CC BY ND

Zrecenzowany artykuł naukowy

dr inż. GRZEGORZ OWCZAREK (ORCID: 0000-0003-3744-6535)
dr inż. JOANNA SZKUDLAREK (ORCID: 0000-0002-8728-0118)
dr inż. MARCIN JACHOWICZ (ORCID: 0000-0002-6402-6897)
dr MAŁGORZATA OKRASA (ORCID: 0000-0003-4980-0909)
Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy
Kontakt: growc@ciop.lodz.pl
DOI: 10.54215/BP.2024.3.7.Owczarek

Zagrożenia oczu podczas ręcznego spawania laserowego – analiza metod wyznaczania ekspozycji na promieniowanie laserowe

Fot. Cormak (https://www.youtube.com/watch?v=qXQGeensIlc)

Ręczne spawanie laserowe, które jest jednym z najnowszych rozwiązań w technologii spawalniczej, stwarza specyficzne zagrożenia zawodowe, zwłaszcza dla oczu spawaczy narażonych na szkodliwe promieniowanie optyczne. Pomimo powszechnego zastosowania tej technologii brakuje jednoznacznych i spójnych metod szacowania ryzyka zawodowego. Ten artykuł ma na celu wypełnienie owej luki poprzez analizę różnych metod wyznaczania maksymalnej dopuszczalnej i spodziewanej ekspozycji (*MDE*) na promieniowanie laserowe oraz określania wymaganego poziomu ochrony dla filtrów zabezpieczających przed promieniowaniem laserowym. Wyniki analizy mogą pomóc w tworzeniu skuteczniejszych protokołów bezpieczeństwa dla spawaczy wykonujących ręczne spawanie laserowe, co ma kluczowe znaczenie dla ich zdrowia i bezpieczeństwa.
Słowa kluczowe: spawanie laserowe, ochrona oczu, promieniowanie laserowe

Eye hazards during manual laser welding – analysis of methods for determining exposure to laser radiation

Manual laser welding, one of the latest advancements in welding technology, poses specific occupational hazards, particularly for welders' eyes exposed to harmful optical laser radiation. Despite the widespread use of this technology, there is a lack of clear and consistent methods for assessing occupational risk. This article aims to fill this gap by analyzing various methods of determining the maximum permissible and expected exposure to laser radiation, as well as defining the required protection level for filters protecting against laser radiation. The results of this analysis may assist in creating more effective safety protocols for welders conducting manual laser welding, which is crucial for their health and safety.
Keywords: laser welding, eye protection, laser radiation

Wstęp

Technologie spawalnicze, czyli technologie pozwalające na łączenie materiałów poprzez ich miejscowe stopienie i zespolenie, znane są od starożytności. Metale o niskiej temperaturze topnienia topiono w ogniskach z wykorzystaniem miechów lub dmuchawek. Wyroby ze srebra, z miedzi, mosiądzu, brązu, a później również ze stali wytwarzano w wyniku zgrzewania ogniskowego. Historia spawania, jaką znamy dziś, rozpoczęła się jednak znacznie później.

Spawanie gazowe zapoczątkowało odkrycie węglika wapnia (karbidu) w 1862 r. Następnie w 1882 r. Stanisław Olszewski i Mikołaj Benardos wynaleźli i opatentowali metodę spawania elektrycznego, w której wykorzystano łuk elektryczny jarzący się pomiędzy elektrodą węglową a metalowym przedmiotem. Jako spoiwa używano metalowego pręta.

W drugiej połowie XX w. opracowano technologię spawania plazmowego [1]. Spawanie laserowe jest najnowszą metodą spawania. Historia laserów liczy nieco ponad 60 lat – w 1960 r. Theodore Maiman wraz z zespołem uruchomił pierwsze takie urządzenie [2, 3]. Na wynalezienie urządzeń laserowych, których moc i energię oraz długość fali emitowanego promieniowania można by wykorzystać do skonstruowania urządzeń spawalniczych, trzeba było poczekać jeszcze wiele lat.

Spawanie laserowe pozwala na znacznie łatwiejsze, niewymagające specjalnych umiejętności (jak w przypadku zastosowania tradycyjnych metod spawania łukowego) łączenie elementów cienkościennych, o grubości ścianek poniżej 1 mm [4]. Dopiero w ostatniej dekadzie XX w. urządzenia laserowe weszły na skalę masową do hal produkcyjnych i były wykorzystywane głównie w procesach zautomatyzowanych, odbywających się w specjalnie do tego celu przygotowanych kabinach.

Liczne zalety spawania laserowego, do których można zaliczyć m.in. wysoką jakość spoiny oraz trwałość połączonych elementów, spowodowały, że technologia ta jest obecnie wykorzystywana również do spawania ręcznego. Podczas spawania ręcznego spawacz jest jednak bezpośrednio narażony na szkodliwe dla oczu i skóry działanie promieniowania laserowego, które w znacznej części odbija się i rozprasza od spajanych elementów. Zagrożenia tego typu nie występowały w przypadku spawania odbywającego się w kabinach spawalniczych. Podczas spawania ręcznego jedyną metodą ochrony oczu i skóry jest zastosowanie środków ochrony indywidualnej.

Celem artykułu jest przeprowadzenie analizy różnych metod wyznaczania maksymalnej dopuszczalnej ekspozycji i spodziewanej ekspozycji na promieniowanie laserowe oraz określania wymaganego poziomu ochrony filtrów zabezpieczających oczy przed promieniowaniem laserowym. W artykule zaprezentowano metody wyznaczania wartości maksymalnej dopuszczalnej ekspozycji *MDE* dla pojedynczych impulsów oraz wartości skumulowanej *MDE* dla ciągów impulsów w określonym czasie ekspozycji. Wartości *MDE* mogą być wyrażone jako natężenie napromienienia E [W/m^2] lub napromienienie H [J/m^2]. Następnie omówiono zagadnienie wyznaczania wartości maksymalnej spodziewanej ekspozycji (wyrażonej przez napromienienie H_0) na promieniowanie laserowe podczas ręcznego spawania, przytoczono przykład wyliczenia wartości H_0 dla określonej mocy lasera, czasu trwania impulsu i średnicy wiązki oraz wyjaśniono znaczenie tego parametru i skutki potencjalnego oddziaływania promieniowania laserowego na oczy i skórę spawacza. Kolejny istotny aspekt artykułu dotyczy wyznaczania wymaganej gęstości optycznej filtrów chroniących przed promieniowaniem laserowym. Przedstawiono sposób obliczenia widmowej gęstości optycznej filtrów w odniesieniu do wartości *MDE* i H_0, a ponadto odniesiono się do zmienności wielkości wiązki promieniowania laserowego.

Zawarte w artykule informacje pomogą zrozumieć zagrożenia związane z ekspozycją na promieniowanie laserowe i właściwie dobrać środki ochrony oczu w celu zapewnienia bezpiecznego i skutecznego wykonywania prac spawalniczych.

Technologia spawania laserowego

Technologia spawania laserowego polega na stapianiu obszaru styku spajanych elementów za pomocą wiązki promieniowania laserowego. Proces może być prowadzony w osłonie gazu obojętnego lub w powietrzu, jeżeli spajane materiały nie ulegają utlenieniu. Pozwala to na wykonywanie spoin o małych szerokościach. Głębokość, na jaką energia promieniowania laserowego może wnikać w materiał, zależy od mocy lasera, wielkości plamki po zogniskowaniu oraz szybkości spawania (szybkości, z jaką plamka zogniskowanej wiązki lasera przemieszcza się nad spajanym materiałem). Technologia spawania laserowego stosowana jest do łączenia stali stopowych, stali węglowych, metali trudnotopliwych oraz metali aktywnych chemicznie (np. aluminium i tytanu). Parametry spawania laserowego mają znaczący wpływ na własności mechaniczne oraz mikrostrukturę powstających połączeń [5, 6].

Generalnie technologię spawania laserowego można podzielić na spawanie kondukcyjne oraz spawanie z głębokim wtopieniem. Podczas spawania kondukcyjnego łączone materiały podgrzewane są energią wiązki promieniowania laserowego powyżej temperatury ich topnienia. Łączone materiały przenikają się wzajemnie i zastygają po usunięciu czynnika powodującego ich rozgrzanie (wiązki lasera). W ten sposób powstaje spoina łącząca spawane materiały. W przypadku spawania z głębokim wtopieniem energia promieniowania laserowego powoduje odparowanie spajanych materiałów. W wyniku tego powstaje ciśnienie częściowo wypierające stopione materiały i tworzy się głęboki, wąski otwór, tzw. kapilara. Kapilara przesuwa się wraz z przesuwaniem się wiązki lasera. Nazwa „spawanie z głębokim wtopieniem" oddaje istotę procesu. Głębokość spawu wykonanego tą metodą jest kilkukrotnie większa niż jego szerokość i może osiągać nawet kilkadziesiąt milimetrów. Moc laserów używanych w technice spawania z głębokim wtopieniem musi więc być wielokrotnie, nawet 100-krotnie większa niż w przypadku spawania kondukcyjnego [7].

W technologii spawania laserowego wykorzystuje się głównie lasery światłowodowe, lasery na ciele stałym (typu Nd:YAG) oraz lasery gazowe (typu CO_2). Źródłem zasilania laserów światłowodowych jest półprzewodnikowa pompa diodowa. Generowane promieniowanie jest przesyłane elastycznym światłowodem, co stanowi wielką zaletę, gdyż w ten sposób można wyeliminować optyczne układy prowadzenia wiązki laserowej. Długość fali promieniowania laserowego emitowanego przez lasery światłowodowe używane podczas spawania wynosi 1070-1080 nm. W laserach Nd:YAG ciałem czynnym jest kryształ Nd:$Y_3Al_5O_{12}$. Lasery te emitują promieniowanie o długości fali 1064 nm. Laser CO_2 jest laserem molekularnym, w którym ośrodkiem czynnym jest mieszanina dwutlenku węgla, azotu i helu. Emituje on promieniowanie o długości fali 10 600 nm [8].

Energia wiązki promieniowania laserowego wykorzystywanego w procesach spawania kondukcyjnego musi być wystarczająca do stopienia spajanych materiałów powyżej temperatury ich topienia, a w przypadku spawania z głębokim wtopieniem – do odparowania stopionych materiałów. Z tego względu moc wyjściowa lasera zamontowanego w urządzeniu spawalniczym musi być rzędu kilowatów. Wiązka lasera jest dodatkowo ogniskowana na bardzo małej powierzchni (rzędu mikrometrów). Lasery mogą pracować w trybie ciągłym (moc promieniowania laserowego stała w czasie) lub impulsowym (moc promieniowania laserowego zmienna w czasie).

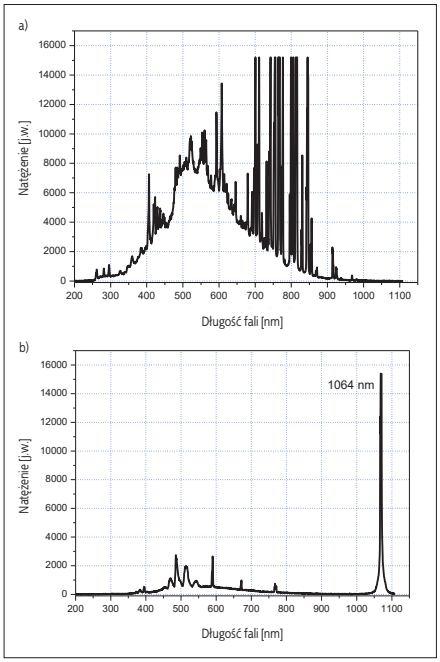
Zagrożenia wywołane promieniowaniem laserowym emitowanym podczas ręcznego spawania laserowego

W technologii spawania laserowego wykorzystywane jest promieniowanie laserowe dużej mocy (kW) z zakresu podczerwieni (głównie 1050-1070 nm lub 10 600 nm), które jest dodatkowo ogniskowane na bardzo małej powierzchni. Bezpośredni kontakt człowieka ze zogniskowaną wiązką promieniowania laserowego, którego energia jest wystarczająca do stopienia, a nawet odparowania metali, jest niedopuszczalny. Promieniowanie laserowe oddziałujące na spajane materiały jest również odbijane i rozpraszane, więc dociera też do miejsca, w którym znajduje się operator (spawacz) urządzenia do ręcznego spawania laserowego. Energia odbitego lub rozproszonego promieniowania, która jest wielokrotnie mniejsza od energii promieniowania zogniskowanego na powierzchni spajanych materiałów, może być jednak wystarczająca do wywołania urazów oczu lub skóry.

Należy dodać, że to promieniowanie jest szczególnie niebezpieczne dla człowieka, ponieważ jest dla niego niewidoczne – długość fali promieniowana laserowego podczas spawania znajduje się w zakresie podczerwieni. Poza tym w trakcie procesu spawania laserowego emitowane jest również promieniowanie towarzyszące z zakresu widzialnego. Często jest ono błędnie interpretowane w ocenie zagrożenia oczu. Wynika to z faktu, że w przypadku innych technik spawalniczych (zwłaszcza w przypadku spawania łukowego) promieniowanie widzialne ma największy udział w widmie emitowanego promieniowania spawalniczego. W celu ochrony przed tym promieniowaniem, jak również w celu zapewnienia komfortowej obserwacji spawanych elementów, filtry spawalnicze używane w spawaniu łukowym tłumią promieniowanie widzialne do poziomu tysięcznych, a nawet dziesięciotysięcznych części procenta. Ilość promieniowania widzialnego emitowanego podczas spawania laserowego jest znacząco mniejsza. Błędna interpretacja ochrony oczu podczas spawania laserowego polega więc na zastosowaniu filtrów osłabiających promieniowanie towarzyszące (widzialne) bez uwzględnienia promieniowania podczerwonego emitowanego przez laser (niewidocznego), które w tym przypadku jest głównym źródłem zagrożenia dla oczu i skóry.

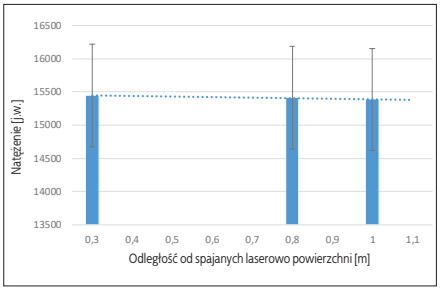
Na rys. 1 zaprezentowano przykładowe charakterystyki widmowe emisji promieniowania optycznego, zmierzone podczas tradycyjnego spawania metodą TIG (spawania elektrodą nietopliwą w osłonie gazów obojętnych – np. argonu lub helu) oraz podczas spawania laserowego. Pomiary przeprowadzono z wykorzystaniem spektroradiometru optycznego OceanView (USA). Głowica pomiarowa była ustawiona w miejscu twarzy spawacza. Na wykresach widać różnice w widmie promieniowania optycznego emitowanego w zakresie widzialnym podczas spawania analizowanymi technikami. Przedstawione przykładowe charakterystyki widmowe nie obrazują jednak tego, jak energia promieniowania laserowego, które jest odbijane i rozpraszane od powierzchni spajanych laserowo elementów, zmienia się wraz z odległością. Ma to istotne znaczenie w ocenie zagrożenia promieniowaniem laserowym w miejscu, w którym może się znajdować spawacz.

W przypadku odbicia lub rozproszenia zogniskowanego promieniowania monochromatycznego od spajanych materiałów (np. stali), których współczynnik odbicia lub rozproszenia dla emitowanego promieniowania laserowego jest zwykle wysoki, należy się spodziewać, że wraz z odległością nieznacznie będzie się zmieniała również energia promieniowania laserowego. Dla urządzenia do ręcznego spawania laserowego emitującego promieniowanie o długości fali 1070 nm zmierzono natężenie promieniowania laserowego w następujących odległościach od powierzchni spajanych materiałów (stali) poddanych ekspozycji na promieniowanie laserowe: 1 m, 0,8 m, 0,3 m. Wyniki tych pomiarów przedstawiono na rys. 2. Wskazują one na relatywnie niewielkie zmiany natężenia promieniowania laserowego w zależności od odległości od powierzchni materiału poddanego ekspozycji



Rys. 1. Przykładowe charakterystyki widmowe emisji promieniowania optycznego uzyskane podczas: a) tradycyjnego spawania metodą TIG, b) spawania laserowego (źródło: CIOP-PIB)

Fig. 1. An example of spectral characteristics of optical radiation emission measured during: a) traditional TIG welding, b) laser welding (source: CIOP-PIB)



Rys. 2. Natężenie promieniowania laserowego w różnej odległości od spajanych laserowo powierzchni, wyrażone w jednostkach względnych (maksymalna wartość 16 000); na rysunku zaznaczono szacowaną niepewność pomiarową na poziomie 10%

Fig. 2. Laser radiation intensity at various distances from the laser-bonded surfaces, expressed in relative units (maximum value 16.000); the estimated measurement uncertainty at a level of 10% is marked on the diagram

na promieniowanie laserowe. Jest to promieniowanie odbite i rozproszone od powierzchni materiału. Wartości względne zmierzonego natężenia promieniowania będą zależały od wybranego miejsca pomiaru oraz współczynnika odbicia (dla długości fali 1070 nm) obrabianego materiału. Wyniki pomiarów świadczą jednak o braku silnej zależności natężenia promieniowania laserowego odbitego i rozproszonego od odległości. W odniesieniu do bezpieczeństwa ma to bardzo istotne znaczenie. W przypadku niekontrolowanego narażenia pracownika na promieniowanie laserowe emitowane podczas spawania zagrożenie wynikające z oddziaływania tego promieniowania na oczy i skórę pozostaje bardzo wysokie niezależnie od odległości.

Promieniowanie laserowe o dużej mocy może być również źródłem zagrożeń pożarowych. Jeśli wiązka promieniowania zostanie skierowana na elementy inne niż spawane, mogą się one zapalić lub – gdy są wykonane z materiałów niepalnych – wywołać zapłon innych elementów. Na przedstawionej fotografii (zob. fot.) widoczny jest płomień pojawiający się po skierowaniu wiązki laserowej z głowicy urządzenia do ręcznego spawania laserowego w stronę tradycyjnej przyłbicy spawalniczej.

Podczas spawania laserowego występują także zagrożenia mechaniczne (np. odpryski ciał stałych). Nierozpoznane są ponadto zagadnienia związane z emisją par i gazów ze spawanych powierzchni, które mogą stanowić zagrożenie inhalacyjne dla użytkownika. Zagrożenia wywołane wysokoenergetycznym promieniowaniem optycznym oraz zagrożenia pożarowe stanowią jednak najpoważniejsze źródło zagrożeń podczas spawania laserowego. Z tego względu w odniesieniu do zagrożeń wywołanych wysokoenergetycznym promieniowaniem laserowym najważniejsze jest określenie wymaganej gęstości optycznej filtrów przeznaczonych do ochrony oczu przed tym promieniowaniem. W tym celu należy wyznaczyć wartości maksymalnej dopuszczalnej ekspozycji na promieniowanie laserowe oraz wartości maksymalnej spodziewanej ekspozycji.

Wyznaczanie wartości maksymalnej dopuszczalnej ekspozycji dla oczu

Jednym z najważniejszych elementów w odniesieniu do zagadnień związanych z bezpieczeństwem obsługi urządzeń do ręcznego spawania laserowego jest analiza zagrożeń wywołanych samym promieniowaniem laserowym oraz wynikająca z tej analizy ocena zagrożenia uszkodzenia oczu lub skóry w wyniku oddziaływania promieniowania laserowego. Ma to szczególne znaczenie w przypadku, gdy wiązka promieniowania laserowego nie jest osłonięta i promieniowanie laserowe może oddziaływać bezpośrednio na człowieka [9]. Sposoby wyznaczania wartości maksymalnej dopuszczalnej ekspozycji opisane są w dyrektywie europejskiej [10], rozporządzeniu w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy [11] oraz w Polskiej Normie [12, 14].

Do wyznaczenia wartości maksymalnej dopuszczalnej ekspozycji dla oczu przyjęto długość fali $\lambda = 1064$ nm oraz założono, że laser może pracować w sposób ciągły lub impulsowy, a czas trwania impulsu wynosi 10^{-4} s. Wyliczono:

- wartości *MDE* dla pojedynczego impulsu o założonym czasie trwania ekspozycji,
- wartości skumulowanej *MDE* dla określonej liczby impulsów w czasie 10-sekundowej ekspozycji,
- wartości *MDE* dla czasu trwania impulsu wynoszącego 10 s, co jest równoważne z ekspozycją na ciągłe promieniowanie laserowe przez 10 s.

W przypadku pojedynczego impulsu o czasie trwania 10^{-4} s wartości *MDE*, charakteryzowane przez napromienienie *H*, wyznacza się ze wzorów, które mają odmienną postać w normie [12]

Fot. Płomień pojawiający się po skierowaniu wiązki laserowej z urządzenia do ręcznego spawania laserowego w stronę tradycyjnej przyłbicy spawalniczej (źródło: CIOP-PIB, za zgodą firmy RYWAL RHC)

Photo. Flame appearing after directing the laser beam from the handheld laser welding device towards a traditional welding helmet (source: CIOP-PIB, with consent RYWAL RHC)

oraz rozporządzeniu [11] (sposób zaprezentowany w rozporządzeniu jest uproszczeniem metod szczegółowych zawartych w normie).

Według rozporządzenia [11] wzór wyrażony dla napromienienia H ma postać (1), a według normy [12] – postać (2):

$$H = 90 \cdot t^{0,75} \cdot C_C \cdot C_E \quad (1)$$

$$H = 90 \cdot t^{0,75} \cdot C_7 \quad (2)$$

gdzie: $C_C = 1$, $C_E = 1$ (dla $\alpha < 1,5$ mrad), $C_7 = 1$ (dla $\alpha < 1,5$ mrad); C_C – współczynnik korekcyjny dla zakresu widmowego 700-1150 nm, C_E – współczynnik korekcyjny dla źródeł rozciągłych emitujących promieniowanie z zakresu długości fali 400-1400 nm (współczynnik ten zwiększa *MDE* oka dla kątów widzenia źródła promieniowania $\alpha > 1,5$ mrad), C_7 – współczynnik korekcyjny dla zakresu długości fali 100-1150 nm.

W przypadku ciągu impulsów można wyznaczyć skumulowaną wartość MDE_T dla ciągów impulsów w szacowanym czasie trwania ekspozycji na promieniowanie laserowe [11]:

$$MDE_T = MDE_{poj} N^{-0,25} \quad (3)$$

gdzie: MDE_{poj} – *MDE* dla pojedynczego impulsu, N – liczba impulsów.

W przypadku czasu trwania impulsu 10^{-4} s maksymalna liczba impulsów w czasie 10-sekundowej ekspozycji wynosi $N = 10^5$.

Gdy czas trwania ekspozycji jest równy lub przekracza 10 s, wartości *MDE,* wyrażane dla natężenia napromienienia *E,* wyznaczane są ze wzoru (4) – według rozporządzenia [11], lub ze wzoru (5) – według normy [12]:

$$E = 10 \cdot C_A \cdot C_C \quad (4)$$

$$E = 10 \cdot C_4 \cdot C_7 \quad (5)$$

gdzie: $C_A = 5$, $C_C = 1$ (dla $\alpha < 1,5$ mrad), $C_4 = 5$, $C_7 = 1$ (dla $\alpha < 1,5$ mrad); C_A – współczynnik korekcyjny ze względu na absorpcję promieniowania w melatoninie (względna zmiana absorpcji promieniowania z zakresu 400-1400 nm w melatoninie zwiększa *MDE* oka i skóry wraz ze wzrostem długości fali), C_C – współczynnik korekcyjny dla zakresu widmowego 700-1150 nm, C_4 – współczynnik korekcyjny dla zakresu długości fali 1050-1400 nm, C_7 – współczynnik korekcyjny dla zakresu długości fali 700-1500 nm.

Wyliczone na podstawie wzorów (1)-(5) wartości *MDE*, wyrażone jako napromienienie *H*, wynoszą odpowiednio:

- *MDE* dla pojedynczego impulsu (zgodnie z rozporządzeniem): $MDE_{poj} = 9,0 \cdot 10^{-2}$ J/m^2,
- *MDE* dla pojedynczego impulsu (zgodnie z normą): $MDE_{poj} = 9,0 \cdot 10^{-2}$ J/m^2,
- skumulowana wartość *MDE* dla ciągu $N = 10^5$ impulsów w czasie trwania ekspozycji 10 s (zgodnie z rozporządzeniem): $MDE_T = 9,0 \cdot 10^{-3,25}$ J/m^2,
- wartości *MDE* dla czasu trwania impulsu wynoszącego 10 s, co jest równoważne z ekspozycją na ciągłe promieniowanie laserowe przez 10 s (zgodnie z rozporządzeniem i normą): $MDE = 5 \cdot 10^1$ W/m^2. Dla czasu 10 s: $MDE = 5 \cdot 10^2$ J/m^2.

Wyliczone powyżej wartości *MDE* są scharakteryzowane jako napromienienie (*H*) wyrażone w J/m^2 dla wymienionych powyżej czasów trwania impulsu (czasu ekspozycji) promieniowania laserowego. Z tych obliczeń wynika, że w przypadku pojedynczego impulsu wartości *MDE* dla oczu, wyznaczone zgodnie z algorytmami przedstawionymi w rozporządzeniu [11] i normie [12], są takie same ($9,0 \cdot 10^{-2}$ J/m^2). Jest oczywiste, że dla ciągu impulsów, na które może być narażony operator urządzenia w czasie 10 s, wartość *MDE* maleje ($9,0 \cdot 10^{-3}$ J/m^2). Zakładając, że laser pracuje w trybie ciągłym, a czas narażenia wynosi 10 s, wartość *MDE* jest największa ($5 \cdot 10^2$ J/m^2). Od wartości *MDE* oraz maksymalnej spodziewanej ekspozycji zależy poziom ochrony, jaki muszą zapewniać filtry przeznaczone do ochrony przed promieniowaniem laserowym. Im wartość *MDE* jest mniejsza przy założonym czasie ekspozycji, tym wyższy musi być poziom ochrony filtrów. W związku z tym – przyjmując najbardziej niebezpieczny scenariusz dotyczący niezamierzonej ekspozycji oczu na promieniowanie laserowe – do dalszej analizy przyjęto *MDE* (wyrażone jako napromienienie) dla oczu na poziomie $9,0 \cdot 10^{-3}$ J/m^2. Jest to skumulowana wartość *MDE* wyznaczona dla ciągu $N = 10^5$ impulsów w czasie 10-sekundowej ekspozycji.

Wyznaczanie wartości maksymalnej spodziewanej ekspozycji

W przypadku ręcznego spawania laserowego sposób wyznaczania wartości maksymalnej spodziewanej ekspozycji na promieniowanie laserowe jest bardzo trudny z powodu braku możliwości precyzyjnej oceny (pomiaru) ilości promieniowania laserowego. Z uwagi na dynamikę procesu spawania laserowego, rodzaj spajanych materiałów, sposób ustawienia wiązki laserowej względem łączonych ze sobą krawędzi oraz zmiany pozycji samego spawacza ilość promieniowania laserowego docierającego bezpośrednio do twarzy jest zmienna. Przy wyznaczaniu wartości maksymalnej spodziewanej ekspozycji należy więc przyjąć założenie, że może wystąpić najbardziej niebezpieczna sytuacja, w której twarz, a więc i oczy spawacza narażone będą na bezpośrednie oddziaływanie wiązki laserowej.

Przykład

Dane: moc promieniowania laserowego – 6 kW (6000 W), czas trwania impulsu – 10^{-4} s, średnica przekroju wiązki – 1 mm (10^{-3} m), energia pojedynczego impulsu – 100 mJ (10^{-1} J).

Uwzględniając znane parametry, wyliczona wartość natężenia napromienienia, wyrażona jako moc 6 kW na powierzchni wiązki o średnicy 1 mm, dla maksymalnej spodziewanej ekspozycji wynosi $E_0 = 7,64 \cdot 10^9$ W/m^2.
Przyjmując czas ekspozycji na promieniowanie laserowe wynoszący 10 s, wartość napromienienia dla maksymalnej spodziewanej ekspozycji wynosi $H_0 = 7,64 \cdot 10^{10}$ J/m^2.
Przy założeniu, że spawacz narażony jest tylko na jeden pojedynczy impuls o energii 100 mJ i czasie trwania 10^{-4} s, wartość napromienienia dla maksymalnej spodziewanej ekspozycji wynosi $H_0 = 1,27 \cdot 10^5$ J/m^2.
Przy założeniu, że w czasie 10 s liczba impulsów o czasie trwania 10^{-4} s i energii 100 mJ wynosi $N = 10^5$, zgodnie ze wzorem (3), w którym wartość *MDE* dla pojedynczego impulsu zastąpiono wartością maksymalnej spodziewanej ekspozycji H_0 dla pojedynczego impulsu, skumulowana wartość napromienienia dla maksymalnej spodziewanej ekspozycji wynosi $H_{0T} = 7,14 \cdot 10^3$ J/m^2.

Wyznaczanie wartości wymaganej gęstości optycznej

Widmową gęstość optyczną filtrów chroniących przed promieniowaniem laserowym o danej długości fali wyznacza się ze wzoru (6) lub (7) [9]:

$$OD = \log_{10}(H_0/MDE) \quad (6)$$

$$OD = \log_{10}(E_0/MDE) \quad (7)$$

gdzie: *OD* – widmowa gęstość optyczna filtra chroniącego przed promieniowaniem laserowym; H_0 – spodziewany poziom ekspozycji niechronionego oka, wyrażony jako napromienienie (J/m²); E_0 – spodziewany poziom ekspozycji niechronionego oka, wyrażony jako natężenie napromienienia (W/m²); *MDE* – maksymalna dopuszczalna ekspozycja, wyrażona jako napromienienie (J/m²) lub natężenie napromienienia (W/m²).

Te wzory wyraźnie wskazują, że wszędzie tam, gdzie występuje zagrożenie ekspozycji oka na promieniowanie laserowe w warunkach, w których konieczne jest stosowanie środków ochrony oczu – okularów lub gogli – chroniących przed promieniowaniem laserowym, konieczna jest znajomość wartości natężenia napromienienia lub napromienienia w warunkach rzeczywistej ekspozycji, jak również wartości *MDE* w odniesieniu do promieniowania laserowego stanowiącego potencjalne zagrożenie. Bez znajomości tych wartości nie da się prawidłowo określić oznaczenia (stopnia ochrony) wymaganych w danych warunkach filtrów chroniących przed promieniowaniem laserowym. Gdy znana jest wartość widmowej gęstości optycznej, wtedy oznaczenie filtrów chroniących przed promieniowaniem laserowym można określić na podstawie PN-EN 207: 2017-07 [13].

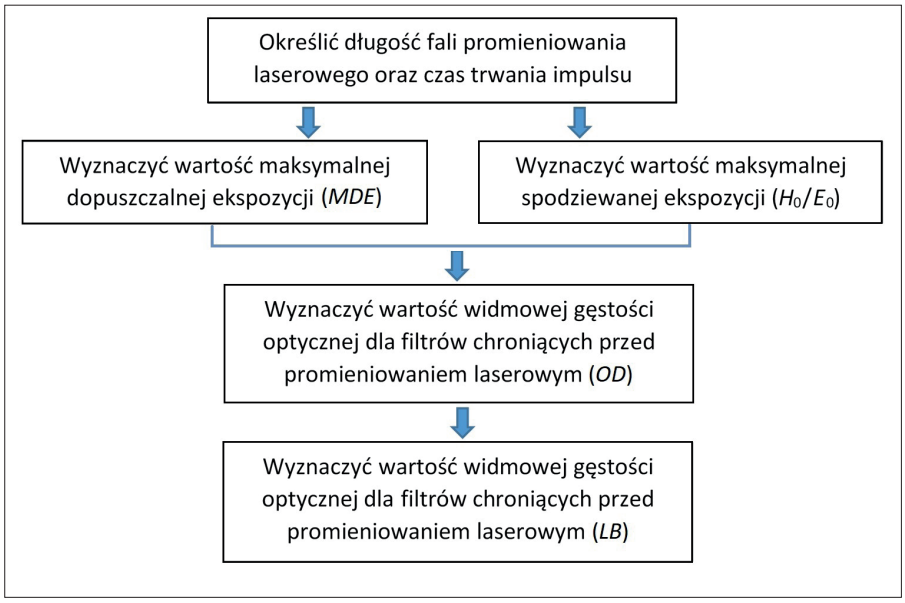
Na rys. 3 przedstawiono schemat obrazujący kolejność działań niezbędnych do określenia oznaczenia, które powinno się znajdować na okularach przeznaczonych do ochrony przed promieniowaniem laserowym.

Oznaczenie *LB*, które nanoszone jest na filtrach, odpowiada gęstości optycznej *OD* w przypadku, gdy filtry spełniają dodatkowo wymagania odporności energetycznej na promieniowanie laserowe. Szczegółowe wymagania odnoszące się do badań odporności energetycznej na promieniowanie laserowe określone są w PN-EN 207: 2017-07 [13].

W tabeli zestawiono wartości maksymalnej dopuszczalnej ekspozycji, maksymalnej spodziewanej ekspozycji oraz wyliczonej na podstawie tych wartości wymaganej gęstości optycznej filtrów przeznaczonych do ochrony przed promieniowaniem laserowym w przypadku, gdy średnica wiązki promieniowania laserowego wynosi 1 mm lub 10 mm.

Wiązka promieniowania laserowego oddziaływającego z materiałem spajanym metodą spawania laserowego jest ogniskowana. Średnica ogniska ma wymiar o wiele mniejszy niż średnica wiązki wychodzącej bezpośrednio z otworu wyjściowego lasera. Jest bardzo mało prawdopodobne, że oczy spawacza będą narażone na energię promieniowania zogniskowanego (mogłoby się to zdarzyć tylko wtedy, gdy głowica spawająca zostałaby specjalnie skierowana na oczy, a jej odległość od oczu byłaby równa długości ogniskowej). Uzasadnione jest zatem przyjęcie założenia, że średnica wiązki promieniowania laserowego będzie znacząco większa nawet od średnicy wiązki wychodzącej bezpośrednio z otworu wyjściowego lasera. Wynika to z efektu rozproszenia promieniowania na powierzchni spajanego materiału. Gdy średnica wiązki będzie wynosiła np. 10 mm, zmienią się wartości maksymalnej spodziewanej ekspozycji. Wartości *MDE*, które odpowiadają danej długości fali oraz danemu czasowi trwania impulsu i wyrażone są w jednostkach mocy/energii na jednostkę powierzchni, nie ulegną zmianie.

Dane przedstawione w tabeli pokazują, jak zmieniają się wartości wymaganej gęstości optycznej filtrów chroniących przed promieniowaniem laserowym w przypadku, gdy zwiększa się energia promieniowania laserowego docierającego do obszaru, w którym znajduje się spawacz. Największa wartość wymaganej gęstości optycznej występuje w przypadku narażenia oczu spawacza przez 10 s na działanie wiązki ciągłego promieniowania laserowego o mocy 6 kW. Takiej sytuacji nie należy jednak rozważać jako tzw. racjonalnie przewidywanego przypadku. Racjonalnym przypadkiem jest narażenie oczu na skumulowany ciąg impulsów. Wyliczona w tym przypadku gęstość optyczna na poziomie *OD* większym niż 4 jest więc w analizowanym przykładzie wymaganą wartością, jaką należy się kierować przy doborze filtrów chroniących przed promieniowaniem laserowym. Filtry te powinny też spełniać wymagania dotyczące ochrony przez innymi współistniejącymi zagrożeniami (np. odpryskami ciał stałych), występującymi na stanowiskach ręcznego spawania laserowego.



Rys. 3. Kolejność postępowania przy określaniu oznaczenia, które powinno się znajdować na okularach chroniących przed promieniowaniem laserowym

Fig. 3. Procedure for determining the labeling that should be present on goggles protecting against laser radiation

Tabela. Maksymalna dopuszczalna ekspozycja, maksymalna spodziewana ekspozycja oraz wymagana gęstość optyczna filtrów chroniących przed promieniowaniem laserowym

Table. Maximum permissible exposure, maximum expected exposure and required optical density of filters against laser radiation

Analizowany przypadek	Maksymalna dopuszczalna ekspozycja *MDE* [J/m²]	Maksymalna spodziewana ekspozycja H_0 [J/m²]	Wymagana gęstość optyczna filtrów chroniących przed promieniowaniem laserowym (*OD*)	
			średnica wiązki 1 mm	średnica wiązki 10 mm
Praca ciągła (CW)	$5 \cdot 10^{2}$	$7{,}64 \cdot 10^{10}$	8,2	6,2
Praca impulsowa (I) – pojedynczy impuls	$9{,}0 \cdot 10^{-2}$	$1{,}27 \cdot 10^{5}$	6,1	4,2
Praca impulsowa (I) – wartość skumulowana	$9{,}0 \cdot 10^{-3}$	$4{,}03 \cdot 10^{6}$	5,9	4,2

Podsumowanie

Do wyznaczenia parametrów charakteryzujących filtry chroniące przed promieniowaniem laserowym konieczne jest określenie wartości maksymalnej dopuszczalnej ekspozycji *MDE* oraz maksymalnej spodziewanej ekspozycji. W przypadku *MDE* jest to stosunkowo proste. Dysponując danymi o mocy/energii, długości fali oraz przekroju poprzecznym emitowanej wiązki promieniowania laserowego, wartości te można wyliczyć według algorytmów opisanych w normie lub rozporządzeniu. Problematyczne jest określenie wartości maksymalnej spodziewanej ekspozycji. Najlepszym sposobem wydaje się pomiar bezpośredni, polegający na zmierzeniu natężenia napromienienia/napromienienia w miejscu, w którym może się znajdować spawacz. Jednakże biorąc pod uwagę dynamiczny charakter procesu spawania, różne wartości współczynników odbicia spajanych materiałów itd., zmierzone wartości mogą się znacząco różnić. Racjonalnym podejściem jest więc oszacowanie wartości maksymalnej spodziewanej ekspozycji na podstawie danych o mocy/energii wyjściowej lasera oraz wielkości powierzchni w miejscu przebywania spawacza, na jakiej rozkłada się docierająca tu energia promieniowania laserowego. W analizie należy również uwzględnić tryb pracy lasera (ciągły lub impulsowy). Na podstawie tak zebranych danych można wyznaczyć wymaganą w danym przypadku wartość gęstości optycznej filtrów przeznaczonych do ochrony przed promieniowaniem laserowym.

BIBLIOGRAFIA

[1] BRYŁA S. Krótka historia spawalnictwa. [Online:] https://spawalnicy.pl/edukacja/krotka-historia-spawalnictwa [dostęp: 20.07.2023 r.].

[2] MAIMAN T.H. The Laser Inventor. Memoirs of Theodore H. Maiman. Springer Biographies. Springer, 2018.

[3] MAIMAN T.H. Optical and Microwave-Optical Experiments in Ruby. Physical Review Letters. 1960, 4(11): 564-566; doi: 10.1103/PhysRevLett.4.564.

[4] PILARCZYK J. i in. Wykorzystanie technik laserowych do spawania elementów o małych wymiarach w Centrum Laserowym Instytutu Spawalnictwa. Problemy Eksploatacji. 2021, 4: 207-216.

[5] RADEK N., ŚLUSARCZYK R. Wpływ parametrów spawania laserowego na własności mechaniczne spoiny. Przegląd Spawalnictwa. 2002, 74(4): 18-20.

[6] RÓŻAŃSKI M., GRAJCAR A., STANO S. Wpływ energii liniowej spawania wiązką laserową na makrostrukturę i wybrane właściwości połączeń ze stali AHSS na przykładzie CPW 800. Przegląd Spawalnictwa. 2015, 87(2): 23-29.

[7] JAWOROWSKA M. Spawanie laserowe – w teorii i praktyce. [Online:] https://automatykab2b.pl/technika/56918-spawanie-laserowe-w-teorii-i-praktyce [dostęp: 20.07.2023].

[8] ZIĘTEK B. Lasery. Toruń: Wydawnictwa Naukowe UMK, 2015.

[9] OWCZAREK G., SZKUDLAREK J., JACHOWICZ M. Maksymalna dopuszczalna ekspozycja (MD) w ocenie zagrożeń oczu i skóry wywołanych promieniowaniem laserowym. Bezpieczeństwo Pracy. Nauka i Praktyka. 2021, 1: 19-23.

[10] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 25/2006/WE z dnia 5 lipca 2006 r. w sprawie minimalnych wymagań w zakresie ochrony zdrowia i bezpieczeństwa dotyczących narażenia pracowników na ryzyko spowodowane czynnikami fizycznymi (sztucznym promieniowaniem optycznym) (Dz.Urz. UE L 114 z 27 kwietnia 2006 r., s. 38-59).

[11] Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Społecznej z dnia 12 czerwca 2018 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy (Dz.U. poz. 1286 z późn. zm.).

[12] PN-EN 60825-1:2014-11. Bezpieczeństwo urządzeń laserowych – Część 1: Klasyfikacja sprzętu i wymagania.

[13] PN-EN 207:2017-07. Ochrona indywidualna oczu – Filtry chroniące przed promieniowaniem laserowym.

[14] WOLSKA A. Sztuczne promieniowanie optyczne – zasady oceny ryzyka zawodowego. Poradnik. Warszawa: CIOP-PIB, 2013.

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