

Zagrożenie promieniowaniem laserowym odbitym

– wpływ kąta ustawienia materiału obrabianego

Na stanowiskach wyposażonych w urządzenia laserowe może występować potencjalne zagrożenie oczu i skóry promieniowaniem laserowym odbitym od obrabianego elementu. Przedstawione w artykule wyniki przeprowadzonych w warunkach laboratoryjnych badań dla próbki aluminium ustawionej pod trzema różnymi kątami względem propagacji wiązki laserowej o długości fali 940 nm wykazały wpływ kąta jej położenia na zagrożenie oczu promieniowaniem odbitym. Wyniki pomiarów wskazują, że wraz ze zmniejszeniem kąta odchylenia materiału obrabianego od położenia prostopadłego względem kierunku propagacji promieniowania laserowego (rys. 1.) zwiększa się gęstość mocy promieniowania laserowego odbitego, a tym samym występuje większe zagrożenie dla zdrowia człowieka.

Hazard related to reflected laser radiation: the influence of the angle position of a treated metal sample

Hazard related to reflected laser radiation from treated material is possible at workstations equipped with lasers. Laboratory measurements for an aluminium sample positioned at three different angles with respect to the direction of an incident laser beam of a wavelength of 930 nm showed the influence of its angle position on eye hazard related to reflected laser radiation. The results indicated that as the angle of declination of the treated sample increased from the direction of the incident laser beam, the power density of reflected laser radiation and the hazard for the worker increased, too.

Wprowadzenie

Na stanowiskach pracy wyposażonych w urządzenia laserowe potencjalne zagrożenie dla oczu i skóry może stanowić promieniowanie laserowe bezpośrednie lub odbite od obrabianego elementu czy od innych powierzchni wyposażenia tego urządzenia lub stanowiska pracy. W przemyśle lasery najczęściej wykorzystywane są do spawania i cięcia głównie różnego rodzaju metali, gdzie stosowane urządzenia laserowe są zazwyczaj klasy IV. Metale charakteryzują się dużym współczynnikiem odbicia, z czym bezpośrednio wiąże się prawdopodobieństwo występowania dużych wartości promieniowania odbitego, zwłaszcza jego składowej odbicia kierunkowego.

Aby praktycznie sprawdzić wpływ kąta położenia materiału obrabianego względem kierunku wiązki laserowej padającej na ten materiał na zagrożenie promieniowaniem

laserowym odbitym, wykonano w laboratoriach Wojskowej Akademii Technicznej pomiary promieniowania laserowego odbitego przy różnych kątach położenia próbki aluminium, na którą padało promieniowanie laserowe o długości fali 940 nm.

Metoda pomiaru

Charakterystyka stanowiska pomiarowego

Schemat ogólny stanowiska do pomiaru promieniowania laserowego odbitego i rozproszonego od powierzchni materiału obrabianego został przedstawiony na rys. 1. W skład stanowiska pomiarowego wchodzi źródło promieniowania laserowego, układ optyczny kolimujący i skupiający promieniowanie laserowe, uchwyt na próbkę materiału obrabianego, miernik mocy i energii promieniowania laserowego wraz z odpowiednim zestawem sond pomiarowych, stojak wraz

dr inż. AGNIESZKA WOLSKA

Centralny Instytut Ochrony Pracy
– Państwowy Instytut Badawczy

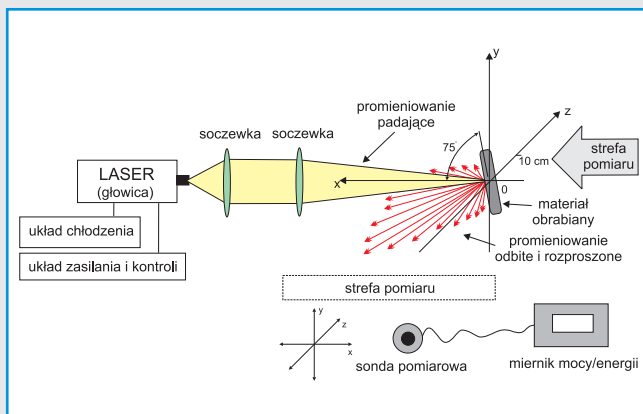
dr inż. JACEK ŚWIDERSKI
mgr inż. PIOTR KONIECZNY

Wojskowa Akademia Techniczna

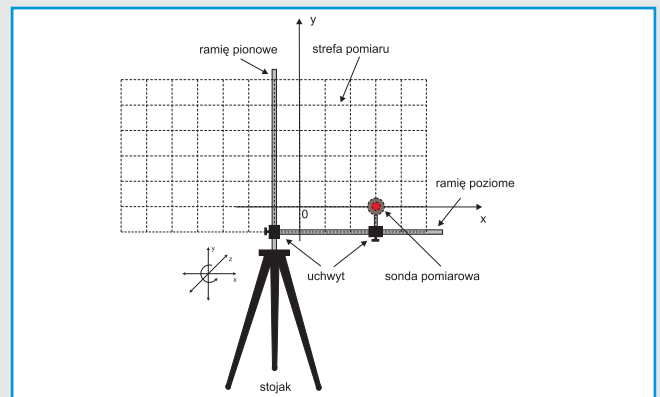
ze stelażem – przeznaczonym do mocowania i przesuwu w kierunkach x, y sondy pomiarowej miernika mocy/energii (rys. 2.).

W pomiarach wykorzystano laser półprzewodnikowy (diode laserową) wykonany na bazie InGaAs/GaAs o mocy średniej 6W (ciąg impulsów o czasie trwania 1 ms przy częstotliwości repetycji 500 Hz). Emitowana długość fali 940 nm (fot. 1.). Celem zapewnienia stabilności parametrów generowanego promieniowania (moc, energia, długość fali generacji oraz szerokość widmowa wiązki) laser wyposażony został w układ stabilizacji temperatury pracy z dokładnością do 1 °C. Dioda ta wyposażona była w światłowód transmisyjny charakteryzujący się średnicą rdzenia 400 μm i aperturą numeryczną NA = 0,22.

Promieniowanie generowane przez laser było kolimowane, a następnie skupiane na powierzchni próbki obrabianego materiału. Do tego celu posłużyły 2 soczewki sferyczne o ogniskowych 40 mm i 104 mm. Materiałem obrabianym była próbka aluminium (fot. 2.).



Rys. 1. Schemat ogólny stanowiska pomiarowego [2]
Fig. 1. A general chart of a measurement station [2]



Rys. 2. Szkic stojaka ze stelażem przeznaczonym do pomiaru promieniowania laserowego rozproszonego i odbitego [2]
Fig. 2. A drawing of a stand with a rack dedicated to measurements of reflected and scattered laser radiation [2]

Pomiary wykonano w płaszczyźnie prostopadłej do podłoża z wykorzystaniem zaprojektowanego do tego celu stojaka (rys. 2.). Na ramieniu poziomym znajduje się metalowy uchwyt (przesuwany wzdłuż ramienia) służący do zamocowania sond pomiarowych przy maksymalnej gęstości siatki wynoszącej 2,5 cm w obu osiach.

Procedura badań

Pomiary rozpoczęto ustawiając sondę pomiarową w punkcie znajdującym się na wysokości odpowiadającej miejscu interakcji promieniowania laserowego z badaną próbką metalu, oddalonym od tego miejsca (w kierunku prostopadłym) o 10 cm (punkt 0 na wykresach).

Wykonano pomiary wartości mocy/energii promieniowania laserowego rozproszonego i odbitego w płaszczyźnie prostopadłej do podłoża o wymiarach 27,5x20 cm oddalanej od miejsca interakcji promieniowania laserowego z badaną próbką o zadanej odległości 10 cm. Pomiar ten pozwolił na określenie miejsc, gdzie gęstość mocy/energii promieniowania laserowego jest krytyczna.

Kąt usytuowania próbki aluminium względem padającego promieniowania był zmienny i wynosił odpowiednio: 90°, 75° i 60° w stosunku do kierunku propagacji promieniowania laserowego padającego na próbkę. Badana próbka zamocowana była w uchwycie mechanicznym pozwalającym na jej obrót wokół własnej osi i ustawienie wybranego do badań kąta.

Wyniki pomiarów

Kąt ustawienia próbki 90°

Wyniki gęstości energii impulsów promieniowania odbitego wyznaczonej z pomiaru mocy promieniowania odbitego i rozproszone-

go dla ustawienia próbki aluminium pod kątem 90° względem promieniowania laserowego padającego na próbkę przedstawiono w tabeli 1. oraz w postaci graficznej na rys. 3.

W przypadku próbki ustawionej pod kątem 90° w płaszczyźnie pomiarów wystąpiło kilka „pików” promieniowania odbitego, wokół których występują różnej szerokości rozproszenia promieniowania. Największa gęstość energii (pierwszy, co do wielkości pik) występowała przy kącie ok. 30° w płaszczyźnie poziomej (liczonym od linii propagacji promieniowania laserowego padającego na próbkę) oraz przy kącie ok. 27° w płaszczyźnie pionowej powyżej linii propagacji promieniowania laserowego padającego na próbkę. Drugi, co do wielkości pik występował przy kącie ok. 27° w płaszczyźnie poziomej (liczonym od linii propagacji promieniowania laserowego padającego na próbkę) oraz w linii propagacji promieniowania laserowego padającego na próbkę (kąt 0°). Trzeci, co do wielkości pik występował przy kącie ok. 24° w płaszczyźnie poziomej (liczonym od linii propagacji promieniowania laserowego padającego na próbkę) oraz przy kącie ok. 37° w płaszczyźnie pionowej powyżej linii propagacji promieniowania laserowego padającego na próbkę.

Kąt ustawienia próbki 75°

Wyniki gęstości energii impulsów promieniowania odbitego wyznaczonej z pomiaru mocy promieniowania odbitego i rozproszonego dla ustawienia próbki aluminium pod kątem 75° względem promieniowania laserowego padającego na próbkę przedstawiono w tabeli 2. (str. 20.) oraz w postaci graficznej na rys. 4 (str. 21.).

W przypadku próbki ustawionej pod kątem 75° największa gęstość energii występowała przy kącie ok. 30° w płaszczyźnie poziomej (liczonym od linii propagacji promieniowania laserowego padającego na próbkę) oraz przy



Fot. 1. Moduł diody laserowej wykonanej na bazie InGaAs/GaAs na zakres 940 nm [2]

Photo. 1. A module of an InGaAs/GaAs laser diode for a wavelength of 940 nm [2]



Fot. 2. Badana próbka wykonana z aluminium

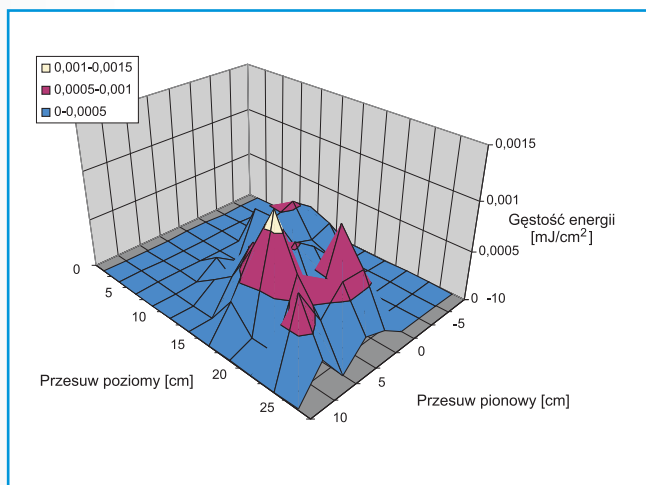
Photo. 2. An aluminium sample

kącie ok. 14° w płaszczyźnie pionowej poniżej linii propagacji promieniowania laserowego padającego na próbkę. Największe zmierzone wartości gęstości energii promieniowania rozproszonego występowały wokół maksymalnego odbicia (odbicie kierunkowe) w obszarze o wymiarach ok. 12,5 cm wzdłuż przesuwu poziomego i 7,5 cm wzdłuż przesuwu pionowego.

Tabela 1
WYNIKI OBLICZONEJ GĘSTOŚCI ENERGII IMPULSÓW PROMIENIOWANIA ODBITEGO I ROZPROSZONEGO DLA USTAWIENIA PRÓBKİ ALUMINIUM POD KĄTEM 90° WZGLĘDEM PROMIENIOWANIA LASEROWEGO PADAJĄCEGO NA PRÓBKĘ [2]

Results of calculated pulse energy density of reflected and scattered laser radiation from an aluminium sample positioned at 90° [2]

Odległość na osi y, cm	Gęstość energii impulsów promieniowania odbitego, mJ/cm ²									
	Odległość na osi x, cm									
	5	7,5	10	12,5	15	17,5	20	22,5	25	27,5
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7,5	0	0	0	0	0,0003	8E-05	7,84E-05	0,00078	0,0003	0
5	0	0	0,00016	0,0003	0,0007	0,0012	0,000706	0,00039	0	0
2,5	0	0,00016	0	0,0005	0,0003	0,0002	0,000235	0,00063	0,0002	0
0	0	0	0	0,0002	0,0005	8E-05	0,000941	0,00063	0,0002	0
-2,5	0	0,00047	0,00047	0,0003	0,0004	8E-05	0	0	0	0
-5	0	0,00024	0,00055	0,0002	0,0002	8E-05	0	0	0	0
-7,5	0	0	0,00039	0,0003	0	0	0	0	0	0
-10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0



Rys. 3. Gęstość energii impulsów promieniowania odbitego i rozproszonego przy ustawieniu próbki aluminium pod kątem 90° [2]

Fig. 3. Pulse energy density of reflected and scattered laser radiation from an aluminium sample positioned at 90° [2]

Tabela 2

WYNIKI OBLICZONEJ GĘSTOŚCI ENERGII IMPULSÓW PROMIENIOWANIA ODBITEGO I ROZPROSZONEGO DLA USTAWIENIA PRÓBKII ALUMINIUM POD KĄTEM 75° WZGLĘDEM PROMIENIOWANIA LASEROWEGO PADAJĄCEGO NA PRÓBKĘ [2]

Results of calculated pulse energy density of reflected and scattered laser radiation from an aluminium sample positioned at 75 [2]

Odległość na osi y, cm	Gęstość energii impulsów promieniowania odbitego, mJ/cm ²											
	Odległość na osi x, cm											
	0	2,5	5	7,5	10	12,5	15	17,5	20	22,5	25	27,5
10	0	0	0	0	0	0,0006	0	0	0	0	0	0
7,5	0	0	0	0,00031	0,00235	0,002	0,0021	0,002	0,000392	0,00031	0	0
5	0	0	0,0009	0,0029	0,00478	0,0067	0,0056	0,0045	0,003529	0,00133	0,0006	0
2,5	0	0,0008	0,0014	0,00549	0,0091	0,0129	0,0144	0,012	0,008	0,0051	0,0035	0,0014
0	0	0,0004	0,0029	0,0062	0,01145	0,0175	0,0242	0,0216	0,015529	0,00847	0,0047	0,0027
-2,5	0	0,0004	0,003	0,00604	0,00941	0,0173	0,0233	0,0271	0,021961	0,01129	0,006	0,0025
-5	0	0	0,0003	0,00306	0,00471	0,0093	0,0129	0,0161	0,016392	0,01075	0,0071	0,0034
-7,5	0	0	0	0,00086	0,00282	0,0055	0,0065	0,0071	0,007294	0,00651	0,0045	0,0022
-10	0	0	0	0	0	0,0013	0,0023	0,0027	0,002431	0,00329	0,0024	0,0016

Tabela 3

WYNIKI OBLICZONEJ GĘSTOŚCI ENERGII IMPULSÓW PROMIENIOWANIA ODBITEGO I ROZPROSZONEGO DLA USTAWIENIA PRÓBKII ALUMINIUM POD KĄTEM 60° WZGLĘDEM PROMIENIOWANIA LASEROWEGO PADAJĄCEGO NA PRÓBKĘ (PUNKTY POMIAROWE, W KTÓRYCH WYSTĘPUJE PRZEKROCZENIE WARTOŚCI MDE DLA OCZU ZACIENIOWANO NA SZARO) [2]

Results of calculated pulse energy density of reflected and scattered laser radiation from an aluminium sample positioned at 60° (measurement points in which the measured values exceeded MPE for the eyes are shown on a grey background) [2]

Odległość na osi y, cm	Gęstość energii impulsów promieniowania odbitego, mJ/cm ²											
	Odległość na osi x, cm											
	0	2,5	5	7,5	10	12,5	15	17,5	20	22,5		
10	0	0	0	0	0,00039	0	0	0	0	0	0	0
7,5	0	0	0	0,00071	0,00024	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0,0002	0,0022	0,00408	0,00282	0,0015	0,0002	0,0013	0	0	0	0
2,5	0,0018	0,0136	0,0172	0,01671	0,00933	0,0051	0,0031	0,0006	0,00039	0	0	0
0	0,0043	0,0251	0,0488	0,0422	0,02604	0,0118	0,0048	0,0016	0,00039	0	0	0
-2,5	0,0086	0,0314	0,0816	0,07608	0,03216	0,0104	0,0042	0,0008	0	0	0	0
-5	0,001	0,0099	0,0238	0,03098	0,01992	0,0068	0,0024	0,0013	0	0	0	0
-7,5	0	0,0013	0,0075	0,00918	0,00792	0,0034	0,0016	0,0004	0	0	0	0
-10	0	0	0,0004	0,00345	0,00329	0,0016	0	0	0	0	0	0

Kąt ustawienia próbki 60°

Wyniki gęstości energii impulsów promieniowania odbitego wyznaczonej z pomiaru mocy promieniowania odbitego i rozproszonego dla ustawienia próbki aluminium pod kątem 60° względem promieniowania laserowego padającego na próbkę przedstawiono w tabeli 3. oraz w postaci graficznej na rys. 5.

W przypadku próbki ustawionej pod kątem 60° największa gęstość energii występowała przy kącie ok. 63° w płaszczyźnie poziomej (liczonym od linii propagacji promieniowania laserowego padającego na próbkę) oraz przy

kącie ok. 14° w płaszczyźnie pionowej poniżej linii propagacji promieniowania laserowego padającego na próbkę. Największe zmierzone wartości gęstości energii promieniowania rozproszonego występowały wokół maksymalnego odbicia (odbicie kierunkowe) w obszarze o średnicy ok. 5 cm.

Porównując wyniki pomiarów dla próbki aluminium przy badanych kątach jej ustawienia względem linii propagacji promieniowania laserowego, można zauważyć, że:

- zmierzona wartość maksymalna energii impulsów promieniowania odbitego przy kącie 60° (0,82 J/m²) jest około 3 razy wyższa niż

przy kącie 75° (0,27 J/m²) oraz ok. 68 razy wyższa niż przy kącie 90° (0,012 J/m²);

- największe rozproszenie promieniowania odbitego (w największym obszarze na płaszczyźnie pomiaru) wraz z występowaniem kilku pików obicia kierunkowego występowało przy kącie ustawienia próbki 90°.

Określenie zagrożenia promieniowaniem laserowym odbitym

Wartości MDE dla badanego lasera

Zgodnie z rozporządzeniem MPiPS [1] w przypadku źródeł laserowych emitujących promieniowanie impulsowe powtarzalne, maksymalną dopuszczalną ekspozycję (MDE) oka i skóry określają następujące warunki:

a) ekspozycja na dowolny pojedynczy impuls w ciągu impulsów nie powinna przekraczać wartości dozwolonych dla pojedynczego impulsu (zgodnie z tabelicą zawartą w rozporządzeniu [1]),

b) średnia ekspozycja dla ciągu impulsów o czasie trwania T nie powinna przekraczać wartości dozwolonych dla ekspozycji o czasie trwania T, (zgodnie z tabelicą zawartą w rozporządzeniu [1]),

c) dla promieniowania laserowego o długości fali zawartej w przedziale 400-1400 nm powinien być spełniony dodatkowo następujący warunek:

– maksymalna dozwolona ekspozycja na dowolny pojedynczy impuls z ciągu impulsów (MDE_{imp}) nie powinna przekraczać wartości MDE miarodajnej dla pojedynczego impulsu (zgodnie z tabelicą zawartą w rozporządzeniu [1]) pomnożonej przez podniesioną do potęgi minus 0,25 liczbę impulsów (N) działających na oczu lub skórze

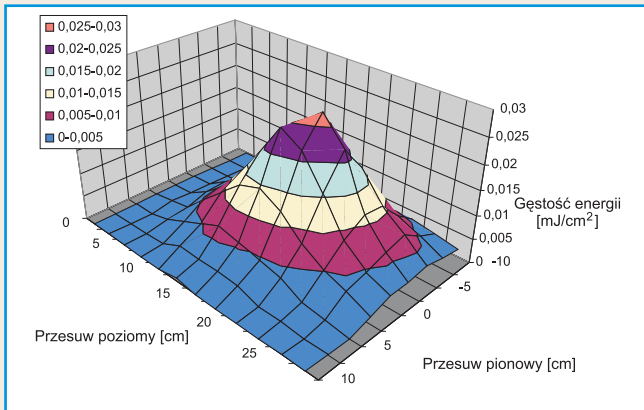
$$MDE_{imp} = MDE \cdot N^{0,25}$$

W przypadku zastosowanego do badań lasera impulsowego o długości fali 940 nm, należy porównać wyniki pomiarów z trzema wartościami MDE, odpowiednio dla oczu i skóry.

Wyznaczenie maksymalnych dopuszczalnych ekspozycji oka

W związku z faktem, że wartości MDE zależą od czasu ekspozycji pracownika, do analizy zagrożeń promieniowaniem laserowym, w przeprowadzonych badaniach, jako przykładowy i reprezentatywny czas ekspozycji przyjęto 10 s. Obliczone wartości MDE wynoszą wówczas odpowiednio [2]:

a) MDE dla ekspozycji na dowolny pojedynczy impuls w ciągu impulsów: przy zastosowanym laserze czas trwania pojedynczego



Rys. 4. Gęstość energii impulsów promieniowania odbitego i rozproszonego przy ustawieniu próbki aluminium pod kątem 75° [2]

Fig. 4. Pulse energy density of reflected and scattered laser radiation from an aluminium sample positioned at 75° [2]

impulsu wynosił 1 ms, wobec czego wartość MDE wyznacza się z następującego wzoru:

$$MDE = 18 \cdot C_4 \cdot t^{0,75} \text{ J/m}^2$$

gdzie

$$C_4 = 10^{(2-700)/500} = 10^{(940-700)/500} = 3,02$$

$$MDE = 18 \cdot 3,02 \cdot 0,001^{0,75} = 0,305 \text{ J/m}^2$$

b) MDE dla średniej ekspozycji na ciąg impulsów przy przykładowo założonym czasie trwania ekspozycji wynoszącym 10 s:

$$MDE = 18 \cdot C_4 \cdot t^{0,75} = 18 \cdot 3,02 \cdot 10^{0,75} = 305,5 \text{ J/m}^2$$

c) MDE_{imp} na dowolny pojedynczy impuls nie powinna dodatkowo przekraczać MDE dla pojedynczego impulsu w ciągu impulsów:

$$MDE_{imp} = MDE \cdot N^{-0,25}$$

Dla przyjętego czasu ekspozycji wynoszącego 10 s liczba impulsów N = 5 000, a wyznaczony wcześniej MDE dla pojedynczych impulsów wynosi 0,305 J/m², czyli:

$$MDE_{imp} = 0,305 \cdot 5000^{-0,25} = 0,04 \text{ J/m}^2$$

Zatem spełniony jest warunek MDE_{imp} < MDE.

Wyznaczenie maksymalnych dopuszczalnych ekspozycji skóry [2]

a) MDE dla ekspozycji na dowolny pojedynczy impuls w ciągu impulsów: przy zastosowanym laserze czas trwania pojedynczego impulsu wynosił 1 ms, wobec czego wartość MDE wyznacza się z następującego wzoru:

$$MDE = 1,1 \cdot 10^4 \cdot t^{0,25} = 110000 \cdot 0,001^{0,25} = 19561 \text{ J/m}^2$$

b) w przypadku MDE dla średniej ekspozycji na ciąg impulsów przy założonym czasie

trwania ekspozycji wynoszącym 10 s mamy dwie wartości:

$$MDE_1 = 1,1 \cdot 10^4 \cdot t^{0,25} = 110000 \cdot 10^{0,25} = 19561 \text{ J/m}^2$$

$$MDE_2 = 2000 \text{ W/m}^2$$

Zgodnie z ogólnie przyjętą zasadą przy ocenie zagrożenia przyjmuje się w takich przypadkach wartość bardziej restrykcyjną, którą w tym przypadku jest MDE₁.

c) MDE_{imp} na dowolny pojedynczy impuls nie powinna dodatkowo przekraczać MDE dla pojedynczego impulsu:

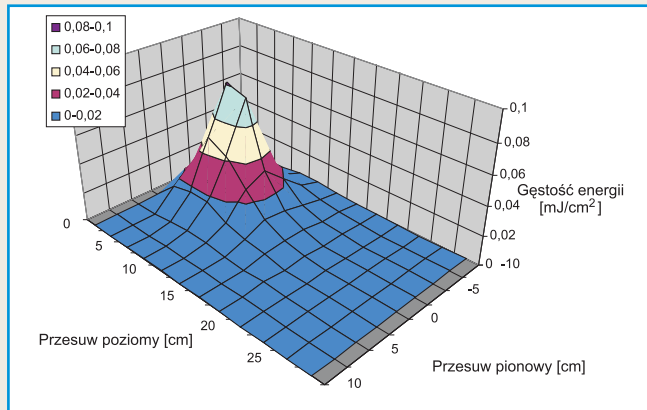
$$MDE_{imp} = MDE \cdot N^{-0,25} = 19561 \cdot 5000^{-0,25} = 2347,32 \text{ J/m}^2$$

Zatem spełniony jest warunek MDE_{imp} < MDE.

Określenie zagrożenia dla oczu i skóry na podstawie otrzymanych wyników pomiarów

Aby stwierdzić, w których miejscach występuje zagrożenie dla oczu i skóry człowieka, należy porównać zmierzone wartości z wartościami MDE wyznaczonymi zgodnie z rozporządzeniem MPiPS [1].

Porównując uzyskane wyniki zawarte w tabelach 1., 2. i 3. z wyznaczonymi wartościami MDE można zauważyć, że w całym obszarze mierzonym nie stwierdzono zagrożenia oczu i skóry promieniowaniem laserowym odbitym przy ustawieniu próbki pod kątem 90° i 75°. Natomiast w przypadku próbki ustawionej pod kątem 60° **stwierdzono występowanie przekroczenia wartości MDE dla ekspozycji oczu na dowolny pojedynczy impuls w ciągu impulsów w kierunku maksymalnego odbicia oraz w otaczającym go obszarze o długości ok. 7,5 cm wzdłuż przesuwu poziomego oraz wysokości ok. 2,5 cm (w górę).** Przy tym ustawieniu próbki nie stwierdzono



Rys. 5. Gęstość energii impulsów promieniowania odbitego i rozproszonego przy ustawieniu próbki aluminium pod kątem 60° [2]

Fig. 5. Pulse energy density of reflected and scattered laser radiation from an aluminium sample positioned at 60° [2]

również zagrożenia skóry promieniowaniem odbitym w całym obszarze mierzonym.

Podsumowanie

Można więc stwierdzić, że im mniejszy kąt odchylenia materiału obrabianego od położenia prostopadłego względem kierunku propagacji promieniowania laserowego, tym większe występują wartości mocy promieniowania odbitego i tym samym większe zagrożenie w przypadku niezamierzonej ekspozycji na promieniowanie laserowe odbite i rozproszone (rys. 1.).

Wynika z tego praktyczny wniosek, że materiał obrabiany należy w miarę możliwości umieszczać prostopadle do kierunku padania promieniowania laserowego. Przy odchyleniu od tego położenia potencjalne zagrożenie promieniowaniem laserowym odbitym wzrasta.

PIŚMIENNICTWO

[1] Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Społecznej z dnia 29 listopada 2002 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy (DzU nr 217, poz. 1833)

[2] A. Wolska, P. Konieczny, A. Pawlak *Opracowanie i budowa stanowiska do badania parametrów promieniowania laserowego dla potrzeb oceny zagrożenia. Sprawozdanie z etapu 2: Opracowanie założeń technicznych kompletowanie elementów stanowiska badania parametrów promieniowania laserowego.* CIOP-PIB, Warszawa 2006

Publikacja opracowana na podstawie wyników uzyskanych w ramach programu wieloletniego pn. „Dostosowywanie warunków pracy w Polsce do standardów Unii Europejskiej” dofinansowywanego w latach 2005-2007 w zakresie badań naukowych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego, w zakresie zadań służb państwowych przez Ministerstwo Pracy i Polityki Społecznej. Główny koordynator: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy