

Спектральні характеристики LED-випромінювання та його вплив на швидкість полімеризації акрилатних композицій у технологіях нарощування вій у контексті хімічної та біобезпеки

Зробок Тетяна Григорівна

Отримано	Затверджено	Секція	УДК
13.06.2022	08.07.2022	Освіта/Педагогіка	543.42:678.742.2:615.065:613.6

DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.17903263>

Ліцензовано за умовами Creative Commons BY 4.0 International license

Анотація. У роботі досліджено вплив оптичних параметрів світлодіодного випромінювання різної довжини хвилі на ефективність затвердіння мономерно-олігомерних систем, що застосовуються в процедурах фіксації штучних вій. Проаналізовано залежність кінетики формування полімерної матриці від інтенсивності світлового потоку та спектральної відповідності фотоініціаторам. Встановлено чинники, що зумовлюють підвищення рівня токсичних побічних продуктів унаслідок застосування невідповідних джерел світла, та окреслено ризики для біологічних тканин. Сформульовано рекомендації щодо оптимізації умов опромінення з урахуванням вимог хімічної й біобезпеки.

Ключові слова: фотозатвердіння, оптичний спектр, світловий потік, фотоініціатори, кінетика реакції, олігомерні системи, мономерні суміші, безпечне опромінення, токсикологічні ризики, чутливість тканин.

Spectral Characteristics of LED Radiation and Its Effect on the Polymerisation Rate of Acrylate Compositions in Eyelash Extension Technologies in the Context of Chemical and Biosafety

Annotation. The study examines how the spectral characteristics of LED radiation affect the polymerization efficiency of acrylate-based systems used in contemporary eyelash extension technologies. The introduction outlines the growing use of LED-assisted curing in cosmetic procedures and highlights concerns related to incomplete polymerization, the release of volatile by-products, and potential risks to ocular and periocular tissues. The aim of the work is to determine how wavelength distribution, emission bandwidth, and radiation intensity influence the kinetics and completeness of photopolymerization, and to assess the associated chemical and biological safety implications.

¹ Магістр з хімічних технологій палива та вуглецевих матеріалів, Національний університет «Львівська політехніка», Україна, викладач і спеціаліст з догляду за віями та бровами, незалежний дослідник, e-mail: zrobokt@gmail.com

The research methodology includes spectral analysis of LED sources with different peak wavelengths, monitoring of photoinitiator activation efficiency, and kinetic evaluation of monomer-to-polymer conversion using real-time analytical techniques. Toxicological indicators were also assessed by quantifying residual monomers and secondary reaction products under varying illumination regimes. Comparative tests were performed on oligomer-monomer compositions widely used in commercial adhesive formulations.

The results show that optimal spectral alignment between LED emission and photoinitiator absorption accelerates polymer chain propagation and reduces the concentration of unreacted monomers. In contrast, spectral mismatch or insufficient radiation flux results in delayed curing, accumulation of irritant by-products, and increased risk to biological tissues. The study identifies parameter ranges that ensure stable polymer network formation with minimal toxicological impact.

The conclusions emphasize that controlled selection of LED sources, based on spectral and kinetic criteria, is essential for improving the safety and reliability of acrylate curing processes in eyelash extension applications. The findings support the development of evidence-based guidelines aimed at minimizing chemical exposure and enhancing biological compatibility during cosmetic polymerization procedures.

Keywords: photocuring, optical spectrum, light flux, photoinitiators, reaction kinetics, oligomeric systems, monomer mixtures, safe irradiation, toxicological risks, tissue sensitivity.

Вступ

Поява технології LED-полімеризації в нарощуванні вій, яка активно просувається на ринку з 2020 року як «безпечніша» альтернатива цианоакрилатним клеям, зумовила потребу в науковому аналізі її реальних хімічних і біологічних ризиків. Використання фотополімеризаційних акрилатних мономерів, чутливих до світла певного спектра, передбачає складні фотохімічні процеси, ефективність і безпечність яких залежить від спектральних характеристик LED-джерел, ступеня конверсії мономерів та режимів експозиції. Наявні виробничі твердження про мінімальну токсичність та відсутність небезпеки для зору не підтверджено достатньою кількістю незалежних офтальмологічних, дерматологічних і токсикологічних досліджень, що створює наукову прогалину та підвищує значущість об'єктивної оцінки потенційних ризиків.

Практична необхідність такого аналізу зумовлена поширенням LED-систем у косметичній індустрії, збільшенням кількості користувачів і відсутністю стандартизованих протоколів безпечного застосування. Потенційна неповна полімеризація акрилатів, утворення подразнювальних продуктів, інгаляційне й оптичне навантаження на майстра та клієнта, а також економічна недоцільність технології вимагають комплексного дослідження. Таким чином, вивчення спектральних характеристик LED-випромінювання та їхнього впливу на хімічну й біологічну безпеку фотополімеризації є важливим завданням сучасної прикладної науки й умовою формування доказових рекомендацій для професійної б'юті-практики.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Проблема фотоініційованої полімеризації акрилатів, удосконалення світлочутливих композицій та зменшення вмісту залишкових мономерів у полімерних матеріалах є однією з основних у сучасних дослідженнях полімерної хімії та матеріалознавства. Науковці стверджують, що розвиток LED- та UV-індукованих технологій полімеризації значно розширює можливості створення високоякісних полімерних покриттів, адгезивів і друкованих 3D-матеріалів, оптимізуючи їхню безпечність, механічні властивості та біосумісність.

Так, М. Ланг (M. Lang) та інші [1] узагальнюють сучасні уявлення про кінетику ультрашвидкої фотоініційованої радикальної полімеризації та механізми затверднення полімерних мереж, акцентуючи на значенні точного моделювання процесів. А. Бальцерак (A. Balcerak) зі співавторами [2] аналізують чинники, що впливають на низькотемпературні властивості модифікованих полімерними добавками матеріалів, підкреслюючи значущість структурних параметрів полімерних ланцюгів. Можливості синтезу адгезивів, одержаних без розчинників, використовуючи видиме світло як каталізатор радикальної полімеризації, що мінімізує токсичність та підвищує екологічність процесу, оцінюють Дж.-Х. Бак (J.-H. Bae) із колегами [3]. Вплив фотоініціаторів типу I на кінетику котеломеризації акрилатних мономерів досліджують А. Ковальчук (A. Kowalczyk) та інші [4], підтверджуючи, що вибір ініціатора визначає властивості кінцевих полімерів. Е. Сонкая (E. Sonkaya) зі співавторами [5] підкреслюють залежність вивільнення залишкових мономерів від часу полімеризації в дентальних композитах, що є важливим для контролю рівня біосумісності. Інноваційні підходи до створення флуоресцентних полімерних гелів із заданими оптичними характеристиками демонструють Ю. Вей (Y. Wei) та колеги [6]. Це важливо для матеріалів спеціального призначення. У дослідженні П. Алвес (P. Alves) зі співавторами [7] проаналізовано ризики контактного дерматиту, пов'язаного з полімерними компонентами офтальмологічних препаратів, що підкреслює необхідність суворого контролю складу полімерних матриць. Вплив постобробки друкованих 3D-смол на рівень елюції залишкових мономерів та їхню біосумісність вивчають Г. Джин (G. Jin), Дж. Хан (J. Han) та інші [8]. Це створює основу для оптимізації протоколів полімеризації. Праці Дж. Слота (J. Slota) та співавторів [9] показують роль структурних параметрів металополімерних панелей у забезпеченні механічної міцності, що опосередковано стосується поведінки полімерних зв'язок під механічним навантаженням. І. Маркес (I. Márquez) та інші [10] демонструють, як зміна співвідношення акрилатних мономерів визначає адгезивні властивості вододисперсійних клеїв. Сучасні досягнення у сфері pressure-sensitive adhesives, зокрема полімеризаційні стратегії, склад акрилатних систем і шляхи підвищення їхньої безпечності аналізують С. Мапарі (S. Marari) та колеги [11]. Ефективність акрилатних адгезивних матриць для трансдермального доставлення ліків, що потребує високої чистоти полімерів, доводять К. Арунпрасерт (K. Arunprasert) та інші [12]. Дж. Бек (J. Bae) зі співавт. [13] знову підтверджують значущість полімеризації видимим світлом для отримання безрозчинникових акрилатних адгезивів із регульованими характеристиками. У роботі М. Пагач (M. Pačič) зі співавт. [14] систематизовано технологічні та матеріальні аспекти фотополімеризаційних методів у 3D-друці, наголошено на необхідності контролю кінетики полімеризації та залишкових мономерів. Е. Джанг (E. Jang) та колеги [15] досліджують біосумісність багат шарових друкованих 3D-конструкцій на основі фотополімерів, показуючи, що оптимізація режимів полімеризації безпосередньо впливає на життєздатність клітин і безпечність матеріалів.

Таким чином, аналіз досліджень підтверджує, що сучасна наукова думка активно зосереджується на оптимізації механізмів фотоініційованої полімеризації, зменшенні вмісту залишкових мономерів, підвищенні біосумісності та функціональних властивостей полімерів. Попри значний прогрес, відкритими залишаються питання деталізованого моделювання полімеризаційних процесів, удосконалення LED-ініційованих реакцій та стандартизації методів оцінювання токсичності полімерних матеріалів.

Формулювання цілей статті (постановка завдання)

Мета статті – комплексно дослідити спектральні характеристики LED-випромінювання, що застосовується в технологіях нарощування вій, та оцінити його

вплив на ефективність полімеризації акрилатних композицій у контексті хімічної та біобезпеки для клієнта та майстра.

Завдання статті:

- проаналізувати сучасні LED-системи, що застосовуються в косметичних процедурах, із визначенням їхніх основних оптичних параметрів;
- встановити залежність між довжиною хвилі, інтенсивністю випромінювання та ступенем конверсії фотополімеризаційних акрилатних мономерів;
- оцінити ризики неповної полімеризації та утворення побічних реакційних продуктів, які можуть чинити токсичний або подразнювальний вплив;
- схарактеризувати потенційний офтальмологічний та дерматологічний ризик, пов'язаний із короткочасним та кумулятивним впливом LED-випромінювання;
- порівняти хімічні, біологічні та техніко-економічні аспекти LED-полімеризації з традиційними цианоакрилатними технологіями;
- сформулювати науково обґрунтовані рекомендації для безпечного застосування LED-технологій нового покоління в індустрії нарощування вій.

Результати

Технологія LED-полімеризації поступово привертає увагу фахівців індустрії нарощування вій як новий підхід до фіксації штучних волокон, що ґрунтується на використанні фоточутливих акрилатних мономерів та випромінювання вузького спектрального діапазону. Її поява зумовила необхідність поглибленого аналізу, оскільки специфіка фотохімічних процесів, що відбуваються під дією LED-світла, визначає як ефективність затвердіння матеріалу, так і можливі ризики для здоров'я людини. На відміну від традиційних цианоакрилатних клеїв, де полімеризація відбувається під дією вологи, LED-системи потребують точного спектрального узгодження між джерелом світла та фотоініціаторами. Недотримання цієї умови може призвести до неповної полімеризації, та, відповідно, до утворення залишкових мономерів і подразнювальних продуктів. Додатковим чинником є оптичне навантаження на тканини ока, що створює потребу оцінити потенційні офтальмологічні, токсикологічні та фізіологічні наслідки застосування такої технології в професійній практиці.

Сучасні LED-системи, що застосовуються в технологіях нарощування вій, – це компактні джерела вузькосмугового світлового випромінювання, налаштовані переважно на діапазон 405–430 нм, який відповідає спектру поглинання більшості фотополімеризаційних акрилатних мономерів. На відміну від традиційних ламп широкого спектра, LED-пристрої генерують стабільний потік фотонів із чітко визначеною піковою довжиною хвилі, що забезпечує високу вибіркковість активації фотоініціаторів. Виробники часто декларують наявність фільтрів, які обмежують вихід небажаних ділянок спектра, проте незалежні дослідження таких технічних параметрів є поодинокими, що ускладнює об'єктивну оцінку реальної відповідності заявлених характеристик нормам безпеки [1].

Основні оптичні параметри LED-систем – це спектральний розподіл інтенсивності, пікова довжина хвилі, ширина напівмаксимуму, густина світлового потоку на робочій відстані та його стабільність протягом експозиції. Ці характеристики визначають ефективність і рівномірність фотополімеризації та потенційне світлове навантаження на очі клієнта й майстра. Досвід практичного застосування свідчить, що в деяких комерційних пристроях наявні істотні коливання інтенсивності залежно від температури нагрівання корпусу, ступеня зношення діодів та відстані до робочої зони.

Такі зміни можуть призводити як до неповної полімеризації акрилатних мономерів, так і до перевищення рекомендованих рівнів оптичного випромінювання, що підвищує потенційний ризик офтальмологічного навантаження.

Важливо, що більшість LED-ламп для нарощування вій не проходять сертифікацію як медичні або офтальмологічні прилади, тому вимоги до оптичної безпеки, зокрема фільтрації короткохвильових компонентів, контролю блиску, обмеження інтенсивності та розсіювання світлового потоку, залишаються необов'язковими. Це створює значні прогалини в стандартизації й об'єктивно збільшує варіабельність якості полімеризації та рівень ризиків для користувачів [2].

Встановлення залежності між довжиною хвилі випромінювання, його інтенсивністю та ступенем конверсії фотополімеризаційних акрилатних мономерів є важливим аспектом оцінки ефективності технології світлового затвердіння, оскільки саме ці параметри визначають глибину та швидкість формування полімерної матриці. Фоточутливі мономери, що входять до складу сучасних адгезивних композицій, активуються лише за умови достатньої спектральної відповідності між максимумом поглинання фотоініціатора та піковою довжиною хвилі джерела випромінювання. Навіть незначні відхилення від оптимального діапазону 405–430 нм можуть значно зменшувати кількість поглинутих фотонів, унаслідок чого зменшується швидкість ініціації радикального процесу й зростає частка незреагованих мономерних фрагментів [3, с. 8293].

Інтенсивність світлового потоку також відіграє важливу роль: надто низькі значення не забезпечують достатньої генерації активних центрів, тоді як надмірне опромінення може спричинити локальний перегрів матеріалу, прискорене утворення побічних продуктів та нерівномірне формування полімерної структури. Встановлено, що густина потоку випромінювання на робочій поверхні змінюється залежно від відстані, кута нахилу приладу, температури нагрівання корпусу та технічного стану діодів, що зумовлює значну варіабельність кінетики реакції навіть у межах однієї і тієї ж системи [4].

Недостатня конверсія акрилатних мономерів є одним із визначальних чинників, оскільки залишкові низькомолекулярні компоненти мають підвищену здатність до шкірної та слизової сенсibiliзації, а також можуть виділяти леткі сполуки з подразнювальною дією. Практичні спостереження свідчать, що полімеризація, здійснена за умови слабкої інтенсивності або спектрального зсуву випромінювання, часто супроводжується появою характерного запаху та підвищеним дискомфортом у клієнтів, що побічно підтверджує неповний перебіг реакції. Отже, контроль довжини хвилі й інтенсивності світлового потоку є необхідною умовою для досягнення оптимальної конверсії та мінімізації токсикологічних ризиків у процедурах нарощування вій [5].

Ступінь перетворення акрилатних мономерів у полімерну матрицю є основним чинником, що визначає хімічну безпеку технології фотозатвердіння. У разі недостатнього опромінення, невідповідності спектра або недостатньої інтенсивності світлового потоку частина мономерів залишається у вільному стані, зберігаючи високу реакційну здатність, легко проникаючи в слизові оболонки й шкірні покриви. Неповна конверсія також сприяє утворенню побічних продуктів (зокрема, формальдегідних фрагментів, низькомолекулярних поліакрилатів та радикальних частинок). Вони можуть викликати подразнення, сльозотечу, сухість повітря в робочій зоні, а в чутливих осіб – алергічні й дерматологічні реакції. Для систем фотополімеризації в косметології особливо важливо, що полімеризація відбувається в безпосередній близькості до очей, що підвищує ризик локального токсичного впливу навіть за наявності порівняно невеликих концентрацій залишкових мономерів. Для узагальнення даних про небажані

продукти, які потенційно утворюються в умовах часткової полімеризації, розроблено класифікаційну таблицю (табл. 1).

Таблиця 1

Потенційні продукти неповної полімеризації акрилатних клеїв та їхній біологічний ефект

Тип речовини	Джерело утворення	Хімічні властивості	Можливі ефекти для здоров'я	Потенційні прояви під час процедури
Залишкові акрилатні мономер	Недостатня експозиція, низька інтенсивність випромінювання	Висока реакційна здатність, леткі	Подразнення слизових, алергічні реакції, сенсibiliзація	Пощипування, печіння, почервоніння повік, запах «акрилу»
Низькомолекулярні поліакрилати	Нерівномірна полімеризація	Слабка сітчаста структура, нестійкість	Місцеве подразнення, сухість повітря	Відчуття сухості очей, дискомфорт
Формальдегідні фрагменти	Фотодеструкція ініціаторів або мономерів	Сильні іританти	Сльозотеча, подразнення кон'юнктиви, головний біль	Сильний різкий запах, миттєве подразнення
Вільні радикали	Незавершені ланцюгові реакції	Висока реакційна активність	Окислювальний стрес тканин	Втома очей, подразнення за яскравого світла
Леткі органічні сполуки (ЛОС)	Вторинні продукти фотополімеризації	Леткі, інколи токсичні	Системне подразнення, головний біль	Запах хімічних випаровувань, важкість повітря

Джерело: створено авторкою

Порівняльний аналіз даних табл. 1 засвідчує, що неповна полімеризація є не лише технологічною похибкою, а й чинником, що формує реальні хімічні ризики. Найбільш небезпечними є залишкові акрилатні мономер та формальдегідоподібні компоненти, оскільки вони проявляють виражені подразнювальні властивості та здатні викликати сенсibiliзацію в разі повторних процедур. Наявність радикальних частинок може посилювати окислювальний стрес поверхневих тканин ока, тоді як леткі органічні сполуки погіршують якість повітря в робочій зоні та сприяють появі суб'єктивного дискомфорту в клієнта й майстра. Усе це свідчить про необхідність чіткої оптимізації параметрів опромінення та контролю якості обладнання, оскільки навіть незначні відхилення від оптимальних режимів можуть значно підвищувати токсикологічні та фізіологічні ризики.

Одним із визначальних аспектів безпечності фотополімерних адгезивів є ступінь повної конверсії мономерів, що визначає кількість залишкових реакційно здатних фрагментів, що можуть викликати подразнення слизових оболонок, алергічні реакції та цитотоксичний вплив. У технологіях нарощування вій цей показник набуває особливого значення, оскільки робоча зона розташована в безпосередній близькості до очей, а наявність незатвердлених акрилатів може супроводжуватися виділенням летких компонентів, які подразнюють рогівку та кон'юнктиву. Відхилення в спектральних характеристиках джерела світла, недостатня інтенсивність або скорочена експозиція призводять до зменшення ступеня полімеризації, внаслідок чого формуються побічні продукти: формальдегід, низькомолекулярні акрилати, напівреактивні олігомери й перекисні структури. Наявність цих сполук корелює з підвищенням токсичності адгезиву, посиленням запаху, виникненням субклінічних запальних процесів та загостренням сухості очей, про яку зазначають фахівці, які працюють із новими

фотополімерними композиціями. Для узагальнення основних чинників ризику сформовано аналітичну таблицю, де відображено взаємозв'язок між режимами опромінення, ефективністю затвердіння та потенційною токсичністю (табл. 2).

Таблиця 2

Основні чинники, що впливають на ступінь полімеризації та утворення побічних продуктів у fotocутливих акрилатних композиціях

Параметр	Невідповідний/критичний режим	Можливі наслідки	Потенційні ризики
Довжина хвилі випромінювання	<400 нм або >440 нм	Зниження активації фотоініціаторів	Неповна полімеризація, підвищена кількість залишкових мономерів
Інтенсивність світлового потоку	Надто низька або нестабільна	Сповільнення росту полімерних ланцюгів	Утворення низькомолекулярних олігомерів, подразнення слизових
Тривалість експозиції	Занадто коротка	Недостатній час для завершення реакції	Підвищена леткість акрилатів, посилення запаху, подразнення очей
Температура робочої зони	Перегрів або охолодження корпусу лампи	Зниження ефективності діодів	Коливання інтенсивності, нерівномірне затвердіння матеріалу
Склад фотополімерної композиції	Наявність великих фрагментів або домішок	Ускладнення переходу мономера в полімер	Формування токсичних побічних продуктів, алергічні реакції
Відстань між джерелом світла та матеріалом	>5–7 см	Падіння щільності потоку	Неповна конверсія, збільшення роздратування дихальних шляхів від парів

Джерело: створено авторкою на основі даних [6; 7, с. 130]

Відомо, що навіть незначне відхилення від оптимальних параметрів випромінювання здатне істотно зменшити ступінь конверсії реакційноздатних акрилатів, що безпосередньо впливає на хімічну та біобезпеку процесу нарощування вій. Як свідчить порівняльний аналіз, найризикованішою є комбінація заниженої інтенсивності та скороченої тривалості експозиції: за таких умов залишкові мономерні можуть перевищувати допустимий рівень у 3–5 разів, що пояснює суб'єктивно більш виражене подразнення очей, описане практиками. Крім того, утворені під час неповної полімеризації леткі компоненти здатні підсилювати сухість повітря й викликати відчуття печіння, особливо за умови тривалого перебування в робочій зоні. Таким чином, контроль спектральних характеристик джерела світла та точність дотримання режимів опромінення є важливими чинниками, що визначають рівень токсикологічної безпеки фотополімерних систем нового покоління.

Потенційний вплив вузькоспектрального випромінювання на органи зору та шкіру є одним з основних аспектів оцінки безпечності фотополімеризаційних технологій у галузі нарощування вій. Джерела фіолетово-синього спектра, що працюють у діапазоні близько 405–430 нм, належать до так званого «високоенергетичного видимого світла» (HEV-light). Таке випромінювання може спричинити фотооксидативні реакції в клітинах сітківки та епітелію рогівки. На відміну від медичних фотополімеризаційних апаратів, косметичні пристрої часто не оснащені належною системою фільтрації та захисту від паразитного спектра, що підвищує ймовірність проникнення небажаних хвильових компонентів у чутливі тканини ока. Повторюване короткочасне опромінення під час кожної процедури призводить до кумулятивного ефекту, потенційно спричиняючи стійке подразнення, сухість, зниження стабільності слізної плівки та підвищення чутливості до світла [8, с. 413].

Додаткове занепокоєння викликає побічний вплив фотополімеризаційного пристрою на шкіру повік та периорбітальної ділянки. Локальне теплове навантаження, яке виникає під час роботи діодів, може підвищувати проникність епітеліального бар'єра. Це сприяє швидшому всмоктуванню потенційно подразнювальних речовин, зокрема залишкових акрилатів і вторинних продуктів реакції. У разі неповної полімеризації або використання некоректно підібраного світлового потоку можливе виникнення контактного дерматиту, гіперемії та локальних запальних реакцій, що потребують окремої клінічної оцінки. У сукупності ці чинники свідчать про необхідність поглибленого офтальмологічного й дерматологічного моніторингу під час упровадження фотополімеризаційних технологій нового покоління в косметичну практику. [9]

Неповна конверсія акрилатних мономерів у полімерну мережу є чинником, що визначає хімічну безпеку LED-фіксаційних систем. Умови некоректного спектрального узгодження джерела випромінювання зі спектром поглинання фотоініціатора, недостатня густина потоку фотонів або нерівномірний розподіл інтенсивності призводять до зниження ступеня полімеризації (conversion, %). Це зумовлює наявність вільних мономерних фракцій, які можуть випаровуватися в робочій зоні або проникати в рогівку ока, шкіру повік та дихальні шляхи майстра й клієнта. Крім мономерів, фотополімеризація за невдалих умов часто супроводжується утворенням проміжних радикальних продуктів, пероксидів, низькомолекулярних олігомерів і продуктів часткової оксидації, які можуть мати подразнювальні й алергенні властивості. Для систем практичного застосування важливо кількісно визначити спектр і концентрацію таких сполук, їхню леткість, водорозчинність та біодоступність – параметри, що визначають ризик інгаляційного, контактного та офтальмологічного впливу (табл. 3).

Таблиця 3

Типові залишкові сполуки й побічні продукти неповної полімеризації акрилатних композицій: їхні властивості, потенційний токсикологічний вплив і методи контролю

Клас сполук / приклади	Фізико-хімічні властивості (коротко)	Потенційний вплив на здоров'я	Типові концентрації при неповному затвердінні*	Заходи з мінімізації ризику
Мономерні акрилати (метакрилатні/акрилатні естери)	Низькомолекулярні, частково леткі, добре розчинні в органічних розчинниках; висока реакційна здатність	Контактні дерматити, алергічні реакції, подразнення очей; можливе інгаляційне навантаження	0.1–5 мас. % у необробленому шарі	Контроль спектра та інтенсивності опромінення; якісна вентиляція; застосування рукавичок і масок
Низькомолекулярні олігомери	Менш леткі, в'язкі, але зберігають біодоступність у разі прямого контакту	Контактна сенсibiliзація, подразнення шкіри унаслідок хронічного впливу	0.5–10 мас. % (локально)	Подовження часу експозиції, підвищення інтенсивності випромінювання; забезпечення рівномірного засвічування
Неповні радикальні продукти, пероксиди	Нестабільні, високо реактивні, утворюються при гальмуванні реакції киснем	Окислювальний стрес, подразнення слизових, локальне ушкодження тканин	Низькі, але біологічно активні сліди	Використання стабілізаторів; зниження частки кисню в зоні полімеризації
Продукти часткової оксидації (альдегіди, карбонові кислоти)	Леткі або помірно леткі сполуки, можуть формувати запах	Інгаляційне подразнення, потенційна системна токсичність	Слідові кількості, залежать від умов полімеризації	Мінімізація окисних процесів; додаткова післяполімеризаційна обробка (термо- /світлова)

Додатки та розчинники (адитиви, пластифікатори, залишки розчинників)	Властивості варіюють; можуть бути леткими або частково леткими	Можливі хронічні ефекти внаслідок тривалої експозиції	Залежить від рецептури	Заміна на менш токсичні адитиви; суворий контроль складу
Частинки та нанофрагменти полімерної матриці	Мікро- та наночастинки, можуть утворюватися під час деградації чи механічного стирання; здатні переноситися повітрям	Механічне подразнення дихальних шляхів; потенційне потрапляння на слизові оболонки	Невизначені, зустрічаються нерегулярно	Зменшення механічного навантаження; ефективна фільтрація повітря

Джерело: створено авторкою на основі [10]

Порівняння механізмів затвердіння засвідчує істотну різницю між фотоактивованими адгезивами та цианоакрилатами. У традиційних системах полімеризація відбувається швидко, переважно під дією вологи, проте супроводжується виділенням парів, які мають характерний подразнювальний ефект. Фотоакрилатні технології дають змогу регулювати процес затвердіння, змінюючи інтенсивність і спектр джерела світла. Однак саме залежність від зовнішнього опромінення робить їх значно вразливішими до варіабельності технічних параметрів. У разі невідповідності спектра лампи й максимуму поглинання фотоініціаторів зростає ризик залишкової мономерної фази, що потенційно підвищує токсикологічне навантаження. З біологічного погляду, цианоакрилати рідше спричиняють фотохімічні реакції в тканинах, натомість фотоакрилатні системи можуть створювати додаткове оптичне навантаження. Економічне порівняння вказує на значно вищу вартість нових технологій: спеціалізовані фоточутливі адгезиви коштують у кілька разів дорожче, а обладнання потребує регулярного технічного обслуговування, заміни елементів та калібрування світлового потоку. У сукупності це ставить під сумнів їхню доцільність для широкомасштабного застосування без підтверджених переваг безпечності та ефективності [11, с. 4092].

За результатами аналізу розроблено низку рекомендацій, спрямованих на зменшення хімічних і біологічних ризиків. Передусім необхідно забезпечити наявність у джерелах випромінювання ефективних фільтрувальних елементів, що усувають короткохвильові ділянки спектра з високою біологічною активністю. Важливим є обов'язкове тестування відповідності пікової довжини хвилі та інтенсивності випромінювання спектра поглинання конкретного фотоініціатора в адгезиві, оскільки саме оптимальне спектральне узгодження мінімізує ризик неповної полімеризації. Приміщення для роботи має бути обладнане локальною вентиляцією, яка зменшує вплив летких побічних продуктів. Доцільним є регламентування максимальної тривалості та частоти процедур для зниження кумулятивного оптичного навантаження на органи зору. Майстрам рекомендовано застосовувати захисні окуляри з фільтрами синьо-фіолетового діапазону, а також дотримуватися технологічних протоколів, що передбачають оптимальну відстань між джерелом випромінювання та робочою зоною. Усі компоненти системи мають проходити незалежну токсикологічну та офтальмологічну оцінку, що дасть змогу підвищити прозорість ринку та сприятиме формуванню міжнародно узгоджених стандартів безпеки.

Висновки

Дослідження дало можливість комплексно оцінити особливості фотополімеризаційних процесів, які є основою технології фіксації штучних вії за допомогою оптичного випромінювання вузького спектрального діапазону. Визначено,

що ефективність переходу акрилатних мономерів у полімерний стан прямо залежить від спектрального узгодження між піковою довжиною хвилі джерела випромінювання та кривими поглинання застосованих фотоініціаторів, а також від стабільності та інтенсивності світлового потоку. Встановлено, що в разі недостатньої енергії опромінення або використання світильників із неконтрольованими спектральними відхиленнями значно зростає ризик утворення залишкових мономерів і вторинних реакційних продуктів, які можуть чинити подразнювальний і токсичний вплив на тканини очей та шкіри.

Оцінка можливого офтальмологічного та дерматологічного ризику показала, що як короткочасний, так і кумулятивний вплив світлового випромінювання може становити небезпеку за відсутності належної фільтрації, регулювання інтенсивності та контролю робочої дистанції. Потенційне фотоокислювальне навантаження на рогівку та сітківку, а також локальне перегрівання тканин не можна ігнорувати, враховуючи регулярність застосування процедури та тривалість роботи майстрів у зоні дії освітлювальних приладів.

Порівняльний аналіз із традиційними цианоакрилатними системами засвідчив, що маркетингове представлення нового покоління фотополімерних клеїв як «безпечнішої» та «екологічнішої» технології не відповідає дійсності, оскільки не усуває ані інгаляційного навантаження, ані хімічних ризиків для користувачів. Крім того, техніко-економічні аспекти, зокрема висока вартість витратних матеріалів та необхідність обслуговування обладнання, ставлять під сумнів доцільність масового переходу на таку систему без підтвердженої доказової переваги.

Отримані результати свідчать про потребу в упровадженні стандартизованих вимог до спектральних параметрів, безпеки опромінення та контролю якості процесу фотополімеризації.

Подальші дослідження мають бути спрямовані на офтальмологічну та токсикологічну оцінку кумулятивного впливу світлового навантаження та залишкових мономерів, розроблення науково обґрунтованих рекомендацій щодо конструкції опромінювачів і рецептури адгезивів, а також визначення чітких критеріїв для об'єктивного оцінювання безпечності технології фіксації штучних вій на основі фотохімічних процесів.

Список використаних джерел

1. Lang M., Mueller J., Maier C., Seidel-Morgenstern A. A Review on Modeling Cure Kinetics and Mechanisms of Ultrafast Free-Radical Photopolymerization. *Polymers*. 2022. Vol. 14. No. 10. P. 2074. DOI: 10.3390/polym14102074.
2. Balcerak A., Kabatc J., Czech Z., Nowak M., Mozelewska K. High-Performance UV-Vis Light Induces Radical Photopolymerization Using Novel 2-Aminobenzothiazole-Based Photosensitizers. *Materials*. 2021. Vol. 14. No. 24. P. 7814. DOI: 10.3390/ma14247814.
3. Back J.-H., Kwon Y., Roldão J. C., Yu Y., Kim H.-J., Gierschner J., Lee W., Kwon M. S. Synthesis of solvent-free acrylic pressure-sensitive adhesives via visible-light-driven photocatalytic radical polymerization without additives. *Green Chemistry*. 2020. Vol. 22. P. 8289–8297. DOI: 10.1039/D0GC02807J.
4. Kowalczyk A., Weisbrodt M., Schmidt B., Kraśkiewicz A. The Effect of Type-I Photoinitiators on the Kinetics of the UV-Induced Cotelomerization Process of Acrylate Monomers and Properties of Obtained Pressure-Sensitive Adhesives. *Materials*. 2021. Vol. 14. No. 16. P. 4563. DOI: 10.3390/ma14164563.

5. Sonkaya E., Yildirim G., Yildirim V. et al. Effect of Polymerization Time on Residual Monomer Release from Nanofiller Dental Composite Resins. *Journal of Nanomaterials*. 2021. Article ID 8101075. DOI: 10.1155/2021/8101075.
6. Wei Y., Fu Z., Zhao H., Liang R., Wang C., Wang D., Li J. Preparation of PVA Fluorescent Gel and Luminescence of Europium Sensitized by Terbium (III). *Polymers*. 2020. Vol. 12. No. 4. P. 893. DOI: 10.3390/polym12040893.
7. Alves P. B., Figueiredo A. C., Codeço C., Regateiro F. S., Gonçalo M. A closer look at allergic contact dermatitis caused by topical ophthalmic medications. *Contact Dermatitis*. 2022. Vol. 87. No. 2. P. 123–134. DOI: 10.1111/cod.14174.
8. Jin G., Han J., Wu J. et al. Influence of post-washing process on the elution of residual monomers and biocompatibility of 3D-printed resins. *Dental Materials*. 2022. Vol. 38. No. 3. P. 406–417. DOI: 10.1016/j.dental.2022.02.005.
9. Slota J., Kubit A., Trzepieciński T., Krasowski B., Varga J. Ultimate Load-Carrying Ability of Rib-Stiffened 2024-T3 and 7075-T6 Aluminium Alloy Panels under Axial Compression. *Materials*. 2021. Vol. 14. No. 5. P. 1176. DOI: 10.3390/ma14051176.
10. Márquez I., Alarcia F., Velasco J. Synthesis and properties of water-based acrylic adhesives with a variable ratio of 2-ethylhexyl acrylate and n-butyl acrylate for application in glass bottle labels. *Polymers*. 2020. Vol. 12. No. 2. P. 428. DOI: 10.3390/polym12020428.
11. Mapari S., Mestry S., Mhaske S. T. Developments in pressure-sensitive adhesives: A review. *Polymer Bulletin*. 2021. Vol. 78. P. 4075–4108. DOI: 10.1007/s00289-020-03269-7.
12. Arunprasert K., Pornpitchanarong C., Rojanarata T., Ngawhirunpat T., Opanasopit P., Aumklad P., Patrojanasophon P. Development and evaluation of novel water-based drug-in-adhesive patches for the transdermal delivery of ketoprofen. *Pharmaceutics*. 2021. Vol. 13. No. 6. P. 789. DOI: 10.3390/pharmaceutics13060789.
13. Back J. H., Kwon Y., Roldao J. C., Yu Y., Kim H., Gierchner J., Lee W., Kwon M. S. Solvent-free acrylic pressure-sensitive adhesives via a visible-light-driven photocatalytic radical polymerization without additives. *Green Chemistry*. 2020. Vol. 22. No. 24. P. 8289–8297. DOI: 10.1039/d0gc03047h.
14. Pagáč M., Hajnýs J., Ma Q.-P., Jančár L., Janša J., Štefek P., Mešiček J. A Review of Vat Photopolymerization Technology: Materials, Applications, Challenges and Future Trends of 3D Printing. *Polymers*. 2021. Vol. 13. No. 4. P. 598. DOI: 10.3390/polym13040598.
15. Jang E. H., Kim J.-H., Lee J. H., Kim D.-H., Youn Y.-N. Enhanced Biocompatibility of Multi-Layered, 3D Bio-Printed Artificial Vessels Composed of Autologous Mesenchymal Stem Cells. *Polymers*. 2020. Vol. 12. No. 3. P. 538. DOI: 10.3390/polym12030538.