

Analysis of safety systems in terms of the physical factors of the laser engraving concerning the Machinery Directive 2006/42/EC

Adam Ponikiewski¹, Damian Kolny^{2*}, Mateusz Gacek³, Jakub Owczarzak⁴, Robert Drobina⁵

¹ University of Bielsko-Biala, Faculty of Mechanical Engineering and Computer Science, ul. Willowa 2, Bielsko-Biala 43-309, Poland, aadam.ponikiewski@gmail.com

² University of Bielsko-Biala, Faculty of Mechanical Engineering and Computer Science, ul. Willowa 2, Bielsko-Biala 43-309, Poland, dkolny@ubb.edu.pl

³ University of Bielsko-Biala, Faculty of Mechanical Engineering and Computer Science, ul. Willowa 2, Bielsko-Biala 43-309, Poland, gacek.mateusz02@gmail.com

⁴ University of Bielsko-Biala, Faculty of Mechanical Engineering and Computer Science, ul. Willowa 2, Bielsko-Biala 43-309, Poland, jakub.owczarzak05@gmail.com

⁵ University of Bielsko-Biala, Faculty of Mechanical Engineering and Computer Science, ul. Willowa 2, Bielsko-Biala 43-309, Poland, rdrobina@ubb.edu.pl

* Corresponding author, e-mail

Abstract: The article presents the problem of implementing protective solutions for devices utilising a laser beam in manufacturing processes. The implementation of the work includes construction of a protective housing, designed to guard against physical factors as well as carrying out selected measurements of these factors in variable conditions of the device's surrounding during the engraving process. The results of the measurements carried out are presented, based on them, the principles of safe use of the protected device are recommended.

Keywords: laser engraving; machinery directive; workstation safety;

Analiza systemów bezpieczeństwa pod względem czynników fizycznych procesu grawerowania laserowego w świetle Dyrektywy Maszynowej 2006/42/WE

Adam Ponikiewski¹, Damian Kolny^{2*}, Mateusz Gacek³, Jakub Owczarzak⁴, Robert Drobina⁵

¹ Uniwersytet Bielsko-Bialski, Wydział Budowy Maszyn i Informatyki, ul. Willowa 2, Bielsko-Biala 43-309, Polska, aadam.ponikiewski@gmail.com

² Uniwersytet Bielsko-Bialski, Wydział Budowy Maszyn i Informatyki, ul. Willowa 2, Bielsko-Biala 43-309, Polska, dkolny@ubb.edu.pl

³ Uniwersytet Bielsko-Bialski, Wydział Budowy Maszyn i Informatyki, ul. Willowa 2, Bielsko-Biala 43-309, Polska, gacek.mateusz02@gmail.com

⁴ Uniwersytet Bielsko-Bialski, Wydział Budowy Maszyn i Informatyki, ul. Willowa 2, Bielsko-Biala 43-309, Polska, jakub.owczarzak05@gmail.com

⁵ Uniwersytet Bielsko-Bialski, Wydział Budowy Maszyn i Informatyki, ul. Willowa 2, Bielsko-Biala 43-309, Polska, rdrobina@ubb.edu.pl

* Corresponding author, e-mail

Streszczenie: W artykule przedstawiono problematykę budowy zabezpieczenia do urządzeń wykorzystujących wiązkę lasera w procesach wytwarzania. Część badawcza pracy obejmuje wykonanie autorskiego projektu obudowy zabezpieczającej przed

uciążliwymi i szkodliwymi dla operatora zjawiskami, takimi jak: oślnienie, związki lotne oraz hałas. Przeprowadzono pomiary tych parametrów w zmiennych warunkach ustawienia urządzenia podczas procesu grawerowania. Przedstawiono wyniki przeprowadzonych pomiarów, a w ich oparciu zarekomendowano zasady bezpiecznego użytkowania zabezpieczonego urządzenia.

Słowa kluczowe: grawerowanie laserowe; dyrektywa maszynowa; bezpieczeństwo stanowiskowe;

1. Wprowadzenie

We współczesnym przemyśle laser odgrywa nieodzowny element w realizacji wielu procesów obróbczych, jak i wytwarzania [1]. Zgodnie z definicją naukową termin Laser (ang. Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) odnosi się do urządzenia, które emituje spójne promieniowanie elektromagnetyczne o bardzo dużym natężeniu i precyzji. Wynalezienie lasera sięga lat 60. XX wieku. Zrewolucjonizowało to wiele dziedzin przemysłu, nauki i medycyny, umożliwiając precyzyjne cięcie, obróbkę materiałów i przeprowadzanie procedur medycznych.

Lasery znajdują zastosowanie w różnorodnych dziedzinach, od metalurgii [2], przez elektronikę, po inżynierię drewna [1, 3, 4]. W przemyśle drzewnym technologia laserowa jest mniej rozwinięta niż w obróbce metali, ale ma ogromny potencjał, zwłaszcza w cięciu i grawerowaniu, gdzie można uzyskać bardzo precyzyjne i estetyczne efekty [3]. Lasery działają na zasadzie wzmocnienia promieniowania optycznego poprzez emisję wymuszoną.

Wiązka laserowa to skoncentrowana energia świetlna, którą można skupić w bardzo małym punkcie, co pozwala na manipulowanie materiałami na poziomie mikroskopowym. Zaletą laserów jest możliwość precyzyjnej kontroli parametrów pracy, takich jak moc, częstotliwość i długość fali, co pozwala na dostosowanie urządzenia do różnych zadań i materiałów. Proces cięcia lub grawerowania za pomocą lasera jest bezkontaktowy, oznacza to, że narzędzie nie ulega fizycznemu zużyciu, a obróbka materiału odbywa się poprzez działanie promieniowania na powierzchnię.

Celem artykułu jest opis realizacji projektu związanego z budową konstrukcji zabezpieczenia laboratoryjnego plotera laserowego oraz pomiar i analiza czynników fizycznych takich jak: oślnienie, szkodliwe związki lotne oraz hałas. Przeprowadzanie odczytów pomiarów odbyło się z zachowaniem stałych czynników zewnętrznych (warunki atmosferyczne w pomieszczeniu, operator, materiał, wzór, parametry pracy lasera, itd.), a w zmiennych parametrach ustawień pracy odciągu spalin w komorze, jak i bez niej. W artykule przedstawiono budowę konstrukcji osłony, przebieg realizacji pomiarów czynników fizycznych towarzyszących procesowi grawerowania oraz ich wyniki wraz z interpretacją oraz odpowiednimi wnioskami.

2. Zastosowanie lasera w zakresie obróbki ubytkowej

Zarówno w procesie grawerowania i cięcia za pomocą lasera wykorzystywana jest skupiona wiązka fal elektromagnetycznych, jednak w zależności od przeznaczenia stosowane są różne parametry i techniki obróbki [3, 5, 6]. Wiadomym jest, iż lasery różnią się od siebie nie tylko długością emitowanej fali czy mocą optyczną, lecz także sposobem emisji mocy. Jest istotną różnicą, czy moc jest emitowana w sposób ciągły czy w postaci impulsów. W przypadku pracy impulsowej z niską częstotliwością powtarzania impulsów, moc szczytowa każdego pojedynczego impulsu jest wartością krytyczną. Jeśli wskaźnik repetycji impulsów rośnie, należy rozważyć moc średnią. Niektóre lasery mogą pracować w różnych trybach [7, 9].

Według normy EN 60825 – 1 [7], którą oparto o limity emisji promieniowania laserowego, wyróżniono 4 klasy zagrożenia. Wartości limitów i AEL dla klas laserów znajdują swoje pochodzenie z medycznych wartości MPE (Maximum Permissible Exposure). Te wartości odnoszą się do poziomów zagrożenia dla tkanki ludzkiej, która może się zetknąć z promieniowaniem generowanym przez laser [8]. Klasy te zdefiniowano w 2007 roku i w tabeli 1 przedstawiono klasyfikację typów laserów uwzględniającą ich poziom niebezpieczeństwa.

Tabela 1. Klasyfikacja typów laserów ze względu na poziom ich niebezpieczeństwa [7, 9]

Klasa	Opis	Rodzaj urządzenia / wymagane zabezpieczenia
1	Promieniowanie emitowane przez ten laser nie jest niebezpieczne.	Nie jest wymagany żaden sprzęt zabezpieczający. Do urządzeń tej klasy należą np. nagrywarki DVD
1M	Bezpieczny dla oczu, gdy jest używany bez instrumentów optycznych; może być niebezpieczny o ile nie są używane instrumenty optyczne. Dochodzi tutaj do emisji promieniowania w obszarze $\lambda = 302,5 \div 4000$ nm.	Brak konieczności stosowania sprzętu ochronnego, jeśli jest używany bez przyrządów optycznych. Do urządzeń tej klasy należą słabe lasery z odsłoniętą wiązką
2	Promieniowanie w widzialnym zakresie długości fal w obszarze $\lambda = 400 \div 700$ nm, nie jest niebezpieczne dla krótkotrwałej ekspozycji trwającej do 0,25s.	Nie ma potrzeby stosowania dodatkowego sprzętu ochronnego. Są to lasery ciągłe o mocy do 1 mW
2M	Światło, które może trafić w oko ma wartości λ lasera klasy 2, w zależności od rozbieżności lub szerokości wiązki, może nie być bezpieczne nawet użyciu przyrządów optycznych.	Brak konieczności stosowania sprzętu ochronnego, jeśli jest używany bez przyrządów optycznych. Są to lasery ciągłe o mocy do 1 mW
3R	Promieniowanie z tego lasera przekracza wartości MPE. Promieniowanie wynosi max. $5 \times$ AEL klasy 1 (niewidoczne) lub $5 \times$ klasy 2 (widoczne). Ryzyko jest nieco niższe niż w klasie 3B. Promieniowanie w obszarze $\lambda = 302,5 \div 10^6$ nm	Niebezpieczne dla oczu; zalecane okulary ochronne. Są to lasery do 5 mW
3B	Bezpośrednie promieniowanie laserowe jest niebezpieczne dla oczu, a w szczególnych przypadkach także dla skóry. Odbicia rozproszone są zwykle klasyfikowane jako nieszkodliwe.	Niebezpieczne dla oczu; wymagane są okulary ochronne. Dotyczy to laserów o mocy do 500 mW w widzialnym zakresie spektralnym
4	Promieniowanie laserowe tej klasy jest szczególnie niebezpieczne dla oczu i skóry w każdym wypadku. W niektórych przypadkach odbicie rozproszone jest również niebezpieczne dla oczu. Ponadto istnieje ryzyko zapłonu lub wybuchu.	Sprzęt ochrony osobistej jest konieczny (okulary, parawany). Dotyczy to laserów o zastosowaniu przemysłowym i medycznym.

Grawerowanie drewna przy wykorzystaniu techniki laserowej

Grawerowanie drewna to proces, w którym laser wypala lub usuwa cienką warstwę materiału z powierzchni, tworząc wzór, napis, zdjęcie lub inne grafiki. W tym przypadku wiązka laserowa jest precyzyjnie sterowana, aby pracować w małym zakresie głębokości, co pozwala na dokładne odwzorowanie śladu obróbki na powierzchni materiału.

Technika i parametry realizacji procesu grawerowania za pomocą lasera [1, 5, 6, 10]:

- moc lasera: Grawerowanie wymaga niższej mocy w porównaniu do cięcia. Moc dobiera się w zależności od twardości drewna i rodzaju grawerunku [3],
- głębokość: Grawerowanie odbywa się na powierzchni materiału, bez jego całkowitego przecięcia. Głębokość graweru jest regulowana poprzez ustawienia mocy, prędkości i liczby przejść wiązki lasera nad danym obszarem,
- detale: Lasery pozwalają na uzyskanie niezwykle precyzyjnych i złożonych wzorów poprzez dobór mocy lasera lub prędkości jego poruszania, np. szczegółowych zdjęć lub ornamentów. Technika ta jest szczególnie ceniona w

produkcji ozdobnych przedmiotów, personalizacji oraz przy tworzeniu unikatowych elementów, takich jak tablice pamiątkowe czy zegary,

- kontrast: Efekt grawerowania na drewnie różni się w zależności od gatunku drewna. Jasne gatunki, takie jak klon, brzoza czy sosna, dają wyraźny, wysoki kontrast grawerów, natomiast ciemniejsze gatunki (np. dąb czy orzech) mogą wymagać dodatkowej obróbki, np. defokusowania lasera, aby uzyskać lepszą widoczność wzorów,
- precyzja: Dzięki zastosowaniu precyzyjnej wiązki laserowej o małej średnicy (0,1-0,2 mm), grawerowanie pozwala na tworzenie detali, które są trudne do osiągnięcia przy użyciu tradycyjnych narzędzi.

Grawerowanie laserowe znajduje szerokie zastosowanie, m.in. [1]:

- personalizowane produkty (np. imiona na drewnianych akcesoriach),
- znaki firmowe i loga na produktach,
- detale artystyczne, wzory, ornament,
- prace dekoracyjne, takie jak intarsje czy ozdoby.

3. Cięcie drewna laserem

Cięcie laserowe drewna polega na przecięciu materiału w celu podziału go na mniejsze elementy lub wykonania wyciętych kształtów. W tym przypadku wiązka lasera jest mocniejsza i wnika głębiej w materiał, skutecznie go przecinając. Technika i parametry procesu kształtują się następująco [1, 5, 6, 10]:

- moc lasera: Cięcie drewna wymaga użycia wyższej mocy w porównaniu do grawerowania, zwłaszcza gdy chodzi o grubsze lub twardsze gatunki drewna,
- prędkość: Aby uzyskać gładkie, proste krawędzie, proces cięcia musi być dostosowany pod względem prędkości. Zbyt duże prędkości cięcia mogą spowodować niedokładności, natomiast zbyt wolne cięcie może doprowadzić do nadmiernego przypalenia krawędzi,
- głębokość: wiązka lasera może przeniknąć przez całą grubość materiału, dlatego głębokość nie jest ograniczona jak w przypadku grawerowania. Grubość drewna, które można przeciąć, zależy od mocy lasera oraz rodzaju drewna, ale zazwyczaj wynosi od kilku milimetrów do nawet kilku centymetrów,
- szerokość linii cięcia: Podczas cięcia uzyskuje się bardzo wąskie linie cięcia (tzw. kerf), zwykle o szerokości około 0,1 mm, co minimalizuje stratę materiału,
- przypalenia: Cięcie drewna laserem może prowadzić do przypaleń krawędzi, zwłaszcza jeśli parametry pracy nie są odpowiednio dobrane. Twardość i gęstość drewna również mają wpływ na jakość cięcia – im większa gęstość, tym trudniej unikać przypaleń.

Do przykładowych zastosowań należą [15]:

- tworzenie precyzyjnych form i kształtów z drewna,
- wycinanie elementów dekoracyjnych, np. intarsji,
- produkcja drewnianych modeli, skrzyń, obudów do urządzeń elektronicznych,
- wytwarzanie prototypów i elementów konstrukcyjnych.

Różnice między cięciem a grawerowaniem drewna

Zestawienie podstawowych różnic procesów cięcia i grawerowania laserowego przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Zasadnicze różnice między cięciem a grawerowaniem drewna [1]

Numer wariantu	Cel procesu	Moc lasera	Głębokość pracy	Zastosowanie	Krawędzie
1.	Grawerowanie to proces usuwania powierzchniowej warstwy drewna w celu stworzenia wzoru lub napisu.	Grawerowanie wymaga niższej mocy, ponieważ skupia się na powierzchni	Grawerowanie operuje na płytkiej warstwie drewna (od kilku mikrometrów do kilku milimetrów)	Grawerowanie jest stosowane głównie w celach dekoracyjnych i personalizacyjnych	Grawerowanie nie powoduje tworzenia przypalonych krawędzi, o ile parametry są odpowiednio dobrane

2.	Cięcie służy do rozdzielania materiału, tworząc odrębne elementy lub kształty	Cięcie wymaga wyższej mocy, aby przeniknąć przez cały materiał	Cięcie przenika przez całą grubość materiału	Cięcie służy do tworzenia elementów konstrukcyjnych i form	Cięcie może prowadzić do przypaleń na krawędziach, szczególnie przy grubszych materiałach lub zbyt niskiej prędkości cięcia
----	-------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------	----------------------------------------------	------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

4. Zagadnienia związane z zabezpieczaniem stanowiska wykorzystującego laser – w świetle wymagań Dyrektywy maszynowej 2006/42/WE

Dyrektywa maszynowa 2006/42/WE znajduje zastosowanie także do urządzeń laserowych. Podczas projektowania stanowisk i urządzeń wykorzystujących laser należy zwrócić szczególną uwagę na następujące czynniki [11]:

- oświetlenie – projekt maszyny musi być wykonany w taki sposób, aby wszelkie światło generowane przez nią nie powodowało zjawiska oślnienia, efektów stroboskopowych wywołanych przez oświetlenie części ruchomych oraz obszarów zacienienia,
- ergonomia – urządzenie powinno dopuszczać do użytku operatora bez względu na jego siłę, wytrzymałość czy stany fizyczne. Powinno zapewniać przestrzeń dla ruchów części ciała operatora oraz nie powinno wymagać ciągłego skupienia wynikającego z monitorowania pracy,
- stanowisko operatora – stanowisko musi być zaprojektowane z uwzględnieniem ochrony operatora przed wszelkiego rodzaju gazami spalinowymi lub brakiem tlenu. Jeśli maszyna docelowo jest przeznaczona do pracy w środowisku niebezpiecznym lub sama go przyczynia się do jego tworzenia, to wobec maszyny i operatora muszą zostać zastosowane odpowiednie środki ochrony w celu zapewnienia operatorowi odpowiednich warunków ochrony i pracy,
- uruchomienie – może jedynie nastąpić poprzez aktywację odpowiednich elementów sterowniczych systemu odpowiedzialnego za sterowanie maszyną,
- zatrzymanie – maszyna musi być wyposażona w element sterowniczy, który w przypadku aktywacji doprowadzi do całkowitego i bezpiecznego zatrzymania się maszyny. W przypadku zatrzymania awaryjnego maszyna musi pozostać w stanie wyłączenia, do momentu aż element sterujący lub inny czynnik odpowiadający za jej zatrzymanie zostanie odblokowany. Element odpowiedzialny za awaryjne zatrzymanie musi być odpowiednio oznaczony i być dostępny i gotowy do aktywacji przez cały czas, bez względu na tryb pracy,
- osłony – muszą być solidnej konstrukcji i powinny umożliwiać wykonanie prac związanych z konserwacją lub wymianą narzędzi bez konieczności ich demontażu. Wszelkie osłony powinny w miarę możliwości chronić przed wyrzucaniem materiałów z maszyny oraz przed emisjami wydzielanych przez nie lub efekt ich pracy. Dodatkowo, osłony powinny być zaprojektowane i wykonane tak, aby mogły być nastawiane jedynie poprzez celowe działanie,
- inne ryzyka – należy zminimalizować wszelkie ryzyko związane z powstaniem pożaru, nadmiernego hałasu, promieniowania laserowego oraz emisji materiałów i substancji niebezpiecznych. Szczególną uwagę należy zwrócić na ryzyko związane z emisją promieniowania laserowego oraz substancji niebezpiecznych. W przypadku stosowania laserów, muszą one być zaprojektowane i wykonane w taki sposób aby zapobiec niecelowej emisji promieniowania. Muszą one być zabezpieczone tak, aby promieniowanie zostało odbite lub rozproszone i nie zagrażało zdrowiu. Jeśli zajdzie potrzeba, wyposażenie optyczne do obserwacji powinno być takie, aby promienie laserowe nie stwarzały zagrożenia dla zdrowia przy jego eksploatacji. W przypadku emisji materiałów maszyna musi być zaprojektowana tak, aby można było uniknąć wdychania, spożycia, zetknięcia ze skórą, oczami lub błoną śluzową oraz przeniknięcia przez skórę materiałów i substancji niebezpiecznych przez nią wytwarzanych. Jeżeli nie można wyeliminować zagrożenia, maszyny należy wyposażyć tak, aby materiały i substancje niebezpieczne mogły być odseparowane, usunięte, wytrącone przez zraszanie wodą, filtrowane lub poddane działaniu innej równie skutecznej metody. W przypadku gdy maszyna podczas normalnego trybu pracy nie jest osłonięta, urządzenia do separacji lub usuwania tych substancji muszą być umieszczone w taki sposób, aby uzyskać maksymalny efekt.

W momencie, w którym laser lub ogień spalają drewno, szczególnie w niestabilnych warunkach, produkty składające się na jego efekt stanowią zwykle – tlenek węgla, tlenki azotu oraz związki organiczne – zarówno lotne (LZO – Lotne Związki Organiczne) jak i wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne (WWA) i części smoliste. Kompletny wykaz produktów spalania drewna, wraz z wskaźnikami emisji g/kg przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Produkty spalania drewna [12]

Lp.	Rodzaj zanieczyszczenia	Wskaźnik emisji w g/kg drewna
1	Tlenek węgla	80 ÷ 370
2	Dwutlenek siarki	0,2 ÷ 0,9
3	Tlenki azotu	0,16 ÷ 0,24
4	Metan	14 ÷ 25
5	Benzen	0,6 ÷ 4,0
6	Pochodne alkilowe benzenu	1,0 ÷ 6,0
7	Aldehydy	0,6 ÷ 5,4
8	Pochodne furanów	0,15 ÷ 1,7
9	Kwas octowy	1,8 ÷ 2,4
10	WWA	0,15 ÷ 1,0
11	Chlorek metylu	0,01 ÷ 0,04
12	Polichlorowane dioksyny	1·10 ⁻⁵ ÷ 4·10 ⁻⁵

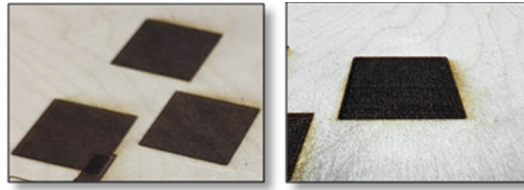
Cięcie laserowe i grawerowanie drewna to dwie różne techniki, ale obie wykorzystują tę samą technologię. Grawerowanie jest bardziej precyzyjne i szczegółowe, doskonale nadaje się do detali i dekoracji, natomiast cięcie służy do oddzielania materiałów i formowania kształtów. Dzięki odpowiedniej konfiguracji lasera można uzyskać wyjątkowe efekty na drewnie zarówno podczas cięcia, jak i grawerowania, co sprawia, że technologia laserowa jest niezastąpiona we współczesnym przemyśle drzewnym [4, 13]. Niemniej jednak należy wziąć pod uwagę efekty uboczne podczas realizacji grawerowania czy też cięcia laserowego, które wymagają odpowiedniego zabezpieczenia procesu i właściwego podejścia do parametryzacji ustawień wiązki lasera, celem ograniczenia czynników szkodliwych dla operatora. W dalszej części artykułu tego typu rozwiązanie w postaci osłony ochronnej zostanie przedstawione i przeanalizowane pod kątem skuteczności działania.

5. Założenia do projektu

Koncepcja realizacji projektu zakresem obejmuje przeprowadzenie wybranych pomiarów parametrów stanowiących czynniki fizyczne towarzyszące procesowi grawerowania laserowego na materiale typu sklejką brzoza o grubości 3 mm, przy zmiennych warunkach nastawienia urządzenia oraz zabezpieczenia. Zabezpieczenie grawerki obejmuje w głównej mierze jej zabudowę z uwzględnieniem osłony przed rozbłyskiem lasera oraz zastosowanie odciągu spalin za pomocą dedykowanego urządzenia. Kolejnym krokiem podjętym w ramach projektu było przeprowadzenie szeregu testów uwzględniających różne ustawienia urządzeń w celu pomiaru wybranych parametrów: olśnienie, szkodliwe związki lotne oraz hałas, które towarzyszą procesowi grawerowania. Głównym założeniem prac pomiarowych było sprawdzenie skuteczności zastosowanej osłony przed szkodliwymi emisjami podczas realizacji procesu grawerowania laserowego, z uwzględnieniem różnych możliwych ustawień urządzenia, uwzględniając również emisję bez osłony. W ramach projektu były sprawdzane następujące ustawienia urządzenia pochłaniającego, zakładając stałe ustawienia pracy lasera:

- wyciąg spalin 100%, komora zainstalowana,
- wyciąg spalin 75%, komora zainstalowana,
- wyciąg spalin 50%, komora zainstalowana,
- wyciąg spalin 25%, komora zainstalowana,
- wyciąg spalin 0%, komora zainstalowana,
- wyciąg spalin 0%, komora niezainstalowana.

Urządzeniem grawerującym w realizowanym projekcie była grawerka laserowa Neje 3 Max V2 o mocy głowicy lasera 12W [14], z kolei grawerowanym wzorem na arkuszach sklejką był kwadrat o wymiarach 400 x 400 mm, przedstawiony na rysunku 1.



Rysunek 1. Grawerowane kwadraty o wymiarach 400 x 400 mm

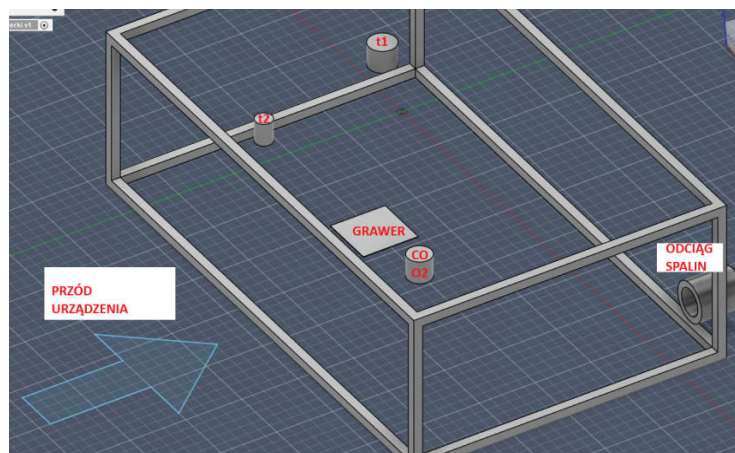
Sterowanie urządzeniem przeprowadzono za pomocą oprogramowania LaserGRBL przy stałych ustawieniach wiązki lasera, tj. moc lasera 100%, prędkość głowicy 1000 mm/min.

6. Realizacja założeń projektowych w kontekście budowy systemu zabezpieczenia

Konstrukcja zabezpieczenia pokrywy została wykonana z profili aluminiowych 20 x 20mm, które przycięto na odpowiednie długości:

- szerokość: 4 x 70cm,
- długość: 4 x 110cm,
- wysokość: 4 x 35cm.

Profile połączono ze sobą za pomocą dedykowanych złączek i śrub. Po skręceniu ze sobą przyciętych profili w odpowiedni sposób, tak aby otrzymać stelaż w kształcie sześciściennej ramy, puste przestrzenie ścian wypełniono panelami ze szkła akrylowego koloru czerwonego o łącznej grubości wynoszącej 3 mm. Pokrywa grawerki laserowej została także wyposażona w drzwi skrzydłowe znajdujące się z przodu urządzenia w celu łatwiejszego wkładania i wyjmowania materiału obrabianego. W zbudowanej w ten sposób konstrukcji zostały rozmieszczone czujniki, odciąg spalin oraz sklejka, na której był wykonywany grawer testowy. Schemat konstrukcji i rozmieszczenia czujników został przedstawiony na rysunku 2.








Rysunek 2. Rozmieszczenie czujników pomiarowych w obudowie zabezpieczającej

Czujniki zostały ulokowane w takich miejscach, aby możliwym było określenie warunków panujących na zewnątrz komory, jak i wewnątrz niej. Następnie zestawiono ze sobą pomiary zebrane podczas badań w celu sprawdzenia skuteczności komory. Czujnik t1 to czujnik, którym mierzono temperaturę na zewnątrz komory – w pracowni, w której warunki były stałe. Czujnik t2, to pomiar temperatury w środku komory, w której pracował laser. Czujnik temperatury głowicy lasera był bezpośrednio przymocowany do samej głowicy lasera. Temperatura lasera była odczytywana z programu LaserGRBL na bieżąco podczas wykonywania operacji grawerowania. Wszystkie temperatury podane zostały w stopniach Celsjusza. Czujnik, który oznaczono jako CO/O₂ to czujnik którym mierzono poziom tlenku węgla (w PPM) oraz procentową objętość tlenu w atmosferze wewnątrz komory. Na rysunku oznaczono również orientację przedniej strony komory, oraz odciąg spalin który znajduje się w tylnej ścianie. Dzięki takiemu umieszczeniu odciągu, powietrze musiało pokonać drogę od przodu urządzenia, aż po odciąg, efektywnie przemierzając całą komorę ochronną. Przód urządzenia jest także miejscem, w którym umieszczono luksometr, mierzący natężenie światła wydobywającego się z komory.

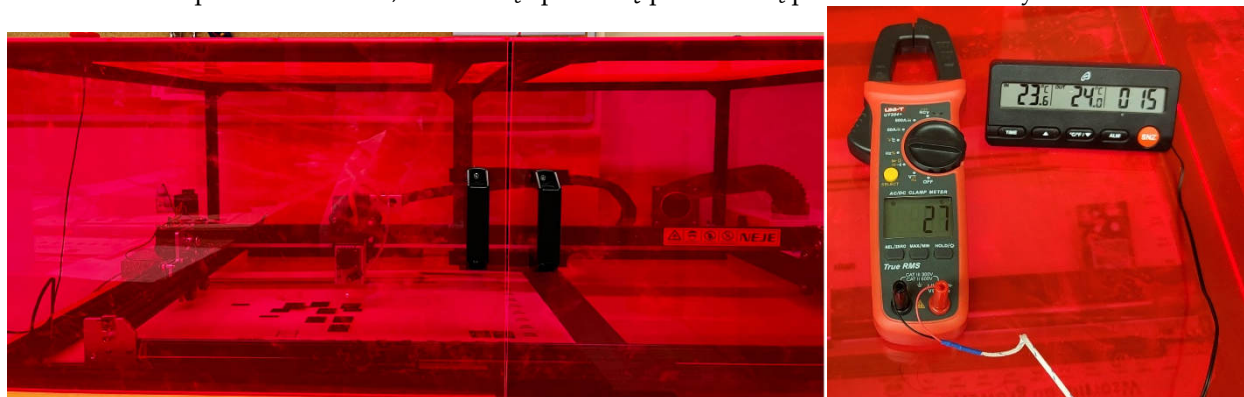
6.1. Mierniki i sposoby odczytu poszczególnych parametrów w trakcie realizacji prób

Pomiary czynników fizycznych przeprowadzono za pomocą zespołu urządzeń pomiarowych, których wykaz przedstawiono w tabeli 4. Tabela zawiera także opisy badanych parametrów, wraz z jednostkami i dokładnościami pomiarowymi urządzeń.

Tabela 4. Wykaz przyrządów pomiarowych wykorzystanych w badaniu [16 - 19]

Lp.	Nazwa urządzenia	Badany parametr	Jednostka	Dokładność pomiaru	Poglądowa fotografia
1	Luksometr Luxmeter L-20A (Przód urządzenia)	Natężenie światła	lx	Błąd dopasowania korekcji widmowej: $\leq 3\%$ Błąd dokładności miernika: $\pm 8\%$	
2	Cyfrowy miernik natężenia dźwięku decybelomierz 30-130 dB	Hałas	dB	$\pm 1,4$ dB	
3	Ventis MX4 (CO, O ₂)	Jakość powietrza	PPM, Obj %	Dla tlenku węgla: $\pm 5\%$ Dla tlenu (5,1 – 30 % obj): $\pm 5\%$	
4	Sonda UNI-T 10k (Multimetr) (t2)	Temperatura wewnętrzna	°C	$\pm 0,75\%$	
5	Auriol HG05685 (t1)	Temperatura zewnętrzna	°C	± 1 °C	

Urządzenia w tabeli powyżej zostały także rozmieszczone zgodnie z rysunkiem 2, mianowicie zostało wskazane ich rozmieszczenie podczas badania, widoczną aparaturę pomiarową przedstawiono na rysunku 3.

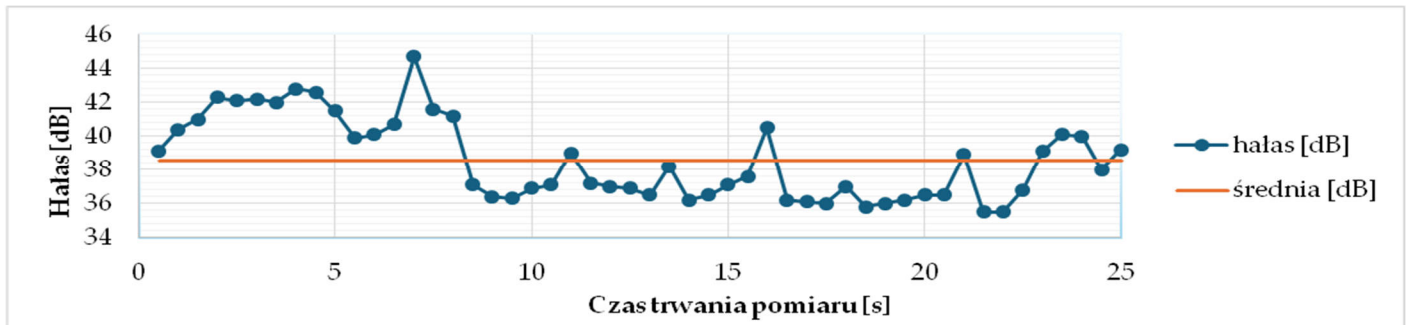


Rysunek 3. Stanowisko badawcze z widoczną aparaturą pomiarową

7. Pomiary wybranych parametrów środowiska pracy podczas realizacji procesu grawerowania

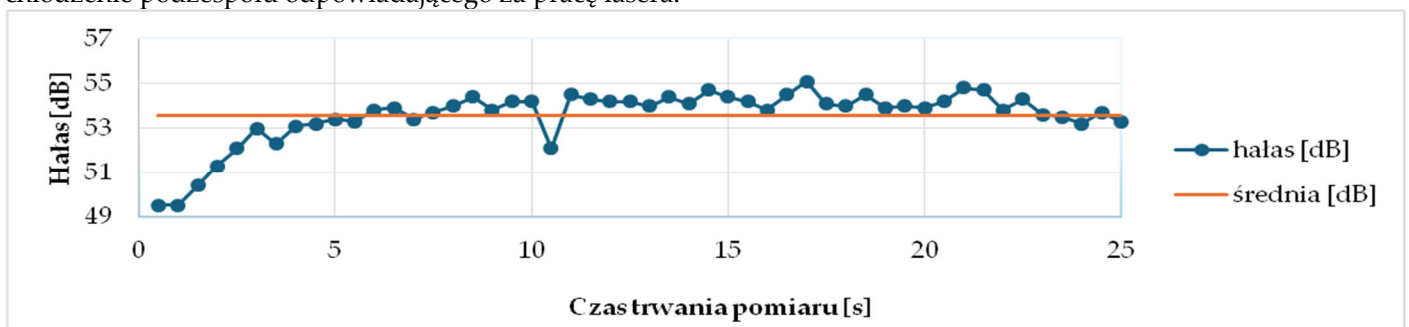
7.1. Pomiar hałasu:

Pomiar hałasu wykonano na drodze zbierania danych z decybelomierza w trakcie pracy grawerki. Wykonano serię pomiarów dla różnych konfiguracji osprzętu komory. Długość każdego z pomiarów wyniosła 25 sekund, w odległości 50 cm od komory, a dane zbierane były co 0,5 sekundy – dla całkowitej liczby 50 zebranych danych w każdym badaniu (rysunek 4).



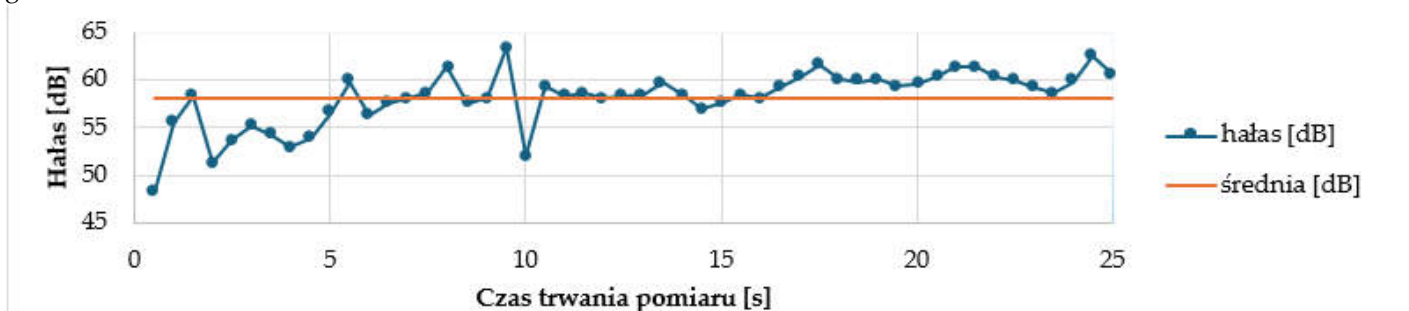
Rysunek 4. Wykres zmian poziomu natężenia dźwięku w czasie: na zewnątrz komory, bez odciągu

Warunki pomiaru hałasu nie miały charakteru dużej zmienności. Widoczne na rysunku 4 podwyższone wartości, odbiegające od sąsiednich spowodowane były wzmożoną pracą wentylatora głowicy lasera, którego celem było chłodzenie podzespołu odpowiadającego za pracę lasera.



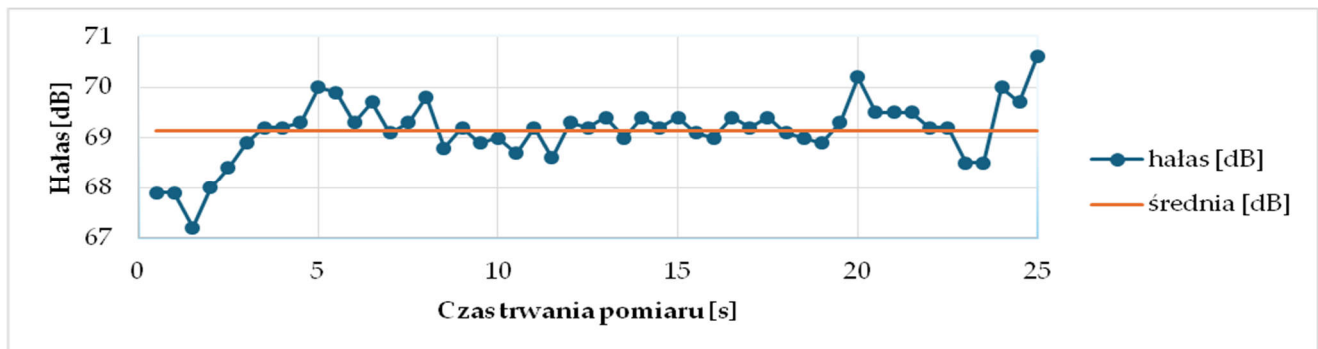
Rysunek 5. Wykres zmian poziomu natężenia dźwięku w czasie: na zewnątrz komory, z odciągiem

Warunki pomiaru hałasu w dalszej części badań były stabilne. Odnotowano brak podwyższonych wartości na rysunku 5, które pojawiały się w przypadku pracy bez odciągu spalin (rysunek 4). Wartości maksymalne i minimalne wyniosły odpowiednio 49,5 dB- 55,1dB. Odciąg spalin najprawdopodobniej zagłuszył ewentualne dźwięki wywołane przez pracę wentylatora chłodzącego głowicę. Zestawiając wykresy przedstawione na rysunku 4 i 5, można zauważyć, iż hałas generowany przez wentylator był średnio wyższy o około 15 dB od hałasu generowanego podczas samej pracy grawerki.



Rysunek 6. Wykres zmian poziomu natężenia dźwięku w czasie: wewnątrz komory, bez odciągu

Wartości hałasu przedstawione na rysunku 6 utrzymywały się w przedziale 47 do 65 dB. Nie ma zauważalnych skoków wartości, szczególnie takich, jakie można było zaobserwować z perspektywy operatora obsługującego grawerkę laserową. Spowodowane jest to hałasem generowanym przez inny wentylator podzespołu działający jednostajnie. Średni poziom hałasu utrzymuje się w okolicy wartości 58 dB, jest to o 20 dB więcej niż wynosiła średnia hałasu poza komorą, z wyłączonym odciągami spalin.

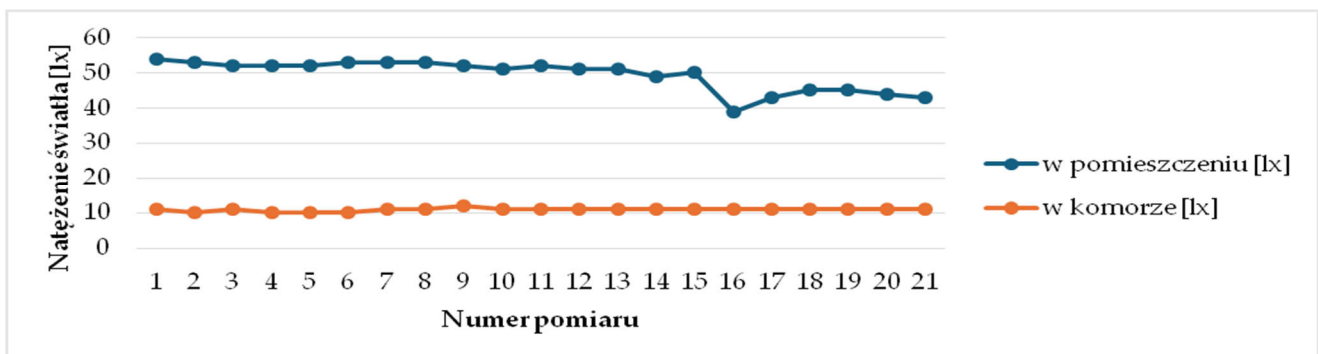


Rysunek 7. Wykres zmian poziomu natężenia dźwięku w czasie: wewnątrz komory, z odciąganiem

Średni poziom hałasu na rysunku 7 wyniósł około 69 dB, jest to o ponad 30 dB więcej od pomiaru spoza komory i z wyłączonym odciąganiem spalin. Przyrównując jednak pomiar to hałasu spoza komory z włączonym odciąganiem spalin można dostrzec wzrost wartości o 15 dB.

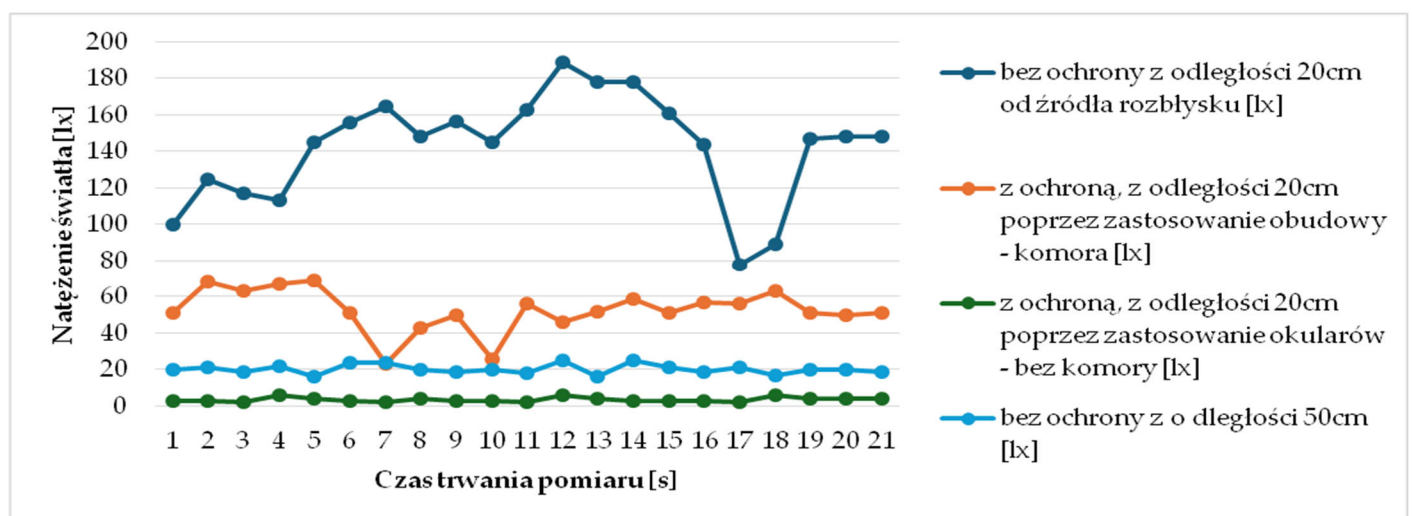
7.2. Pomiar natężenia światła

Pomiar natężenia światła wykonano w serii 21 pomiarów za pomocą luksomierza wewnątrz i na zewnątrz komory. W przypadku pracy lasera sondę skierowano w kierunku wiązki.



Rysunek 8. Pomiar oświetlenia z wyłączonym laserem

W pomieszczeniu natężenie światła utrzymywało się na poziomie wynoszącym pomiędzy 40 a 55 luksów. Natomiast, gdy sonda luksomierza została umieszczona w środku komory, pomiar wyniósł 10 luksów. Różnica wykazana na rysunku 8 wynosi więc około 30 luksów.



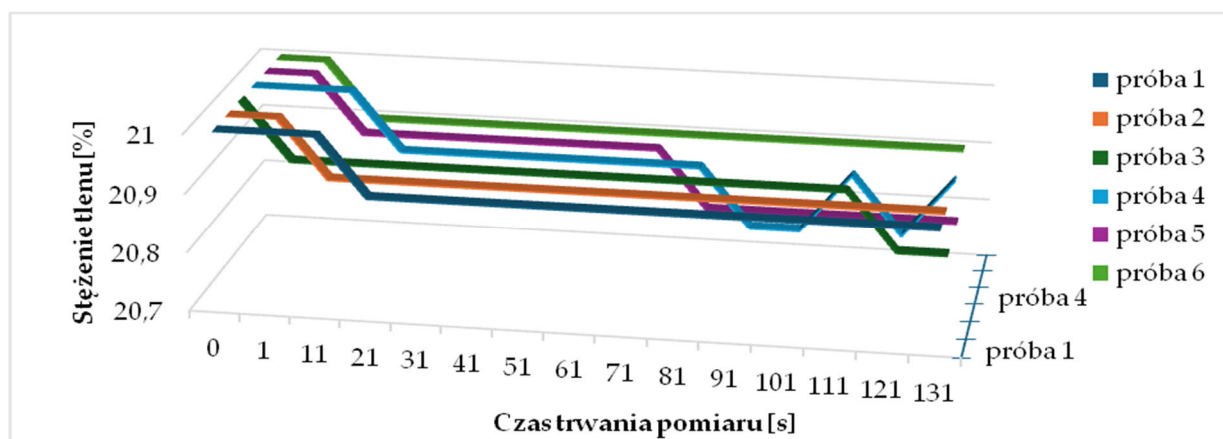
Rysunek 9. Pomiar oświetlenia z włączonym laserem

Rozbłysk światła w komorze podczas pracy lasera przekroczył wartość 180 luksów. Następnie sonda została umieszczona za obudową. Wartość natężenia uległa zmianie obniżając swoją wartość nawet poniżej 40 luksów, czyli

o około 140 luksów. Na rysunku 9 można też zauważyć, że zachowanie większej odległości od grawerki zmniejsza efekt rozświetlenia.

7.3. Pomiary jakości powietrza (stężenie tlenu)

Pomiary jakości powietrza wykonano na drodze umieszczenia czujnika Ventis MX4 wewnątrz komory podczas pracy lasera. Czas pomiaru dla każdej z 6 prób wynosił 131 sekund. Próby 1 – 5 zakładają ograniczanie efektywności odciągu spalin w sposób dekrementalny o 25% na próbę. Natomiast próba 6 zakłada wykonanie pomiarów bez wykorzystania komory zabezpieczającej. Poniżej przedstawiono wyniki pomiaru stężenia tlenu w powietrzu (rysunek 10).



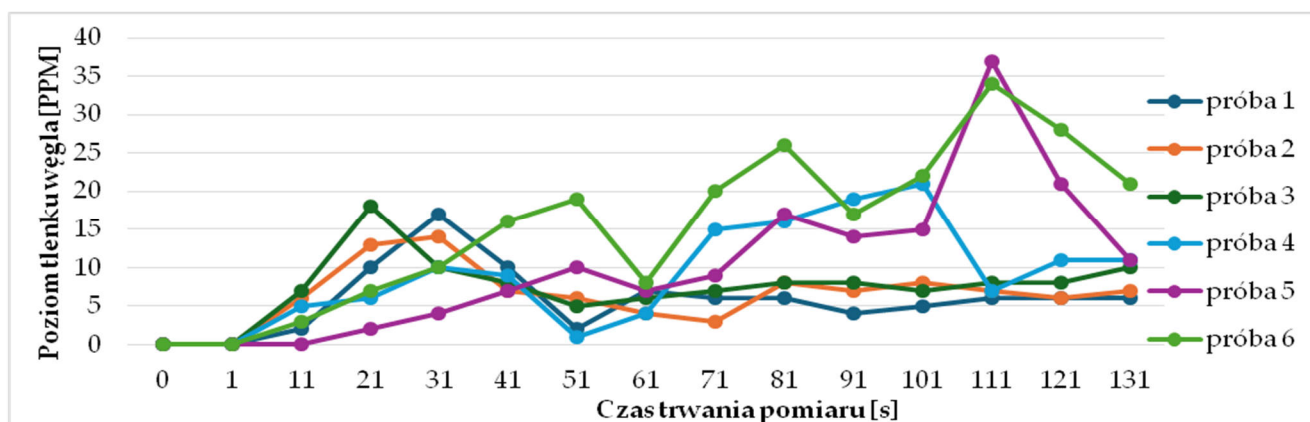
Rysunek 10. Stężenie tlenu w powietrzu

Pomiary stężenia tlenu podzielono na 6 prób:

- Próba 1, 2, 6: Do około 20 sekund trwania próby na rysunku 10 obserwujemy szybki spadek stężenia tlenu z około 21% do około 20,95%, po czym następuje stabilizacja na poziomie 20,9%, która utrzymuje się do końca próby. W tych próbach system odciągu spalin i obudowa skutecznie odciągają produkty pracy lasera i utrzymują zawartość tlenu w komorze, stabilizując poziom tlenu na poziomie 20,9%.
- W próbach: 3, 4, 5 stężenie tlenu spada poniżej 20,9%. W Próbie 4, występują oscylacje pomiędzy 20,9% a 20,8%. W próbie 5 stężenie tlenu stabilizuje się na 20,8%, sytuacja ta ma miejsce około 70 sekundy pomiaru. W tych próbach ograniczono wydajność odciągu spalin - w próbie 3 o 50%, w próbie 4 o 75% i w próbie 5 o 100%.

7.4. Pomiary jakości powietrza

Na rysunku 11 przedstawiono pomiary ilości tlenku węgla wyrażone w PPM.



Rysunek 11. Ilość tlenku węgla zarejestrowana przez miernik

Pomiary jakości powietrza, podobnie jak w przypadku stężenia tlenu, podzielono na 6 prób:

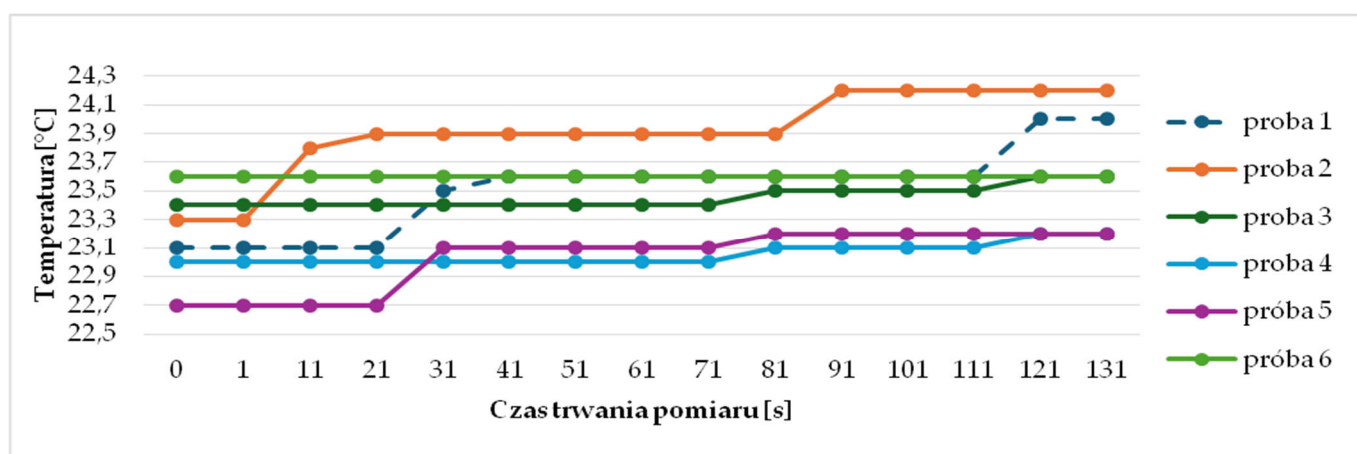
- Próba 1 (odciąg spalin 100%): Stężenie tlenku węgla rośnie powoli na początku, osiągając szczyt około 17 PPM w 31 sekundzie. Potem wartość spada i nie przekracza wartości 6 PPM.

- Próba 2 (odciąg spalin 75%): Mniejsze wahania i niższe maksymalne stężenie tlenu węgla w porównaniu do Próby 1. Wartość początkowo wzrasta, osiągając szczyt 14 PPM, a następnie lekko spada i utrzymuje się na niższym poziomie nieprzekraczającym 8 PPM przez resztę próby.
- Próba 3 (odciąg spalin 50%): Początkowe wzrosty są wyraźne, a maksymalne stężenie osiąga około 18 PPM. Po początkowym pikie następuje gwałtowny spadek, po którym stężenie pozostaje na niższym poziomie nieprzekraczającym 10 PPM.
- Próba 4 (odciąg spalin 25%): Brakuje wyraźnego pików wartości PPM na początku tak jak jest to w poprzednich próbach. Próba 4 charakteryzuje się średnimi wartościami PPM przez większość czasu, z kilkoma wzrostami, które dochodzą do 21 PPM. Widać pewną regularność w spadkach i wzrostach stężenia. Mniejsze odciagi mogą powodować większe gromadzenie się stężenia tlenu węgla.
- Próba 5 (odciąg spalin 0%, z komorą): Duże wahania są widoczne przez cały czas trwania eksperymentu, z dwoma wyraźnymi szczytami (jeden w środku o wartości 17 PPM, drugi pod koniec o wartości 37 PPM). Brak odciagu spalin przyspiesza kumulowanie się tlenu węgla w komorze.
- Próba 6 (odciąg spalin 0%, bez komory): Próba ma nieregularny przebieg, z dużymi szczytami stężenia tlenu węgla. Wartość rośnie gwałtownie, a następnie spada. Pierwszy szczyt osiąga w 51 sekundzie i wynosi on 19 PPM, następnie widoczny jest gwałtowny spadek. Następny nagły wzrost odnotowano w 81 sekundzie i wyniósł on 26 PPM, następuje nagły spadek. Kolejne zwiększenie, tym razem największe - 37 PPM wystąpiło w 111 sekundzie. To wskazuje, że brak komory wraz z brakiem odciagu spalin może powodować bardziej nieprzewidywalne zachowanie się gazów – powietrze w żaden sposób nie jest ukierunkowane.

Próby 1, 2, 3 i 4, w których działają różne poziomy odciagu spalin, pokazują wyraźnie niższe stężenia tlenu węgla w porównaniu do próby 5 i 6, gdzie odciąg spalin jest wyłączony. Próba 4 wskazuje że już znaczne zmniejszenie wentylacji komory powoduje nagłe skoki wartości tlenu węgla. Próba 1, z odciążeniem na poziomie 100%, ma najniższe stężenia tlenu węgla. Próba 5 (odciąg 0% z komorą) pokazuje najwyższe skoki stężenia tlenu węgla, co wynika z tego, że spaliny kumulują się w zamkniętej przestrzeni. Próba 6 (odciąg 0%, bez komory) pokazuje duże wahania stężenia, jednak brak komory pozwala na rozpraszanie się tlenu węgla, co tłumaczy gwałtowne spadki.

7.5. Pomiary temperatur

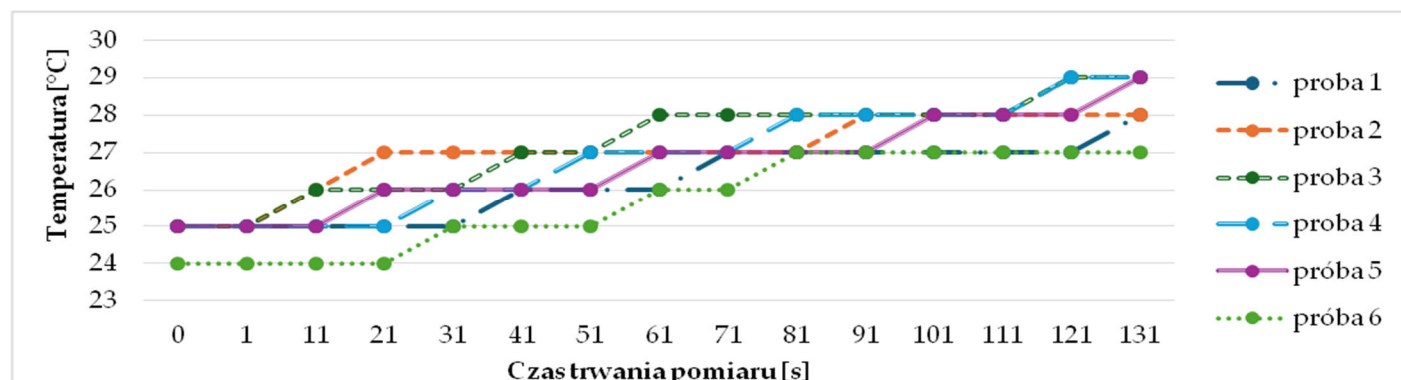
Pomiary temperatur powietrza wewnątrz komory wykonano na drodze zbierania odczytów z termometru wewnątrz komory w równych odstępach wynoszących dziesięć sekund. Wyjątek stanowią pierwsze dwa pomiary, które zebrano w zerowej i pierwszej sekundzie pomiaru. W tych pomiarach stopniowo redukowano efektywność odciagu spalin i w ostatniej próbie usunięto komorę ochronną.



Rysunek 12. Temperatura wewnątrz komory podczas pracy grawerki

Temperatura dla wszystkich sześciu testów wykazuje stopniowy wzrost w czasie, ale tempo wzrostu różni się w zależności warunków prowadzenia próby badawczej. Jak widać na rysunku 12, początkowe temperatury dla wszystkich prób mieszczą się w zakresie od 22,5°C do 23,7°C. Maksymalna temperatura osiągnięta we wszystkich testach wynosi 24,2°C. Próba 2 wykazuje najwyższy początkowy wzrost temperatury, z zauważalnym wzrostem na wczesnych etapach. Stabilizuje się na poziomie 24,2°C. Próba 1 i Próba 6 zaczynają się w niższych temperaturach

i wykazują wolniejsze tempo wzrostu. Przebieg zmian temperatury w próbie badawczej 4 odpowiada sytuacji dla próby 3, przy czym obserwuje się wyraźniejszy wzrost w późniejszych etapach testu.



Rysunek 13. Temperatura przy głowicy lasera podczas pracy grawerki

Temperatura w pobliżu głowicy na początku jest zauważalnie niższa od temperatury obudowy, ale rośnie szybciej. Wszystkie testy widoczne na rysunku 13 wykazują wzrost temperatury od około 24°C - 25°C do około 27°C - 29°C. Zakres temperatur jest zdecydowanie wyższy niż w przypadku temperatury wewnątrz obudowy. Biorąc pod uwagę o wiele wyższą zmienność temperatury przy laserze. Zmienność temperatury jest zatem ściśle powiązana z pracą głowicy lasera.

8. Wnioski

- Podczas przeprowadzania badań poziomu hałasu, jego poziom został w niektórych przypadkach sztucznie zawyżony przez wzmożone działanie wentylatora. Pozostałe wyniki są miarodajne, oznacza to iż nie zostały zniekształcone przez czynniki zewnętrzne.
- Wraz z inkrementalnym postępem włączania odciągu spalin, jego praca widocznie wpływała na odczyty decybelomierza. Hałas generowany przez odciąg zwiększał ogólny poziom hałasu o około 15 dB, w porównaniu do odczytów, gdy odciąg był wyłączony.
- Różnica średnich poziomów odnotowanego hałasu w komorze i poza nią wynosi około 20 dB. Różnica ta pojawia się w przypadku, gdy nie został włączony odciąg spalin. Podczas pracy odciągu, różnica średnich wartości zmierzonych w komorze i poza nią wynosi około 16 dB. Oznacza to, iż obudowa skutecznie tłumi dźwięki generowane przez pracę lasera i odciągu.
- Nawet, jeżeli nie ma między operatorem a laserem fizycznej bariery w postaci pleksi – skuteczność rozpraszania się światła jest wystarczająca, żeby do fotoogniwa sondy dotarło około 20 luksów. Najskuteczniejsze jednak okazały się okulary zaproponowane przez producenta plotera. Okulary mające na celu chronić wzrok ograniczyły natężenie światła nawet do 3 luksów.
- Poziomy tlenku węgla są ściśle powiązane z poziomem wentylacji obecnej podczas pracy lasera. Badania wykazały, że dekrementalne obniżanie efektywności odciągu spalin powoduje inkrementalne zwiększanie się poziomu wartości tlenku węgla. Całkowite wyłączenie odciągu spowodowało, że spaliny nie mogły wydostać się z komory i jakość powietrza była w tym wypadku najgorsza. Pozbycie się komory wykazuje duże wahania stężenia. Jest to spowodowane faktem, że tlenek węgla rozchodzi się po pomieszczeniu laboratoryjnym, a wraz z nim szkodliwe związki lotne powstałe podczas grawerowania.
- Należy dodać, że odciąg skutecznie odsysa produkty pracy lasera (części gazowe) i utrzymuje zawartość tlenu w komorze, stabilizując poziom tlenu w badaniu na poziomie 20,9%.
- Warto zaznaczyć, że odciąg spalin funkcjonuje także jako filtr, ogranicza on więc ilość szkodliwych związków, które mogą dostać się do dróg oddechowych operatora.

9. Podsumowanie

Artykuł przedstawił zarys problematyki zabezpieczania urządzeń wykorzystujących wiązkę lasera w realizacji procesów wytwarzania. W ramach pracy wykonano własną konstrukcję nośną, która została następnie zabudowana za pomocą pleksi. Takie rozwiązanie miało na celu zabezpieczenie operatora przed czynnikami fizycznymi oraz ułatwienie wykonania pomiarów parametrów, niezbędnych do przeprowadzenia analizy efektywności przyjętego rozwiązania. Przedstawiono wyniki, uzyskane na drodze wykonywania pomiarów w zmiennych konfiguracjach grawerki laserowej. Uzyskane wyniki pozwoliły na przedstawienie niosków odnośnie pracy grawerki i ocenę efektywności komory ją zabezpieczającej.

Bibliografia

1. Petru A., Lungulesasa A.: Wood Processing by Laser Tools. International Conference of Scientific Paper Afases, Brasov, 22-24 May 2014.
2. A. A. Gugin, S. N. L'vov, P. I. Mal'ko, V. F. Nemchenko, I. P. Starodubov. Electrical and thermal conductivities of rhenium, osmium, and iridium and some of their alloys with thorium and lanthanum in a wide temperature range. *Soviet Powder Metallurgy and Metal Ceramics* 1972, 11, 51-55.
3. Aniszewska M., Maciak A., Zychowicz W., Zowczak W., Mühlke T., Christoph B., Lamrini S., Sujecki S.: Infrared Laser Application to Wood Cutting.
4. Aurel Lungulesa. Wood physics and mechanics. Transilvania University Press, Brasov.
5. I. Swaczyna, P. Beer. Badanie Sklejalności Drewna Ciętego Laserem. Instytut Maszyn Przepływowych PAN: Gdańsk, Poland, 1994; pp. 273–281.
6. I. Swaczyna, P. Beer. Charakterystyka powierzchni drewna ciętego laserem CO₂ o pracy ciągłej i przerywanej. *Przemysł Drzewny* 1995, 46, 9–13.
7. Laser a bezpieczeństwo, <https://lasery.pl/laser-a-bezpieczenstwo>, 20.10.2024.
8. https://www-iecee-org.translate.google/certification/iec-standards/iec-60825-12007?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=pl&_x_tr_hl=pl&_x_tr_pto=rq
9. Łukasik Z., Kuśmińska A., Żurek M., Bezpieczeństwo Podczas Pracy z Laserami i Urządzeniami Laserowymi.
10. D. Fengel, G. Wegener. Wood: Chemistry, Ultrastructure, Reactions. Walter de Gruyter: Berlin, Germany 2011
11. Dyrektywa Maszynowa 2006/42/WE <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/?uri=celex%3A32006L0042>
12. Musialik A., Ciołek J., Porównanie Emisji Lotnych Związków organicznych podczas spalania drewna
13. American woodworker, Tool Talk - Epilog CNC Lasers. Available: <http://www.americanwoodworker.com/blogs/tools/archive/2010/07/13/tool-talk-epilog-cnc-lasers.aspx> (March, 2014)
14. Neje 3 Max V2, <https://neje.shop/products/neje-3-max-a40640>, 10.10.2024
15. Antonin Durna, Jiri Fries, Leopold Hrabovsky, Ales Silva, Jozef Zarnovsky. Research and development of laser Engraving and Material Cutting Machine from 3D Printer, *Scienco: Management Systems in Production Engineering*, 2020, Volume 28, issue 1, pp. 47-52.
16. Instrukcja obsługi urządzenia Sonopan L20A
17. Instrukcja obsługi urządzenia Ventis MX4
18. <https://www.tme.eu/en/details/utt10k/probes-accessories-of-temperatures/uni-t/>, 15.10.2024
19. <https://www.instrukcjaobslugipdf.pl/auriol/hg05685/instrukcja>, 15.10.2024