

dr inż. MARIUSZ DĄBROWSKI (ORCID: 0000-0002-0197-2544)

Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy

Kontakt: madab@ciop.pl

DOI: 10.5604/01.3001.0013.1577

Bezpieczeństwo pracy i ergonomia podczas łączenia elementów statków powietrznych

W artykule przedstawiono specyficzne problemy bezpieczeństwa pracy i ergonomii występujące w procesach łączenia struktur statków powietrznych. Wielu pracowników w przemyśle lotniczym w Polsce uczestniczy w procesach łączenia materiałów za pomocą nitowania, klejenia lub zgrzewania. Opisano typowe wypadki przy tych pracach i omówiono charakterystyczne zagrożenia i uciążliwości występujące przy wykorzystaniu różnych technologii łączenia stosowanych w przemyśle lotniczym. Podano także przykłady wyposażenia pracy oraz działań prewencyjnych służących poprawie komfortu pracy podejmowanych w istniejących uwarunkowaniach prawnych i techniczno-organizacyjnych.

Słowa kluczowe: przemysł lotniczy, łączenie materiałów, bezpieczeństwo pracy, ergonomia, zagrożenia

Occupational safety and ergonomics in aircraft assembly

The article presents particular problems of occupational safety and ergonomics in aircraft assembly. Many employees in the aircraft industry in Poland participate in processes of joining materials by riveting, gluing or welding. The article describes typical accidents that may happen during such works and discusses distinctive risks and strenuousness present during application of different technologies of aircraft assembly. The article also provides examples of work equipment and prevention measures for improvement of safety and comfort at work undertaken in the existing legal and technical-organizational conditions.

Keywords: aircraft industry, joining materials, occupational safety, ergonomics, hazards



Fot. presmaster/Bigstockphoto

i klejonych. Nie uwzględniają one jednak problemów bhp podczas łączenia elementów z wykorzystaniem tych technologii. Nie istnieją również szczegółowe normy techniczne odnośnie do procesów zgrzewania realizowanych w przemyśle lotniczym.

W praktyce produkcyjnej przedsiębiorstwa lotnicze stosują zwykle opracowane na własne potrzeby instrukcje technologiczne, instrukcje obsługi maszyn oraz sprzętu roboczego. Dokumenty te zawierają wymagania dotyczące m.in. występujących podczas pracy zagrożeń oraz niezbędnego wyposażenia pracowników w środki ochrony indywidualnej, sprawdzania stosowanych narzędzi, maszyn i urządzeń oraz instalacji przemysłowych, organizacji pracy, obowiązkowych czynności przed zakończeniem i po zakończeniu pracy, itp. Mogą więc stanowić pewną podstawę do działań prewencyjnych podczas prac, których dotyczą. Analiza szczegółowych treści tych opracowań wskazuje jednak, że:

- pracownika (np. działu montażu końcowego konstrukcji lotniczych) dotyczy zazwyczaj co najmniej kilka takich instrukcji, np. instrukcje użytkowania wiertarek, nitownic oraz szlifierek, instrukcja użytkowania podestów roboczych czy instrukcja postępowania podczas ręcznych prac transportowych

- instrukcje często nie obejmują szczegółowych sposobów wykonywania tych prac (jednoosobowo lub zespołowo). Nie podają też podziału zadań w zespole, sposobów komunikowania się i współdziałania podczas zespołowego wykonywania

czynności roboczych. Nie uwzględniają warunków wykonywania prac montażowych, takich jak praca na wysokości z poziomu podestu, praca w ciasnych wnętrzach oraz przy utrudnionym dostępie narzędzi (wiertarek, młotków czy podtrzymek) w celu wykonania operacji.

Uwzględnienie tych wszystkich uwarunkowań jest niezmiernie istotne. Takie podejście powinno zaowocować poprawą jakości pracy i zmniejszeniem liczby popełnianych błędów.

Analiza wypadków w przemyśle lotniczym

Z elektronicznej bazy danych o wypadkach GUS z lat 2005-2014 wynika, że do największej liczby wypadków w przemyśle lotniczym dochodzi podczas przemieszczania się pracowników w poziomie i pionie, a także używania narzędzi (zarówno zmechanizowanych, jak i niezmechanizowanych), [12]. Pozostałe czynności, przy których często dochodzi do wypadków, to wszelkiego rodzaju manipulowanie przedmiotami oraz transportowanie.

Udział procentowy czynników urazu przedstawiono na rys. 1.

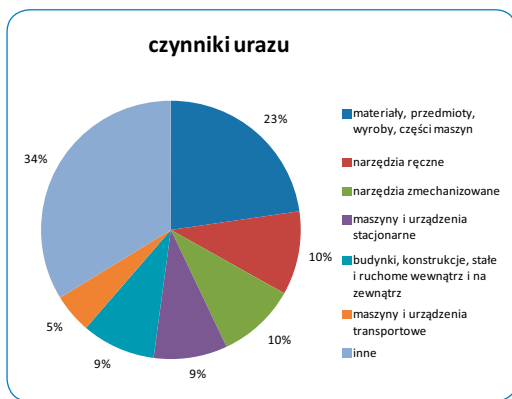
Dokonana przez autora dokładna analiza opisów wypadków, do których doszło w trakcie ostatnich 5 lat w jednym z dużych przedsiębiorstw lotniczych wskazuje, że największy udział liczbowy (ponad 40%) mają wypadki zaistniałe podczas wiercenia, rozwiercania i nawiercania otworów pod połączenia nitowe przy zastosowaniu pneumatycznych wiertarek pistoletowych

wych i kątowych. Na kolejnych miejscach znajdują się wypadki podczas operacji laminowania i klejenia (blisko 30%) oraz nitowania przy użyciu ręcznych pras oraz młotków pneumatycznych (ok. 18%), a także operacji montażowych i pomocniczych (ok. 14%).

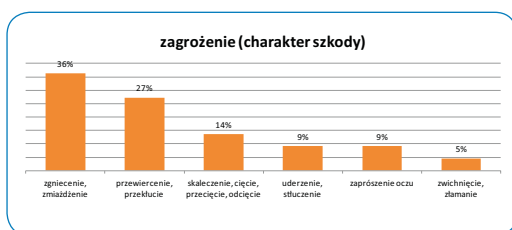
Do wszystkich opisanych wypadków doszło wskutek działania zagrożeń mechanicznych (rys. 2.), z których ponad 1/3 przypada na zgniecenia i zmiżdżenia, a ponad 1/4 na przewiercenia i przekłucia. O ile w tym drugim przypadku jest to dość oczywiste i zrozumiałe (biorąc pod uwagę znaczną liczbę wypadków zachodzących podczas operacji wiercenia), o tyle dominująca pozycja zgniecenia i zmiżdżenia jest dosyć zaskakująca. Na trzecim miejscu z blisko dwukrotnie mniejszym udziałem są wypadki, w wyniku których doszło do skaleczeń, przecięć i odcięć. W mniej niż 10. wypadku dochodziło do uderzeń i stłuczeń oraz zaprószenia oczu. Zanotowano również upadek z wysokości, skutkujący urazem stawu skokowego.

Warto również przyjrzeć się bliżej czynnościom wykonywanym przez poszkodowanych w chwili wypadku (rys. 3.). Przybliża to najbardziej typowe okoliczności zajścia zdarzeń wypadkowych podczas wykonywania operacji technologicznych łączenia elementów w przemyśle lotniczym.

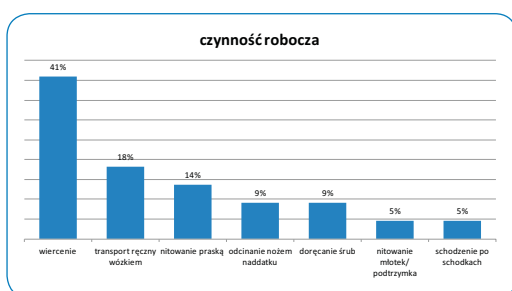
Najczęstszymi czynnościami są: wiercenie (41%) i transportowanie przy użyciu ręcznych wózków transportowych (18%). Pozostałe, typowe czynności, wykonywane podczas wystąpienia wypadków, to: nitowanie ręczną praską pneumatyczną,



Rys. 1. Czynniki urazu w procesach łączenia elementów statków powietrznych – udział procentowy. Oprac. własne na podstawie [12]
 Fig. 1. Injury factors in aircraft assembly – percentage. This author's results based on [12]



Rys. 2. Dominujące zagrożenia określone przez charakter szkody doznanej wskutek wypadku – udział procentowy
 Fig. 2. Dominant hazards described by potential consequences of an accident – percentage share



Rys. 3. Czynności robocze, podczas których doszło do wypadku – udział procentowy
 Fig. 3. Work activities during which there was an accident – percentage share

odcinanie nożem naddatków (np. uszczelniacza), dokręcanie śrub, a także nitowanie z zastosowaniem młotka pneumatycznego i podtrzymki oraz schożenie po schodkach.

Na podstawie opisów wypadków można zauważyć również, że do niektórych wypadków przyczyniły się znacząco:

- trudności w komunikowaniu się lub współdziałaniu zespołowym, zazwyczaj dwuosobowym, a także
- nierówności podłoża lub kable leżące na drogach przejazdu ręcznych wózków transportowych.

Zagrożenia dla zdrowia i bezpieczeństwa pracowników w procesach łączenia elementów w wytwórniach lotniczych

Wytwarzanie elementów statków powietrznych przez spajanie wielowarstwowe

W technologii tej wytwarzane są głównie elementy poszycia i kadłuba statków powietrznych, wykonane ze spojonych ze sobą kilku (czasem nawet

kilkudziesięciu) cienkich warstw różnych materiałów: folii metalowych, włókien szklanych, aramidowych, węglowych itp. Arkusze przycinane są mechanicznie, „na wymiar” i precyzyjnie układane w warstwy. Po nałożeniu następuje odsysanie powietrza spomiędzy warstw przy jednoczesnym docisku pneumatycznym. Proces polimeryzacji, w celu trwałego spojenia warstw pod wpływem temperatury oraz ciśnienia i podciśnienia, wykonywany jest w autoklawach¹.

Polimeryzowane elementy kadłuba wyciągane są z autoklawu przy pomocy suwnicy lub wózka jezdniowego, a następnie poddaje się je obróbce mechanicznej na frezarce CNC oraz kontroli wymiarowej przy użyciu defektoskopu. Gotowe elementy, spełniające wymagania jakościowe, są transportowane z wykorzystaniem suwnic, wózków ręcznych lub akumulatorowych na linie łączenia elementów statków powietrznych.

Pracownicy realizujący te operacje muszą stosować rękawice chroniące przed kontaktem z ostrymi i gorącymi elementami spajanych elementów.

Operacje wiercenia i nitowania na linii łączenia elementów statków powietrznych

Łączone ze sobą elementy kadłuba są unieruchamiane przez zamocowanie w uchwytych, a następnie wiercone są w nich ręcznie (czasem z wykorzystaniem szablonów) otwory pod nity o różnych średnicach (od 2,5 mm do ponad 4 mm). Następnie rozwierca się je i nawierca pod główne nitów, po czym łączone elementy są pozycjonowane za pomocą wkładanych w otwory trzpieni w różnych kolorach, odpowiadających różnym średnicom i rodzajom nitów. Podczas nitowania kolejne trzpienie pozycjonujące są wyjmowane i zastępowane nitami.

Zazwyczaj w konstrukcjach lotniczych, ze względu na dużą wytrzymałość połączeń, stosowane są nity zakuwane. Czasami, gdy istnieje możliwość dostępu, pracownicy używają w tym celu ręcznych lub stacjonarnych pras pneumatycznych, ale najczęściej stosuje się nitowanie udarowe. Wykonuje je dwóch pracowników, z których jeden podstawi podtrzymkę, a drugi rozkuwa nit przy pomocy młotka pneumatycznego (fot. 1).

Dość rzadko, do mało wymagających połączeń, stosowane są nity zrywane. Prace te wykonywane są jednoosobowo – nie wymagają dostępu obustronnego. Podobnie wykonywane są połączenia śrubo-nitami (kołkami HL), przy czym mechanizm ich spęczenia polega na zakręcaniu nakrętki na śrubie i wciąganiu jej w środku tulejki nitu. Śruba urywa się po całkowitym uformowaniu łba nitu.

Operacjom wiercenia i nitowania towarzyszą hałas i drgania (zwłaszcza w trakcie nitowania udarowego, kiedy przybierają charakter impulsowy). Do ochrony pracowników przed drganiami stosowane są taśmy antywibracyjne do podtrzymek oraz cięższe od stalowych podtrzymki wolframowe (fot. 2.). Gdy to możliwe, stosuje się obrótowe przyrządy montażowe, dzięki czemu można uzyskać lepszy dostęp do montowanych elementów, a pracownikom zapewnić wygodniejsze wykonywanie tych prac.

Zdarzeniami niebezpiecznymi podczas wiercenia otworów są najczęściej złamanie wiertła. Do wypadku może dojść również przy niewłaściwym podpieraniu wierconego elementu z drugiej strony przez współpracownika. W celu ochrony przed

przewierceniem dłoni współpracownik powinien stosować podkładki drewniane.

Technologie zgrzewania oporowego

W połączeniach elementów statków powietrznych z aluminium i tytanu w niektórych przypadkach stosowane jest zgrzewanie oporowe liniowe lub punktowe. Zgrzewane elementy są ręcznie ustawiane (zazwyczaj przez dwóch pracowników) na stacjonarnych zgrzewarkach i przytrzymywane za pomocą wyposażenia pomocniczego.

Podczas zgrzewania występują zagrożenia zmiążdżeniem i poparzeniem dłoni oraz promieniowanie elektromagnetyczne.

Do wkładania i przytrzymywania zgrzewanych elementów podczas zgrzewania oraz do zakładania i wyjmowania spinaczy łączących przedmioty do zgrzewania pracownicy muszą używać rękawic ochronnych oraz specjalnych szczypiec. Wskazane jest również wyposażenie pracowników w odzież chroniącą przed oddziaływaniem pól elektromagnetycznych.

Klejenie i laminowanie warstw tkanin zbrojących żywicami

Tradycyjną technologią stosowaną przy budowie szybowców i lekkich samolotów jest klejenie warstwowe żywicami tkanin zbrojących. Tkaniny zbrojące, wykonane z włókien węglowych i szklanych, są układane kolejno (przy zachowaniu kierunku przebiegu włókien) w specjalnych formach, po czym są nasączone żywicami, np. epoksydowymi.

Utwardzanie kleju z zastosowaniem tej technologii odbywa się naturalnie lub termicznie (temperatura utwardzania: od 80 do 130 °C). W celu zwiększenia wytrzymałości mechanicznej, do klejonych tkanin wkładane są porowate pianki usztywniające lub wkładki metalowe.

W celu ułatwienia dalszej obróbki, elementy są malowane ręcznie farbą podkładową, co zmniejsza także pylenie oraz chroni warstwy zbrojące przed ewentualnym uszkodzeniem. W celu umożliwienia montażu, wcześniej uformowane elementy statku powietrznego są poddawane szlifowaniu oraz obcinaniu brzegów. Na stanowiska montażowe są one dostarczane przy pomocy wózków kołowych.

Pomalowane elementy statku powietrznego są szpachlowane, a następnie szlifowane przed malowaniem farbami akrylowymi, które odbywa się w kabinach natryskowych.

Inną metodą klejenia jest metoda prepeg z wykorzystaniem gotowych tkanin zbrojących nasączonych żywicami [13]. Kolejność operacji jest wtedy bardzo zbliżona do technologii z wykorzystaniem klejenia warstwowego żywicami tkanin zbrojących.

Łączenie elementów statków powietrznych odbywa się również przez wklejanie tzw. insertów, tj. gwintowanych wkładów do montażu akcesoriów. Na niektórych stanowiskach klejenia, sytuowanych – ze względu na szkodliwość stosowanych substancji (klej uczulający) – w wydzielonych pomieszczeniach wyposażonych w odciągi miejscowe, pracownicy używają rękawic i masek ochronnych.

Wymuszone pozycje ciała

Wiele operacji w procesach łączenia elementów statków powietrznych, zwłaszcza nitowanie oraz wiercenie, wykonywanych jest przez pracowników w wymuszonej warunkami zewnętrznymi pozycji ciała. Uciążliwość tych prac wynika przede wszystkim

¹ Hermetyczny zbiornik wyposażony w instalację grzewczą służący do przeprowadzania procesów chemicznych.

kim ze zmuszonych, powtarzanych wielokrotnie tych samych czynności, wykonywanych w stałej i często niewygodnej pozycji, wymagających jednocześnie precyzji i skupienia uwagi, a często także koordynacji między współpracownikami. Mogą to być prace wykonywane w belkach ogonowych i innych ciasnych przestrzeniach statków powietrznych, a także z podestów lub bezpośrednio na zewnątrz kadłubów. We wszystkich przypadkach, ze względu na łączenie dużą liczbą nitów umiejscowionych na niewielkiej powierzchni (w celu uzyskania odpowiedniej wytrzymałości połączeń), pracownik zmuszony jest przez długi czas przebywać w niezmiennej pozycji ciała.

Do typowych należą prace wykonywane przez pracowników w pozycji: stojącej, siedzącej, leżącej na plecach, oraz w pozycji kucznej lub kłęzącej. W przypadku wykonywania tego typu czynności pracy także niezbędne jest odpowiednie szkolenie pracowników.

Najmniej uciążliwa z wymienionych wydaje się być pozycja stojąca, jednak również w tej pozycji występują uciążliwości związane np. z koniecznością operowania rękoma uniesionymi w górę i obciążonymi narzędziami.

Pracujący przez dłuższy czas w pozycji siedzącej często uskarżają się na ból kręgosłupa, co jak się wydaje wynika z konieczności wielokrotnego pochylania się do przodu.

Pozycja leżąca na plecach stanowi duże utrudnienie dla pracownika ze względu na konieczność realizacji prac z wyciągniętymi do góry rękami obciążonymi narzędziami. W pozycji tej występuje zwiększone ryzyko zaprószenia oczu podczas wiercenia lub szlifowania. Pracownicy narażeni są na uderzenia spadającymi na nich z góry narzędziami i przedmiotami, używanymi przez innych pracowników wykonujących w tym samym czasie prace w górnej części kadłuba lub innego montowanego podzespołu. Podczas realizacji tego typu operacji stosowane są, gdy to możliwe, odpowiednie urządzenia pomocnicze, np. wózki (podobne do używanych w zakładach mechaniki pojazdowej), a także przerwy w pracy oraz właściwa koordynacja prac zespołu monterów.

Prace wykonywane w pozycji kucznej lub kłęzącej należą do najbardziej uciążliwych i są przez pracowników nielubiane, uznawane za męczące i powodujące drętwienie kończyn dolnych. By temu przeciwdziałać, niezbędne jest wyposażenie załogi w środki ochrony stawów kolanowych, najlepiej dobierane do indywidualnych możliwości i potrzeb pracowników.

Prace na wysokości

Operacje nitowania na wysokości są wykonywane z poziomu podestów lub bezpośrednio na korpusie statku powietrznego. W pierwszym przypadku metody postępowania i stosowane środki prewencji są powszechnie znane, jednak prace na wysokości, prowadzone bez możliwości zapewnienia statecznego podparcia w postaci podestów, niosą ze sobą ryzyko utraty równowagi na zakrzywionej powierzchni kadłuba i upadku z wysokości. Podczas prac prowadzonych bezpośrednio na korpusie statku powietrznego problem stanowią również liczne otwory technologiczne o różnych rozmiarach. Większe otwory, w których może zmieścić się człowiek, są zabezpieczane, aby ochronić pracowników przed upadkiem z wysokości. W przypadku otworów mniejszych, które nie zawsze udaje się zabezpieczyć,

występuje ryzyko upadku narzędzi ręcznych lub nitów na pracowników wykonujących prace wewnątrz kadłuba. By temu zapobiec, należy stosować biodrowe pasy narzędziowe, z podwieszonymi do nich narzędziami, a pracownicy wykonujący prace wewnątrz konstrukcji powinni być wyposażeni w ochronę głowy i oczu.

Podsumowanie

Zagrożenia wypadkowe w procesach łączenia elementów statków powietrznych występują zwłaszcza przy operacjach wiertarskich i nitowaniu oraz transporcie międzyoperacyjnym. Wspólną cechą jest zespołowość tych prac i problemy z koordynacją czynności roboczych przez współpracowników, które wydają się być po części powodem istnienia zdarzeń wypadkowych. Zagrożenia upadkiem z wysokości występują w związku z nitowaniem i innymi pracami wykonywanymi na wysokości, z podestów lub bezpośrednio na łączącej konstrukcji lotniczej.

Nitowanie, zwłaszcza udarowe wiąże się też z uciążliwym dla pracowników hałasem impulsowym i drganiami, które trudno wyeliminować ze względu na brak możliwości zautomatyzowania tego procesu. Właśnie problemy wynikające z hałasu i drgań są najczęściej sygnalizowane przez służbę ds. bhp.

Mniejszym problemem w procesach łączenia elementów są natomiast czynniki chemiczne, występujące głównie przy operacjach klejenia, a także hermetyzacji poszycia statków powietrznych. Stosowane w tych procesach kleje i żywice oraz inne środki chemiczne są zwykle nietoksyczne: tylko w niektórych przypadkach mogą mieć działanie drażniące w kontakcie z oczami lub skórą.

W przemyśle lotniczym pojawiają się także problemy natury ergonomicznej, wynikające z wymuszonej pozycji ciała lub utrudnionego dostępu do miejsc łączenia i ciasnych przestrzeni, jak np. belka ogonowa statku powietrznego.

W wielu przypadkach zastosowanie odpowiedniego wyposażenia pracy, właściwie dobranych środków ochrony indywidualnej, a także przestrzeganie przez pracowników ustalonych zasad postępowania, pozwala ograniczyć ryzyko zawodowe i niewygodę podczas pracy. Niemniej jednak identyfikacja najbardziej istotnych problemów w procesach łączenia elementów z wykorzystaniem technologii nitowania, zgrzewania oraz klejenia w przemyśle lotniczym umożliwia podjęcie dalszych prac nad opracowaniem zaleceń dotyczących ograniczania ryzyka zawodowego i list do kontroli warunków pracy w tych procesach.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Przemysł lotniczy tętni życiem. [Aviation industry is very much alive] <http://biznes.onet.pl/praca/najlepszy-pracodawcy/przemysl-lotniczy-tetni-zyciem/mmxcs> [dostęp: 2017.04.25].
- [2] DUNKERTON, S.B., VLATTAS, C. Joining of aerospace materials – an overview. *International Journal of Materials and Product Technology* 1998, 13.
- [3] Mały leksykon techniczny. *Technologia mechaniczna. [Small technical lexicon. Mechanical technology. Second edition, revised]* Wyd. drugie popr. i uzup. Wyd. Naukowo-Techniczne, Warszawa 1988.
- [4] TIAN, W., ZHOU, Z., LIAO, W. Analysis and investigation of a rivet feeding tube in an aircraft automatic drilling and riveting system. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2016, 82.
- [5] SIMMONS, M., SCHLEYER, G. Pulse pressure loading of aircraft structural panels. [in:] *Thin-Walled Structures*, Vol. 44, 2006.



Fot. 1. Nitowanie udarowe nitami zakuwanymi. Fot. WSK PZL-Świdnik S.A.

Photo 1. Impact riveting with forged rivets. Photo: WSK PZL-Świdnik S.A.



Fot. 2. Młotek pneumatyczny i podtrzymki wolframowe do nitowania udarowego. Fot. WSK PZL-Świdnik S.A.

Photo 2. Pneumatic rivet hammer and tungsten bucking bars for impact riveting. Photo: WSK PZL-Świdnik S.A.

[6] LANGRAND, B., DELETOMBE, E., MARKIEWICZ, E., DRAZETIC, P. Riveted joint modeling for numerical analysis of airframe crashworthiness. *Finite Elements in Analysis and Design* 2001, 38.

[7] BAGIŃSKI, A., ZUREK, J. Problemy bezpieczeństwa w lotnictwie. [Safety concerns in aviation] Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych. *Journal of KONBIN* 2008, 3, 6.

[8] ALDERLISTEN, R., HOMAN J. Fatigue and damage tolerance issues of glare in aircraft structures. *International Journal of Fatigue* 2016, 28.

[9] KOMOREK, A., PRZYBYŁEK, P. Obudowy ochronne wyposażenia awionicznego z powłokami na bazie kompozytów o właściwościach ablastycznych. [Safety covers in avionic equipment with ablative composite-based layers] *Technologia i Automatyka Montażu* 2010, 4.

[10] SWIFT T. Damage tolerance capacity. *International Journal of Fatigue* 1994, 16.

[11] PN-EN ISO 12100:2012 Bezpieczeństwo maszyn – Ogólne zasady projektowania – Ocena ryzyka i zmniejszanie ryzyka [Machine safety – general design rules – evaluation of occupational risk and its minimization].

[12] Elektroniczna baza danych o wypadkach 2005-2014. [Electronic accident database] GUS, Warszawa.

[13] SUROWSKA, B., BIENIAŚ J. Wytwarzanie wielowarstwowych struktur kompozytowych metodą autoklawową. [Manufacture of multilayer composite structures by the use of the autoclave method] *Kompozyty* 2010, 2 <http://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-article-BARO-0049-0037> [dostęp: 2017. 09.13].

Publikacja opracowana na podstawie wyników IV etapu programu wieloletniego „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy”, finansowanego w latach 2017-2019 w zakresie zadań służb państwowych przez Ministerstwo Rodziny, Pracy i Polityki Społecznej. Koordynator programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy.