

Streszczenie

Problematyka podjęta w pracy dotyczy szacowania niepewności wyników pomiaru promieniowania nadfioletowego źródeł technologicznych na potrzeby oceny zagrożeń fotobiologicznych dla zdrowia pracowników. W rozprawie przyjęto do badań i analizy łuk spawalniczy jako reprezentatywne źródło technologiczne emitujące wysokie poziomy promieniowania nadfioletowego. Promieniowanie łuku spawalniczego cechuje się dużą zmiennością na co wpływ mają takie zjawiska jak rozbłysk w fazie zajarzenia łuku, zadymienie oraz pulsacja promieniowania łuku obserwowana w trakcie procesu spawania. Powoduje to, że rozkład wyników serii pomiarów promieniowania łuku cechuje się często asymetrią i odbiega od rozkładu normalnego. W związku z tym przyjęta metoda propagacji niepewności składowych powinna pozwalać na efektywne szacowanie niepewności złożonych dla różnych rozkładów prawdopodobieństwa źródeł błędów, w tym także rozkładów asymetrycznych, oraz uwzględniać zachodzące między nimi korelacje. W związku z ograniczeniami metody analitycznej GUM dla rozkładów asymetrycznych, przyjęto do wyznaczania niepewności złożonej metodę Monte Carlo nie posiadającą tych ograniczeń. Ze względu na złożony charakter błędów losowych występujących podczas spawania łukowego (zajarzenie, pulsacja, dymy), których rozkład prawdopodobieństwa jest trudny do ustalenia, metodę Monte Carlo zmodyfikowano poprzez zastosowanie metody Bootstrap do symulowania rozkładu zjawisk losowych na podstawie rozkładu wyników serii pomiarów. Głównym celem naukowym pracy było opracowanie algorytmu i narzędzia do szacowania niepewności pomiaru i analizy źródeł błędów pomiaru spektrometrycznego promieniowania łuku spawalniczego.

Dysertacja zawiera przegląd dostępnych metod szacowania niepewności złożonej wyników pomiaru spektrometrycznych promieniowania łuku oraz analizę źródeł błędów wpływających na wynik widmowego skutecznego aktywnie natężenia napromienienia nadfioletem na stanowiskach pracy. Wprowadzony został podział źródeł błędów na kategorie.

Na podstawie wyników badań w laboratorium oraz na stanowiskach spawania łukowego zostały przyjęte rozkłady prawdopodobieństwa wystąpienia dla poszczególnych źródeł błędów. Zidentyfikowano jedenaście źródeł błędów, które zostały przydzielone do czterech kategorii błędów: środowiskowych, instrumentalnych, metody i obserwacji. Na podstawie tej analizy opracowany został trzystopniowy model matematyczny pomiaru (równanie rozszerzone) skutecznego aktywnie widmowego natężenia napromienienia nadfioletem. Podział modelu na trzy stopnie pozwolił w przejrzysty sposób uwzględnić korelacje między źródłami błędów. Na bazie równania rozszerzonego opracowane zostały modele matematyczne szacowania niepewności metodą analityczną GUM, metodą Monte Carlo oraz metodą Monte Carlo + Bootstrap wyznaczania niepewności złożonej wyników pomiaru.

W celu pomiaru fazy zajarzenia i pulsacji promieniowania łuku opracowana została metoda wykorzystująca spektrometr oraz szybki radiometr wraz z oprogramowaniem narzędziowym pozwalającym na analizę wyników pomiarów radiometrycznych.

Opracowano aplikację implementującą modele Monte Carlo oraz Monte Carlo + Bootstrap do wyznaczania niepewności rozszerzonej wyniku pomiaru skutecznego aktywnie widmowego natężenia napromienienia promieniowaniem nadfioletowym. Aplikacja wskazuje źródła błędów determinujące niepewność wyniku pomiaru, co umożliwia szybką weryfikację oceny zagrożenia fotobiologicznego i pozwala na ewentualne powtórzenie pomiarów. Poprawne działanie algorytmu aplikacji zostało potwierdzone za pomocą opracowanej w tym celu metody walidacji.

Dla serii pomiarów charakteryzujących się dużym rozrzutem i asymetrią rozkładu wyników błędy losowe stają się dominującym czynnikiem determinującym niepewność złożoną wyniku pomiaru. Niepewność wyniku skutecznego aktywnie natężenia napromienienia serii pomiarów o stosunkowo niewielkim rozrzucie i rozkładzie normalnym jest determinowana przez niepewność wyznaczenia odległości do łuku spawalniczego oraz niepewność wzorcowania spektrometrii.

Obowiązujące przepisy nakładają wymóg zapewnienia niepewności rozszerzonej pomiaru parametrów promieniowania UV, która nie może przekraczać 30 \% (przy $k=2$). Opracowana aplikacja umożliwia poprawne szacowanie niepewności zwłaszcza dla rozkładów asymetrycznych, co pozwala uniknąć jej przeszacowania.

Abstract

The dissertation concerns estimation of measurements uncertainty of ultraviolet radiation emitted by technological sources for the purposes of photobiological risk assessment for the health of employees. Welding arc was selected for research and analysis as a representative example of technological source emitting strong ultraviolet radiation. Arc welding is a technological process where the level of ultraviolet exposure reaches one of the highest values. Welding arc radiation can be characterized by high variability, which is affected by phenomena such as radiation peak in the arc ignition phase, smoke and pulsation of arc radiation observed during the welding process. This causes the distribution of the results of the arc radiation measurement series to be often characterised by asymmetry and to deviate from normal distribution. Therefore, the method adopted for propagating the uncertainty of the components should allow for an efficient estimation of the compound uncertainty for different probability distributions of the error sources, including asymmetric distributions, and take into account the correlations between them. Due to the limitations of the GUM analytical method for asymmetric distributions, the Monte Carlo method, that does not have these limitations, was adopted to determine the combined uncertainty. Taking into account the complex nature of random errors occurring during arc welding (ignition, pulsation, fumes), the probability distribution of which is difficult to determine, the Monte Carlo method was modified by using the Bootstrap method to simulate the distribution of random phenomena based on the distribution of the results of a series of measurements. The main scientific objective of the work was to develop an algorithm and a software tool for estimating measurement uncertainty and analyzing sources of errors in spectroradiometric measurement of welding arc radiation.

The dissertation provides a review of the available methods for estimating combined uncertainty of the spectroradiometric arc radiation measurement results and an analysis of sources of errors influencing the result of the actinic ultraviolet spectral irradiance at workplaces. A categorisation of error sources has also been introduced..

On the basis of the measurements in the laboratory and at the arc welding workplaces, probability distributions for individual sources of errors were adopted. Eleven sources of error were identified and assigned to four error categories: environmental, instrumental, method and observation. Based on this analysis, a three-stage mathematical model (extended equation) of measurement of the actinic spectral irradiance was developed. The division of the model into three stages allowed the correlations between the sources of errors to be clearly taken into account. On the basis of the extended equation, mathematical models were developed for estimating the uncertainty using the GUM analytical method, the Monte Carlo method and the Monte Carlo + Bootstrap method for determining the combined uncertainty of the measurement results.

In order to measure the phase of ignition and pulsation of the arc radiation, a method was developed that uses a spectroradiometer and a fast radiometer together with the software tool that allows for the analysis of the results of radiometric measurements.

An application implementing Monte Carlo and Monte Carlo + Bootstrap models was developed to determine the expanded uncertainty of the measurement result of the actinic spectral irradiance of ultraviolet radiation. The application indicates sources of errors determining the uncertainty of the measurement result, which enables quick verification of the photobiological risk assessment and allows for the possible repetition of measurements. The correct operation of the application algorithm was confirmed using a validation method developed for this purpose.

For a series of actinic irradiance measurement results characterized by a large dispersion and asymmetry of the distribution, random errors become the dominant factor determining the

combined uncertainty of the measurement result. The uncertainty of series of measurements with a relatively small scatter and normal distribution is determined by the distance to the welding arc and the uncertainty of spectroradiometer calibration.

The applicable regulations impose the requirement to ensure the expanded uncertainty of the measurement of UV radiation parameters, which may not exceed 30 \% (at $k=2$). The developed application enables the correct estimation of uncertainty, especially for asymmetric distributions, thus avoiding its overestimation.