

mgr inż. GRZEGORZ OWCZAREK  
 dr ZYGMUNT KUBACKI  
 mgr inż. ADAM POŚCIK  
 Centralny Instytut Ochrony Pracy

## Kontaktowe ochrony oczu przy źródłach promieniowania laserowego

### Rys historyczny Kontaktowe ochrony oczu

W kraju, jak i na świecie do ochrony przed promieniowaniem laserowym stosuje się tradycyjne ochrony indywidualne, a więc okulary i gogle (chroniące oczy) [1,2] oraz środki ochrony zbiorowej w postaci kurtyn lub ekranów (chroniące całe ciało) [3]. Na różnych stanowiskach pracy (m.in. podczas zabiegów medycznych, polegających na naświetlaniu osób promieniowaniem laserowym miejsc bliskich gałce ocznej) okulary i gogle nie są w stanie zapewnić skutecznej ochrony oka. W związku z tym, istnieje pilna potrzeba podjęcia badań dotyczących opracowania nowego, nie stosowanego do tej pory, rodzaju zabezpieczenia oczu.

Najwcześniejsze pomysły dotyczące nakładania bezpośrednio na oko elementów zmieniających jego refrakcję datują się od XV w., gdy Kartezjusz (1596–1659) opisywał możliwość zmiany refrakcji gałki ocznej przez bezpośrednie przyłożenie do jej zewnętrznej powierzchni szklanego kulistego pojemnika, względnie rurki wypełnionej cieczą [8]. Pierwsze prace eksperymentalne z elementami przylegającymi bezpośrednio do gałki ocznej przeprowadził Thomas Young (1773–1829), angielski lekarz i fizyk. Prace Younga polegały na nałożeniu na gałkę oczną wypukłej soczewki zaopatrzonej w kołnierzyk z wosku i wypełnionej wodą. W XIX w. Herschel (1792–1871) zastosował łuskę szklaną z cienką warstwą żelatyny od strony oka.

Początkowo soczewki nagałkowe, obecnie nazywane soczewkami kontaktowymi, produkowane były ze szkła dmuchanego na podstawie wcześniej wykonanych odlewów. Wszystkie charakteryzowały się kulistą częścią gałkową.

Znaczący postęp w doskonaleniu szkieł nagałkowych dokonali w latach 1912–1948 Rohr, Heine, Csapody, Dallos, Obbrig, Sulzer, Pagensteicher i Axenfelder [8]. Udoskonalono wówczas obróbkę części

optycznej szkła twaródkowego, wprowadzono termoplastyczne techniki odlewnicze, polegające na zdejmowaniu formy bezpośrednio z gałki ocznej. Zastosowano szkła skleralne szlifowane, często perforowane lub rowkowane. Po pewnym czasie zaczęto tworzyć zestawy soczewek, w których uwzględniono statystyczne prawidłowości kształtów oraz zniekształceń gałek ocznych.

W 1939 r. Teissler przedstawił pierwsze soczewki kontaktowe wykonane z celulozoidu, wyciskane odpowiednią formą metalową [8]. W tym samym roku Gysrffy pierwszy zastosował szkło organiczne (polimetakrylan metylu – PMMA) do wyrobu soczewek kontaktowych [9]. W Polsce Kałczyński jako pierwszy (1939 r.) wykonał tłoczoną soczewkę kontaktową ze szkła organicznego [8]. Soczewki z PMMA wykonywane są do dzisiaj. Nazywa się je twardymi soczewkami kontaktowymi. Są nietoksyczne, odporne na rozpuszczanie enzymatyczne i dobrze tolerowane. Cechują się brakiem wodochłonności i elastyczności.

Kolejnego postępu w dziedzinie soczewek kontaktowych dokonali w 1962 roku Wichterle i Lim przez wynalezienie hydrożelu, czyli polimetakrylanu 2-hydroksyetylu (PHEMA). Obecnie PHEMA jest podstawowym materiałem, z którego wytwarza się miękkie soczewki kontaktowe. Materiał ten w stanie suchym ma właściwości twardego szkła organicznego, po uwodnieniu zaś staje się miękki i plastyczny.

Soczewki kontaktowe, bezpośrednio przylegające do gałki ocznej, wykorzystywane są w celach:

- korekcji wadliwej refrakcji oka – soczewki twarde i miękkie,
- terapeutycznych (np. leczenia ran rogówki) – soczewki miękkie,
- kosmetycznych (np. zmiany koloru tęczówki oka) – soczewki miękkie.

Zastosowanie twardych soczewek kontaktowych może spełniać wymagania

*Praca wykonana w ramach Programu Wieloletniego (b. SPR-1) pn. „Bezpieczeństwo i ochrona zdrowia człowieka w środowisku pracy” dofinansowanego przez Komitet Badań Naukowych*

dotyczące ochrony przed promieniowaniem laserowym [1, 2], pod warunkiem odpowiednio przeprowadzonej modyfikacji ich widmowych charakterystyk przepuszczania. Można to osiągnąć przez barwienie twardych soczewek kontaktowych lub przez naniesienie na ich powierzchnię ultracienkich, interferencyjnych warstw ochronnych absorbujących i odbijających promieniowanie laserowe. Wytworzenie powyższymi technikami ochron zabezpieczających oczy przed promieniowaniem laserowym nazwano kontaktowymi ochronami oczu.

Do tej pory w Polsce nie podjęto badań nad zastosowaniem kontaktowych ochron oczu. Na świecie pojawiły się jedynie modelowe rozwiązania tego typu ochron, wyłącznie nie przepuszczające promieniowania widzialnego [4]. W dostępnej literaturze oraz w bieżących informacjach zamieszczanych w Internecie nie znaleziono opracowań poświęconych analizie właściwości ochronnych i podstawowych parametrów charakteryzujących kontaktowe ochrony oczu, między innymi ich kształtu. Jak dotąd, jedynymi powszechnie stosowanymi środkami, chroniącymi oczy przed działaniem promieniowania laserowego, są okulary lub gogle [5,6].

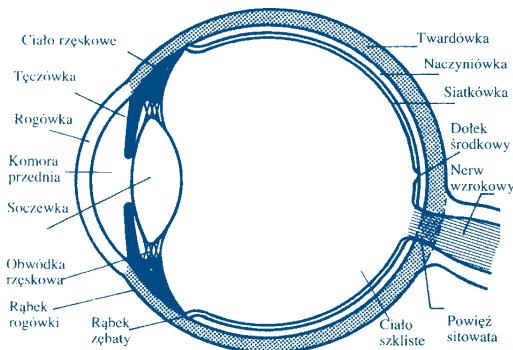
Niniejsza publikacja prezentuje niektóre aspekty kształtu ochron kontaktowych chroniących oczy przed promieniowaniem laserowym.

### Oko i jego patologia wywołana wiązką laserową

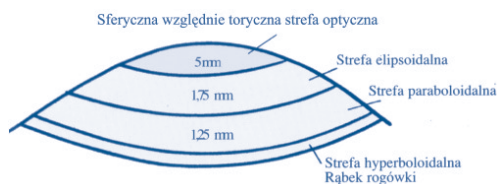
Istotne znaczenie w aplikacji kontaktowych ochron oczu, z uwagi na ich bezpośrednią styczność z tkankami oka, jest

znajomość podstaw anatomii i fizjologii przedniego odcinka gałki ocznej, a zwłaszcza rogówki oraz filmu łzowego. Schematyczny przekrój gałki ocznej przedstawiono na rys. 1 [8].

Rogówka wraz z twardówką tworzą włóknistą powłokę (*tunica externa oculi*)



Rys. 1. Schematyczny przekrój gałki ocznej



Rys. 2. Schemat profilu strefy optycznej rogówki

**ZESTAWIENIE PATOLOGICZNYCH EFEKTÓW TOWARZYSZĄCYCH NAŚWIETLENIU OCZU WIĄZKĄ LASEROWĄ**

Zakres widmowy promieniowania laserowego	Efekty patologiczne oka
Nadfiolet C (180 – 280 nm)	zapalne uszkodzenie rogówki
Nadfiolet B (280 – 315 nm)	zapalne uszkodzenie rogówki
Nadfiolet A (315 – 400 nm)	katarakta fotochemiczna
Widzialny (400 – 780 nm)	fotocemiczne i termiczne uszkodzenia siatkówki
Podczerwień A (780 – 1400 nm)	katarakta, oparzenie siatkówki
Podczerwień B (1,4 – 3,0 μm)	przymglenie rogówki, katarakta, oparzenie rogówki
Podczerwień C (3,0 – 1 nm)	oparzenie rogówki

li) obejmującą gałkę oczną. Zajmuje ona około 1/5 całej powierzchni gałki ocznej i ma kształt elipsoidalny. W przeciwieństwie do twardówki jest bardzo wypukła i jest tkanką przezroczystą, beznaczyniową, o gładkiej i błyszczącej powierzchni. Stanowi silnie załamujący światło element optycznego układu oka. Rolę optyczną spełnia jej centralna część, której średnica wynosi ok. 4–6 mm.

Zewnętrzna powierzchnia rogówki wraz z filmem łzowym odgrywają znaczną rolę w procesie widzenia. Jej przezroczystość decyduje o prawidłowym załamaniu promieni świetlnych. Schemat profilu optycznej rogówki pokazano na rys. 2 [8].

Przedoczny film łzowy o grubości ok. 6–10 μm pokrywa powierzchnię gałki ocznej w obrębie szpary powiekowej. Płyn łzowy odgrywa znaczącą rolę w umieszczeniu i użytkowaniu ochrony kontaktowej na powierzchni oka. Umieszczona na powierzchni rogówki ochrona kontaktowa (w warstwie filmu łzowego w postaci kieszonki) rozdziela ten film na dwie warstwy łzowe: 1 – na zewnętrznej stronie ochrony, 2 – między ochroną a rogówką. Warstwa filmu łzowego przed ochroną spełnia rolę oczyszczającą, ochronną i optyczną. Warstwa filmu łzowego między ochroną a rogówką spełnia rolę odżywczą dla rogówki. Łącznie z ochroną kontaktową (przepuszczającą światło) warstwa ta bierze udział w refrakcji przepuszczanego światła.

Oczy są bardzo wrażliwą strukturą biologiczną. Promieniowanie laserowe, charakteryzujące się dużą gęstością mocy przypadającej na jednostkę powierzchni stanowi – zwłaszcza dla oka – poważne zagrożenie. W zakresie fal od 400 nm (promieniowanie nadfioletowe) do 1400 nm (promieniowanie podczerwone) bardziej zagrożona jest siatkówka oka, ponieważ rogówka, soczewka, ciecz wodnista i ciało szkliste przepuszczają to promieniowanie [12]. Wiązka laserowa skupiona na siatkówce może osiągnąć znaczne gęstości mocy. Gęstość mocy, która może wystąpić na siatkówce, zależy od rodzaju lasera, jego mocy oraz stopnia zbieżności lub rozbieżności wiązki.

Energia wiązki laserowej absorbowana przez siatkówkę może spowodować lokalne nagrzanie i oparzenie nabłonka barwnikowego oraz czopków i pręcików. Może być także przyczyną uszkodzenia wzroku, a nawet trwałej utraty widzenia. Zestawienie patologicznych efektów towarzyszących naświetleniu oczu wiązką laserową przedstawiono w tabeli [12].

Szczegółowy opis mechanizmów powodujących uszkodzenia oczu oraz sposoby obliczania zagrożeń oczu na skutek oddziaływania promieniowania laserowego można znaleźć m.in. w publikacjach [12,13,14].

Do obliczania zagrożeń oczu, wywołanych promieniowaniem laserowym stosuje się określenie maksymalnej dopuszczalnej ekspozycji promieniowania laserowego (MDE). Wartości MDE są ustalane poniżej znanych poziomów zagrożeń i oparte są na informacjach z badań doświadczalnych [12]. Wartości te powinny być uważane jedynie za wskazówki przy kontroli ekspozycji. Nie definiują one jednak precyzyjnie granicy oddzielającej poziom bezpieczny od niebezpiecznego. W każdym przypadku ekspozycja na promieniowanie laserowe powinna być tak mała, jak tylko to możliwe.

**Podstawowe parametry charakteryzujące kształt kontaktowych ochron oczu Dopasowanie ochron do oka**

Podstawowymi parametrami charakteryzującymi kształt rogówkowych ochron kontaktowych są:

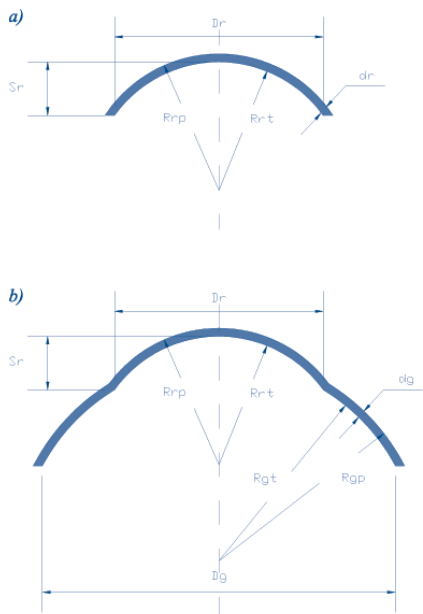
- głębokość łuku oznaczana jako  $S_r$  lub  $sag_r$ ,
- średnica  $D_r$
- promień krzywizny tylnej  $R_{rt}$ ,
- promień krzywizny przedniej  $R_{rp}$
- grubość  $d_r$ .

Dla ochron kontaktowych nagałkowych (z częścią gałkową) określamy ponadto:

- promień krzywizny tylnej części gałkowej  $R_{gt}$

- promień krzywizny przedniej części gałkowej  $R_{gp}$
- średnicę części gałkowej  $D_g$  – średnicę całej ochrony
- kąt nachylenia części gałkowej do osi optycznej ochrony ( $\alpha$ ) – tylko dla części gałkowych typu stożkowego.

Głębokość łuku jest podstawowym parametrem decydującym o sposobie dopasowania do oka rogówkowej ochrony kontaktowej. W przypadku nagalkowej ochrony kontaktowej część rogówkowa ochrony nie dotyka do powierzchni rogówki. Kształt części gałkowej musi więc zapewnić właściwe położenie całej ochrony na gałce ocznej. Na rys. 3 schematycznie przedstawiono – z zaznaczeniem wymienionych powyżej parametrów – ochrony kontaktowe typu rogówkowego oraz typu nagalkowego (z częścią gałkową – w postaci sfery).



Rys. 3. Kontaktowe ochrony oczu: a) – rogówkowe, b) – nagalkowe

Z rysunku 3 jasno wynika, że głębokość łuku  $S_r$  lub  $S_g$  można wyliczyć na podstawie znajomości średnicy  $D_r$  lub  $D_g$  i promienia krzywizny tylnej  $R_{rt}$  lub  $R_{gt}$  zgodnie ze wzorem.

$$S = R - \sqrt{R^2 - \left(\frac{D}{2}\right)^2}$$

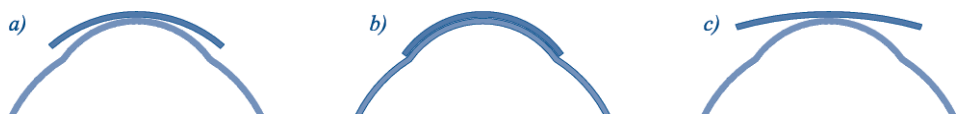
Określona głębokość łuku kontaktowej ochrony otrzymujemy przez zaprojektowanie odpowiednich wielkości promienia krzywizny tylnej i średnicy. Analiza rysunku oraz wzoru pozwala na sprecyzowanie zależności między parametrami geometrycznymi ochron kontaktowych. Zależności te przedstawiają się następująco:

- wraz ze wzrostem promienia krzywizny, przy stałej średnicy, maleje głębokość łuku,
- wraz ze zmniejszaniem promienia krzywizny, przy stałej średnicy, rośnie głębokość łuku,
- wraz ze zwiększaniem średnicy, przy stałym promieniu krzywizny, rośnie głębokość łuku,
- wraz ze zmniejszaniem średnicy, przy stałym promieniu krzywizny, maleje głębokość łuku.

Optymalne dopasowanie rogówkowej ochrony kontaktowej, jej ułożenie na gałce ocznej oraz wielkość i wyprofilowanie brzegów odgrywają znaczną rolę w efektywnym przepływie łez, prawidłowości przebiegów metabolicznych, utrzymaniu normalnych właściwości optycznych rogówki.

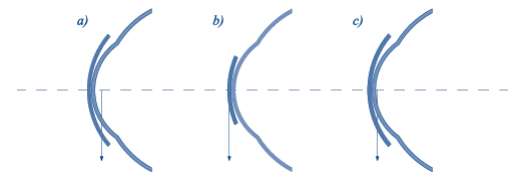
Ochrona kontaktowa przylegająca bezpośrednio do powierzchni rogówki może być ułożona na niej prawidłowo, zbyt stromo lub zbyt płasko. Na rys. 4 schematycznie przedstawiono różne ułożenia centralnej części ochrony kontaktowej na powierzchni rogówki.

Analizując kształt i dopasowanie rogówkowych ochron kontaktowych, mających zapewniać maksymalne bezpieczeństwo, zwrócono również uwagę na znaczenie położenia środka ciężkości



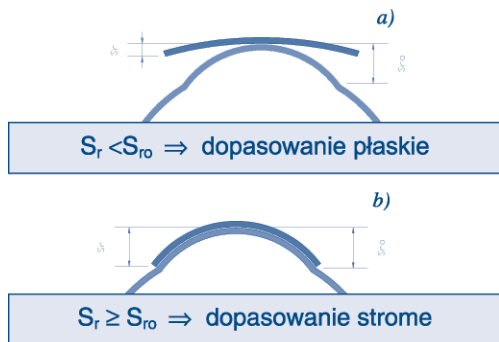
Rys. 4. Ułożenie centralnej części ochrony kontaktowej na powierzchni rogówki: a) – prawidłowe, b) – zbyt strome, c) – zbyt płaskie

tego typu ochrony. Wraz ze wzrostem średnicy ochrony położenie środka ciężkości przesuwa się do wewnętrznej strony oka (rys. 5), zapewniając mniejszą ruchomość ochrony. Położenie środka ciężkości w samej ochronie kontaktowej lub w przednim odcinku rogówki powoduje luźne niestabilne dopasowanie. Położenie środka ciężkości ochrony bardziej wewnętrznie powoduje stabilizację ochrony. Nałożenie na zewnętrzną powierzchnię ochrony interferencyjnych warstw zabezpieczających przed promieniowaniem laserowym może powodować nieznaczne przesuwanie się środka ciężkości ochrony na zewnątrz (pogorszenie stabilizacji). Zwiększenie w tym przypadku średnicy ochrony przemieszcza środek ciężkości do wewnątrz, co poprawia stabilizację ochrony.



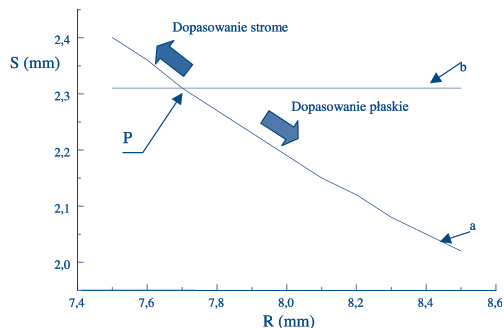
Rys. 5. Położenie środka ciężkości ochron kontaktowych w zależności od ich wielkości: a) – ochrona o dużej średnicy, b) – ochrona o małej średnicy, c) – przesunięcie środka ciężkości wskutek nakładania na ochronę warstw ochronnych

O dopasowaniu ochrony kontaktowej do oka decyduje również geometria samej rogówki charakteryzowana głównie przez jej głębokość łuku  $S$ . W zależności od głębokości łuku rogówki ochrona kontaktowa może być dopasowana w sposób płaski lub stromy. Różne sposoby dopasowania ochrony kontaktowej w zależności od stosunku wielkości głębokości łuków ochrony kontaktowej i rogówki pokazano na rys. 6.



Rys. 6. Sposoby dopasowania ochrony kontaktowej w zależności od stosunku wielkości głębokości łuków ochrony kontaktowej i rogówki: a) – dopasowanie płaskie, b) – dopasowanie strome,  $S_{r0}$  – oznacza głębokość łuku rogówki,  $S_r$  – głębokość łuku rogówkowej ochrony kontaktowej

Przyjmując dla rogówki średni promień krzywizny tylnej  $R = 7,7$  mm oraz średnicę  $D = 11$  mm i korzystając ze wzoru otrzymujemy średnią głębokość łuku rogówki  $S = 2,31$  mm. Aby zapewnić optymalne niezbyt strome dopasowanie rogówkowej ochrony kontaktowej do oka, jej głębokość łuku powinna być nieco mniejsza od głębokości łuku rogówki. Ze względu na zbyt małe głębokości łuków ochron kontaktowych o średnicy 7–10 mm – przy promieniach krzywizny 7,5–5 mm, a więc mieszczących się w zakresie średnich wartości promienia krzywizny rogówki – niemożliwe jest dopasowanie ochron o tych średnicach. Ochrona o średnicy 11 mm pokrywa również całą rogówkę (rys. 7).



Rys. 7. Zależność między głębokością łuku  $S$  a promieniem krzywizny ochrony  $R$ : a) – krzywa zależności między głębokością łuku a promieniem ochrony o średnicy 11 mm; b) – linia odpowiadająca średniej głębokości łuku rogówki  $S = 2,31$  mm

Z wykresu na rys. 7 widać, że aby kontaktowa ochrona rogówkowa o średnicy 11 mm była prawidłowo dopasowana, to jej promień krzywizny powinien być większy od promienia krzywizny, dla którego krzywa zależności między głębokością łuku a promieniem ochrony kontaktowej przecina się z linią odpowiadającą głębokości łuku rogówki (punkt P). Na wykresie linia ta odpowiada średniej głębokości łuku rogówki  $S = 2,31$  mm.

Do ochrony oczu przed promieniowaniem należy stosować nagałkowe ochrony kontaktowe składające się z części rogówkowej oraz gałkowej.

W powszechnie stosowanych soczewkach kontaktowych – zarówno twardych jak i miękkich – nie stosuje się obecnie części gałkowej (nośnej). Dawniej służyła ona jedynie jako element podtrzymujący tzw. część optyczną (rogówkową). Jednak do ochrony oczu przed promieniowaniem laserowym zdecydowano się na wprowadzenie części gałkowej, ze względu na znaczne rozszerzenie obszaru chronionego. Średnica soczewki rogówkowej wynosi maksymalnie ok. 12 mm, natomiast średnica części gałkowej może wynosić 20–24 mm. Zastosowanie części gałkowej zwiększa chronioną powierzchnię oka o ok. 3,5 razy w stosunku do części rogówkowej. Ponieważ część rogówkowa, w ochronie z częścią gałkową, nie dotyka do rogówki oka, jej kształt może być sferyczny [11]. Kształt części gałkowej może być sferyczny, asymetryczny, stożkowy lub indywidualnie dopasowany na podstawie specjalistycznych pomiarów gałki ocznej.

\* \* \*

Promieniowanie laserowe stanowi duże zagrożenie dla organizmu człowieka, zwłaszcza dla oczu. W medycynie oczy osób obsługujących urządzenia laserowe i pacjentów naświetlanych wiązką laserową tradycyjnie chronią okulary i gogle. Ocena obecnego stanu wiedzy w tym zakresie wykazała, że na pewnych stanowiskach pracy (np. podczas wykonywania zabiegów medycznych naświet-

lania wiązką laserową miejsc bliskich gałce ocznej) okulary i gogle nie są w stanie zapewnić pacjentom skutecznej ochrony oczu przed promieniowaniem laserowym. W związku z tym, podjęto badania dotyczące opracowania nowego, nie stosowanego do tej pory, rodzaju zabezpieczenia oczu – kontaktowych ochron oczu. Jednym z najważniejszych elementów tych ochron jest ich kształt.

PIŚMIENNICTWO

[1] EN 207:1998 *Personal eye-protection – Filters and eye-protection against laser radiation*  
 [2] EN 208:1998 *Personal eye-protection – Eye protectors for adjustment work on laser and laser system (laser adjustment eye-protectors)*  
 [3] EN 12254:1998 *Screens for laser working places – Safety requirements and testing*  
 [4] Katalog firmy Rockwell Laser Industries (USA)  
 [5] Guide to selection, use and maintenance of industrial eye-protectors, CEN 1995  
 [6] Katalogi firm produkujących środki ochrony oczu.  
 [7] Owczarek G., Pościak A., Kubacki Z., Płachta E.: *Badania nad zastosowaniem ochron kontaktowych chroniących oczy przed promieniowaniem laserowym. Punkt kontrolny 1. Dokumentacja pracy naukowo-badawczej CIOP. Zadanie 03.9.13 w SPR-1. Warszawa 1999 (maszynopis)*  
 [8] Szymankiewicz S.: *Soczewki kontaktowe korekcyjne i lecznicze – powikłania*. UNIA, Katowice 1997  
 [9] Ruben M.: *Contact Lens Practice*. Bailliere Tindall, Londyn 1975  
 [10] *Okulistyka współczesna, pod redakcją Witolda Orłowskiego*, PZWL, Warszawa 1986  
 [11] Kałczyńska A.: *Szklą nagałkowe*. PZWL, Warszawa 1963  
 [12] Niechoda Z., Nowicki M.: *Przepisy BHP przy pracy z laserami. Materiały Konferencyjne IV Szkoły Optoelektroniki (1991)*  
 [13] PN-91/T-06700 *Bezpieczeństwo przy promieniowaniu emitowanym przez urządzenia laserowe. Klasyfikacja sprzętu. Wymagania i wytyczne dla użytkownika*  
 [14] Mathews L., Garcia G.: *Laser and safety in Laboratory*. IEEE Press, Washington, USA, 1995  
 [15] Owczarek G., Płachta E.: *Rozpoznanie i ocena możliwości ochrony oczu przed ekspozycją na promieniowanie laserowe. Etapy 1 i 2. Dokumentacja pracy naukowo-badawczej CIOP. Temat V.029, Warszawa 1997 (maszynopis)*  
 [16] Charakterystyka biomateriałów. Internet <http://www.aries.com.pl/~deniz/biomecyn/dyplom>