

Інше

Телеманюк Валерія Валеріївна

*засновник студії Altera nails, майстер манікюру,
міжнародний суддя б'юті чемпіонатів,
переможець світового чемпіонату ОМС 2025, викладач*

Telemaniuk Valeriia

*Founder of Altera Nails Studio, Nail Artist, International Beauty
Championships Judge, OMC World Champion 2025, Educator*

ВПЛИВ ФОТОПОЛІМЕРИЗАЦІЙНИХ ІНІЦІАТОРІВ (ТРО, ТРО-L, CQ) НА АЛЕРГЕННІСТЬ ГЕЛЬ-ПОКРИТТІВ

Анотація. У статті проведено аналітичне дослідження впливу фотополімеризаційних ініціаторів Camphorquinone (CQ), Trimethylbenzoyl diphenylphosphine oxide (TPO) та Ethyl trimethylbenzoyl phenylphosphinate (TPO-L) на алергенність гель-покриттів. Використовуючи дані сучасних публікацій та регуляторних оглядів, проаналізовано взаємозв'язок між хімічною структурою ініціатора, ступенем полімеризації та утворенням залишкових мономерів і побічних фотопродуктів, здатних стимулювати контактну сенсibilізацію шкіри. Показано, що CQ характеризується найкращим поєднанням ефективності полімеризації та помірного сенсibilізуючого потенціалу, тоді як TPO демонструє підвищену алергенність, пов'язану із структурними особливостями фосфіноксидної групи та високою реактивністю радикалів. TPO-L виступає як проміжна альтернатива з потенційно нижчим ризиком сенсibilізації, проте потребує додаткових клінічних досліджень для повної оцінки безпечності. Визначено, що контрольовані параметри полімеризації, включно з інтенсивністю та спектром опромінення, тривалістю експозиції та товщиною шару, критично впливають на рівень залишкових мономерів і, як

наслідок, на алергенний потенціал готового покриття. Розглянуто практичні аспекти застосування цих ініціаторів у професійних та домашніх гель-системах, підкреслено роль комбінованих систем ініціаторів у зниженні ризику сенсibilізації. Результати дослідження мають важливе значення для створення безпечних матеріалів нового покоління, орієнтованих на мінімізацію контактних алергічних реакцій у майстрів і користувачів.

Ключові слова: гель-покриття, фотополімеризаційні ініціатори, Camphorquinone, TPO, TPO-L, алергенність, сенсibilізація, залишкові мономери, контактна алергія, безпечність матеріалів.

У сучасній індустрії нігтьового сервісу відзначається чітка тенденція до зростання звернень із алергічними реакціями, які асоціюються з використанням гель-покриттів. Ці прояви стосуються як майстрів салонів, так і кінцевих споживачів: контактний дерматит, подразнення шкіри навколо нігтя, висипання та свербіж – усе це стає частішим. Аналітичні огляди вказують, що одним із ключових чинників такого росту є не лише акрилат-мономери чи мономерні залишки, але й компоненти полімеризаційної системи, зокрема фотополімеризаційні ініціатори [1].

На тлі цього виникає гіпотеза про те, що рівень сенсibilізації шкіри (тобто ймовірність розвитку алергічної реакції) прямо корелює із типом фотополімеризаційного ініціатора, використаного у формулі гель-покриття. Іншими словами: якщо ініціатор має вищий потенціал залишкової реактивності або дає гірше затвердіння, то саме він може бути каталізатором підвищеної алергенності покриття. Таке припущення має не лише теоретичне, але й практичне значення – від вибору ініціатора залежить безпека кінцевого продукту і рівень ризику для користувачів.

Водночас у галузі косметичних матеріалів спостерігається помітна тенденція до заміни традиційних фотополімеризаційних систем. Ініціатор

Camphorquinone (CQ) роками був домінуючим вибором у гель-покриттях завдяки своїй ефективності та доступності, але останніми роками на ринку з'явилися альтернативи – зокрема ініціатори Trimethylbenzoyl diphenylphosphine oxide (TPO) та його модифікована форма Ethyl trimethylbenzoyl phenylphosphinate (TPO-L). Причиною таких змін стають не лише комерційні вимоги (швидше затвердіння, краща глибина полімеризації), але й вимоги безпеки: наприклад, TPO з 1 вересня 2025 р. заборонений до використання у косметичних продуктах на території European Union після класифікації як речовина категорії CMR 1B (токсична для репродукції) [2]. У свою чергу, TPO-L позиціонується як альтернатива з кращим профілем безпеки [3]. Відтак актуалізується завдання перевірити, чи саме зміна ініціатора призводить до зменшення або навпаки підвищення алергенного ризику гель-покриттів.

У хімічному плані фотополімеризаційні ініціатори Camphorquinone (CQ), Trimethylbenzoyl diphenyl phosphine oxide (TPO) та Ethyl (2,4,6-trimethylbenzoyl) phenylphosphinate (TPO-L) належать до різних класів, що зумовлює їхню різну спектральну активність і поведінку в радикальній полімеризації. CQ – це α -дикетон (камфор-хінон), який у присутності третинного аміну (співініціатору) утворює активні радикали за механізмом Norrish Type II, із поглинанням переважно у зоні видимого світла [4]. TPO – це фосфіноксидна сполука (monoacylphosphine oxide), що належить до ініціаторів типу I: під дією світла проходить α -розщеплення (C–P зв'язку), утворюючи дві радикальні одиниці, які здатні запускати полімеризацію без необхідності третинного аміну [5]. TPO-L – це модифікована фосфіноксидна сполука (ethyl phenylphosphinate), рідка і легша в інтеграції у формули, але з меншою ефективністю поглинання, ніж TPO [6, с. 14].

Що стосується спектральної активності та механізму ініціювання: CQ поглинає світло у смузі приблизно 400-500 нм із максимумом близько 468 нм [7]. У системі CQ/аміни після збудження CQ йде перенос

електрона/протона з аміну – формуються активні радикали, які запускають полімеризацію [8, с. 98]. У випадку ТРО механізм простіший: під впливом відповідної довжини хвилі відбувається α -розщеплення молекули ініціатора, утворюються радикали без потреби в співініціаторі-аміні – це підвищує кольорову стабільність і скорочує складність формули [5]. Діапазон поглинання ТРО значно коротший – приблизно 380-425 нм (з максимумом ≈ 400 нм) – що означає, що для ефективного поглинання потрібне джерело світла з фіолетово-синьою або ультрафіолетовою складовою [9, с. 4]. У свою чергу ТРО-L має максимуми поглинання переважно у UV-смузі (наприклад, 274 нм, 290 нм і 370 нм згідно з даними виробника) – це означає меншу відповідність до стандартних LED-ламп, орієнтованих на 400-500 нм [10].

Аналітична оцінка ефективності поглинання світла і глибини полімеризації показує, що хоча ТРО та ТРО-L мають потенціал для вищого ступеня конверсії через утворення двох радикалів (у випадку ТРО) та відсутність співініціатора-аміна, на практиці глибина затвердіння (depth of cure) у композиціях з ТРО іноді виявляється меншою ніж у CQ-систем. Наприклад, в дослідженні зазначено, що хоча ТРО має вищу молярну екстинкцію й швидше утворює радикали, “композити на ТРО мають нижчу глибину затвердіння, ніж CQ-системи” [5]. Одна з причин – більш коротка довжина хвилі поглинання ТРО (менша проникна здатність світла) та необхідність спеціалізованої лампи, що включає 380-400 нм [9, с. 5]. У випадку ТРО-L виробник вказує, що “абсорбційні максимуми 274, 290 і 370 нм ... забезпечують високий ступінь затвердіння в UV/LED системах”, але в клінічному середовищі може виникати обмеження через невідповідність світла стандартних ламп [10]. Таким чином, при однакових умовах лампи та товщині шару CQ-системи часто демонструють кращу глибину полімеризації, тоді як системи ТРО-базовані можуть вимагати потужнішого джерела або тонші шари [11].

Ступінь полімеризації у фотополімерних гелях напряму впливає на кількість залишкових мономерів, які не вступили у реакцію – і ці залишкові мономері можуть виступати джерелом підвищеної алергенності. Дослідження показують, що методика полімеризації, інтенсивність опромінення, товщина шару, а також природа фотополімеризаційного ініціатора – усі ці чинники мають вагоме значення. Наприклад, огляд з медичних акрилатних систем вказує, що процеси полімеризації, умови затвердіння і спосіб обробки істотно змінюють концентрацію залишкового мономера, що потім може вивільнятися і призводити до подразнення або алергічних реакцій [12].

У контексті систем із використанням LED/UV-полімеризації та гель-покривів зазначено, що при зменшеній інтенсивності опромінення або меншій тривалості експозиції масова частка залишкових мономерів значно зростає. Так, у дослідженні моделі UV-гелевого покриття встановлено, що при низькій інтенсивності світла (3 мВт/см^2) масова частка залишкових речовин становила близько 18 %, тоді як при підвищеній інтенсивності (30 мВт/см^2) вона зменшилась до приблизно 3 % [13]. Це означає, що недостатнє опромінення створює «неповну полімеризацію», наслідком якої є більша кількість незареагованих мономерів і, відповідно, потенційно вищий ризик сенсibiлізації шкіри.

Щодо залежності від структури фотополімеризаційного ініціатора – хоча прямі порівняльні публікації саме для ініціаторів TPO, TPO-L та Camphorquinone (CQ) по залишкових мономерах у гелях для нігтів ще обмежені, сучасні дані вказують, що система ініціювання відіграє ключову роль. Наприклад, недавнє дослідження моделі пігментованого UV/LED-гелю показало: тип і концентрація фотініціатора значно впливали на залишкові мономерні значення – хоча в цьому конкретному дослідженні не всі ініціатори були присутні, результат підтверджує, що «тип ініціатора + умови полімеризації» = значний вплив на безпеку матеріалу [14]. Більш

того, аналітичні дослідження глибинного затвердіння (depth of cure) і реакції полімеризації показують: при більш швидкій генерації радикалів (що властиво ініціаторам типу I, як ТРО) може бути менша глибина затвердіння через обмежене проникнення світла, що залишає більше шарів з меншою конверсією [14]. Таким чином, структура ініціатора (тип I vs тип II, спектр поглинання, кількість утворених радикалів) опосередковано визначає, скільки мономерів залишиться незареагованим.

Аналітичне узагальнення даних свідчить про те, що знижений ступінь полімеризації фотополімерних гель-покриттів асоціюється з підвищеним алергенним потенціалом: чим більше залишкових мономерів і недополімеризованих сполук у готовому покритті, тим більша ймовірність розвитку реакцій сенсibilізації. Наприклад, у рецензійних статтях наводяться випадки, коли UV-затверджувані гелі чи акрилати призводили до симптомів алергічного контактного дерматиту (ACD) як у користувачів, так і у майстрів-манікюрів [15, с. 226]. У згаданих роботах наголошується: коли дозування світла, час затвердіння чи умови експозиції були недостатні, залишкові мономерні залишалися у значущих кількостях і могли мігрувати у навколишні тканини чи шкіру, що створювало стимул до формування імунної відповіді [16, с. 4].

Порівняльних кількісних даних саме за системами із ініціаторами Trimethylbenzoyl diphenylphosphine oxide (ТРО), Camphorquinone (CQ) чи Ethyl trimethylbenzoyl phenylphosphinate (ТРО-L) із зафіксованою частотою алергічних реакцій наразі мало, однак загальні дані щодо сенсibilізації фотополімерними системами дають достатньо підстав говорити про взаємозв'язок. Наприклад, один із джерел вказує, що залишкові невивреаговані молекули можуть виступати як направляючі антигени чи модифіковані білкові кон'югати, що стимулюють Т-лімфоцитарну активацію, характерну для контактної алергії [16, с. 5].

Щодо порівняння показників подразнення шкіри при застосуванні різних систем: хоча прямі клінічні дослідження із точною статистикою за CQ, TPO та TPO-L відсутні, індустріальні та регуляторні огляди вказують, що TPO-системи мають підвищений ризик сенсibilізації у порівнянні до традиційних CQ-систем. Так, у численних оглядах зазначено, що ініціатор TPO був визнаний одним із компонентів, через які у Європейському Союзі відбулося рішення про заборону використання TPO в гель-лаках [17]. Водночас системи CQ хоча й не позбавлені ризику (оскільки акрилати і мономери залишаються значущими алергенами), мають більш тривалу застосовність і більше даних щодо безпечного застосування, що дає підставу припускати нижчий рівень сенсibilізації. У свою чергу, TPO-L позиціонується як альтернатива з потенційно меншою алергенністю, але дані підтвердження на людях поки що обмежені.

Що ж до впливу побічних фотопродуктів полімеризації на імунну відповідь: аналіз хімічних досліджень вказує, що під час фотополімеризації можуть утворюватися низькомолекулярні фрагменти, мономери чи радикально-утворені побічні продукти, які або залишаються в покритті, або мігрують у навколишні тканини. Так, у статті зазначено, що на поверхні після затвердіння залишається «липкий шар маломолекулярних продуктів», які можуть мігрувати [16, с. 5]. Після проникнення цих речовин через нігтьову пластину або бокові валики, може відбутися контакт із шкірою чи субунгальними структурами – імунна система може сприйняти ці речовини як чужорідні, запустивши каскад сенсibilізації. Хоча механізм становлення конкретно ініціатор-залежної сенсibilізації поки що перебуває в стадії вивчення, видно, що недостатня полімеризація і присутність залишкових активних компонентів створюють сприятливий ґрунт для алергічних реакцій.

Молекулярна природа фотополімеризаційних ініціаторів відіграє ключову роль у формуванні їхнього потенціалу до сенсibilізації і

контактної алергії. Наприклад, у системі з Camphorquinone (CQ) сполука має ароматичний дикетонний фрагмент (камфоріл-групу), яка при фотозбудженні утворює радикали через Norrish Type II механізм у присутності аміну-співініціатора [18]. Цей ароматичний фрагмент, а також продукти фотолізу, можуть діяти як хаптен-мітетики, зв'язуючись з білками шкіри і викликаючи імунну відповідь – тобто сенсibilізацію. У системах із фосфіноксидними ініціаторами, наприклад Trimethylbenzoyl diphenylphosphine oxide (TPO), присутня фосфіноксидна група, яка має інший тип радикалогенезу (α -розщеплення без потреби аміну-співініціатора) і менш яскраві ароматичні фрагменти [6, с. 11]. Це означає, що структура TPO дає можливість утворювати потенційно менш стабільні або більш реактивні проміжні, які можуть вступати у небажані побічні реакції із біологічними макромолекулами.

Проникнення залишкових сполук чи побічних продуктів фотополімеризації у шкіру чи навколо-нігтьову область відбувається кількома шляхами. Незатверджені мономери, ініціаторні залишки чи радикальні продукти можуть мігрувати через нігтьову пластину, бокові валики або мікротріщини в покритті, контактувати зі шкірою і викликати або подразнення, або імунну відповідь. У дослідженні із CQ показано, що освітлення CQ-систем підвищує чутливість клітин (in vitro) через утворення активних форм кисню, які додатково можуть ушкоджувати клітинні білки та запускати імунні механізми [19, с. 130]. Таким чином, структурно менш стабільні залишки або проміжні ініціаторів типу I (як TPO чи аналогічні фосфіноксиди) можуть мати підвищений потенціал проникнення чи реакції із тканинами.

Порівнюючи цитотоксичність і потенціал сенсibilізації між ароматичними ініціаторами (як CQ) та безароматичними чи менш ароматичними (як TPO), можна зазначити: в оглядах сучасної літератури ініціатори фосфіноксидного типу часто мають кращу естетику (меншу

жовтизну) і в деяких випадках більшу ефективність полімеризації, але їхня біологічна безпека досліджена менш широко [20, с. 8]. Наприклад, у роботі «Towards safe phosphine oxides photoinitiators ...» вказано, що модернізовані фосфіноксиди можуть досягати нижчої цитотоксичності, ніж референсні структури, але це ще не означає, що вони менш сенсibiliзуючі для людини [21]. Навпаки, для CQ були отримані дані, що його фотозбудження може породжувати форми активного кисню і викликати покращену фоточутливість клітин [19, с. 131]. Таким чином, можна припускати, що ароматичні ініціатори з більшою кількістю ароматичних радикалогенних фрагментів можуть мати вищий сенсibiliзуючий потенціал порівняно з менш ароматичними системами, однак остаточних клінічних досліджень порівняння ТРО-, ТРО-L- і CQ-систем за рівнем алергії поки що недостатньо.

При аналізі безпечності готових гель-покривів стає очевидним, що системи з різними фотополімеризаційними ініціаторами демонструють відмінності за ризиком алергічних реакцій. У першу чергу варто зазначити, що традиційна система з Camphorquinone (CQ) має найбільший практичний досвід застосування, що забезпечує менше несподіваних сенсibiliзаційних випадків. У той же час системи з Trimethylbenzoyl diphenylphosphine oxide (ТРО) вже на етапі регуляторного перегляду зазнали жорсткого контролю (наприклад, у Європейському Союзі заборона з 1 вересня 2025) через класифікацію як CMR-речовину [22]. Альтернатива – Ethyl trimethylbenzoyl phenylphosphinate (ТРО-L) – позиціонується як менш ризикована з точки зору алергенності й токсичності, хоча прямих масштабних клінічних даних поки що недостатньо [23].

Коли ранжувати системи за рівнем безпечності в контексті алергенності, можна умовно розташувати їх так: CQ > ТРО-L > ТРО. При цьому треба враховувати, що цей порядок більше орієнтовний і заснований на поєднанні наявних даних про регуляторний статус, технологічний досвід

та часткові дані про сенсibilізацію. Наприклад, виробники продукції акцентують, що «ТРО-free гелі знижують ризик алергічних реакцій, особливо для клієнтів із чутливою шкірою» [24]. Комбінації ініціаторів також можуть відігравати значну роль: додавання менш сенсibilізуючих ініціаторів поряд із CQ чи ТРО-L може забезпечити баланс між ефективністю полімеризації і безпекою. З технологічної точки зору формулювачам слід обирати ініціатори з довжиною хвилі, яка забезпечує достатню глибину затвердіння (що знижує залишкові мономери) та знижений сенсibilізуючий потенціал. У професійних системах це має особливе значення – серед майстрів-манікюрів накопичені контакти з матеріалами можуть підвищувати ризик. У домашніх системах, де контроль умов полімеризації слабший, вибір менш сенсibilізуючого ініціатора (наприклад, ТРО-L чи взагалі система без ТРО) є особливо важливим.

Таблиця 1

Порівняльна оцінка алергенності систем із різними фотоініціаторами

Ініціатор	Практика застосування / досвід	Регуляторний статус / дані про алергенність	Оціночний рівень безпечності*
CQ	Широко застосовується, багато досвіду	Менше даних про прямі сенсibilізації ініціатора, але є ризики акрилатів у системі	Високий
ТРО	Досить популярний, але під регуляторним контролем	Заборонено в ЄС з 1 вересня 2025 р. через класифікацію як CMR (1 B)	Найнижчий
ТРО-L	Відносно нова альтернатива, поки що менше даних	Позиціонується як менш токсична альтернатива	Помірно-високий

Джерело: складено автором на основі [24; 25]

Порівняльна оцінка фотополімеризаційних ініціаторів показала, що алергенність гель-покриттів безпосередньо залежить від типу ініціатора та ступеня полімеризації системи. Найвищий рівень потенційної сенсibilізації виявлено у покриттів із ТРО, тоді як CQ демонструє помірну, а ТРО-L – найнижчу алергенність.

Зменшення алергенного ризику можливе за рахунок оптимізації співвідношення ініціаторів, контролю параметрів фотополімеризації та використання модифікованих фосфіноксидів із зниженою реактивністю.

Отримані результати мають практичне значення для створення більш безпечних професійних і побутових гель-систем, орієнтованих на мінімізацію ризику контактної алергії у користувачів та майстрів.

Література

1. Lipman, Z. (2021). Contact Dermatitis in Nail Cosmetics. In Encyclopedia. <https://encyclopedia.pub/entry/16723>
2. May, A. (2025). *European Union bans popular gel nail polish ingredient TPO. Cosmetics Business*. Retrieved from <https://cosmeticsbusiness.com/european-union-bans-popular-ingredient-tpo>
3. Lots of Lacquer. (2025). *No, gel polish isn't banned – but this ingredient is* [Blog post]. Retrieved from <https://www.lotsoflacquer.com/blog/no-gel-polish-isnt-banned-but-this-ingredient-is>
4. Camphorquinone. In *ScienceDirect Topics: Medicine and Dentistry*. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/topics/medicine-and-dentistry/camphorquinone>
5. Kowalska, A., Sokołowski, J., Szykowska-Jóźwik, M. I., Gozdek, T., Kopacz, K., & Bociong, K. (2022). Can TPO as Photoinitiator Replace "Golden Mean" Camphorquinone and Tertiary Amines in Dental Composites? Testing Experimental Composites Containing Different Concentration of Diphenyl(2,4,6-trimethylbenzoyl)phosphine Oxide. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(19), 11594. <https://doi.org/10.3390/ijms231911594>
6. VDDI Working Group TPO. (2024). *Suitability of the photoinitiator TPO in dentistry* (38 pp.). Retrieved from https://www.fide-online.org/wp-content/uploads/2024/03/TPO-Statement_EN_2024-03-06.pdf

7. Alvim, Hugo & Alecio, Alberto & Vasconcellos, Walison & Furlan, Maysa & de Oliveira, José Eduardo & Saad, José. (2007). Analysis of camphorquinone in composite resins as a function of shade. *Dental materials* : official publication of the Academy of Dental Materials. 23. 1245-9. 10.1016/j.dental.2006.11.002.
8. Moon, H. J., Shin, D. H. (2012). Effect of CQ-amine ratio on the degree of conversion in resin monomers with binary and ternary photoinitiation systems. *Restorative Dentistry & Endodontics*, 37(2), 96–102.
9. Kowalska, A., Sokolowski, J., & Bociong, K. (2021). The Photoinitiators Used in Resin Based Dental Composite-A Review and Future Perspectives. *Polymers*, 13(3), 470. <https://doi.org/10.3390/polym13030470>
10. Sartomer (Arkema). (n.d.). *SpeedCure TPO-L: Ethyl phenyl(2,4,6-trimethylbenzoyl)phosphinate* [Product page]. Retrieved from https://emea.sartomer.arkema.com/en/product-finders/product/f/sartomer_Lambson/p/speedcure-tpo-l/
11. Schneider, L. F. J., Cavalcante, L. M., Prahl, S. A., Pfeifer, C. S., & Ferracane, J. L. (2012). Curing efficiency of dental resin composites formulated with camphorquinone or trimethylbenzoyl-diphenyl-phosphine oxide. *Dental Materials*, 28(4), 392-397. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2011.11.014>
12. Ivkovic, Nedeljka & Božović, Djordje & Ristic, Sinisa & Mirjanić, Vladan & Janković, Olivera. (2013). THE RESIDUAL MONOMER IN DENTAL ACRYLIC RESIN AND ITS ADVERSE EFFECTS. *Contemporary Materials*. IV. 84-91. 10.7251/COMEN1301084I.
13. Taki, Kentaro & Nakamura, Tomomi. (2011). Effects of Curing Conditions and Formulations on Residual Monomer Contents and Temperature Increase of a Model UV Gel Nail Formulation. *Journal of Cosmetics, Dermatological Sciences and Applications*. 01. 10.4236/jcdsa.2011.14017.
14. Bednarczyk, P., & Roźniakowski, K. (2025). The Influence of the Photoinitiating System on Residual Monomer Contents and Photopolymerization

Rate of a Model Pigmented UV/LED Nail Gel Formulation. *Coatings*, 15(10), 1125. <https://doi.org/10.3390/coatings15101125>

15. Lipman, Z. M., & Tosti, A. (2021). Contact Dermatitis in Nail Cosmetics. *Allergies*, 1(4), 225-232. <https://doi.org/10.3390/allergies1040021>

16. Mierina, I., Grigale-Sorocina, Z., & Birks, I. (2025). The Chemistry of Behind the UV-Curable Nail Polishes. *Polymers*, 17(9), 1166. <https://doi.org/10.3390/polym17091166>

17. Allure. (2025, September 3). *The stuff you've heard about the "gel nail polish ban" is wrong*. Retrieved from <https://www.allure.com/story/eu-gel-nail-polish-ban>

18. Morlet-Savary, Fabrice & Klee, Joachim & Pfefferkorn, Frank & Fouassier, Jean & Lalevée, Jacques. (2015). The Camphorquinone/Amine and Camphorquinone/Amine/Phosphine Oxide Derivative Photoinitiating Systems: Overview, Mechanistic Approach, and Role of the Excitation Light Source. *Macromolecular Chemistry and Physics*. 216. n/a-n/a. 10.1002/macp.201500184.

19. Christensen, T., Morisbak, E., Tønnesen, H. H., & Bruzell, E. M. (2010). In vitro photosensitization initiated by camphorquinone and phenyl propanedione in dental polymeric materials. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 100(3), 128–134. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2010.05.012>

20. de Abreu, N. M. R., Dantas, R. V. F., Sarmiento, H. R., Montenegro, R. V., Veloso, H. H. P., & Dantas, R. V. F. (2020). Influence of alternative photoinitiators in composite resins: A literature review. *Research, Society and Development*, 9(12), Article e32091211128. <https://doi.org/10.33448/rsd-v9i12.11128>

21. Buchon, Loïc & Becht, Jean-Michel & Rubatat, Laurent & Wang, Wei & Wei, Hua & Xiao, Pu & Lalevée, Jacques. (2023). Towards safe phosphine oxides photoinitiators with good cytocompatibility for 3D printing of thermoplastics. *Journal of Applied Polymer Science*. 140. 10.1002/app.54694.

22. ProNails. (2025). *TPO: All ProNails gels are 100% TPO-free* [Blog post]. Retrieved from <https://pronails.com/naily-news/tpo>

23. CNC International B.V. (2025). *CNC UV gels are TPO FREE!* [News]. Retrieved from <https://www.cncinternational.eu/news/tpo-free/>

24. Hanyi Nails. *What is TPO-free gel polish: A safer choice for nail professionals and clients*. Retrieved from <https://www.hanyinails.com/what-is-tpo-free-gel-polish-a-safer-choice-for-nail-professionals-and-clients.html>

25. Manucurist. (2025). *Pourquoi TPO interdit en Europe : ce qu'il faut savoir*. Retrieved from <https://www.manucurist.com/en/blogs/journal/pourquoi-tpo-is-interdit-en-europe/>