свою чергу, не дозволяє мономерам АС інфільтрувати колагенову сітку в повному обсязі. Крім того, під дією кислого середовища вивільняється значна кількість матриксних металопротеїназ, які сприяють деградації гібридного шару та порушенню крайового прилягання фотокомпозиту.

Під час лабораторного дослідження міцності адгезивного зв'язку шляхом мікротензивних тестів двох універсальних АС з різним рівнем рН було встановлено, що показники зразків, виготовлених за протоколами тотального та самопротравлення достовірно ($p > 0,05$) не відрізнялися і складали $13,78 \pm 5,11$ МПа та $12,41 \pm 3,71$ МПа для АС з ультра-низькою кислотністю, $8,09 \pm 2,33$ МПа та $7,85 \pm 2,27$ МПа для АС з низькою кислотністю [24]. Також значний вплив на міцність адгезії до дентину відіграє склад мономерів в універсальній АС. Середні значення сили адгезивного зв'язку АС, що містять 10-метакрилоїлоксіетилдигідрофосфат та 4-метакрилоїлоксіетил тримелітату ангідрид у лабораторних умовах були більш ніж в 2 рази вищими, а саме $17,55 \pm 9,47$ МПа, відносно показників АС з традиційними мономерами – $7,88 \pm 8,83$ МПа [25].

В іншій роботі, застосування універсальних АС за технікою тотального протравлення забезпечило вищі показники мікротензивної міцності зразків щодо аналогічних АС, використаних за протоколом самопротравлення [26]. Через 24 години після виготовлення зразки, сформовані з використанням травильного гелю (I група), демонстрували міцність на розтяг на рівні $33,9 \pm 3,2$ МПа натомість в зразках, зроблених тільки з застосуванням універсальної АС (II група), цей показник був достовірно ($p < 0,05$) нижчим і складав $24,1 \pm 2,6$ МПа. Однак показники нанопідтікання також були вищими для зразків I групи, зокрема, вони складали $15,0 \pm 1,2\%$, а для II групи – $9,5 \pm 0,9\%$. На електронних мікрофотографіях, отриманих за допомогою СЕМ, зафіксовано більшу пенетрацію адгезиву в дентинні каналці саме в шліфах зразків, виготовлених за протоколом тотального протравлення [26].

Підвищення міцності адгезивного зв'язку при застосуванні універсальних АС можна забезпечити використанням протоколів селективного протравлення дентину протягом 3 секунд та активного втирання АС у його поверхню. В експерименті, середня адгезивна міцність на розтяг зразків з зафіксованими на їх поверхні фотокомпозитними циліндрами за технікою самопротравлення через 6 місяців становила $38,4 \pm 5,3$ МПа, однак при застосуванні селективного протравлення та активного втирання АС протягом 15, 20 та 35 с цей же показник становив – $45,6 \pm 4,2$ МПа, $47,9 \pm 5,7$ МПа та $48,3 \pm 4,7$ МПа, відповідно [27]. Подібні результати можна пояснити утворенням більш вираженого гібридного шару завдяки глибшій демінералізації дентину.

З метою спрощення підготовки твердих тканин зубів до реставрації та скорочення термінів лікування розроблені універсальні АС, які можливо використовувати в режимі «без очікування», тобто про-

водити їх полімеризацію одразу після нанесення на поверхні порожнини [28]. За результатами рандомізованого дослідження було з'ясовано, що клінічна ефективність таких відновлень зубів через 6 місяців користування достовірно ($p > 0,05$) не відрізнялася від реставрацій, виготовлених з використанням універсальної АС, полімеризацію якої проводили через 20 с, незалежно від техніки адгезивної підготовки. Після 18 місяців експлуатації частка успішних реставрацій без порушень у пацієнтів, в яких полімеризацію АС проводили негайно, складала 100% та 90,9% для адгезивної підготовки в режимі тотального протравлення та самопротравлення, відповідно. Водночас ефективність реставрацій з універсальною АС перед полімеризацією якої очікували 20 с знаходили на рівні 95,5% для тотального протравлення та 90,9% для техніки самопротравлення [28].

Мінімально чутливими до техніки адгезивної підготовки та найбільш зручними для повсякденного клінічного використання стали самоадгезивні композити – АС VIII генерації [21]. Ці композити вже широко представлені на українському ринку стоматологічних матеріалів, зокрема, Vertise Flow, Kerr; Xeno IV, Dentsply; Filtek Supreme Plus Flow, 3M ESPE; Tetric EvoFlow, Ivoclar Vivadent. Застосування таких матеріалів передбачає одномоментне нанесення фотокомпозита на відновлювальні поверхні зубів без попередньої аплікації будь-яких додаткових розчинів, що унеможливорює вірогідність помилок та скорочує час лікування. Подібна технологія обумовлює використання цих матеріалів не лише як адаптивну частину прямих реставрацій, а й для фіксації ортопедичних конструкцій та ортодонтичних апаратів, ремонту кераміки, герметизації фісур та самостійного відновлення невеликих за об'ємом каріозних порожнин у постійних та тимчасових зубах [29]. Суттєвим недоліком самоадгезивних композитів вважають низьку адгезивну міцність до дентину, що пов'язана з недосконалим формуванням гібридного шару. Підвищення міцності адгезивного зв'язку за використання подібних АС досягають шляхом попереднього протравлення твердих тканин зубів [14]. У лабораторному дослідженні було встановлено, що обробка дентину ортофосфорною кислотою протягом 15 с підвищує середню адгезивну міцність утричі – $17,01 \pm 5,02$ МПа, у порівнянні з стандартним використанням самоадгезивного композита – $5,59 \pm 3,34$ МПа [14]. Втім, застосування попереднього кондиціонування твердих тканин зубів нівелює переваги самоадгезивних композитів та створює передумови для виникнення ускладнень з боку пульпи.

У подібному дослідженні вивчали адгезивну міцність самоадгезивного композиту за умов додаткового використання тільки травильного гелю (I група зразків), тільки праймеру (II група) або почергового нанесення ортофосфорної кислоти, праймеру та адгезиву (III група) на поверхню дентину зразків [30]. Показники мікротензивної міцності через 24 години штучного старіння відрізнялись достовірно ($p < 0,05$) і складали $2,4 \pm 0,8$ МПа, $8,8 \pm 0,8$ МПа та $22,4 \pm 0,3$ МПа для I, II та III груп зразків, відповідно. На електронних мікрофотографіях I групи визначали значну кількість оголених колагенових волокон, неімпрегнованих мономерами самоадгезивного композиту, що створює умови для їх ферментної та гідролітичної дегра-

дації та пояснює нижчу міцність адгезивного зв'язку. В інших групах, навпаки, не було зафіксовано вільних колагенових волокон натомість реєстрували формування організованого гібридного шару зі значною penetрацією адгезивних смол до дентинних каналців [30].

Ще одним фактором, який впливає на клінічну ефективність реставрацій, вважають режим полімеризації АС [31]. У клінічному дослідженні автори зафіксували найменшу кількість ускладнень та найвищу клінічну ефективність на рівні 93,3% через 24 місяці в пацієнтів, у яких полімеризацію АС проводили поетапним світловим впливом на кожну стінку та дно сформованих порожнин за допомогою спеціальної насадки на світловод фотополімеризатора [31]. Клінічна ефективність реставрацій, виконаних шляхом одномоментного світлового впливу або за режимом «м'який старт» на АС, складала 69,2% та 57,4%, відповідно.

З метою зменшення полімеризаційного стресу в ділянці інтерфейсу фотокомпозит-дентин запропонована одночасна полімеризація АС та першого шару текучого фотокомпозита [1]. Однак у лабораторному дослідженні доведена достовірно ($p < 0,001$) нижча міцність адгезивного зв'язку за такого способу полімеризації в порівнянні зі стандартною поетапною методикою за використання АС V генерації (на 8,14 МПа), VII покоління (на 7,63 МПа) та універсальної АС (на 3,65 МПа) [20].

Тривалий час «золотим стандартом» в адгезивній стоматології вважають двокомпонентні АС V генерації, які застосовують за концепцією тотального протравлення [21]. Водночас обробка поверхні дентину ортофосфорною кислотою призводить до утворення неоднорідного гібридного шару і, як наслідок, негерметичної лінії адгезивного з'єднання, порушення крайового прилягання, розвитку постопераційної чутливості, вторинного карієсу тощо. Зусилля фірм-виробників, спрямовані на запобігання надмірної демінералізації дентину розчинами кислот та спрощення протоколу адгезивної підготовки, надали змогу розробити самопротравлюючі дво- та однокомпонентні АС VI та VII поколінь, які, в той же час, демонстрували суттєво нижчу міцність фіксації фотокомпозиційних матеріалів до твердих тканин зубів. Пошук матеріалу з оптимальним балансом між силою адгезії до дентину та створенням надійного гібридного шару з герметичною ізоляцією дентинних каналців вдається основним напрямком подальшого вдосконалення АС. Найбільш відомими результатами цього пошуку стало впровадження в клінічну практику універсальних АС та самоадгезивних

композитів. Втім, клінічна ефективність цих новітніх матеріалів залишається суперечливою, навіть у дослідженнях із короткими термінами спостереження.

Перспективними способами поліпшення фізико-механічних та біологічних властивостей АС виглядають зміни протоколів їх застосування, наприклад, селективне протравлення емалі та дентину, зменшення часу експозиції ортофосфорної кислоти, активна аплікація адгезиву, нові режими полімеризації тощо. З іншого боку, важливим шляхом підвищення клінічної ефективності прямих фотокомпозиційних реставрацій є вплив на структурні компоненти та ферменти самого дентину, які відповідають за будову гібридного шару при застосуванні будь-яких АС. За рахунок модифікації складу АС чи то попереднього нанесення на поверхню дентину речовин, які здатні деактивувати матриксні металопротеїнази дентину або поліпшити конфігурацію колагенової сітки, можливо створити високоорганізований гібридний шар, нехильний до каталітичної естеразної деградації саме в значні терміни експлуатації реставрацій.

Висновки.

На сьогоднішній день відсутні адгезивні системи, які мають оптимальний набір фізико-механічних та клінічних характеристик для відновлення дефектів твердих тканин зубів фотокомпозиційними матеріалами. Відомі результати лабораторних та клінічних досліджень аналогічних адгезивних систем демонструють суттєві розбіжності щодо показників адгезивної міцності, герметичності інтерфейсу дентин-фотокомпозит, успішності реставрацій, що пояснюється відсутністю стандартизованих методів їх випробувань та чітких критеріїв оцінювання клінічної ефективності.

Сучасні універсальні адгезивні системи та самоадгезивні композиційні матеріали дозволяють ефективно відновлювати анатомічну форму зубів у певних клінічних ситуаціях з використанням визначених протоколів та потребують подальшого вивчення з метою розширення показань до їх застосування та поліпшення прогнозу реставраційного лікування в довготривалі терміни користування.

Перспективи подальших досліджень.

Модифікації складу адгезивних систем або протоколів адгезивної підготовки можуть покращити фізико-механічні та біологічні характеристики гібридного шару на поверхні дентину, що, в свою чергу, дозволить підвищити ефективність відновлення дефектів твердих тканин зубів фотокомпозиційними реставраціями та потребує подальшого вивчення в лабораторних і клінічних умовах.

References / Література

1. Udod OA, Borysenko OM. Stan fotokompozitsiynykh vidnovlen zubiv u riznykh umovakh svitlovoi polimeryzatsii adhezyvnoi systemy. Ukrainskii stomatologichnii almanakh. 2019;1:16-9. [in Ukrainian].
2. Parsaie Z, Firouzmandi M, Mohammadi N. Evaluating the Effect of Pretreatment with Matrix Metalloproteinase Inhibitors on the Shear Bond Strength of Composite Resin to Primary Teeth Dentin: A 6-Month In vitro Study. Contemp Clin Dent [Internet]. 2021 Oct-Dec [cited 2023 Jul 18];12(4):408-13. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35068841/>. DOI: [10.4103/ccd.ccd_662_20](https://doi.org/10.4103/ccd.ccd_662_20).
3. Brailko NM. Terapevtychni aspekty analizu adhezyvnykh system. Aktualni problemy suchasnoi medytsyny. 2018;2(62):294-300. [in Ukrainian].
4. Udod OA, Moroz IO. Pryami fotokompozitsiini vidnovlennya zubiv: stan ta porushennya. Inovatsii v stomatologii. 2022;1:19-24. [in Ukrainian].
5. Paschoini VL, Ziotti IR, Neri CR, Corona SAM, Souza-Gabriel AE. Chitosan improves the durability of resin-dentin interface with etch-and-rinse or self-etch adhesive systems. J Appl Oral Sci [Internet]. 2021 Dec [cited 2023 Jul 18];29:e20210356. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34910075/>. DOI: [10.1590/1678-7757-2021-0356](https://doi.org/10.1590/1678-7757-2021-0356).

6. Steiner R, Edelhoff D, Stawarczyk B, Dumfahrt H, Lente I. Effect of Dentin Bonding Agents, Various Resin Composites and Curing Modes on Bond Strength to Human Dentin. *Materials (Basel)* [Internet]. 2019 Oct 17 [cited 2023 Jul 18];12(20):3395. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6829412/>. DOI: [10.3390/ma12203395](https://doi.org/10.3390/ma12203395).
7. Schärer BM, Peutzfeldt A. Impact of adhesive application errors on dentin bond strength of resin composite. *Biomater Investig Dent* [Internet]. 2022 Nov 7 [cited 2023 Jul 19];9(1):101-9. Available from: . DOI: [10.1080/26415275.2022.2138405](https://doi.org/10.1080/26415275.2022.2138405).
8. Hardan L, Bourgi R, Cuevas-Suárez CE, Devoto W, Zarow M, Monteiro P, et al. Effect of Different Application Modalities on the Bonding Performance of Adhesive Systems to Dentin: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Cells* [Internet]. 2023 Jan 3 [cited 2023 Jul 19];12(1):190. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/36611983/>. DOI: [10.3390/cells12010190](https://doi.org/10.3390/cells12010190).
9. Mochalov YuO, Lokota OV. Doslidzhennya adhezii do struktur zuba universalnogo mikrihibrydnogo kompozytnoho stomatolohichnogo restavratsiinoho materialu "Dzhen-Radians". *Molodyi vchenyi*. 2018;8(60):298-301. [in Ukrainian].
10. ISO 11405:2015 – «Dentistry – Testing of adhesion to tooth structure» [Internet]. Geneva: ISO; 2015 Feb [cited 2023 Jul 19]. Available from: <https://www.iso.org/standard/62898.html>.
11. Avakov VV. Zastosuvannya rastrovoi elektronnoi mikroskopii dlya obgruntuvannya dotsilnosti vykorystannya adhezyvnoi tekhniki v postinykh zubakh u ditei, shcho prozhyvayut v umovakh tekhnolohichnogo zabrudnennya solyamy vazhkykh metaliv. *Visnyk problem biolohii i medytsyny*. 2019;2(150):233-6. [in Ukrainian].
12. Vilde T, Stewart CA, Finer Y. Simulating the Intraoral Aging of Dental Bonding Agents: A Narrative Review. *Dent J (Basel)* [Internet]. 2022 Jan 15 [cited 2023 Jul 19];10(1):13. Available from: . DOI: [10.3390/dj10010013](https://doi.org/10.3390/dj10010013).
13. Ismail AM, Bourauel C, ElBanna A, Salah Eldin T. Micro versus Macro Shear Bond Strength Testing of Dentin-Composite Interface Using Chisel and Wireloop Loading Techniques. *Dent J (Basel)* [Internet]. 2021 Nov 30 [cited 2023 Jul 19];9(12):140. Available from: . DOI: [10.3390/dj9120140](https://doi.org/10.3390/dj9120140).
14. Junior LR, Baroudi K, Barroso LS, Miranda ME, Vitti RP, Brandt WC. Bond strength of self-adhesive resin cement to dentin using different adhesion protocols. *J Clin Exp Dent* [Internet]. 2022 Jan 1 [cited 2023 Jul 20];14(1):35-9. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35070122/>. DOI: [10.4317/jced.59043](https://doi.org/10.4317/jced.59043).
15. Daher R, Krejci I, Mekki M, Marin C, Di Bella E, Ardu S. Effect of Multiple Enamel Surface Treatments on Micro-Shear Bond Strength. *Polymers (Basel)* [Internet]. 2021 Oct 18 [cited 2023 Jul 20];13(20):3589. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34685348/>. DOI: [10.3390/polym13203589](https://doi.org/10.3390/polym13203589).
16. Gupta A, Tavane P, Gupta PK, Tejolatha B, Lakhani AA, Tiwari R, et al. Evaluation of Microleakage with Total Etch, Self-Etch and Universal Adhesive Systems in Class V Restorations: An In vitro Study. *J Clin Diagn Res* [Internet]. 2017 Apr [cited 2023 Jul 20];11(4):53-6. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28571262/>. DOI: [10.7860/JCDR/2017/24907.9680](https://doi.org/10.7860/JCDR/2017/24907.9680).
17. Sengar EV, Mulay S, Beri L, Gupta A, Almohareb T, Binalrimal S, et al. Comparative Evaluation of Microleakage of Flowable Composite Resin Using Etch and Rinse, Self-Etch Adhesive Systems, and Self-Adhesive Flowable Composite Resin in Class V Cavities: Confocal Laser Microscopic Study. *Materials (Basel)* [Internet]. 2022 Jul 16 [cited 2023 Jul 20];15(14):4963. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9319247/>. DOI: [10.3390/ma15144963](https://doi.org/10.3390/ma15144963).
18. Bhupanapadu N, Sattar MA, Deb A. Evaluation of Nanoleakage Depth and Pattern of Cervical Restorations Bonded with Different Adhesive Systems. *Int J Clin Pediatr Dent* [Internet]. 2022 May-Jun [cited 2023 Jul 20];15(3):299-303. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9357532/>. DOI: [10.5005/jp-journals-10005-2391](https://doi.org/10.5005/jp-journals-10005-2391).
19. Bekuzarova Khl. Kliniko-laboratorne obgruntuvannya optymizatsii adhezyvnoi tekhniki vidnovlennya zubiv [avtoreferat dysertatsii]. Kyiv: Nats. med. akad. pislyadyplom. osvity im. Shupika; 2018. 24 s. [in Ukrainian].
20. Vukelja J, Klaric Sever E, Sever I, Jukic Krmek S, Tarle Z. Effect of Conventional Adhesive Application or Co-Curing Technique on Dentin Bond Strength. *Materials (Basel)* [Internet]. 2021 Dec 12 [cited 2023 Jul 21];14(24):7664. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34947259/>. DOI: [10.3390/ma14247664](https://doi.org/10.3390/ma14247664).
21. Van Meerbeek B, Yoshihara K, Van Landuyt K, Yoshida Y, Peumans M. From Buonocore's Pioneering Acid-Etch Technique to Self-Adhering Restoratives. A Status Perspective of Rapidly Advancing Dental Adhesive Technology. *J Adhes Dent* [Internet]. 2020 [cited 2023 Jul 21];22(1):7-34. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32030373/>. DOI: [10.3290/j.jad.a43994](https://doi.org/10.3290/j.jad.a43994).
22. Haak R, Werner MS, Schneider H, Häfer M, Schulz-Kornas E. Clinical Outcomes and Quantitative Margin Analysis of a Universal Adhesive Using a Randomized Clinical Trial over Three Years. *J Clin Med* [Internet]. 2022 Nov 23 [cited 2023 Jul 21];11(23):6910. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/36498485/>. DOI: [10.3390/jcm11236910](https://doi.org/10.3390/jcm11236910).
23. Bakry AS, Abbassy MA. Application Modes Affect Two Universal Adhesive Systems' Nanoleakage Expression and Shear Bond Strength. *Biomed Res Int* [Internet]. 2021 Sep 30 [cited 2023 Jul 21];2021:7375779. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34631886/>. DOI: [10.1155/2021/7375779](https://doi.org/10.1155/2021/7375779).
24. Raji Z, Hosseini M, Kazemian M. Micro-shear bond strength of composite to deep dentin by using mild and ultra-mild universal adhesives. *Dent Res J (Isfahan)* [Internet]. 2022 Jun 1 [cited 2023 Jul 21];19:44. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35915717/>.
25. Jafarnia S, Zeinaddini MJ, Zandkarimi F, Saberi S, Shahabi S, Valanezhad A, et al. Comparative Evaluation of Microtensile Bond Strength of Three Adhesive Systems. *Front Dent* [Internet]. 2022 Feb 6 [cited 2023 Jul 21];19:8. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35937153/>. DOI: [10.18502/fid.v19i8.8725](https://doi.org/10.18502/fid.v19i8.8725).
26. Vasconcelos EC, Delgado AHS, Félix S, Brito J, Gonçalves L, Polido M. Improving Properties of an Experimental Universal Adhesive by Adding a Multifunctional Dendrimer (G-1EMA): Bond Strength and Nanoleakage Evaluation. *Polymers (Basel)* [Internet]. 2022 Apr 3 [cited 2023 Jul 22];14(7):1462. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35406335/>. DOI: [10.3390/polym14071462](https://doi.org/10.3390/polym14071462).
27. Hardan L, Orsini G, Bourgi R, Cuevas-Suárez CE, Nicastro M, Lazarescu F. Effect of Active Bonding Application after Selective Dentin Etching on the Immediate and Long-Term Bond Strength of Two Universal Adhesives to Dentin. *Polymers (Basel)* [Internet]. 2022 Mar 11 [cited 2023 Jul 22];14(6):1129. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35335459/>. DOI: [10.3390/polym14061129](https://doi.org/10.3390/polym14061129).
28. Almeida RAM, Lima SNL, Nassif MV, Mattos NHR, Matos TP, Jesus TRR, et al. Eighteen-month clinical evaluation of a new universal adhesive applied in the "no-waiting" technique: a randomized clinical trial. *Clin Oral Investig* [Internet]. 2023 Jan [cited 2023 Jul 22];27(1):151-163. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/36068369/>. DOI: [10.1007/s00784-022-04703-7](https://doi.org/10.1007/s00784-022-04703-7).
29. Shaalan OO, Abou-Auf E. A 24-Month Evaluation of Self-Adhering Flowable Composite Compared to Conventional Flowable Composite in Conservative Simple Occlusal Restorations: A Randomized Clinical Trial. *Contemp Clin Dent* [Internet]. 2021 Oct-Dec [cited 2023 Jul 24];12(4):368-375. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35068835/>. DOI: [10.4103/ccd.ccd_600_20](https://doi.org/10.4103/ccd.ccd_600_20).
30. Inglês M, Vasconcelos ECJ, Mano AA, Polido M, Delgado AHS. Comparative Assessment of Different Pre-Treatment Bonding Strategies to Improve the Adhesion of Self-Adhesive Composites to Dentin. *Polymers (Basel)* [Internet]. 2022 Sep 21 [cited 2023 Jul 24];14(19):3945. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/36235894/>. DOI: [10.3390/polym14193945](https://doi.org/10.3390/polym14193945).
31. Borysenko OM. Udoslionalennya pidkhodiv do zastosuvannya adhezyvnykh system dlya vidnovlennya zubiv fotokompozytsiinymy materialamy [anotatsiya dysertatsii]. Lyman: Donetsk. nats. med. univer.; 2020. 14 s. [in Ukrainian].

СУЧАСНІ АДГЕЗИВНІ СИСТЕМИ ТА ТЕХНІКИ ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ ДЛЯ ПРЯМОГО ВІДНОВЛЕННЯ ДЕФЕКТІВ ТВЕРДИХ ТКАНИН ЗУБІВ

Помпій О. О., Керімова Т. М., Помпій Е. С.

Резюме. У статті наведені результати огляду наукової літератури щодо сучасних адгезивних систем та технік їх застосування для лікування дефектів твердих тканин зубів фотокомпозиційними матеріалами, описані недоліки та ускладнення, що реєструють у короткі та тривалі терміни експлуатації прямих реставрацій, можливі причини їх виникнення. Представлені порівняльні показники фізико-механічних характеристик та клініч-

ної ефективності найбільш популярних бондингових агентів V та VII поколінь, використаних за класичними протоколами тотального протравлення та самопротравлення. В роботі вказані актуальні методи лабораторних досліджень зразків зубів з зафіксованими на їх поверхнях фотокомпозиційними матеріалами з метою визначення властивостей різних бондів, зокрема, міцності адгезивного зв'язку на зсув і розтяг, герметичності інтерфейсу дентин-фотокомпозит та товщини гібридного шару, ступеня penetрації мономерів адгезивних систем до дентинних канальців, як одразу після виготовлення зразків, так і в різні терміни їх зберігання з застосуванням актуальних протоколів штучного старіння. Детально обговорено механізми утворення гібридного шару на поверхні дентину за використання різних протоколів адгезивної підготовки та поширених адгезивів. Висвітлені позитивні властивості та недоліки новітніх універсальних адгезивних систем та самоадгезивних композитів, вдосконалені техніки адгезивної підготовки, рекомендації для підвищення ефективності прямих реставрацій. Наведені представники нових поколінь бондингових агентів, що сертифіковані в Україні. Окреслені перспективи розвитку реставраційної стоматології за рахунок модифікацій стоматологічних матеріалів засобами, що зменшують руйнівну дію ферментів дентину на гібридний шар і сприяють створенню високоорганізованої сітки колагенових волокон, для підвищення сили адгезивного зв'язку між фотокомпозитами та дентином зубів, поліпшення прогнозу реставраційного лікування.

Ключові слова: адгезивні системи, фотокомпозиційні реставрації, техніка адгезивної підготовки, клінічна ефективність, адгезивна міцність.

MODERN ADHESIVE SYSTEMS AND TECHNIQUES OF THEIR APPLICATION FOR DIRECT RESTORATION OF HARD DENTAL TISSUES DEFECTS

Pompii O. O., Kerimova T. M., Pompil E. S.

Abstract. The article presents the results of the scientific literature review on modern adhesive systems and their application techniques for the direct treatment of hard dental tissue defects with photocomposite materials, describes the shortcomings and complications observed in the short- and long-term use of these restorations and their possible causes. Comparative indicators of the physical and mechanical properties and clinical efficacy of the most popular bonding agents – V and VII generations – used according to the classic protocols of total etching and self-etching are presented. The paper describes current methods of laboratory testing of tooth specimens with photocomposite materials bonded to their surfaces, in order to determine the properties of various adhesives, in particular, shear and tensile bond strength, dentin-photocomposite interface tightness and hybrid layer thickness, degree of penetration of adhesive monomers into dentinal tubules, both immediately after specimen preparation and during their various storage periods using current artificial ageing protocols. Different bonding protocols and common adhesives are used to discuss the mechanisms of hybrid layer formation on the dentin surface. The advantages and disadvantages of the latest universal adhesive systems and self-adhesive composites, improved adhesive preparation techniques and recommendations for increasing the efficiency of direct restorations are highlighted. The representatives of the new generation of bonding agents certified in the Ukraine are presented. The perspectives for the development of restorative dentistry through the modification of dental materials with substances that reduce the destructive effect of dentin enzymes on the hybrid layer and contribute to the formation of a highly organized network of collagen fibers, increase the strength of the adhesive bond between photocomposites and dentin, and improve the predictability of restorative therapy are outlined.

Key words: adhesive systems, photocomposite restorations, adhesive preparation technique, clinical effectiveness, adhesive strength.

ORCID and contributionship / ORCID автора та його внесок до статті:

Pompii O. O.: [0000-0001-7993-8744](https://orcid.org/0000-0001-7993-8744) ^{ABCD}

Kerimova T. M.: [0000-0002-3653-0180](https://orcid.org/0000-0002-3653-0180) ^{EF}

Pompil E. S.: [0000-0002-9388-3599](https://orcid.org/0000-0002-9388-3599) ^{AD}

Conflict of interest / Конфлікт інтересів:

The authors of the article confirm the absence of conflict of interest. / Автори статті підтверджують відсутність конфлікту інтересів.

Corresponding author / Адреса для кореспонденції

Pompii Oleksandr Oleksandrovych / Помпій Олександр Олександрович

Luhansk State Medical University / Державний заклад «Луганський державний медичний університет»

Ukraine, 33028, Rivne, 16 Lypnya str. / Адреса: Україна, 33028, м. Рівне, вул. 16 Липня 36

Tel.: 0662723651 / Тел.: 0662723651

E-mail: stifler2637@gmail.com

A – Work concept and design, B – Data collection and analysis, C – Responsibility for statistical analysis, D – Writing the article, E – Critical review, F – Final approval of the article / A – концепція роботи та дизайн, B – збір та аналіз даних, C – відповідальність за статистичний аналіз, D – написання статті, E – критичний огляд, F – остаточне затвердження статті.

Received 20.03.2023 / Стаття надійшла 20.03.2023 року

Accepted 25.08.2023 / Стаття прийнята до друку 25.08.2023 року