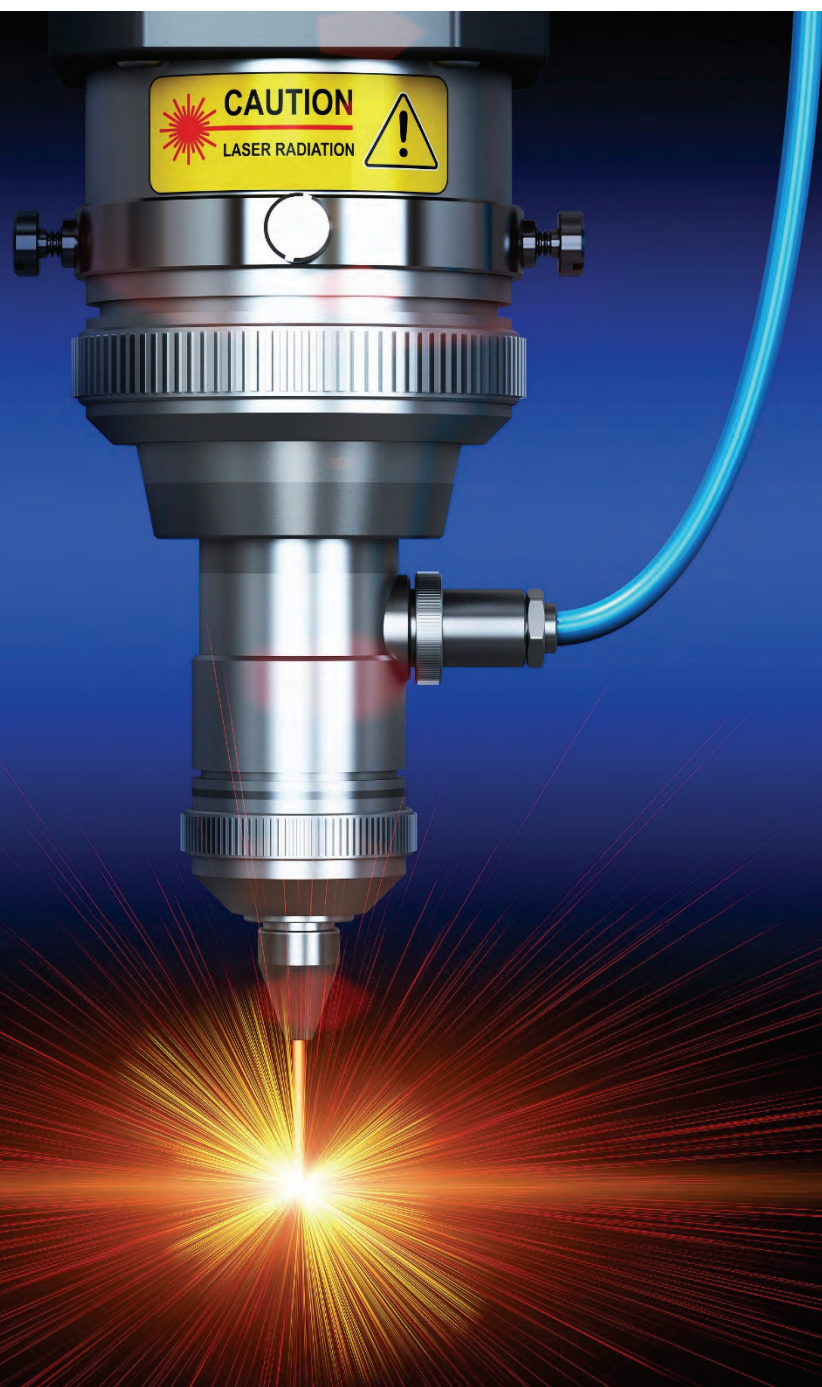


Małgorzata Okrasa ■ Joanna Szkudlarek ■ Grzegorz Owczarek

Ochrona przed promieniowaniem laserowym



Opracowano i wydano na podstawie wyników VI etapu programu wieloletniego pn. „Rządowy Program Poprawy Bezpieczeństwa i Warunków Pracy”, finansowanego w zakresie badań naukowych i prac rozwojowych ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju. Projekt nr I.PN.06 pt.: Optyczne filtry ochronne do zastosowań w warunkach narażenia na promieniowanie laserowe w przemyśle, medycynie oraz sektorze wojskowym
Koordynator Programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy

Autorzy:

Małgorzata Okrasa¹, Joanna Szkudlarek¹, Grzegorz Owczarek²

1) Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy

2) Niezależny ekspert

Projekt okładki: Anna Borkowska

Opracowanie redakcyjne: Kamil Jach

Opracowanie graficzne: Anna Borkowska

Publikacja skierowana jest do specjalistów ds. bhp odpowiedzialnych za organizację stanowisk pracy, na których wykorzystywane są urządzenia laserowe oraz do użytkowników tego typu sprzętu. Zawiera podstawowe informacje na temat: laserów stosowanych w przemyśle, zagrożeń występujących przy obsłudze laserów, prawodawstwa w zakresie ochrony zdrowia, a także środków bezpieczeństwa dotyczących narażenia pracowników na ryzyko spowodowane promieniowaniem laserowym oraz sposobów jego redukcji.

Copyright by Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy

Warszawa, 2024



Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy

ul. Czerniakowska 16, 00-701 Warszawa

tel. (22) 623 36 98, www.ciop.pl

Spis treści

<i>Wstęp</i>	<i>4</i>
<i>Klasyfikacja urządzeń laserowych i powiązane z nią zagrożenia dla wzroku</i>	<i>5</i>
<i>Skutki oddziaływania promieniowania laserowego.....</i>	<i>10</i>
<i>Narażenie oczu na promieniowanie laserowe</i>	<i>11</i>
<i>Narażenie skóry na promieniowanie laserowe</i>	<i>12</i>
<i>Prawodawstwo w zakresie ochrony zdrowia i bezpieczeństwa dotyczących narażenia pracowników na ryzyko spowodowane promieniowaniem laserowym</i>	<i>14</i>
<i>Elementy bezpieczeństwa laserowego wg PN-EN 60825-1</i>	<i>20</i>
<i>Środki ochrony indywidualnej przed promieniowaniem laserowym.....</i>	<i>26</i>
<i>Środki ochrony oczu</i>	<i>26</i>
<i>Odzież i rękawice ochronne.....</i>	<i>31</i>
<i>Dobre praktyki użytkowników laserów</i>	<i>33</i>
<i>Literatura.....</i>	<i>34</i>

Wstęp

Rozwój technologii laserowych od momentu ich odkrycia w latach 60. XX wieku zrewolucjonizował wiele dziedzin gospodarki, takich jak przemysł, medycyna, telekomunikacja i obronność [1]. Obecnie lasery są szeroko stosowane ze względu na swoją precyzję, wydajność oraz zdolność do działania w różnych warunkach środowiskowych.

W medycynie lasery stały się nieodzownym narzędziem w chirurgii, diagnostyce i terapii. Wykorzystuje się je m.in. w chirurgii okulistycznej, dermatologii oraz terapii fotodynamicznej, w których umożliwiają precyzyjne usuwanie tkanek, leczenie schorzeń skórnych, a nawet leczenie niektórych nowotworów. Postępy w technologii laserowej przyniosły również innowacje w obrazowaniu medycznym. Przykładem może być optyczna tomografia koherentna, która pozwala na bezinwazyjne badanie głęboko położonych tkanek [2].

W przemyśle lasery są szeroko stosowane w obróbce materiałów, podczas cięcia, spawania, czyszczenia i grawerowania, co znacząco zwiększa precyzję i efektywność procesów. Technologie te znalazły zastosowanie także w zaawansowanych procesach produkcyjnych, takich jak druk 3D, który pozwala na wytwarzanie skomplikowanych struktur z różnych materiałów [3]. W zastosowaniach telekomunikacyjnych lasery napędzają rozwój sieci światłowodowych, umożliwiając szybki przesył danych na duże odległości [4].

Innym z obszarów, w których technologia laserowa znajduje zaawansowanie jest obronność. Lasery odgrywają istotną rolę w systemach celowniczych i nawigacyjnych, umożliwiając precyzyjne namierzanie i śledzenie celów z dużą dokładnością. Systemy te wykorzystują lasery do pomiaru odległości. W dziedzinie obronności lasery są także rozwijane jako potencjalna broń oraz elementy systemów zakłócania komunikacji przeciwnika [5].

Promieniowanie laserowe, mimo swoich licznych zastosowań, może być źródłem zagrożeń, głównie dla narządu wzroku, ale również dla skóry i innych tkanek [6]. Ekspozycja na wysokoenergetyczne promieniowanie laserowe może prowadzić do natychmiastowych poważnych uszkodzeń tkanek, natomiast długotrwała ekspozycja na lasery o niskiej intensywności może skutkować problemami zdrowotnymi, które rozwijają się z czasem [7,8]. Skutki działania promieniowania laserowego różnią się w zależności od długości fali, intensywności i czasu trwania ekspozycji [7,9,10]. Zagrożenie może stanowić także promieniowanie odbite oraz rozproszone [11]. Oprócz tego, promieniowanie laserowe może

generować pyły, ozon i inne substancje toksyczne w wyniku oddziaływania z obrabianymi materiałami, co stanowi dodatkowe zagrożenie dla operatora urządzenia laserowego. Z uwagi na opisane wyżej zagrożenia niezwykle istotne jest stosowanie odpowiednich środków minimalizacji ryzyka wynikającego z narażenia na promieniowanie laserowe.

Celem poniższego materiału jest dostarczenie specjalistom ds. bezpieczeństwa i higieny pracy oraz osobom odpowiedzialnym za eksploatację urządzeń laserowych w przemyśle podstawowych informacji na temat zagrożeń związanych z promieniowaniem laserowym oraz metod ich minimalizacji. Szczególny nacisk położono na środki ochrony oczu i twarzy, w tym zasady ich właściwego doboru i stosowania, co wspiera dobre praktyki związane z bezpiecznym użytkowaniem laserów.

Klasyfikacja urządzeń laserowych i powiązane z nią zagrożenia dla wzroku

Klasyfikacja laserów została opracowana w celu ułatwienia użytkownikom oceny zagrożeń związanych ze stosowaniem laserów oraz określenia niezbędnych środków kontrolnych. Została ona opisana w PN-EN 60825-1: 2014-11 [12], która definiuje kategorie laserów w zależności od potencjalnego ryzyka narażenia na promieniowanie laserowe pod względem uszkodzeń skóry lub oczu. Klasyfikacja nie dotyczy innych zagrożeń, takich jak ryzyka elektryczne, mechaniczne, chemiczne czy związane z promieniowaniem wtórnym. Celem klasyfikacji jest uwzględnienie wzrastającego poziomu ryzyka obrażeń wraz ze wzrostem mocy dostępnej powyżej poziomu klasy 1 oraz dokładne opisanie ryzyka związanego z potencjalną ekspozycją pracownika znajdującego się w niewielkiej odległości od lasera. Strefa zagrożenia może znacząco różnić się w odniesieniu do różnych laserów w obrębie tej samej klasy. Poziom ryzyka można jednak znacznie zmniejszyć poprzez zastosowanie dodatkowych środków ochronnych, w tym dodatkowych zabezpieczeń technicznych, takich jak osłony ochronne. Zgodnie z ww. normą lasery dzieli się na cztery klasy, w obrębie których wydzielone są dodatkowo podklasy (rys. 1).



Rysunek 1. Klasyfikacja produktów laserowych wg PN-EN 60825-1:2014-11.

Źródło: CIOP-PIB

Lasery klasy 1 to produkty laserowe, które są bezpieczne w użytkowaniu, nawet przy długotrwałym bezpośrednim narażeniu na działanie wiązki, w tym podczas obserwacji przy użyciu teleskopowych układów optycznych. Do tej klasy zaliczają się także lasery o dużej mocy, które są całkowicie zamknięte, co uniemożliwia dostęp do potencjalnie niebezpiecznego promieniowania podczas ich eksploatacji (tzw. wbudowane produkty laserowe, np. drukarki laserowe odtwarzacze płyt CD, DVD i Blu-ray). Choć bezpośrednio patrzenie w wiązkę laserów klasy 1., które emitują widzialne promieniowanie, może powodować efekt olśnienia, szczególnie w warunkach słabego oświetlenia, nie stanowi ono zagrożenia dla zdrowia.

Lasery klasy 1M to produkty laserowe, które są bezpieczne podczas użytkowania, w tym przy długotrwałym bezpośrednim patrzeniu w wiązkę promieniowania przez nieuzbrojone oko (bez użycia układów optycznych). Jednak w przypadku użycia optyki teleskopowej (takiej jak lornetki), może dojść do przekroczenia maksymalnej dopuszczalnej ekspozycji i uszkodzenia oczu. Zakres długości fal dla laserów klasy 1M ogranicza się do zakresu widma, w którym większość szklanych materiałów optycznych używanych w przyrządach optycznych może efektywnie transmitować promieniowanie, czyli od 302,5 nm do 4000 nm. Choć bezpośrednio patrzenie w wiązkę promieniowania laserowego klasy 1M, emitującego

widzialne promieniowanie, nie jest niebezpieczne, może powodować efekt olśnienia, szczególnie w warunkach słabego oświetlenia zewnętrznego.

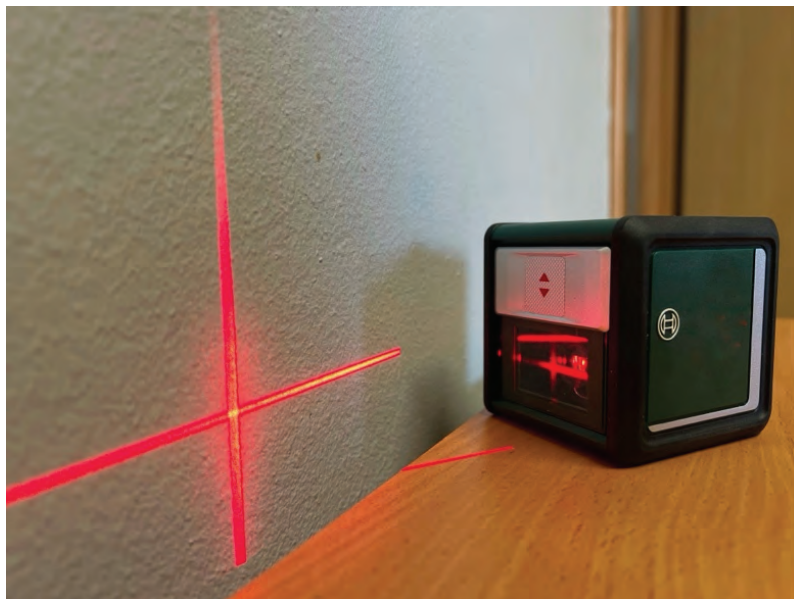
Lasery klasy 1C to produkty laserowe przeznaczone do bezpośredniego stosowania na skórze lub tkankach wewnętrznych ciała podczas zabiegów medycznych, diagnostycznych, terapeutycznych lub kosmetycznych, takich jak np. usuwanie owłosienia, redukcja zmarszczek, leczenie trądziku (rys. 2). Chociaż promieniowanie laserowe emitowane przez te urządzenia może odpowiadać poziomom klas 3R, 3B lub 4, narażenie oczu jest skutecznie redukowane za pomocą odpowiednich środków technicznych.



Rysunek 2. Przykład zastosowania lasera klasy 1C do usuwania zmian skórnych.
Fot. Khuram Nasem/Pexels.com

Lasery klasy 2 emitują widzialne promieniowanie w zakresie długości fal od 400 do 700 nm i są bezpieczne przy krótkotrwałej ekspozycji (w tym podczas obserwacji przy użyciu teleskopowych układów optycznych), jednak mogą być niebezpieczne przy celowym, długotrwałym wpatrywaniu się w wiązkę. W przypadku laserów tej klasy zakłada się, że istnieje bardzo niskie ryzyko urazu przy chwilowych ekspozycjach, które mogą być nieco dłuższe niż bazowy czas 0,25 sekundy (czas do wystąpienia odruchu mrugania lub awersji). Wiązka lasera klasy 2. może powodować zjawiska takie jak oślepienie, ślepotę błyskową czy powidoki, zwłaszcza w warunkach słabego oświetlenia zewnętrznego. Te efekty mogą mieć pośrednie konsekwencje dla ogólnego bezpieczeństwa, szczególnie w sytuacjach wymagających koncentracji, jak praca przy maszynach, praca na wysokości, obsługa urządzeń pod napięciem, czy prowadzenie pojazdów. Przykładami laserów klasy 2. są niektóre wskaźniki laserowe,

czytniki kodów kreskowych, poziomice laserowe (rys. 3) oraz czujniki laserowe stosowane w automatycznych systemach przemysłowych.



Rysunek 3. Przykład lasera klasy 2. – poziomica laserowa (laser krzyżowy).

Źródło: CIOP-PIB (fot. M. Okrasa)

Lasery klasy 2M emitują widzialne promieniowanie laserowe i są bezpieczne dla nieuzbrojonego oka (bez użycia przyrządów optycznych) tylko przy krótkotrwałej ekspozycji. W przypadku zastosowania teleskopowych układów optycznych, takich jak lornetki, ich obserwacja może natomiast prowadzić do uszkodzenia oczu. Podobnie jak w przypadku laserów klasy 2. wiązka lasera klasy 2M, zwłaszcza w warunkach słabego oświetlenia, może powodować takie zjawiska, jak: oślepienie, ślepotę błyskową i powidoki, co może mieć pośrednie skutki dla bezpieczeństwa pracy. Tego typu zakłócenia widzenia mogą być szczególnie niebezpieczne w sytuacjach wymagających wysokiej koncentracji. Przykłady laserów klasy 2M obejmują wskaźniki oraz dalmierze laserowe długiego zasięgu.

Lasery klasy 3R emitują promieniowanie, które może przekraczać maksymalną dopuszczalną ekspozycję przy bezpośrednim wpatrywaniu się w wiązkę, jednak ryzyko obrażeń w większości przypadków jest stosunkowo niskie. Chociaż nie są one całkowicie bezpieczne, ryzyko jest ograniczone, ponieważ niezamierzone narażenie na wiązkę rzadko prowadzi do pełnego pochłonięcia energii przez oko. Ponadto naturalne reakcje obronne, takie jak odruch unikania patrzenia (w przypadku promieniowania widzialnego) lub reakcja rogówki na nagrzewanie (w przypadku promieniowania podczerwonego), zmniejszają prawdopodobieństwo uszkodzenia oczu. Ryzyko obrażeń wzrasta wraz z czasem ekspozycji,

a w najgorszych scenariuszach lub przy celowym wpatrywaniu się w wiązkę, ekspozycja może być niebezpieczna. Promieniowanie laserowe klasy 3R w zakresie widzialnym może powodować takie efekty, jak: oślepienie, ślepotę błyskową czy powidoki, szczególnie w warunkach słabego oświetlenia, co może pośrednio wpływać na bezpieczeństwo pracy. Lasery klasy 3R powinny być używane tylko w miejscach, gdzie bezpośrednie patrzenie w wiązkę jest mało prawdopodobne.

Lasery klasy 3B są zwykle niebezpieczne w przypadku bezpośredniej ekspozycji oczu na wiązkę, w tym także przy przypadkowej, krótkotrwałej ekspozycji. Patrzenie na promieniowanie rozproszone i odbite zazwyczaj jest bezpieczne. Lasery klasy 3B, których emisja zbliża się do górnej granicy dopuszczalnego poziomu emisji (GED, ang. *accessible emission level*, AEL) w stosunku do tej klasy, mogą powodować drobne uszkodzenia skóry lub stanowić ryzyko zapalenia łatwopalnych materiałów, ale jest to możliwe tylko wtedy, gdy wiązka ma małą średnicę lub jest skupiona.

Lasery klasy 4. to urządzenia, w przypadku których zarówno bezpośrednie patrzenie w wiązkę, jak i ekspozycja skóry są niebezpieczne, a nawet patrzenie na rozproszone odbicia może stanowić zagrożenie. Lasery tej klasy często stwarzają również ryzyko pożaru. Przykłady laserów klasy 4. to lasery przemysłowe do cięcia i spawania (rys. 4), lasery chirurgiczne stosowane podczas zabiegów medycznych oraz lasery używane w badaniach naukowych, które wymagają wysokiej mocy promieniowania.

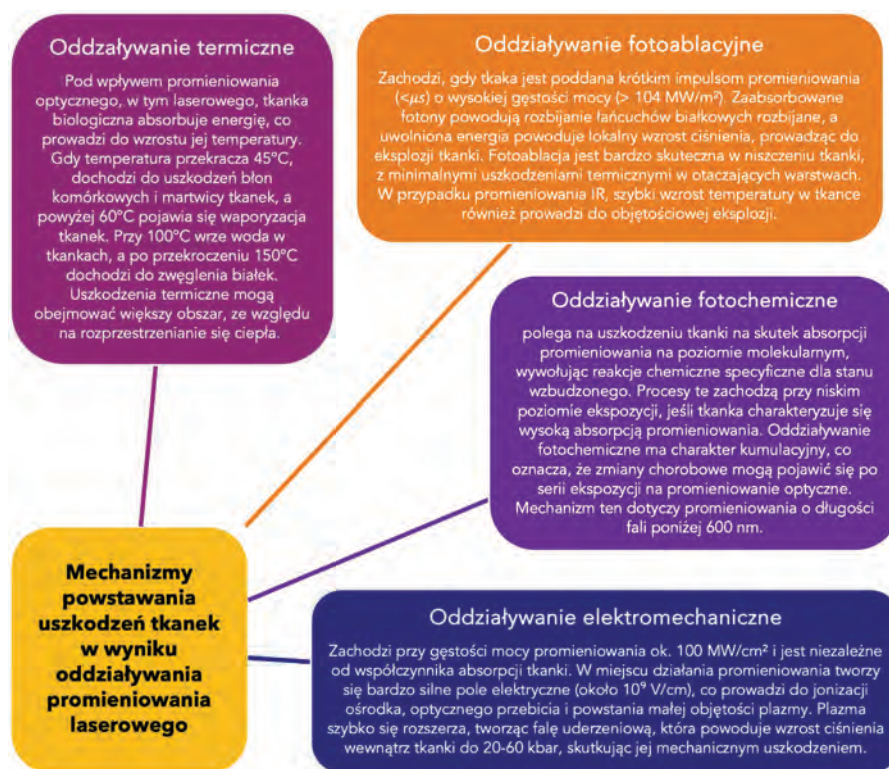


Rysunek 4. Przykład zastosowania lasera klasy 4. – ręczne spawanie laserowe.
Źródło: CIOP-PIB (fot. M. Okrasa)

Skutki oddziaływania promieniowania laserowego

Kluczowym czynnikiem decydującym o potencjalnych skutkach oddziaływania promieniowania laserowego na tkanki są ich właściwości optyczne [13, 14]. Tkanki te można podzielić na dwie grupy:

- przeziernie, w szerokim zakresie widmowym obejmującym widzialne promieniowanie elektromagnetyczne (np. tkanki oka) oraz większość tkanek w tzw. "oknach optycznych" w podczerwieni (700-900 nm);
- absorbujące, charakteryzujące się wysoką i zmienną absorpcją w zależności od długości fali promieniowania oraz parametrów fizycznych.



Rysunek 5. Podstawowe mechanizmy powstawania uszkodzeń tkanek w wyniku oddziaływania promieniowania laserowego.

Źródło: CIOP-PIB (opracowano na podstawie [12, 13])

Zarówno w przypadku skóry, jak i oczu, zagrożenie może wynikać zarówno z bezpośredniego kontaktu z wiązką laserową skierowaną na tkankę, jak i z odbitego lub rozproszonego promieniowania [6]. Interakcje między promieniowaniem laserowym a tkanką mogą powodować uszkodzenia poprzez różne mechanizmy, w tym oddziaływania termiczne, fotochemiczne, fotoablacyjne i elektromechaniczne. Oddziaływania termiczne charakteryzują

się zmianami w tkance wywołanymi ciepłem, natomiast efekty fotochemiczne obejmują reakcje chemiczne indukowane przez fotony. Fotoablacja skutkuje precyzyjnym usunięciem tkanki przy minimalnym uszkodzeniu termicznym, a efekty elektromechaniczne powodują uszkodzenia mechaniczne wynikające z lokalnych wzrostów ciśnienia i kawitacji. Konkretny rodzaj i zakres uszkodzeń tkanki zależą od parametrów lasera oraz właściwości tkanki docelowej (rys. 5).

Narażenie oczu na promieniowanie laserowe

Oko jest przystosowane do odbierania i przetwarzania promieniowania optycznego, co sprawia, że jest szczególnie podatne na uszkodzenia w wyniku nadmiernej ekspozycji na promieniowanie laserowe.

W zakresie długości fal 400-1400 nm największym zagrożeniem dla oka jest uszkodzenie siatkówki, ponieważ promieniowanie przechodzi przez przezroczyste struktury oka, takie jak rogówka, soczewka i ciało szkliste, a następnie jest silnie ogniskowane na siatkówce. Powoduje to znaczny wzrost natężenia promieniowania na siatkówce (nawet 200 000 razy w porównaniu do rogówki). Na przykład, wiązka o mocy 50 W/m^2 na rogówce osiąga wartość $1 \times 10^7 \text{ W/m}^2$ na siatkówce. Jedynie niewielka część promieniowania jest absorbowana przez barwniki wzrokowe, podczas gdy większość pochłania melanina w nabłonku barwnikowym siatkówki, co prowadzi do miejscowego nagrzania i oparzeń, mogących skutkować utratą wzroku. Uszkodzenie centralnej części plamki żółtej, odpowiedzialnej za ostre widzenie, objawia się początkowo jako biała plama, która z czasem może zmienić się w czarną plamę. Dochodzi wówczas do trwałego uszkodzenia wzroku.

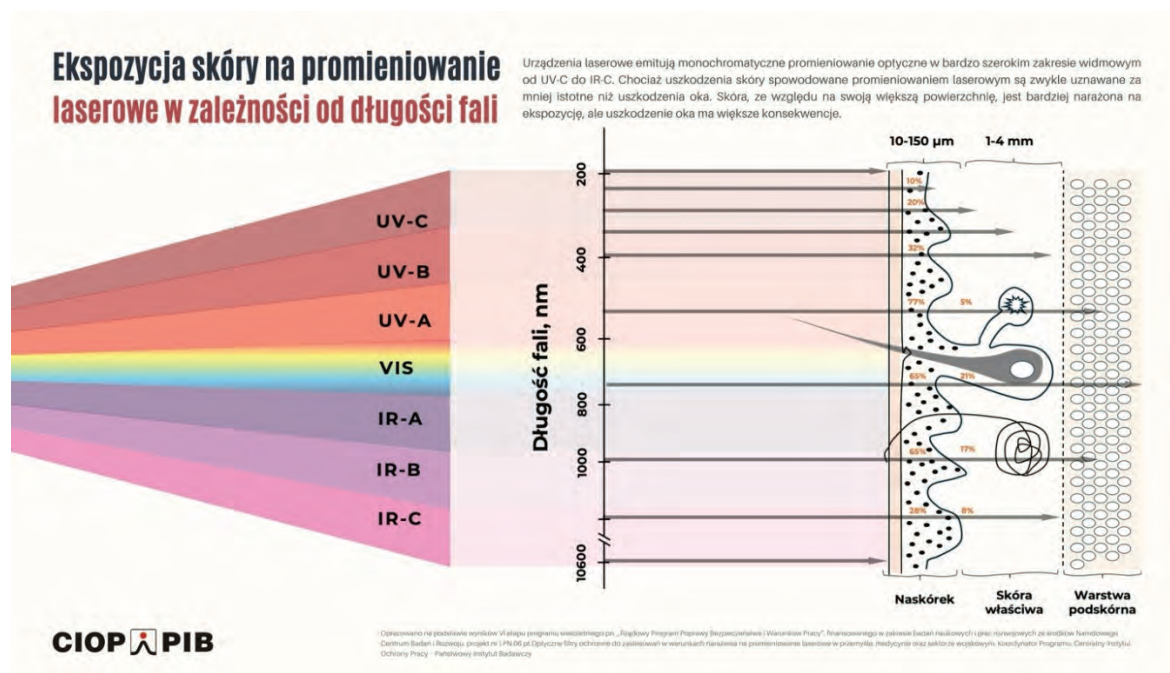
W przypadku długości fal poniżej 400 nm i powyżej 1400 nm największe zagrożenie stanowią uszkodzenia rogówki i soczewki. W zakresie 1500-2600 nm promieniowanie przenika do cieczy wodnistej oka, co powoduje rozpraszanie ciepła na większej objętości, zmniejszając ryzyko uszkodzeń przy krótkich ekspozycjach (poniżej 10 sekund).

Na infografice o ekspozycji oka zilustrowano zależność pomiędzy długością fali emitowanego promieniowania laserowego a narażeniem różnych części oka (rys. 6; infografikę można pobrać ze strony https://www.ciop.pl/CIOPPortalWAR/file/99009/I-PN-06-Infografika_PL.pdf, a kod QR znajduje się na tylnej okładce broszury).

ograniczających się do martwej, zewnętrznej warstwy naskórka. Tego rodzaju uszkodzenia mogą być bolesne, jeśli są wystarczająco poważne, jednak zazwyczaj goją się bez pozostawiania trwałych śladów. Oparzenia obejmujące większe obszary skóry są znacznie bardziej niebezpieczne, gdyż mogą prowadzić do utraty płynów ustrojowych i poważnych konsekwencji zdrowotnych. Mimo to, podczas pracy z laserami, prawdopodobieństwo wystąpienia tego rodzaju zagrożeń jest niewielkie.

Odczuwanie ciepła wynikające z absorpcji energii laserowej zazwyczaj zapewnia wystarczające ostrzeżenie, aby uniknąć uszkodzeń termicznych skóry. Wyjątkiem są lasery dalekiej podczerwieni o bardzo dużej mocy, które mogą nie generować takiego, wczesnego sygnału ostrzegawczego. Ekspozycja na promieniowanie ultrafioletowe może powodować długoterminowe skutki, takie jak przyspieszone starzenie się skóry, a w skrajnych przypadkach – rozwój raka skóry. Tego typu efekty mogą wystąpić w wyniku długotrwałej, chronicznej ekspozycji na promieniowanie laserów UV.

Infografika ilustrująca zależność pomiędzy długością fali emitowanego promieniowania laserowego a narażeniem różnych części oka została zaprezentowana na rys. 7 (można ją pobrać ze strony https://www.ciop.pl/CIOPPortalWAR/file/99369/I-PN-06-Infografika_Laser_derm_PL.pdf, a kod QR znajduje się na tylnej okładce broszury).



Rysunek 7. Zależność pomiędzy długością fali emitowanego promieniowania laserowego a narażeniem kolejnych warstw skóry. Na rysunku oznaczono procentową wartość absorpcji w poszczególnych warstwach skóry.

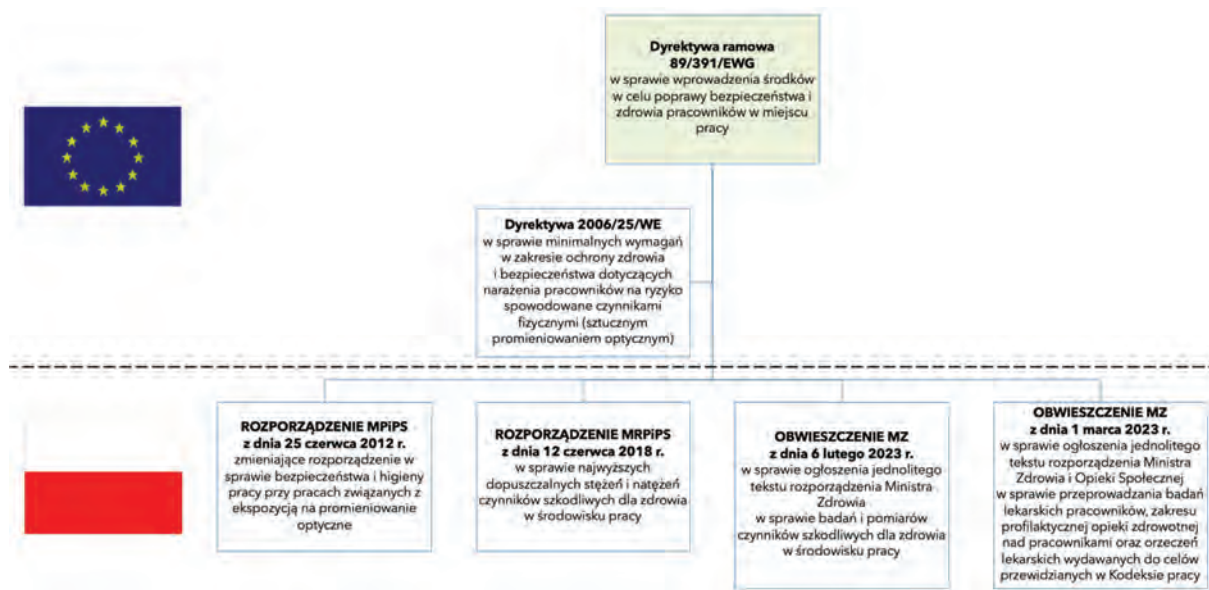
Źródło: CIOP-PIB

Uszkodzenia skóry wywołane promieniowaniem laserowym dzielą się na dwie główne kategorie: uszkodzenia termiczne, czyli oparzenia spowodowane krótkotrwałą ekspozycją na wiązki laserowe o dużej mocy oraz uszkodzenia fotochemiczne, które mogą wystąpić w wyniku przewlekłej ekspozycji na rozproszone promieniowanie ultrafioletowe.

Prawodawstwo w zakresie ochrony zdrowia i bezpieczeństwa dotyczących narażenia pracowników na ryzyko spowodowane promieniowaniem laserowym

Podstawą prawną regulującą zagadnienia bezpieczeństwa i ochrony zdrowia pracowników w Unii Europejskiej, w tym dotyczące narażenia na promieniowanie laserowe, jest **dyrektywa ramowa 89/391/EWG** [15]. Jest to dokument ustanawiający ogólne zasady dotyczące warunków pracy, w tym zapewnienia bezpiecznego i zdrowego środowiska pracy. Dyrektywa ta została wdrożona do polskiego prawa na mocy Kodeksu pracy [16] i określa obowiązki pracodawców oraz prawa pracowników w zakresie minimalizowania ryzyka i ochrony przed zagrożeniami. Dokument obejmuje szeroki zakres zagadnień, w tym ocenę ryzyka, środki zapobiegawcze oraz obowiązki informacyjne i szkoleniowe wobec pracowników w zakresie bezpieczeństwa i ochrony zdrowia.

Kolejnym dokumentem jest **dyrektywa 2006/25/WE** [17], będąca dziewiętnastą dyrektywą szczegółową w rozumieniu art. 16 ust. 1 dyrektywy ramowej 89/391/EWG. Dyrektywa ta określa minimalne wymagania dotyczące ochrony zdrowia i bezpieczeństwa pracowników narażonych na ryzyko związane z czynnikami fizycznymi, w tym sztucznym promieniowaniem optycznym. Zakres regulacji obejmuje ochronę przed szkodliwym działaniem promieniowania laserowego na skórę oraz oczy pracowników. Przepisy tej dyrektywy zostały wdrożone do polskiego prawodawstwa poprzez cztery odrębne rozporządzenia (rys. 8).



Rysunek 8. Prawodawstwo unijne i krajowe w odniesieniu do ochrony zdrowia i bezpieczeństwa pracowników narażonych na promieniowanie laserowe (podstawowe akty prawne).

Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Społecznej z dnia 27 maja 2010 r., z późniejszymi zmianami z 25 czerwca 2012 r., określa minimalne wymagania w zakresie bezpieczeństwa i higieny pracy przy pracach związanych z ekspozycją na promieniowanie optyczne. Regulacje te obejmują wyznaczanie poziomu ekspozycji, ocenę ryzyka zawodowego, wdrażanie środków eliminacji i minimalizacji ryzyka oraz obowiązki informacyjne i szkoleniowe wobec pracowników. Dokument odnosi się do prac, w których może wystąpić narażenie na nielaserowe i laserowe promieniowanie optyczne, z wyłączeniem promieniowania naturalnego. Rozporządzenie nakłada na pracodawcę szereg obowiązków które syntetycznie przedstawiono w tabeli 1. Ponadto w rozporządzeniu podano sposób wyznaczania poziomu ekspozycji na podstawie oceny poziomu promieniowania. Aby to zrobić w odniesieniu do promieniowania laserowego, należy określić natężenie napromienienia (gęstość mocy) E oraz napromienienie (gęstość energii) H zgodnie ze wzorami przedstawionymi poniżej. Wyznaczanie poziomów ekspozycji na podstawie pomiarów mocy lub energii promieniowania, bądź informacji o urządzeniu laserowym jest procesem złożonym i powinno być wykonywane przez osobę posiadającą odpowiednie kwalifikacje [18].

$E = \frac{dP}{dA}$ gdzie: E – natężenie napromienienia (gęstość mocy) [W/ m²] dP – moc promieniowania [W] dA – powierzchnia, na którą pada promieniowanie [m²]	$H = \int_0^t E(t) dt$ gdzie: H – napromienienie (gęstość energii) [J/ m²] E(t) – natężenie napromienienia w czasie (z pomiarów lub danych producenta) [W/ m²] dt – całkowity czas ekspozycji [s]
---	---

Przy wyznaczaniu poziomu ekspozycji na promieniowanie laserowe należy wziąć pod uwagę:

- wpływ środków ochrony zbiorowej, takich jak ekrany ochronne, które zmniejszają natężenie promieniowania;
- czas ekspozycji zależny od trybu pracy lasera i rodzaju zagrożenia;
- charakter eksploatacji (wszelkie czynności eksploatacyjne związane z użytkowaniem lasera, takie jak obsługa, konserwacja, remonty i pomiary kontrolne).

Tabela 1. Obowiązki pracodawcy wynikające z rozporządzenia MPiPS z dnia 27 maja 2010 r., z późniejszymi zmianami z 25 czerwca 2012 r.

Identyfikacja źródeł i Pomiar Poziomu Promieniowania	Identyfikacja źródeł promieniowania	Pracodawca powinien zidentyfikować wszystkie źródła promieniowania optycznego w miejscu pracy.
	Pomiar poziomu promieniowania	Wykonać pomiary odpowiednich parametrów promieniowania na stanowisku pracy. Alternatywnie, można użyć danych od producenta urządzenia lub dokonać obliczeń teoretycznych.
	Wyznaczenie poziomu ekspozycji	Na podstawie wyników pomiarów lub danych technicznych, określić poziom ekspozycji, uwzględniając wszystkie stosowane środki ochrony.
Ocena Ryzyka Zawodowego	Dokonanie oceny	Oceń ryzyko zawodowe związane z ekspozycją na promieniowanie optyczne, biorąc pod uwagę: Skutki oddziaływania promieniowania optycznego na organizm człowieka. Wartości maksymalnych dopuszczalnych ekspozycji (MDE). Obecność urządzeń i/lub wyposażenia ochronnego ograniczającego poziom ekspozycji. Poziom promieniowania i czas ekspozycji. Ryzyko dla pracowników szczególnego ryzyka (np. kobiet w ciąży).

		Wpływ współwystępujących czynników, takich jak fotouczulające substancje chemiczne.
	Dokumentowanie wyników	Sporządzić dokumentację oceny ryzyka, zgodnie z ogólnymi przepisami bezpieczeństwa i higieny pracy.
Eliminacja i Minimalizacja Ryzyka	Wdrożenie działań minimalizujących ryzyko	Na podstawie wyników oceny ryzyka, wdrożyć środki eliminujące lub minimalizujące ryzyko: Wprowadzenie procesów lub metod pracy ograniczających ryzyko Ograniczanie emisji promieniowania (np. zastosowanie osłon i ekranów). Wybór urządzeń o niskiej emisji promieniowania. Odpowiednia konserwacja sprzętu i urządzeń ochronnych. Projektowanie stanowisk pracy w sposób umożliwiający ograniczenie ekspozycji. Ograniczenie czasu trwania i poziomu ekspozycji. Zapewnienie środków ochrony indywidualnej. Przestrzeganie instrukcji użytkowania stosowanych urządzeń.
	Oznakowanie i wyznaczenie stref niebezpiecznych	Oznakować strefy, w których poziom promieniowania może przekraczać wartości MDE, oraz ograniczyć dostęp do tych miejsc.
Środki Ochrony Indywidualnej i Zbiorowej	Dobór	Zapewnić pracownikom odpowiednio dobrane środki ochrony indywidualnej (np. okulary ochronne) oraz środki ochrony zbiorowej.
	Regularna konserwacja i kontrola	Pracodawca powinien dbać o właściwy stan techniczny i sprawność wszystkich zastosowanych środków ochrony.
Informowanie i Szkolenie Pracowników	Przeprowadzenie szkoleń bhp	Zapewnić pracownikom informacje i szkolenia dotyczące zagrożeń związanych z promieniowaniem optycznym, środków ochronnych oraz sposobów minimalizacji ryzyka.
	Dostarczenie wyników oceny ryzyka	Przekazać pracownikom informacje o wynikach oceny ryzyka oraz działaniach podjętych w celu minimalizacji ryzyka.
Monitorowanie i Aktualizacja Oceny Ryzyka	Regularna aktualizacja	Pracodawca powinien okresowo powtarzać ocenę ryzyka, szczególnie w przypadku zmian w procesie technologicznym, nowych źródeł promieniowania lub wprowadzenia nowych środków ochronnych.
	Dokumentacja i rejestry	Prowadzić aktualną dokumentację dotyczącą oceny ryzyka i pomiarów ekspozycji na promieniowanie optyczne.

Wyznaczone wartości ekspozycji należy porównać z odpowiednimi wartościami maksymalnych dopuszczalnych ekspozycji (MDE) określonymi w przepisach. Jeśli istnieje więcej niż jedna wartość MDE odnosząca się do danej długości fali promieniowania laserowego, należy użyć wartości bardziej restrykcyjnej, zapewniając w ten sposób wyższy poziom ochrony zdrowia pracowników.

Wartości MDE określa **rozporządzenie Ministra Rodziny, Pracy i Polityki Społecznej z dnia 12 czerwca 2018 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy** [19].

Definicja

“Maksymalna dopuszczalna ekspozycja (MDE) - poziom promieniowania laserowego, na który w normalnych warunkach pracy urządzenia laserowego mogą być ekspozowane osoby bez doznawania szkodliwych skutków”

W rozporządzeniu określono wartości maksymalnej dopuszczalnej ekspozycji:

- oka i skóry na promieniowanie laserowe z zakresu 180÷400 nm (tabela 5),
- oka na promieniowanie laserowe z zakresu 400÷1400 nm dla czasów trwania ekspozycji < 10 s (tabela 6),
- oka na promieniowanie laserowe z zakresu 400÷1400 nm dla czasów trwania ekspozycji ≥ 10 s (tabela 7),
- skóry na promieniowanie laserowe z zakresu 400÷1400 nm (tabela 8),
- oka i skóry na promieniowanie laserowe z zakresu 1400÷106 nm (tabela 9).

Rozporządzenie uwzględnia również takie czynniki wpływające na wartość MDE, jak: długość fali promieniowania laserowego, czas trwania ekspozycji lub impulsu, rodzaj narażonego narządu (oko, skóra), kąt widzenia źródła promieniowania (w przypadku maksymalnej dopuszczalnej ekspozycji oka i promieniowania z zakresu 400÷1400 nm).

Obwieszczenie Ministra Zdrowia z dnia 6 marca 2023 r. ogłasza jednolity tekst **rozporządzenia dotyczącego badań i pomiarów czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy z dnia 2 lutego 2011 r.** [20]. Dokument ten określa szczegółowe wymagania dotyczące metod, częstotliwości oraz warunków wykonywania badań i pomiarów takich czynników. W przypadku narażenia na promieniowanie laserowe badania i pomiary wykonuje się, jeżeli eksploatowane są źródła promieniowania inne niż:

- lasery zaliczone, zgodnie z PN-EN 60825-1 [12], do klasy 1, 1M, 2, 2M lub 3R, które pracują w warunkach określonych przez producenta urządzenia,

- lasery zaliczone, zgodnie z PN-EN 60825-1 [12], do klasy 3B lub 4, do których zostały zastosowane środki ochrony zbiorowej, pozwalające na zaklasyfikowanie urządzenia do klasy 1.

Częstotliwość prowadzenia badań i pomiarów zależy od wcześniej określonej ekspozycji (przekroczenia wartości MDE). Prowadzi się je co najmniej:

- raz na 2 lata (gdy podczas ostatniego badania i pomiaru stwierdzono ekspozycję na poziomie 0,4 do 0,8 wartości MDE),
- raz w roku (gdy podczas ostatniego badania i pomiaru stwierdzono ekspozycję powyżej 0,8 wartości MDE).

Rozporządzenie zawiera również zasady dotyczące rejestracji i przechowywania wyników (zamieszczono w nim wzór karty badań i pomiarów czynników szkodliwych), oraz wymagania dla laboratoriów wykonujących pomiary (rys. 9).



Rysunek 9. Wymagania wobec jednostek mogących wykonywać badania i pomiary promieniowania laserowego; *) w przypadku braku takich laboratoriów akredytowanych.

Obwieszczenie Ministra Zdrowia z dnia 1 marca 2023 r. ogłasza jednolity tekst **rozporządzenia dotyczącego przeprowadzania badań lekarskich pracowników, zakresu profilaktycznej**

opieki zdrowotnej nad pracownikami oraz wydawania orzeczeń lekarskich do celów przewidzianych w Kodeksie pracy z dnia 30 maja 1996 r. [21]. Dokument ten określa szczegółowe wymagania dotyczące wstępnych, okresowych i kontrolnych badań lekarskich oraz częstotliwość ich wykonywania. Ponadto wskazuje zasady dotyczące profilaktycznej opieki zdrowotnej oraz procedur związanych z wydawaniem orzeczeń lekarskich, które dotyczą oceny zdolności pracowników do wykonywania określonych zadań w warunkach narażenia na czynniki szkodliwe lub uciążliwe dla zdrowia. W przypadku narażenia na promieniowanie laserowe prowadzi się badanie lekarskie ze szczególnym zwróceniem uwagi na skórę oraz badanie narządu wzroku. Rozporządzenie wskazuje, że podczas badania konieczne jest zwrócenie uwagi na stan spojówek, rogówek oczu i dna oka. Należy również określić ostrość widzenia, pole widzenia i przezierność soczewek. Badanie powinno być wykonywane co 3 lata.

Elementy bezpieczeństwa laserowego wg PN-EN 60825-1

Informacje na temat rozwiązań technicznych, które muszą być spełnione przez produkty laserowe w zakresie ochrony zdrowia i bezpieczeństwa użytkowników zamieszczone zostały w PN-EN 60825-1: 2014 [12]. Określono w niej szczegółowe wymagania dotyczące takich zabezpieczeń, jak: obudowy ochronne, blokady bezpieczeństwa, ostrzeżenia przed emisją promieniowania oraz inne środki ochronne, które są dostosowane do klasyfikacji lasera. W dokumencie podkreślono, że urządzenia muszą być zaprojektowane tak, aby ograniczyć dostęp do promieniowania o poziomach przekraczających poziomy dopuszczalny, co ma na celu minimalizację ryzyka ekspozycji użytkowników na niebezpieczne promieniowanie laserowe. Informacje na temat poszczególnych elementów bezpieczeństwa zestawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Zestawienie elementów bezpieczeństwa laserowego w zależności od klasy lasera

Element bezpieczeństwa	Odniesienie do wymagań PN-EN 60825-1	Klasa lasera, której dotyczy wymaganie	Uwagi:
Obudowa ochronna	6.2	1M, 2, 2M, 3B, 3R, 4	- Obudowa powinna uniemożliwiać dostęp do promieniowania laserowego przekraczającego poziomy określone w odniesieniu do kl. 1, chyba że dostęp jest konieczny do wykonania funkcji urządzenia. - Podczas konserwacji urządzeń kl. 1, 1C, 1M, 2, 2M lub 3R, nie powinno być możliwości dostępu do promieniowania kl. 3B lub 4. W przypadku urządzeń kl. 3B, konserwacja nie powinna umożliwiać dostępu do promieniowania kl. 4.
Płyty dostępu i blokady bezpieczeństwa	6.3	3B, 4	- Blokada bezpieczeństwa musi być zainstalowana na panelach dostępu obudowy ochronnej, jeśli panel dostępu jest przeznaczony do usuwania lub przemieszczania podczas konserwacji lub obsługi, a jego usunięcie lub przemieszczenie umożliwiłoby dostęp do promieniowania laserowego o określonych w normie poziomach. - Panel z blokadą w urządzeniach kl. 1, 1C, 1M, 2 lub 2M po otwarciu nie może emitować promieniowania przekraczającego GED dla klas 1M lub 2M, w zależności od długości fali, chyba że blokada zostanie dezaktywowana. - W przypadku produktów laserowych kl. 3R, 3B lub 4, otwarcie panelu nie może powodować emisji przekraczającej GED w odniesieniu do kl. 3R, chyba że blokada zostanie wyłączona. - Blokada musi być oznaczona odpowiednią etykietą i podczas wyłączenia blokady powinna pojawić się wyraźna sygnalizacja wizualna lub dźwiękowa.
Złącze zdalnej blokady	6.4	3B, 4	- Gdy styki tego złącza są otwarte, dostępne promieniowanie nie może przekraczać GED w odniesieniu do kl. 1M lub 2M. - Wymóg ten nie dotyczy systemów laserowych kl. 3B, które są przenośne i zasilane bateryjnie.

Element bezpieczeństwa	Odniesienie do wymagań PN-EN 60825-1	Klasa lasera, której dotyczy wymaganie	Uwagi:
			• Producenci mogą opcjonalnie dodać drugie złącze blokady, niewymagające aktywnego działania celem uruchomienia emisji.
Resetowanie ręczne	6.5	4	• Mechanizm resetowania, powinien umożliwiać wznowienie emisji promieniowania laserowego kl. 4 po jej przerwaniu w wyniku użycia zdalnego złącza blokady lub po przerwaniu zasilania trwającym dłużej niż 5 sekund.
Uruchamianie kluczem	6.6	3B, 4	• Klucz powinien być wyjmowany, a promieniowanie laserowe nie powinno być dostępne, gdy klucz zostanie usunięty. • Termin "klucz" obejmuje, takie formy zabezpieczeń jak kombinacje klawiszy, hasła, karty magnetyczne itp.
Ostrzeganie przed emisją promieniowania laserowego	6.7	1C, 3B, 4, 3R (o dł. fali < 400 nm i > 700 nm)	• System musi mieć urządzenie ostrzegawcze, które daje sygnał dźwiękowy lub wizualny, gdy laser jest włączony lub, gdy kondensatory lasera impulsowego są ładowane lub nie zostały jeszcze rozładowane. • Każdy element sterujący lub apertura lasera, oddalone od głównego urządzenia ostrzegawczego o 2 m lub więcej, musi być wyposażone w oddzielne urządzenie ostrzegawcze. • W przypadku przenośnych urządzeń kl. 3R, zamiast wskaźnika emisji można zastosować przycisk chwilowy, który musi być stale przytrzymywany, aby umożliwić emisję promieniowania.
Tłumik/blokada emisji promieniowania	6.8	3B, 4	• Urządzenie do tłumienia lub zatrzymywania emisji promieniowania (np. blokada wiązki, tłumik, kontroler elektryczny, przełącznik) musi uniemożliwiać dostęp do promieniowania laserowego przekraczającego GED w odniesieniu do kl. 1M lub 2M.
Sterowanie	6.9	3R, 3B lub 4	• Elementy sterujące powinny być rozmieszczone w taki sposób, aby ich regulacja i obsługa nie wymagały narażenia na promieniowanie laserowe

Element bezpieczeństwa	Odniesienie do wymagań PN-EN 60825-1	Klasa lasera, której dotyczy wymaganie	Uwagi:
			na poziomie odpowiadającym klasie 3R, 3B lub 4. • Użytkownik powinien mieć możliwość bezpiecznego dostępu do wszystkich elementów sterujących, bez ryzyka ekspozycji na niebezpieczne poziomy promieniowania podczas korzystania z urządzenia.
Optyka wizyjna	6.10	wszystkie dla których optyka wizyjna jest stosowana	• Każdy układ optyczny, wizjer lub ekran wyświetlacza wbudowany w urządzenie laserowe musi zapewniać wystarczające tłumienie, aby uniemożliwić dostęp do promieniowania laserowego przekraczającego GED w odniesieniu do kl. 1M. • W przypadku, gdy wizjer lub ekran posiada przesłonę lub zmienny tłumik, muszą one: (a) zapewnić, aby podczas otwierania przesłony lub zmiany tłumienia nie było możliwe narażenie na promieniowanie laserowe przekraczające GED w odniesieniu do kl. 1M, (b) uniemożliwić otwarcie przesłony lub zmianę tłumienia, jeśli istnieje ryzyko narażenia na promieniowanie laserowe przekraczające GED w odniesieniu do kl. 1M.
Zabezpieczenia przed awarią skanowania	6.11	wszystkie emitujące tego typu promieniowanie	• Urządzenia muszą być wyposażone w zabezpieczenia przed awarią skanowania, które zapobiegają przypadkowemu narażeniu na niebezpieczne poziomy promieniowania, nawet jeśli nastąpi błąd skanowania. • Urządzenia laserowe przeznaczone do emisji skanowanego promieniowania, które są klasyfikowane na tej podstawie, nie mogą – w wyniku awarii skanowania lub zmian w prędkości lub amplitudzie skanowania – umożliwiać dostępu do promieniowania laserowego przekraczającego GED w odniesieniu do przypisanej klasy.
Zabezpieczenie laserów klasy 1C	6.12	1C	• Produkty kl. 1C muszą być wyposażone w odpowiednie zabezpieczenia, które uniemożliwią przypadkową ekspozycję

Element bezpieczeństwa	Odniesienie do wymagań PN-EN 60825-1	Klasa lasera, której dotyczy wymaganie	Uwagi:
			na promieniowanie przekraczające poziomy dopuszczalne w odniesieniu do kl. 1 lub 3B w określonych warunkach.
Dostęp do wnętrza obudowy	6.13	Wszystkie umożliwiające dostęp typu "walk-in"	- Należy zapewnić środki, dzięki którym każda osoba wewnątrz obudowy może zapobiec aktywacji zagrożenia związanego z promieniowaniem laserowym odpowiadającym klasie 3B lub 4. - W obudowie ochronnej musi być umieszczone urządzenie ostrzegawcze, które dostarczy odpowiedniego sygnału o emisji promieniowania laserowego równoważnego klasie 3R (dla długości fal <400 nm i >700 nm), kl. 3B lub 4. - W przypadku, gdy dostęp do wnętrza obudowy podczas pracy lasera jest przewidziany lub możliwy do przewidzenia, należy zastosować rozwiązania techniczne uniemożliwiające emisję promieniowania odpowiadającego kl. 3B lub 4, jeśli ktoś znajduje się wewnątrz obudowy ochronnej urządzenia laserowego kl. 1, 2 lub 3R. - Środki zapobiegające dostępowi do promieniowania, gdy ktoś przebywa wewnątrz obudowy, mogą obejmować np. maty czułe na nacisk lub czujniki na podczerwień.
Warunki środowiskowe	6.14	wszystkie	- Produkt laserowy musi spełniać wymagania bezpieczeństwa określone w PN-EN 60825-1 we wszystkich przewidywanych warunkach eksploatacyjnych, odpowiednich do zamierzonego zastosowania. Należy uwzględnić warunki klimatyczne (np. temperatura, wilgotność względna) oraz wibracje i wstrząsy. - Jeżeli w specyficznej normie dotyczącej bezpieczeństwa produktu nie przewidziano odpowiednich wytycznych, można stosować odpowiednie podpunkty normy IEC 61010-1.

Element bezpieczeństwa	Odniesienie do wymagań PN-EN 60825-1	Klasa lasera, której dotyczy wymaganie	Uwagi:
Ochrona przed innymi zagrożeniami	6.15	wszystkie dla których inne zagrożenia występują	• Zagrożenia nieoptyczne: urządzenia laserowe muszą spełniać wymagania dotyczące bezpieczeństwa określone w odpowiednich normach bezpieczeństwa produktów, zarówno podczas normalnej pracy, jak i w przypadku pojedynczych awarii w odniesieniu do zagrożeń elektrycznych, ekstremalnych temperatur, ryzyka rozprzestrzeniania się pożaru, hałasu i ultradźwięków, obecności substancji szkodliwych, ryzyka wybuchu. • Promieniowanie wtórne: obudowa ochronna urządzeń laserowych zazwyczaj zapewnia ochronę przed promieniowaniem wtórnym (np. ultrafioletowym, widzialnym, podczerwonym). Jeśli istnieje obawa, że dostępne promieniowanie wtórne może być niebezpieczne, wartości MDE dla lasera mogą być zastosowane do oceny zagrożenia.
Obwód kontrolujący moc	6.16	wszystkie posiadające taki obwód	• Jeżeli w urządzeniu laserowym stosowany jest obwód, który ogranicza moc elektryczną dostarczaną do urządzenia emitującego laser w taki sposób, aby nie przekroczyć GED w odniesieniu do określonej kl. lasera podczas pracy, to obwód ten musi również ograniczać emisję w przypadku możliwych pojedynczych awarii.

Użytkowanie laserów wymaga odpowiedniego dostosowania infrastruktury w miejscu pracy. W przypadku procesów zautomatyzowanych, lasery są zainstalowane wewnątrz szczelnych obudów, a ochrona pracowników, którzy nie są bezpośrednio narażeni na promieniowanie laserowe, polega na sprawdzeniu szczelności obudowy oraz działania systemów bezpieczeństwa. Natomiast w sytuacji obsługi urządzeń ręcznych, gdzie pracownik operuje wiązką laserową, jest on narażony na promieniowanie bezpośrednie, a także na promieniowanie odbite i rozproszone. W takich przypadkach konieczne jest zastosowanie szczególnych środków bezpieczeństwa, w tym przede wszystkim środków ochrony indywidualnej.

Środki ochrony indywidualnej przed promieniowaniem laserowym

Środki ochrony indywidualnej (ŚOI) stanowią ostateczną linię obrony w systemach zarządzania bezpieczeństwem i higieną pracy. W przypadku zagrożeń związanych z promieniowaniem laserowym, podstawową strategią minimalizacji ryzyka powinno być stosowanie odpowiednich środków organizacyjnych i technicznych oraz zapewnienie odpowiedniego przeszkolenia użytkowników. Dopiero gdy te kroki nie wystarczają lub nie ma możliwości ich zastosowania, należy rozważyć użycie ŚOI zabezpieczających przed promieniowaniem laserowym. Do ŚOI chroniących przed promieniowaniem laserowym zaliczamy środki ochrony oczu (okulary ochronne, gogle i osłony twarzy), odzież ochronną oraz rękawice ochronne.

Środki ochrony oczu

Środki ochrony oczu przed promieniowaniem laserowym działają poprzez selektywne tłumienie wiązek laserowych o określonej długości fali, co zmniejsza intensywność promieniowania docierającego do oczu użytkownika. Wyposażone są one w filtry optyczne, które pochłaniają lub odbijają promieniowanie laserowe, jednocześnie pozwalając na zachowanie dobrej widoczności w innych zakresach widma świetlnego. W ten sposób minimalizują ryzyko uszkodzeń siatkówki, rogówki lub soczewki oka, które mogą wystąpić na skutek bezpośredniego lub rozproszonego promieniowania laserowego.

Wymagania dotyczące środków ochrony oczu przed promieniowaniem laserowym zostały określone w następujących normach:

- PN-EN 207:2017-07 (norma europejska) dotycząca środków ochrony oczu przed niezamierzoną ekspozycją na promieniowanie laserowe o długości fali od 180 nm do 1 mm [22],
- PN-EN ISO 19818-1:2021 – 12 (norma międzynarodowa) dotycząca środków ochrony oczu przed niezamierzoną ekspozycją na promieniowanie laserowe o długości fali od 180 nm do 1 mm [23],
- PN-EN 208:2010 (norma europejska) dotycząca okularów ochronnych stosowanych podczas regulacji laserów [24].

Normy te definiują wymagania wobec filtrów optycznych stosowanych w tego rodzaju ŚOI w zakresie parametrów optycznych, odporności na promieniowanie laserowe, odporności termicznej oraz mechanicznej (rys. 10).



Rysunek 10. Wymagania wobec środków ochrony oczu przed promieniowaniem laserowym.

Podstawowym parametrem w odniesieniu do filtrów ochronnych przed promieniowaniem laserowym jest **gęstość optyczna** (OD, *ang. optical density*). Wskazuje na stopień tłumienia promieniowania, jaki zapewnia dany filtr. OD oblicza się w oparciu o skalę logarytmiczną (logarytm dziesiętny), co oznacza, że wzrost wartości OD o 1 powoduje dziesięciokrotne zwiększenie ochrony przed promieniowaniem laserowym. Na przykład, filtr o OD 1 przepuszcza 10% promieniowania laserowego, OD 2 przepuszcza 1%, a OD 3 zmniejsza transmisję do 0,1%. Zatem im wyższa wartość OD, tym większy stopień ochrony (LB) filtra (tabela 3).

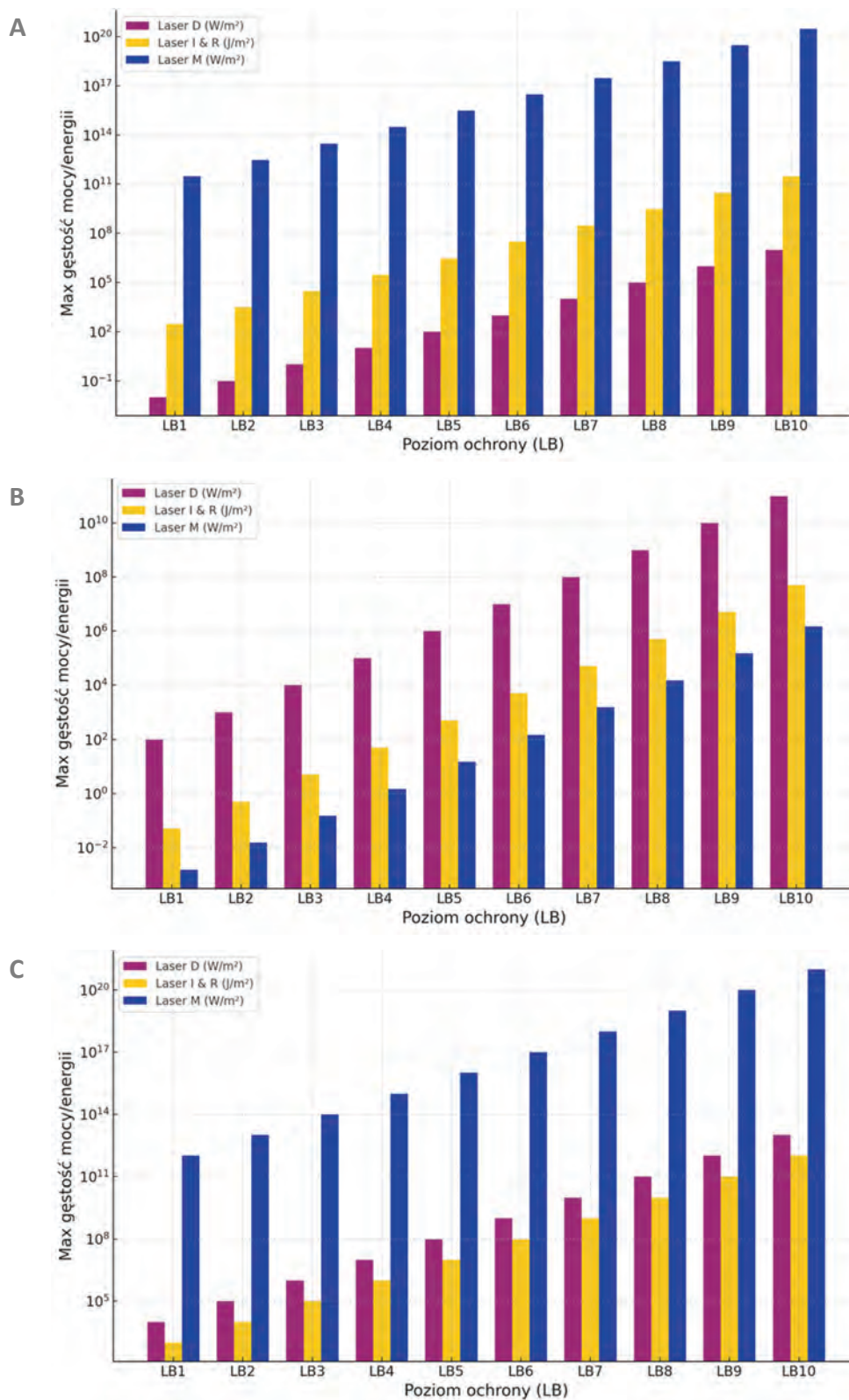
Tabela 3. Poziomy ochrony oczu przed promieniowaniem laserowym (LB) w zależności od gęstości optycznej filtrów (OD) i przepuszczalności promieniowania

Gęstość optyczna (OD)	Poziom ochrony (LB)	Współczynnik przepuszczania promieniowania laserowego (%)
OD 1	LB1	10%
OD 2	LB2	1%
OD 3	LB3	0,1%
OD 4	LB4	0,01%
OD 5	LB5	0,001%
OD 6	LB6	0,0001%
OD 7	LB7	0,00001%
OD 8	LB8	0,000001%
OD 9	LB9	0,0000001%
OD 10	LB10	0,00000001%

Wybór odpowiedniego filtra zależy od kilku czynników, takich jak:

- tryb pracy lasera (D – laser pracy ciągłej, I – laser impulsowy, R – laser impulsowy z modulacją dobroci Q, M – laser impulsowy z synchronizacją modu),
- zakres długości fali promieniowania laserowego,
- maksymalna gęstość mocy (E) lub gęstość energii (H) promieniowania laserowego.

W zależności od długości fali i trybu pracy lasera, w stosunku do każdego filtra określa się maksymalną dopuszczalną gęstość mocy (E) lub gęstość energii (H). Te parametry pomagają dobrać filtr odpowiedni dla konkretnego zastosowania laserowego, zapewniając użytkownikowi adekwatny poziom ochrony (rys. 11).



Rysunek 11. Maksymalna gęstość mocy [W/m^2]/energii [J/m^2] w odniesieniu do różnych typów laserów o długości fali z przedziału A) 180 – 315 nm; B) >315 – 1400 nm; C) >1400 nm – 1 mm.

Minimalną wymaganą gęstość optyczną (poziom ochrony) OD_{min} w warunkach założonej ekspozycji można wyznaczyć stosując następujące równanie:

$$OD_{min} = \log_{10} \frac{H}{MDE}$$

gdzie:

OD_{min} – minimalna wymagana gęstość optyczna filtra

H – spodziewany poziom ekspozycji niechronionego oka (gęstość energii promieniowania) [J/m^2]

MDE – maksymalna dopuszczalna ekspozycja

Przykład

Założmy że laser impulsowy o mocy 10 W emituje promieniowanie o długości fali 1064 nm i średnicy wiązki 50 μm . Czas trwania impulsu wynosi 100 ns.

Maksymalna gęstość mocy dla tego lasera wynosi:

$$E = \frac{dP}{dA} = \frac{10 \text{ W}}{\pi (2,5 \times 10^{-5} \text{ m})^2} = 1,6 \times 10^{10} \frac{W}{m^2}$$

Średnia gęstość energii wynosi wówczas:

$$H = 1,6 \times 10^{10} \frac{W}{m^2} \cdot 10^{-6} s = 1,6 \times 10^4 \frac{J}{m^2}$$

Wartość MDE (dla kąta widzenia źródła promieniowania $< 1,5$ mrad) odczytana z tabeli 6 rozporządzenia Ministra Rodziny, Pracy i Polityki Społecznej z dnia 12 czerwca 2018 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy [19] wynosi:

$$MDE = 5 \times 10^{-2} \cdot C_c \cdot C_E \frac{J}{m^2} = 5 \times 10^{-2} \frac{J}{m^2}$$

Wówczas minimalna wymagana gęstość optyczna filtra do stosowania podczas użytkowania ww. lasera wynosi:

$$OD_{min} = \log_{10} \frac{1,6 \times 10^4 \frac{J}{m^2}}{5 \times 10^{-2} \frac{J}{m^2}} = \log_{10} 3,2 \times 10^5 = 5,505 \approx 5$$

Jednocześnie wszystkie filtry chroniące przed promieniowaniem laserowym – stosowane w środkach ochrony oczu – muszą zapewnić **przepuszczanie promieniowania widzialnego** na poziomie umożliwiającym obserwację stanowiska pracy i otoczenia (minimum 20%).

Ponadto podczas projektowania filtrów chroniących przed promieniowaniem laserowym ważne jest zapewnienie odpowiedniej wytrzymałości energetycznej materiału. Zgodnie z wymaganiami dotyczącymi **odporności filtrów i opraw na promieniowanie laserowe**, filtry oraz ramki (oprawy) powinny spełniać wymagania określone w normie i nie mogą tracić swoich

właściwości ochronnych pod wpływem promieniowania laserowego (o gęstości mocy/energii jak na rys. 9. W wyniku działania promieniowania laserowego filtry nie powinny wykazywać odwracalnej zmiany poziomu ochrony. Nie powinny również powstawać odpryski po stronie skierowanej w stronę oka użytkownika. Dopuszcza się stopienie lub inne uszkodzenia powierzchni filtra, o ile jego właściwości ochronne zostają zachowane.

Co więcej, materiały filtrów muszą spełniać rygorystyczne wymagania dotyczące jakości optycznej. Maksymalne dopuszczalne wartości **mocy optycznych** w stosunku do ochrony oczu bez korekcji wynoszą $\pm 0,09$ D w przypadku mocy sferycznej oraz 0,09 D w przypadku mocy astygmatycznej. Dopuszczalne odchylenia mocy pryzmatycznych to 0,75 cm/m w poziomie „na zewnątrz”, 0,25 cm/m w poziomie „do wewnątrz” oraz 0,25 cm/m w pionie. Dodatkowo, filtry **muszą być wolne od wad materiałowych i powierzchniowych**, które mogłyby wpłynąć na ich funkcjonalność. Nie mogą zawierać takich defektów jak pęcherzyki, rysy, wtrącenia, matowe plamy, ślady formowania ani inne uszkodzenia wynikające z procesu produkcji. Filtry muszą być również całkowicie pozbawione otworów i powinny charakteryzować się możliwie niskim współczynnikiem luminancji rozpraszania światła. **Zredukowany współczynnik luminancji rozproszenia światła** filtra nie powinien przekraczać $0,50 \text{ cd/m}^2/\text{lx}$, co gwarantuje zachowanie wysokiej jakości optycznej materiału.

Ważnym aspektem właściwości użytkowych filtrów przeznaczonych do ochrony przed promieniowaniem laserowym jest ich **odporność na promieniowanie ultrafioletowe oraz podwyższoną temperaturę**. Zmiana współczynnika przepuszczania światła nie może przekroczyć 10% pod wpływem promieniowania UV oraz 5% w wyniku działania podwyższonej temperatury. Kluczowe jest również, aby w obu przypadkach przepuszczanie promieniowania laserowego pozostawało poniżej maksymalnych wartości określonych w odniesieniu do danego stopnia ochrony. Ponadto filtry i oprawy nie mogą ulegać **zapłonowi** ani żarzeniu w kontakcie z gorącymi powierzchniami i spełniać minimalne wymagania dotyczące **odporności mechanicznej**.

Odzież i rękawice ochronne

Odzież i rękawice ochronne mają za zadanie chronić obszary ciała najbardziej narażone na ekspozycję na promieniowanie. Obecnie nie istnieją specyficzne, międzynarodowe normy dotyczące odzieży i rękawic przeznaczonych wyłącznie do ochrony przed promieniowaniem

laserowym, jak ma to miejsce w przypadku ochrony oczu (np. PN-EN 207 i PN-EN 208). Niemniej jednak ochrona przed promieniowaniem optycznym, w tym laserowym, jest częściowo regulowana przez normy dotyczące środków ochrony indywidualnej przed promieniowaniem UV, IR oraz promieniowaniem cieplnym. Przykłady tych norm to:

- PN-EN 13758-2 – odnosi się do odzieży chroniącej przed promieniowaniem UV i może być stosowana do ochrony przed niektórymi rodzajami promieniowania optycznego [25].
- PN-EN ISO 11612 – norma dotycząca odzieży chroniącej przed czynnikami gorącymi, istotna przy ochronie przed promieniowaniem podczerwonym generowanym przez lasery [26].
- PN-EN 407 – norma dotycząca rękawic chroniących przed ciepłem i ogniem, szczególnie użyteczna przy ochronie przed promieniowaniem cieplnym, szczególnie w zakresie bliskiej podczerwieni emitowanej przez lasery [27].

W kontekście ochrony przed promieniowaniem laserowym przydatne mogą być także normy dotyczące odzieży i rękawic spawalniczych:

- PN-EN ISO 11611 – określa wymagania dotyczące odzieży ochronnej stosowanej podczas spawania i procesów pokrewnych, zapewniając ochronę m.in. przed promieniowaniem cieplnym i drobnymi kroplami stopionych metali powstających w procesach spawania [28].
- PN-EN 12477 – norma dotycząca rękawic spawalniczych, które chronią przed promieniowaniem cieplnym i drobnymi kroplami stopionych metali [29].

Warto również wspomnieć o nowoczesnych systemach ochrony aktywnej, które integrują czujniki w tekstyliach. Czujniki te wykrywają ekspozycję na promieniowanie laserowe i automatycznie dezaktywujące źródło lasera, znacznie zwiększając poziom ochrony [30]. Odzież aktywna może zawierać zintegrowane układy elektroniczne do przetwarzania sygnałów, przechowywania danych i komunikacji bezprzewodowej, umożliwiające zdalne wyłączenie lasera w razie zagrożenia. Innowacyjne materiały, takie jak grafen na tkaninach kevlarowych, integrują elektronikę w odzieży ochronnej, zachowując jednocześnie elastyczność i oddychalność. Tego rodzaju odzież może być samowystarczalna energetycznie i wyposażona w elastyczne baterie oraz czujniki, co dodatkowo zwiększa jej funkcjonalność [31].

Dobre praktyki w pracy z laserami

Przestrzeganie dobrych praktyk w pracy z laserami jest kluczowe do zapewnienia bezpieczeństwa użytkowników i minimalizacji ryzyka związanego z ekspozycją na promieniowanie laserowe. Poniżej zestawiono szereg działań, które użytkownicy mogą wdrożyć, aby zredukować potencjalne zagrożenia w codziennej pracy:

1. **Usuwanie elementów odbijających światło:** przed rozpoczęciem pracy z laserem należy usunąć ze swojego ubrania i ciała wszystkie przedmioty mogące odbijać promieniowanie, takie jak zegarki, pierścionki, bransoletki czy identyfikatory. Warto również pamiętać o wyjęciu telefonu z kieszeni, ponieważ może on również powodować powstawanie odbicia.
2. **Blokowanie potencjalnych odbić:** podczas ustawiania optyki oraz po jej zamontowaniu należy uwzględnić możliwość powstawania odbić, w tym odbić wstecznych. Odbicia mogą pochodzić z różnych kierunków, dlatego należy stosować odpowiednie blokady wiązek i obudowy, aby zminimalizować ryzyko odbicia promieniowania w niepożądane miejsca.
3. **Kontrola promieniowania odbitego:** należy regularnie sprawdzać, czy w otoczeniu lasera nie pojawiają się odbicia. Dotyczy to nie tylko początkowej konfiguracji, ale także późniejszych zmian w ustawieniach, szczególnie w przypadku pracy w dużych zespołach.
4. **Prowadzenie wiązki poniżej poziomu oczu:** wiązka lasera powinna być prowadzona poniżej poziomu oczu – zarówno podczas siedzenia, jak i stania. Zamiast dostosowywania wysokości użytkownika (np. poprzez zmianę wysokości krzesła), lepiej zastosować blokady wiązki lub inne zabezpieczenia, które ochronią użytkownika przed przypadkową ekspozycją.
5. **Używanie odpowiednich środków ochrony indywidualnej:** bardzo ważne jest stosowanie odpowiednich okularów ochronnych, odzieży i rękawic ochronnych. Często w laboratoriach dochodzi do urazów wynikających z używania niewłaściwych ŚOI – np. okularów przeciwsłonecznych zamiast ochronnych. Istotne jest, aby okulary miały odpowiednią gęstość optyczną (OD) i były dostosowane do długości fali używanego lasera. Specjaliści ds. bezpieczeństwa laserowego powinni upewnić się, że użytkownicy korzystają z właściwego sprzętu ochronnego.
6. **Zabezpieczanie laserów pozostawionych bez nadzoru:** Lasery pozostawione bez nadzoru stwarzają ryzyko, szczególnie gdy systemy są włączone, aby uzyskać stabilność termiczną. W takich przypadkach należy zadbać o zamknięcie lub odpowiednie zabezpieczenie

wiązek, aby zapobiec przypadkowemu dostępowi osób nieupoważnionych, takich jak pracownicy ochrony czy osoby sprzątające.

7. **Zabezpieczanie laserów i optyki:** Wszystkie lasery i elementy optyczne muszą być solidnie zamocowane do stołu optycznego lub powierzchni roboczej, aby zminimalizować ryzyko przesunięcia lub przewrócenia, co mogłoby prowadzić do niebezpiecznej ekspozycji na promieniowanie.
8. **Komunikacja:** Komunikacja między użytkownikami jest kluczowa dla zachowania bezpieczeństwa. Przed włączeniem systemu laserowego lub usunięciem blokady wiązki należy poinformować pozostałych użytkowników w pomieszczeniu, aby mogli założyć odpowiednią ochronę lub opuścić strefę niebezpieczną. Niewłaściwa komunikacja może prowadzić do poważnych wypadków.

Na zakończenie należy podkreślić **konieczność regularnych szkoleń** z zakresu bezpieczeństwa przy pracy z laserami. Warto skorzystać z dostępnych szkoleń oferowanych przez Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy (CIOP-PIB), dostępnych pod adresem

https://www.ciop.pl/CIOPPortalWAR/appmanager/ciop/pl?_nfpb=true&_pageLabel=P27200153781409747183354&html_tresc_root_id=28414&html_tresc_id=2129&html_klucz=28414&html_klucz_spis=. Kod QR przekierowujący do tych szkoleń znajduje się na tylnej okładce tej broszury.

Literatura

1. Townes, C.H. Theodore H. Maiman (1927–2007). *Nature* **2007**, 447, 654–654, doi:10.1038/447654a.
2. Reyes, P. Advancements in Laser Technology for Medical Applications. *J. Lasers, Opt. Photonics* **2023**, 10, 115, doi:10.37421/2469-410X.2023.10.115.
3. Bachmann, F.G. Industrial laser applications. *Appl. Surf. Sci.* **1990**, 46, 254–263, doi:10.1016/0169-4332(90)90153-Q.
4. Ackerman, D.A.; Johnson, J.E.; Ketelsen, L.J.P.; Eng, L.E.; Kiely, P.A.; Mason, T.G.B. Telecommunication Lasers. In *Optical Fiber Telecommunications IV-A*; Elsevier, 2002; pp. 587–665.
5. Kaushal, H.; Kaddoum, G. Applications of Lasers for Tactical Military Operations. *IEEE Access* **2017**, 5, 20736–20753, doi:10.1109/ACCESS.2017.2755678.
6. Wolska, A.; Konieczny, P. Promieniowanie laserowe – skutki zdrowotne i aspekty bezpieczeństwa. *Pr. Inst. Elektrotechniki* **2006**, 228, 283–296.
7. Petrova, M.; Mal'kova, Ny. Adverse Health Effects of Exposure to Visible Laser Radiation in the General Population: A Review. *PUBLIC Heal. LIFE Environ.* **2021**, 44–49, doi:10.35627/2219-5238/2021-29-9-44-49.
8. Khalimov, Y.S.; Vlasenko, A.N.; Tsepkova, G.A.; Sosukin, A.E. Occupational diseases caused by exposure to laser radiation. *Bull. Russ. Mil. Med. Acad.* **2019**, 21, 209–214, doi:10.17816/brmma25946.
9. Kohtiao, A.; Newton, J.; Schwell, H.; Resnick, I. HAZARDS AND PHYSIOLOGICAL EFFECTS OF LASER RADIATION. *Ann. N. Y. Acad. Sci.* **1965**, 122, 777–779, doi:10.1111/j.1749-6632.1965.tb20260.x.

10. Ham, W.T.; Williams, R.C.; Mueller, H.A.; Ruffin, R.S.; Schmidt, F.H.; Clarke, A.M.; Vos, J.J.; Geeraets, W.J. OCULAR EFFECTS OF LASER RADIATION. *Acta Ophthalmol.* **1965**, *43*, 390–409, doi:10.1111/j.1755-3768.1965.tb07878.x.
11. Świdorski, J.; Zając, A. Symulacja zagrożeń promieniowaniem laserowym odbitym i rozproszonym oraz wybrane aspekty projektowania osłon przed tym promieniowaniem. *Biul. WAT* **2007**, *LVI*, 223–244.
12. PN-EN 60825-1: 2014-11 Bezpieczeństwo urządzeń laserowych. Część 1: Klasyfikacja sprzętu i wymagania; 2014; ISBN 9788327536891.
13. Wolska, A.; Głogowski, P. Promieniowanie laserowe: Dokumentacja dopuszczalnych wartości natężenia czynnika fizycznego. *Pod. i Metod. Oceny Środowiska Pr.* **2010**, *1*, 5–78.
14. Duck, F.A. Optical Properties of Tissue including Ultraviolet and Infrared Radiation. In *Physical Properties of Tissues*; Elsevier, 1990; pp. 43–71.
15. Directive 89/391 on the Introduction of Measures to Encourage Improvements in the Safety and Health of Workers at Work. *Off. J. Eur. Communities* 1989.
16. Ustawa z dnia 26 czerwca 1974 r. Kodeks pracy. *Dz. Ustaw* **1974**, 83.
17. Dyrektywa 2006/25/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 5 kwietnia 2006 r. w sprawie minimalnych wymagań w zakresie ochrony zdrowia i bezpieczeństwa dotyczących narażenia pracowników na ryzyko spowodowane czynnikami fizycznymi (sztucznym promieniowaniu). **2006**, *L114*, 38–59.
18. Wolska, A. Sztuczne promieniowanie optyczne – zasady oceny ryzyka zawodowego. 1–170.
19. Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Społecznej z dnia 6 czerwca 2014 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy. *Dz. Ustaw* **2014**, *poz. 817*, 1–42.
20. Rozporządzenie Ministra Zdrowia w sprawie badań i pomiarów czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy. *Dz. Ustaw Rzeczyposp. Pol.* **2023**, *poz. 419*.
21. Rozporządzenie Ministra Zdrowia i Opieki Społecznej z dnia 30 maja 1996 r. w sprawie przeprowadzania badań lekarskich pracowników, zakresu profilaktycznej opieki zdrowotnej nad pracownikami oraz orzeczeń lekarskich wydawanych do celów przewidzianych w Kod. **2020**, 1–10.
22. PN-EN 207:2017-07 Ochrona indywidualna oczu. Filtry i środki ochrony oczu chroniące przed promieniowaniem laserowym 2017.
23. PN-EN ISO 19818-1:2021-12 Ochrona oczu i twarzy. Ochrona przed promieniowaniem laserowym. Część 1: Wymagania i metody badań.
24. PN-EN 208:2010 Ochrona indywidualna oczu. Ochrony oczu do pracy justacyjnej na laserach i systemach laserowych (ochrony oczu do justowania laserów).
25. PN-EN 13758-2+A1:2007/Ap1:2021-08 Tekstylna. Właściwości ochronne przed działaniem promieniowania UV. Część 2: Klasyfikacja i znakowanie.
26. PN-EN ISO 11612:2015-11 Odzież ochronna. Odzież do ochrony przed czynnikami gorącymi i płomieniem. Minimalne wymagania dotyczące skuteczności.
27. PN-EN 407:2020-10 Rękawice ochronne oraz inne środki ochrony rąk przed zagrożeniami termicznymi (gorąco i/lub ogień).
28. PN-EN ISO 11611:2015-11 Odzież ochronna do stosowania podczas spawania i w procesach pokrewnych.
29. PN-EN 12477:2005 Rękawice ochronne dla spawaczy.
30. Hustedt, M.; Hennigs, C.; Kaierle, S.; Gołębiowski, W.; Wenzel, D.; Hutter, A. Passive and active protective clothing against laser radiation. *J. Laser Appl.* **2013**, *25*, 042003, doi:10.2351/1.4802762.
31. Wang, H.; Wang, H.; Wang, Y.; Su, X.; Wang, C.; Zhang, M.; Jian, M.; Xia, K.; Liang, X.; Lu, H.; et al. Laser Writing of Janus Graphene/Kevlar Textile for Intelligent Protective Clothing. *ACS Nano* **2020**, *14*, 3219–3226, doi:10.1021/acsnano.9b08638.

Infografika – narażenie oczu

Link:

https://www.ciop.pl/CIOPPortalWAR/file/99009/I-PN-06-Infografika_PL.pdf



Infografika – narażenie skóry

Link:

https://www.ciop.pl/CIOPPortalWAR/file/99369/I-PN-06-Infografika_Laser_derm_PL.pdf



Szkolenie: Bezpieczeństwo w obsłudze urządzeń

Link:

https://www.ciop.pl/CIOPPortalWAR/appmanager/ciop/pl?nfpb=true&pageLabel=P27200153781409747183354&html_tresc_root_id=28414&html_tresc_id=2129&html_klucz=28414&html_klucz_spis=

