

dr hab. inż. Piotr Nikończuk, dr hab. inż. Włodzimierz Rosochacki prof. ZUT

Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie
Wydział Techniki Morskiej i Transportu
Al. Piastów 41, 71-065 Szczecin, Poland
E-mail: piotr.nikonczuk@zut.edu.pl, wlodzimierz.rosochacki@zut.edu.pl

Koncepcja miary niezawodności rekuperatora kabiny lakierniczej

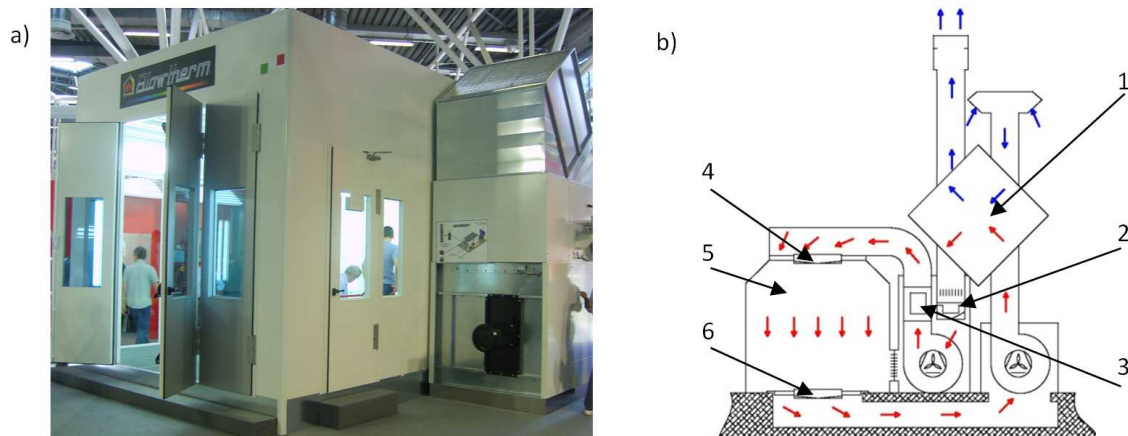
Słowa kluczowe: niezawodność, kabina lakiernicza, rekuperator, osady lakiernicze

Streszczenie: Odkładające się na lamelach rekuperatora osady lakiernicze powodują stopniowe zmniejszanie przekroju poprzecznego kanałów rekuperatora. Skutkiem tego procesu są wzrosty oporów przepływu powietrza oraz oporu termicznego przy wymianie ciepła. Oba zjawiska wpływają negatywnie na niezawodność urządzenia.

W artykule przedstawiono koncepcję miary niezawodności rekuperatora. W tym celu sformułowano podstawowe wymaganie niezawodnościowe (nieuszkodzalność) oraz zdefiniowano uszkodzenia utożsamiając je z utratą zapasu strumienia powietrza oraz zapasu efektywności wymiany ciepła. Na tym tle określono cechy zdatności urządzenia, granice ich obszarów oraz krytyczny czas utraty zdatności rekuperatora.

1. Wprowadzenie

Rekuperator jest urządzeniem technicznym stosowanym w systemach wentylacyjnych, również w komorach lakierniczych. Ze względu na wymagania technologiczne związane z lakierowaniem istotne jest, aby proces ten był prowadzony w odpowiednich warunkach, określonych przede wszystkim właściwą temperaturą i czystością powietrza [30]. Celem stosowania rekuperatora jest odzyskiwanie części ciepła odpadowego pochodzącego ze zużytego powietrza wywiewanego z przestrzeni roboczej kabiny lakierniczej oraz wstępne ogrzanie pobieranego z zewnątrz powietrza świeżego. Wewnątrz rekuperatora znajdują się na przemian kanały ciepłego i zimnego powietrza, oddzielone od siebie cienkimi, aluminiowymi lamelami. W rekuperatorze krzyżowym strumienie ciepłego i zimnego powietrza przepływają względem siebie pod kątem prostym. Za pośrednictwem lamel wymieniane jest ciepło pomiędzy strumieniami powietrza. Na rysunku 1 przedstawiono kabinę lakierniczą z rekuperatorem krzyżowym oraz schemat cyrkulacji powietrza podczas pracy kabiny w trybie lakierowania. Świeże powietrze pobierane z zewnątrz jest wstępnie ogrzewane w rekuperatorze (1) następnie po oczyszczeniu w filtrze zgrubnym (2) ogrzewane jest do zadanej temperatury przez palnik z wymiennikiem ciepła (3). Ogrzane powietrze jest ostatecznie oczyszczane w filtrze nawiewnym (4) oraz nawiewane do przestrzeni roboczej kabiny (5). W przestrzeni roboczej odbywa się proces aplikacji lakierów, podczas którego powstaje mgła lakiernicza. We mgle lakierniczej unoszą się lotne związki organiczne (LZO) oraz drobiny lakieru, które nie znalazły się na lakierowanej powierzchni. Powietrze przechodząc przez przestrzeń roboczą kabiny zabiera ze sobą mgłę lakierniczą i opuszcza kabinę za pośrednictwem filtra typu *paint stop* (6), którego zadaniem jest zatrzymywanie drobin lakieru. Następnie oczyszczone powietrze za pośrednictwem kanału wywiewnego trafia do rekuperatora (1) gdzie częściowo oddaje ciepło do czerpanego, świeżego powietrza.



Rys. 1. Kabina lakiernicza z rekuperatorem a) obiekt rzeczywisty b) Schemat obiegu powietrza, 1- rekuperator krzyżowy, 2 – filtr wstępny, 3 – palnik z wymiennikiem ciepła, 4 – filtr nawiewny, 5 – przestrzeń robocza kabiny lakierniczej, 6 – filtr typu *paint stop*

Eksploatacji rekuperatora w kabynie lakierniczej towarzyszy proces sedymentacji drobin lakieru na lamelach rekuperatora w kanałach ciepłego powietrza. Prowadzone są badania i modelowanie zanieczyszczania wymienników ciepła [6]. Model powstawania osadów lakierniczych dla rekuperatora krzyżowego przedstawiono w pracy [14]. Bezpośrednim skutkiem tego zjawiska jest zmniejszanie się przekroju poprzecznego kanałów ciepłego powietrza w wymienniku ciepła. Zostało to szerzej opisane m.in. w pracy [12]. W rezultacie prowadzi to do wzrostu oporów przepływu powietrza oraz oporu termicznego w procesie wymiany ciepła. Wzrost oporu termicznego skutkuje obniżeniem efektywności odzyskiwania ciepła w rekuperatorze, natomiast zmniejszenie wolumenu wymienianego powietrza prowadzi do powstawania zagrożenia wybuchu. Proces sedymentacji drobin lakieru na lamelach rekuperatora ma więc charakter destrukcyjny, mający istotny wpływ na niezawodność jego działania.

Wymogi bezpieczeństwa aplikacji lakierów zostały poruszone w publikacji [18], określane i aktualizowane są w odpowiednich regulacjach Unii Europejskiej [29] oraz pozostałe światowe akty prawne, między innymi w Australii [32], w Stanach Zjednoczonych [34] oraz w Nowej Zelandii [33]. Wymogi zawarte w lokalnych regulacjach zostały zaprezentowane w przewodniku dobrych praktyk dla prac lakierniczych opracowanym przez National Air Filtration Association [30]. Podobne opracowanie zostało wydane w Wielkiej Brytanii [31]. Wpływ regulacji na branżę lakiernictwa samochodowego przedstawiono w opracowaniu [35]. W kabinach lakierniczych zidentyfikowano dwa główne zagrożenia: zatrucia lakiernika oraz powstawania mieszanki wybuchowej. Metodę określania ryzyka wybuchu dla kabin stosowanych do farb proszkowych opisano w pracy [25].

Obniżenie tempa wzrostu osadów lakierniczych jest możliwe między innymi poprzez poprawę skuteczności oczyszczania powietrza usuwanego z kabiny lakierniczej z drobin mgły lakierniczej. Efektywność filtrów typu *paint stop* uzależniona jest od ich rodzaju [4] oraz rozmiaru drobin lakieru unoszonych we mgłę lakierniczej. Analizę efektywności oczyszczania powietrza z drobin lakieru w funkcji ich wielkości przedstawiono w pracy [1]. Wyniki porównawcze efektywności filtrów przedstawiono w pracy [4] natomiast szerszy zakres prac badawczy został zawarty w podsumowaniu zakończonego projektu badawczego [3]. Rozmiar drobin uzależniony jest od materiału lakierniczego oraz parametrów aplikacji. Analizę wielkości drobin lakieru przedstawiono w publikacji [20] natomiast znacznie rozszerzone wyniki zawarto w pracy [21]. Oddzielną analizę powstawania mgły lakierniczej

oraz oczyszczania powietrza dla technologii bez udziału sprężonego powietrza (*airless spray painting*) przedstawiono w pracy [23].

Problematyka oczyszczania powietrza usuwanego z lakierni jest wciąż aktualna, przegląd stanu wiedzy zaprezentowano w pracy [22]. Prowadzone są prace nad nowymi rozwiązaniami filtracji powietrza w kabinach lakierniczych [7]. Rozważane są techniki oczyszczania grawitacyjnego na mokro [10] oraz metody bez stosowania wymiennych filtrów (*medialess dynamic filtration*) [26]. Do tej pory nie opracowano technologii oczyszczania powietrza, która zapewnia całkowite usuwanie drobin mgły lakierniczej. Dla usuwania lotnych związków organicznych rozważane są technologie biofiltracji [8] zaproponowano między innymi zastosowanie biologicznej filtracji strumieniowej [24] lub filtrów grzybowych [16].

Konsekwencją sedymentacji drobin lakieru na lamelach rekuperatora jest, jak już wcześniej zauważono, pogorszenie poziomu niezawodności urządzenia. Obecne dokumentacje techniczne kabin lakierniczych wyposażonych w rekuperatory krzyżowe nie zawierają wytycznych dotyczących okresowych inspekcji stanu rekuperatora oraz częstotliwości jego oczyszczania. Zidentyfikowanie głównych cech zdatności rekuperatora oraz określenie wartości progowych dla obszarów zdatności ułatwi wyznaczenie częstotliwości inspekcji i oczyszczania rekuperatora, w celu zapewnienia bezpieczeństwa aplikacji lakierów. W niniejszej pracy przedstawia się propozycję miar niezawodności rekuperatora oraz oszacowania krytycznego czasu zdatności rekuperatora t_{kr} , po którym nastąpi jego uszkodzenie, przyjmując założenie, że istotnym wymaganiem niezawodnościowym jest jego nieuszkodzalność. Czas krytyczny zdatności rekuperatora t_{kr} jest również wyznacznikiem częstotliwości przeglądów i prac konserwacyjnych rekuperatora.

2. Cechy zdatności

W dalszych rozważaniach przyjęto założenie, że na niezawodność rekuperatora istotny wpływ ma proces odkładania się osadów lakierniczych. Jest to zasadnicze założenie upraszczające rzeczywistość, polegające na pominięciu innych, mniej istotnych procesów mogących prowadzić do innych form uszkodzeń (np. mechanicznych). Opisany powyżej wpływ osadów lakierniczych na parametry pracy rekuperatora pozwala na przyjęcie do dalszych analiz dwóch cech określających jego zdatność. Są nimi: zapas efektywności wymiany ciepła oraz zapas strumienia powietrza. Utratę zapasu w odniesieniu do każdej z tych cech utożsamia się z wystąpieniem uszkodzenia i przejściem urządzenia w stan zawodności.

Mając na uwadze charakter zjawiska prowadzącego do uszkodzenia rekuperatora, w celu określenia jego miary niezawodności za poprawne i użyteczne cechy zdatności przyjęto *zapas efektywności wymiany ciepła oraz zapas spadku ciśnienia*.

2.1 Zapas efektywności wymiany ciepła

Cecha odnosi się do uszkodzenia utożsamianego ze stanem rekuperatora, w którym osiągnięta zostaje graniczna wartość współczynnika przewodności cieplnej k_{gr} . Cecha ta dotyczy aspektów ekonomicznych związanych z rekuperacją ciepła odpadowego.

Efektywność wymiany ciepła w rekuperatorze związana jest ze strumieniem ciepła $\dot{Q}(t)$ ¹, który jest zależny od współczynnika przewodności cieplnej $k(t)$ oraz różnicy

¹ W niniejszej pracy symbole zmiennych losowych pisane są grubą czcionką.

temperatur strumieni powietrza po obu stronach lameli rekuperatora ΔT (przy założeniu, że różnica ta jest zdeterminowana i niezmienna w czasie):

$$\dot{Q}(t) = k(t)\Delta T \quad (1)$$

Zapas efektywności wymiany ciepła $h_1(t)$ określa się jako:

$$h_1(t) = \dot{Q}(t) - \dot{Q}_{gr} \quad (2)$$

gdzie:

\dot{Q}_{gr} – graniczna wartość zapasu efektywności ciepła.

Mając na uwadze (1), zależność opisująca zapas efektywności wymiany ciepła $h_1(t)$ przyjmuje postać:

$$h_1(t) = (k(t) - k_{gr})\Delta T \quad (3)$$

Wartość współczynnika przewodności cieplnej $k(t)$ określa się dla rekuperatora z uwzględnieniem wpływu narastających na powierzchni lameli warstw osadów lakierniczych. Współczynnik ten jest zmienną losową, gdyż narastanie na powierzchni lameli warstw osadów lakierniczych jest zjawiskiem losowym. Dla dowolnej chwili τ i punktu powierzchni lameli opisanego współrzędnymi (x_o, y_o) , realizację procesu $\{k(x,y,t)\}$ opisuje się następującą zależnością [17]:

$$k(x_o, y_o, \tau) = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_R}{\lambda_{TR}} + \frac{\delta_S(x_o, y_o, \tau)}{\lambda_{TS}} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (4)$$

gdzie:

α_1, α_2 – współczynnik przejmowania ciepła powietrza [W/(m²K)]; z założenia wielkość zdeterminowana,

δ_R – grubość lameli rekuperatora [m]; z założenia wielkość zdeterminowana,

$\delta_S(x_o, y_o, \tau)$ – grubość warstwy narastających osadów lakierniczych w punkcie powierzchni lameli określonym współrzędnymi (x_o, y_o) [m]; realizacja procesu stochastycznego $\{\delta_S(x,y,t)\}$ w chwili τ ,

λ_{TR} – przewodność cieplna lameli rekuperatora [W/(mK)]; z założenia wielkość zdeterminowana,

λ_{TS} – przewodność cieplna osadów lakierniczych [W/(mK)]; z założenia wielkość zdeterminowana.

Do wyznaczenie wartości cechy zdatności $h_1(t)$ w chwili τ realizację współczynnika $k(t)$ określa się ze wzoru:

$$k(\tau) = \frac{I}{xy} \int_0^y \int_0^x k(x,y,\tau) dy dx \quad (5)$$

2.2 Zapas spadku ciśnienia

Cecha odnosi się do uszkodzenia utożsamianego ze stanem, w którym zostaje osiągnięta graniczna wartość spadku ciśnienia strumienia powietrza ΔP_{gr} w kanałach rekuperatora. Przepływające przez kanał wentylacyjny powietrze pokonuje opór tarcia występujący na ściankach kanału wentylacyjnego. Opór ten wraz ze zmniejszającym się w czasie przekrojem kanału powoduje spadek ciśnienia na całej jego długości prowadząc do zmniejszenia objętościowego strumienia powietrza. Obniżenie wolumenu wymianianego powietrza skutkuje niebezpieczeństwem powstawania mieszanki wybuchowej w przestrzeni roboczej kabiny. Prowadzi to również do groźby zatrucia pracującego wewnątrz lakiernika [32].

Zapaw spadku ciśnienia $h_2(t)$ wyraża się zależnością:

$$h_2(t) = \Delta P_{gr} - \Delta P(t) \quad (6)$$

gdzie:

$\Delta P(t)$ – chwilowy spadek ciśnienia strumienia powietrza.

Spadek ciśnienia powietrza w kanale wentylacyjnym jest procesem stochastycznym $\{\Delta P(t)\}$, którego realizacje zależą od długości kanału l oraz losowo zmiennego w czasie jednostkowego współczynnika oporu $r(t)$:

$$\Delta P(t) = r(t)l \quad (7)$$

Współczynnik oporu $r(t)$ zwany również jednostkowym spadkiem ciśnienia [17] jest zależny od wielu parametrów w tym dwóch, które zmieniają swoje wartości w czasie:

$$r(t) = \frac{\lambda_F(t)\zeta w^2}{2d(t)} \quad (8)$$

gdzie:

$\lambda_F(t)$ – bezwymiarowy współczynnik tarcia; wielkość losowa,

ζ – gęstość powietrza [kg/m^3]; z założenia wielkość zdeterminowana,

w – średnia prędkość przepływu powietrza [m/s]; z założenia wielkość zdeterminowana

$d(t)$ – średnica równoważna przekroju kanału [m]; wielkość losowa.

Średnicę równoważną dla przekroju poprzecznego kanału w ogólnej postaci wyznacza się korzystając z zależności [17]:

$$d = \frac{2ab}{a+b} \quad (9)$$

gdzie a i b oznaczają wymiary boków prostokątnego przekroju poprzecznego kanału.

Uwzględniając losowo zmienną w czasie grubość narastających osadów lakierniczych $\delta_s(t)$ zależność opisująca realizacje średnicy równoważnej $d(t)$ w chwili τ przyjmuje postać:

$$d(\tau) = \frac{2ab - 4(a+b)\delta_s(\tau) + 8\delta_s^2(\tau)}{a+b - 4\delta_s(\tau)} \quad (10)$$

Bezwymiarowy współczynnik tarcia $\lambda_F(t)$ zmienia swoją wartość w czasie ze względu na zależność od liczby Reynoldsa. Dla przepływu turbulentnego współczynnik tarcia opisany jest następującą zależnością:

$$\lambda_F(t) = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{Re(t)}} \quad (11)$$

Liczba Reynoldsa $Re(t)$ zależy od średnicy równoważnej przekroju poprzecznego w kanale wentylacyjnym $d(t)$. W chwili τ jej realizację określa się na podstawie zależności:

$$Re(\tau) = \frac{wd(\tau)}{\nu} \quad (12)$$

gdzie ν oznacza kinematyczny współczynnik lepkości [m^2/s].

3. Granice obszarów zdatności

Zdefiniowane powyżej cechy zdatności stwarzają podstawę wyznaczenia poniższych granic obszarów zdatności

- dla cechy *zapas współczynnika przewodności cieplnej*:
gdy rekuperator zdatny (brak uszkodzenia)

$$h_1(\dot{Q}(t), \dot{Q}_{gr}) > 0 \quad (13)$$

gdy rekuperator niezdatny

$$h_1(\dot{Q}(t), \dot{Q}_{gr}) \leq 0 \quad (14)$$

- dla cechy *zapas spadku ciśnienia*:
gdy rekuperator zdatny (brak uszkodzenia)

$$h_2(\Delta P(t), \Delta P_{gr}) > 0 \quad (15)$$

gdy rekuperator niezdatny

$$h_2(\Delta P(t), \Delta P_{gr}) \leq 0 \quad (16)$$

4. Miara niezawodności

Przyjmuje się, że podstawowym wymaganiem niezawodnościowym stawianym konstrukcji rekuperatora jest jego funkcjonowanie bez uszkodzeń w określonym przedziale czasu. Podejście takie znajduje uzasadnienie w funkcji, którą pełni to urządzenie. Osiągnięcie opisanych powyżej stanów krytycznych utożsamianych w niniejszej pracy z uszkodzeniem jest jednoznaczne z nieakceptowanym pogorszeniem funkcjonalności urządzenia w istotny sposób rzutujący na bezpieczeństwo i koszt eksploatacji kabiny lakierniczej oraz jakość procesu aplikacji lakierów.

Mając powyższe na względzie przyjmuje się, że miarą niezawodności, która dobrze charakteryzuje sformułowane powyżej wymaganie niezawodnościowe, jest prawdopodobieństwo jego spełnienia w analizowanym okresie:

$$R(t) = P((h_1(t) > 0) \cap (h_2(t) > 0)) \quad (17)$$

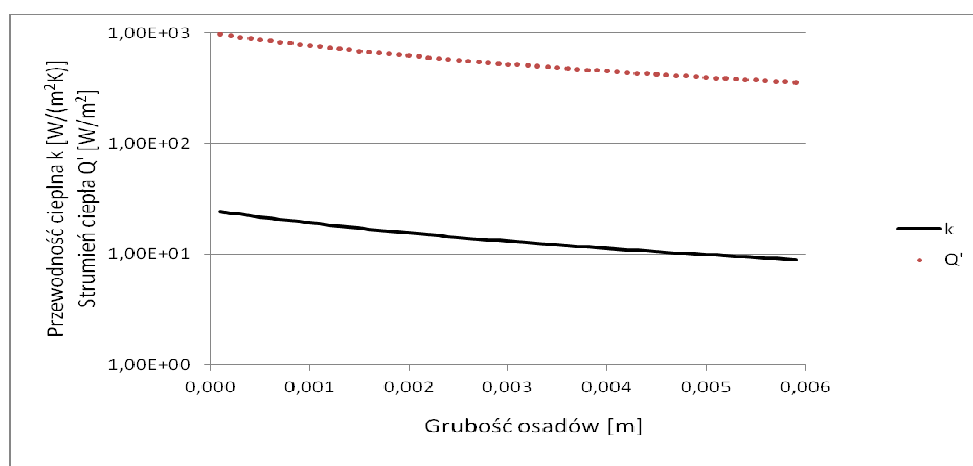
Określeniu podlega więc prawdopodobieństwo pracy rekuperatora z zachowaniem obu analizowanych tu cech zdatności. Należy zauważyć, że zależność (17) określa prawdopodobieństwo zaistnienia dwóch zdarzeń zależnych. Zależność ta wynika z powiązania obu cech zdatności z procesem narastania osadów lakierniczych, reprezentowanym tu przez proces stochastyczny $\{\delta_s(t)\}$.

5. Analiza cech zdatności

Zakłada się, że przedstawione powyżej cechy zdatności zależą od stałych parametrów konstrukcyjnych rekuperatora oraz zmiennej w czasie grubości osadów lakierniczych $\delta_s(t)$.

Przeprowadzono wstępną analizę cech zdatności na przykładzie rekuperatora dedykowanego dla kabin lakierniczych, znajdującego się w dokumentacji ofertowej jednego z przedsiębiorców działających na rynku branży lakierniczej [28]. Rekuperator był przedmiotem badań prezentowanych w pracy [13].

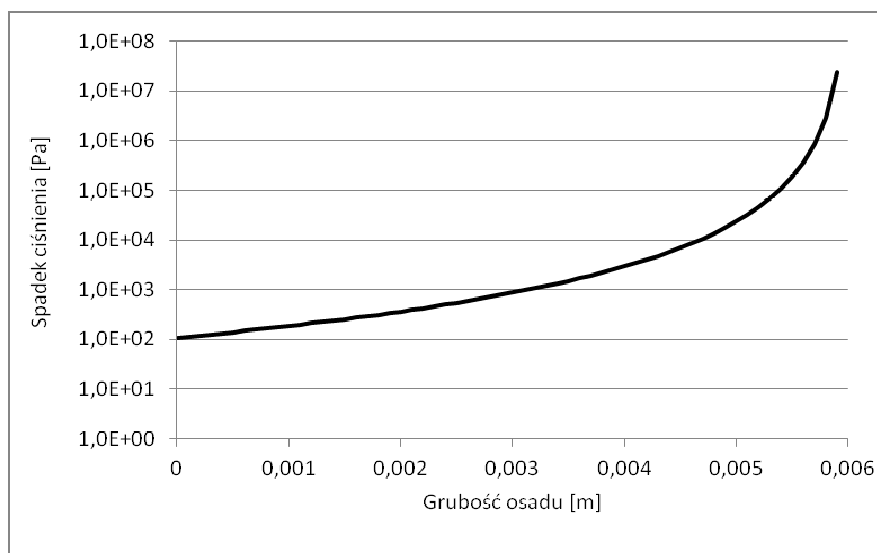
Dla przedstawionego rekuperatora przeanalizowano wpływ grubości osadów lakierniczych na zmiany sformułowanych cech zdatności. Na rysunku 2 przedstawiono zmiany współczynnika przewodności cieplnej $k(\delta_s)$ według równania (4) oraz odpowiadające im zmiany strumienia ciepła $\dot{Q}(\delta_s)$ według równania (1). Mają one wpływ na wartość cechy zdatności $h_1(t)$. Do obliczeń przyjęto współczynnik przewodności cieplnej osadów lakierniczych $\lambda_{TS} = 0.082 \pm 0.003$ [W/(mK)], metodykę pomiarów i opracowanie wyników wraz z analizą błędów dla przewodności cieplnej osadów opisano w pracy [15]. Dla obliczeń według równia (4) przyjęto następujące wartości: przewodność cieplna aluminium $\lambda_{TR} = 200$ [W/(mK)] oraz jednakowe wartości współczynnika przejmowania ciepła dla powietrza po obu stronach lameli $\alpha_1 = \alpha_2 = 50$ [W/(m²K)], za dokumentacją [28] określono grubość lameli rekuperatora $\delta_R = 2e-4$ [m]. Wartości strumienia ciepła $\dot{Q}(\delta_s)$ obliczono dla różnicy temperatur $\Delta T = 40$ [K].



Rys. 2 Obliczone zmiany współczynnika przewodności cieplnej $k(\delta_s)$ oraz strumienia ciepła $\dot{Q}(\delta_s)$

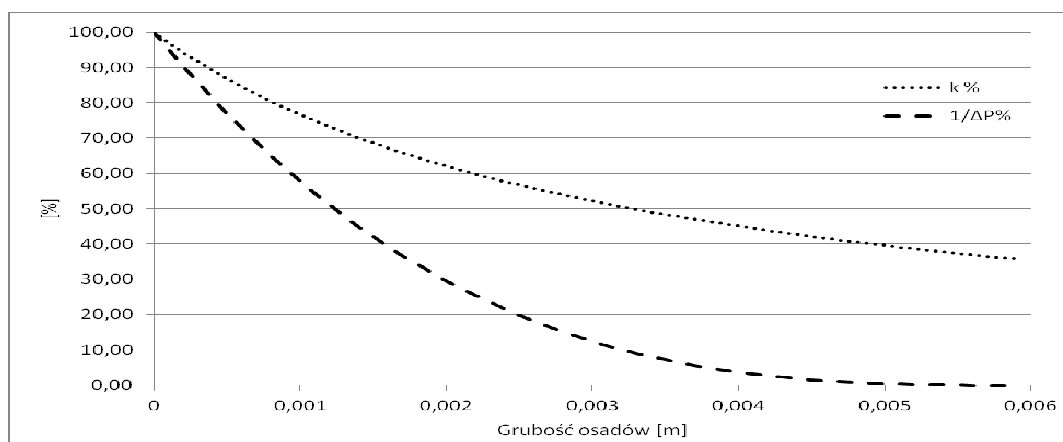
Na rysunku 3 przedstawiono wzrost spadku ciśnienia w funkcji grubości warstwy osadów lakierniczych $\Delta P(\delta_s)$. Spadek ciśnienia jest związany z cechą zdatności $h_2(t)$. Obliczenia przeprowadzono według równania (7). Przyjęto następujące wartości zmiennych: gęstość powietrza $\zeta = 1.2$ [kg/m³], średnia prędkość przepływu powietrza $w = 5.56$ [m/s], kinematyczny współczynnik lepkości $\nu = 1.5e-5$ [m²/s]. Na podstawie dokumentacji [28] określono następujące parametry kanałów rekuperatora: boki przekroju prostokątnego kanału

$a = 1.2e-2$ [m], $b = 1$ [m] długość kanału $l = 1$ [m], liczba kanałów w rekuperatorze oddzielnie dla ciepłego i zimnego powietrza $n = 60$. Osady lakiernicze odkładają się wyłącznie w kanałach z usuwanym z kabiny ciepłym powietrzem. Obliczenia spadku ciśnienia przeprowadzono dla pojedynczego kanału ciepłego powietrza przy założeniu, że we wszystkich przekrojach kanałów jest jednolity rozkład prędkości powietrza oraz ma miejsce przepływ burzliwy. Dla średnicy równoważnej $d(t)$ opisanej równaniem (10) przyjęto jednorodną, uśrednioną wartość grubości osadów lakierniczych $\delta_s(t)$.



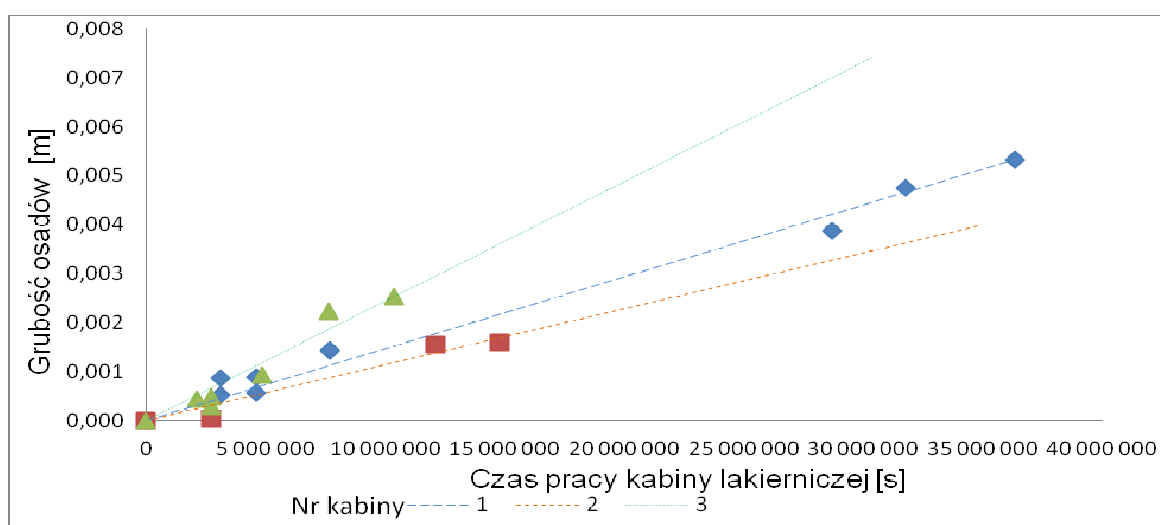
Rys. 3 Obliczony spadek ciśnienia $\Delta P(\delta_s)$

Na rysunku 4 przedstawiono procentowe zmiany efektywności wymiany ciepła oraz odwrotności spadku ciśnienia w funkcji grubości osadów lakierniczych. Na wykresie przedstawiono odwrotność spadku ciśnienia $1/\Delta P(\delta_s)$ w celu poprawy przejrzystości w porównaniu z procentowymi zmianami strumienia ciepła $\dot{Q}(\delta_s)$. Punkty początkowe wynoszące 100% dla obu parametrów wskazują ich wartości dla stanu czystych, niepokrytych osadami lakierniczymi lamel rekuperatora. Analiza prezentowanego wykresu wskazuje na znacznie większy wpływ procesu narastania osadów na zmianę spadku ciśnienia, a w rezultacie na zmianę wartości cechy $h_2(t)$.



Rys. 4 Procentowe zmiany strumienia ciepła $\dot{Q}(\delta_s)$ i odwrotności ciśnienia $1/\Delta P(\delta_s)$ w zależności od grubości osadów

Tempo wzrostu osadów lakierniczych uzależnione jest od wielu parametrów i jest procesem o zmiennej dynamice. Na rysunku 5 przedstawiono wyniki pomiarów grubości osadów lakierniczych w trzech kabinach lakierniczych. Przedstawione na wykresie punkty reprezentują wartości średnie z pomiarów po danym okresie czasu pracy kabiny. Linie trendu przedstawiają uśrednione wartości tempa wzrostu osadów w każdej z kabin. Metodyka przeprowadzenia badań oraz ich warunki zostały opisane w pracy [13]. Pomiary prowadzono w kabinach lakierniczych niewyposażonych w rekuperatory. Punkty pomiarowe ze względów technicznych były zlokalizowane w każdej kabinie na pokrywie przepustnicy powietrza w kanale wyrzutni. Jest to miejsce, gdzie zwyczajowo instaluje się rekuperator (rysunek 1). Wyniki pomiarów były podstawą do opracowania modelu symulacyjnego odkładania się osadów na lamelach rekuperatora, model numeryczny oraz wyniki symulacji przedstawiono w pracy [14]. W modelu przyjęto, że we wszystkich przekrojach kanałów rekuperatora jest jednakowa prędkość powietrza oraz przepływ ma charakter burzliwy.

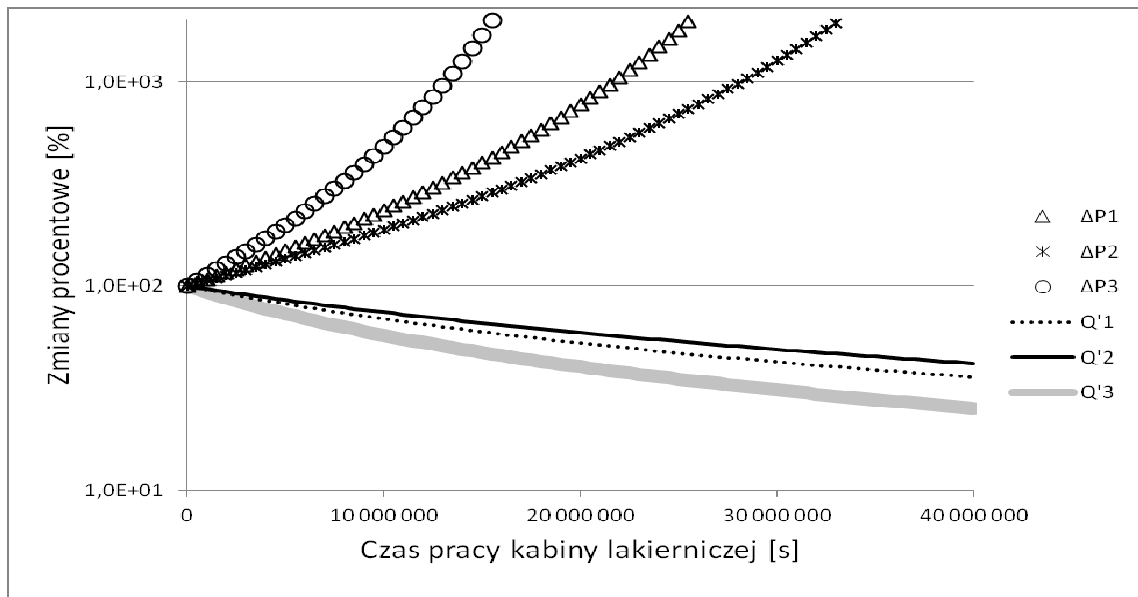


Rys. 5 Tempo wzrostu osadów lakierniczych w trzech kabinach lakierniczych [13]

Analiza wyników prezentowanych na rysunku 5 wskazuje na silnie losowy charakter procesu narastania osadów. Przykładowo, linie trendu wyników pomiarów grubości osadów w kabinach nr 2 i 3 wskazują na ponad dwukrotnie większe tempo wzrostu w kabinie nr 3 niż w kabinie nr 2. Wiąże się to między innymi z losowym wpływem na ten proces takich czynników jak: sumaryczne udziały czasów pracy w trybach lakierowania oraz suszenia w całkowitym czasie eksploatacji kabiny lakierniczej, parametry nastaw oraz efektywność transferu pistoletu lakierniczego, efektywność wywiewnego filtra powietrza w kabinie, umiejętności lakiernika, kształt i rozmiary lakierowanych obiektów.

Na podstawie linii trendu przedstawionych na rysunku 5 opracowano dla poszczególnych kabin procentowe zmiany spadku ciśnienia oraz względnych współczynników przewodności cieplnej w dziedzinie czasu. Wyniki przedstawiono na rysunku 6. Na wykresach dla kabin 1, 2 i 3 odpowiednio oznaczono spadki ciśnienia jako ΔP_1 , ΔP_2 i ΔP_3 oraz strumień ciepła jako $Q'1$, $Q'2$ i $Q'3$. Obliczenia przeprowadzono z użyciem równań przedstawionych w rozdziale 2.

Ze względu na wykładniczy wzrost spadku ciśnienia uwidoczniony na rysunku 3, na wykresie na rysunku 6 przedstawiono fragmenty krzywych, które nie przekraczają wartości zmian 2000 [%]. Wartości te są wynikami obliczeń teoretycznych, które nie będą osiągalne w normalnej eksploatacji kabiny lakierniczej z rekuperatorem.



Rys. 6 Procentowe zmiany spadku ciśnienia ($\Delta P1$, $\Delta P2$, $\Delta P3$) oraz strumienia ciepła ($Q'1$, $Q'2$, $Q'3$) w poszczególnych kabinach

Porównując dynamikę procentowych zmian współczynnika przewodności cieplnej oraz spadku ciśnienia zauważalny jest istotny wzrost procentowej zmiany spadku ciśnienia w stosunku do procentowej zmiany współczynnika przewodności cieplnej.

Opisane w pracy [13] badania procesu eksploatacji kabin lakierniczych, obserwacje oraz wywiady z eksploratorami kabin lakierniczych dają podstawę do oszacowania wartości, które proponuje się w analizowanych tu cechach zdadności uznać za graniczne. W odniesieniu do cechy $h_1(t)$ utożsamianej z zapasem efektywności wymiany ciepła proponuje się wstępnie przyjąć za wartość graniczną

$$\dot{Q}_{gr} = 0.5 \dot{Q}_N = 500 [\text{W/m}^2] \quad (18)$$

przy czym \dot{Q}_N oznacza nominalną wartość strumienia ciepła dla nowego niezabrudzonego osadami rekuperatora. Wartość nominalną strumienia ciepła można odczytać z rysunku 2 $\dot{Q}_N = 1000 [\text{W/m}^2]$. Przy takiej wartości strumienia ciepła efektywność energetyczna rekuperatora osiąga połowę wartości nominalnej, co obniża o połowę szacowane korzyści ekonomiczne użytkownika kabiny lakierniczej. Uznano, że połowa uzyskiwanych oszczędności tytułem odzyskanego ciepła stanowi granicę opłacalności kosztów inwestycyjnych związanych z zakupem i instalacją rekuperatora.

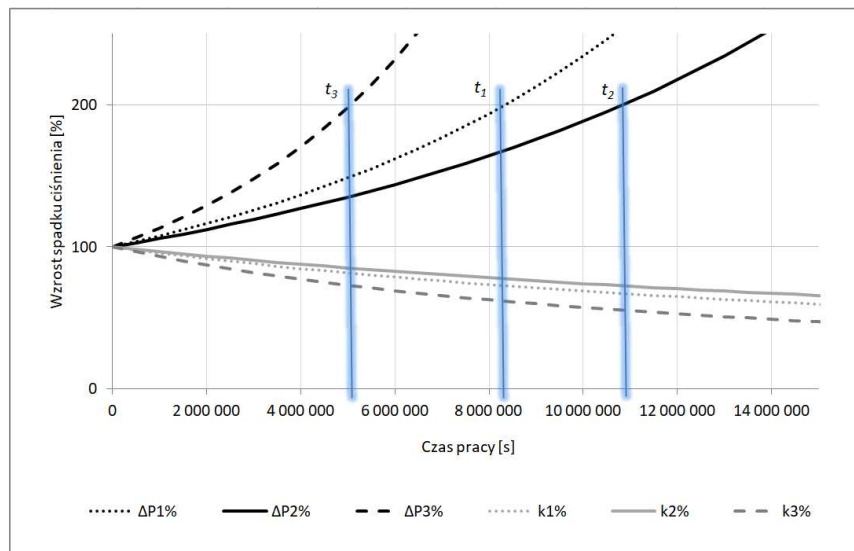
W odniesieniu do cechy $h_2(t)$ za wartość graniczną spadku ciśnienia ΔP_{gr} proponuje się dwukrotność nominalnego spadku ciśnienia ΔP_N

$$\Delta P_{gr} = 2 \Delta P_N = 216 [\text{Pa}] \quad (19)$$

Za nominalną wartość ΔP_N przyjęto spadek ciśnienia na rekuperatorze w stanie czystym, gdy lamele rekuperatora nie są pokryte osadami lakierniczymi. Na rysunku 3 przedstawiono obliczone według równania (7) zmiany spadku ciśnienia w zależności od grubości osadów. Wartość początkowa spadku ciśnienia dla grubości osadu $\delta_s = 0 [\text{mm}]$ wynosi $\Delta P_N = 108 [\text{Pa}]$. Całkowity spadek ciśnienia w kanałach wentylacyjnych kabiny lakierniczej jest indywidualny dla każdej kabiny. Związany jest on z wieloma parametrami a

przede wszystkim z długością oraz przekrojami kanałów, liczbą i rodzajem kształtek w instalacjach wentylacyjnych, konstrukcją wymiennika ciepła do ogrzewania powietrza, rodzajami oraz stanem czystości filtrów powietrza a także rekuperatorem. Na tej podstawie uznano, iż dwukrotność nominalnego spadku ciśnienia na rekuperatorze stanowi dla niego wartość krytyczną.

Dla przyjętych powyżej wartości krytycznych oraz na podstawie szybszych zmian spadku ciśnienia w funkcji grubości osadów, za wiodącą cechę w szacowaniu czasu utraty zdolności eksploatacyjnej przyjęto cechę $h_2(t)$.



Rys. 7. Szacowane czasy zdwojenia spadku ciśnienia

Na rysunku 7 przedstawiono szacowane czasy, w których dla poszczególnych kabin zostały osiągnięte wartości graniczne ΔP_{gr} . Czasy, w których nastąpiło zdwojenie spadku ciśnienia dla poszczególnych kabin oznaczono kolejno jako t_1 , t_2 i t_3 adekwatnie do numeru kabiny. Czasy zdwojenia dla poszczególnych kabin odpowiednio wynoszą:

$$t_1 = 8346234 \text{ [s]}$$

$$t_2 = 10837105 \text{ [s]}$$

$$t_3 = 5061598 \text{ [s]}$$

Wartości te są zróżnicowane, szczególnie zauważalne jest, że czas t_2 jest prawie dwukrotnie większy od czasu t_3 . Różnorodność wartości jest skutkiem silnej losowości procesu narastania osadów lakierniczych.

Na podstawie powyższych obliczeń, jako krytyczny czas utraty zdolności rekuperatora przyjęto wartość t_3 , jest to najkrótszy okres, w którym nie nastąpi uszkodzenie

$$t_{kr} = t_3 = 5061598 \text{ [s]}$$

6. Podsumowanie

W proponowanym modelu niezawodności rekuperatora w kabine lakierniczej wyróżniono dwie cechy zdolności: *zapas efektywności wymiany ciepła* $h_1(t)$ oraz *zapas spadku ciśnienia* $h_2(t)$. Cechy zdolności $h_1(t)$ oraz $h_2(t)$ mają zróżnicowaną zmienność w

zależności od grubości osadów lakierniczych $\delta(t)$. Jak wskazuje analiza procesu narastania osadów ma on charakter losowy. Cecha $h_1(t)$ związana jest ze spadkiem efektywności odzysku ciepła w rekuperatorze. Ma ona charakter ekonomiczny. Natomiast cecha zdatności $h_2(t)$ związana jest ze wzrostem oporów przepływu powietrza przez rekuperator. Obniżenie wolumenu wymiany powietrza w przestrzeni roboczej kabiny lakierniczej może prowadzić do zwiększenia koncentracji mgły lakierniczej oraz LZO. Skutkiem tego może być zatrucie lakiernika lub powstawanie mieszanki wybuchowej. W związku z tym cecha zdatności rekuperatora $h_2(t)$ związana jest z bezpieczeństwem eksploatacji kabiny lakierniczej. W publikacji wskazano na znacznie szybsze tempo zmian cechy zdatności $h_2(t)$ w porównaniu do cechy $h_1(t)$ w dłuższym okresie eksploatacji. Ostatecznie cechę $h_2(t)$ uznano jako dominującą, która ma znaczący wpływ na wyznaczenie okresowości inspekcji i oczyszczania rekuperatora.

Oszacowano czas pracy rekuperatora w stanie nieuszkodzonym na $t_{kr} = 5061598$ sekund co jest równoważne 1406 godzinom pracy kabiny lakierniczej. Po upływie tego czasu należy przeprowadzić inspekcję oraz oczyszczanie rekuperatora z osadów lakierniczych. Uzyskane wyniki dotyczą trzech kabin lakierniczych i stanowią wstępne wartości. Ze względu na niejednorodną prędkość wzrostu osadów lakierniczych, trudno szacować dokładne czasy osiągnięcia wartości granicznych przez cechy zdatności. Pozyskanie i uporządkowanie wyników pomiarów tempa wzrostu osadów w wielu kabinach lakierniczych ułatwi określenie średnich oraz krytycznych przedziałów czasu eksploatacji kabin lakierniczych w jakich należy się spodziewać uszkodzenia rekuperatora.

Proponowane cechy zdatności przedstawiają ujęcie, przy założeniu, że na niezawodność rekuperatora istotny wpływ ma grubość osadów lakierniczych z pominięciem innych możliwych uszkodzeń. Podobne podejście przedstawiono w pracy [19]. Stan uszkodzenia rekuperatora skutkuje utratą zdatności eksploatacyjnej całej kabiny lakierniczej. Wskazane cechy zdatności rekuperatora stają się również cechami zdatności kabiny lakierniczej, nie są one jednak jedynymi cechami wskazującymi na poziom zdatności kabiny. Uśredniając tempo wzrostu osadów lakierniczych można utworzyć indywidualny model kabiny lakierniczej jako systemu wieloelementowego opisanego w pracy [27]. W pracy [11] zaprezentowano również metodę szybkiej oceny niezawodności złożonego systemu technicznego, gdzie elementy składowe mają różne czasy odnawiania. Współczesne technologie przemysłu 4.0 polegające na połączeniu urządzeń przemysłowych z internetem oraz składowaniem danych w sieci niosą możliwości automatycznej akwizycji i składowania w chmurze wyników pomiarów parametrów pracy kabin lakierniczych. Wybrane parametry w sposób pośredni mogą wskazywać na stan czystości rekuperatora. Analiza zebranych wyników w chmurze umożliwi zdalne określenie zdatności rekuperatora [5]. Analiza zdatności może zostać przeprowadzona metodą uczenia maszynowego [2] lub z zastosowaniem logiki zbiorów rozmytych [9].

Literatura:

1. Chan T.L., D'Arcy J.B., Schreck R.M. High-solids paint overspray aerosols in a spray painting booth: particle size analysis and scrubber efficiency. American Industrial Hygiene Association Journal 1986 ;7: 411–417. DOI.org/10.1080/15298668691389964.
2. Chen X, Zhang Z, Zhang Z. Real-time equipment condition assessment for a class-imbalanced dataset based on heterogeneous ensemble learning. Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability 2019; 21(1): 68–80, <http://dx.doi.org/10.17531/ein.2019.1.9>.

3. Darvin C.H. Fractional penetration of paint overspray arrestors. Project summary, United States Environmental Protection Agency, April 1997, <https://permanent.access.gpo.gov/websites/epagov/www.epa.gov/ORD/WebPubs/projsum/600sr97011.pdf>.
4. Darvin C. H., Cox L. S. & Smith D. Comparative Study of Spray Booth Filter System Efficiency, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 1999; 49(3): 339:344,
5. Fang Y, Tao W, Tee KF. A new computational method for structural reliability with big data. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2019; 21(1): 159–163, <http://dx.doi.org/10.17531/ein.2019.1.18>
6. Hassan Al-Haj Ibrahim Fouling in Heat Exchangers, *MATLAB - A Fundamental Tool for Scientific Computing and Engineering Applications* -2012; 3, Vasilios N. Katsikis, IntechOpen, DOI: 10.5772/46462. Available from: <https://www.intechopen.com/books/matlab-a-fundamental-tool-for-scientific-computing-and-engineering-applications-volume-3/fouling-in-heat-exchangers>
7. Howarth J. L., Anand S. C., Design, development and characterization of a novel and innovative exhaust filter media for the global automotive industry. *Textile Research Journal* DOI: 10.1177/0040517515619349.
8. Kazenski S.L., Kinney K.A. Biofiltration of paint spray booth emissions: Packing media considerations and VOC interactions, in: *Proceedings of the 2000 Annual Meeting and Exhibition of Air and Waste Management Association*, June 2000, Salt Lake City, A & WMA, 1–14.
9. Khaniyev T, Baskir MB, Gokpinar F, Mirzayev F. Statistical distributions and reliability functions with type-2 fuzzy parameters. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2019; 21(2): 268–274, <http://dx.doi.org/10.17531/ein.2019.2.11>.
10. Kim H.T., Jung C.H., Oh S.N., Lee K.W. Particle removal efficiency of gravitational wet scrubber considering diffusion, interception, and impaction, *Journal of Environmental Engineering Science* 2001; 2: 125–136.
11. Młynarski S, Pilch R, Smolnik M, Szybka J, Wiązania G. A Method for rapid evaluation of k-out-of-n systems reliability. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2019; 21 (1): 170–176, <http://dx.doi.org/10.17531/ein.2019.1.20>.
12. Nikończuk P. Study of Heat Recovery in Spray Booths, *Metal Finishing* 2013; 111(6): 37-39.
13. Nikończuk P. Preliminary analysis of heat recovery efficiency decrease in paint spray booths. *Transactions of the Institute of Metal Finishing* 2014; 92(5): 235-237.
14. Nikończuk P. Preliminary modeling of overspray particles sedimentation at heat recovery unit in spray booth. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2018; 20 (3): 387–393, <http://dx.doi.org/10.17531/ein.2018.3.6>.

15. Nikończuk P., Dobrzyńska R. Preliminary Measurements of Overspray Sediment's Thermal Conductivity. *Ochrona przed Korozją* 2018; 61 (2): 40-42, DOI:10.15199/40.2018.2.3.
16. Qi B., Moe W.M., Kinney K.A. Treatment of paint spray booth off-gases in a fungal biofilter. *Journal of Environmental Engineering* 2005; 2: 180–189.
17. Recnagel – Sprenger – Hönnmann - Schramek, *Ogrzewanie i klimatyzacja, Poradnik*, Wydanie 1, EWFE, Gdańsk 1994.
18. Ron J. Ventilation and paint filtration requirements for spray booths. *Metal Finishing* 2007; 105 (6), 82–84
19. Rosochacki W. Basis of reliability model for offshore structures bearing. *Scientific Journals Maritime University of Szczecin*, 2009 vol. 19 (91): 92-96.
20. Sabty-Daily R.A., Hinds W.C., Froines J. Size distribution of chromate paint aerosol generated in a bench-scale spray booth. *The Annals of Occupational Hygiene* 2005; (1): 33–45.
21. Salaimeh A. A., Adornato A., Akafuah N. K., Saito K. Assessment of Spray Envelope Using Droplet Breakup Regime and Mechanisms. ICLASS 2015, 13th Triennial International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, Tainan, Taiwan, August 23-2 2015.
22. Schweizer R. Technological Advancements in Overspray Collectors. *Metal Finishing*, 2010; 108(4): 38-45.
23. Settles G.S., Miller J.D., Hartranft T.J., Brandt A.D. Visualization and collection of overspray from airless spray painting. In: 8th International Symposium on Flow Visualization, Sorrento, Italy 1998.
24. Webster T.S., Tongna A.P., Guarini W.J., McKnight L. Treatment of volatile organic compound emissions from a paint spray booth application using biological trickling filtration. In: 2000 USC-TRG Conference on Biofiltration (an air pollution control technology), Los Angeles, California, USA, October 2000, University of Southern California, Reynolds Group, 41–50.
25. Wiechuła B. M. The assessment of explosion risk in cabins during spraying coating powder. *Eksplatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2005; 7 (25): 3-15.
26. Wright S. R., Bond J. H. Hazardous waste Minimization of paint overspray via medialess dynamic particle filtration. Final Report 25 Apr 97 -25 Jan 98, INNOVATECH, INC.
27. Zhang Y, Ma Y, Ouyang L, Liu L. A novel reliability model for multi-component systems subject to multiple dependent competing risks with degradation rate acceleration. *Eksplatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2018; 20 (4): 579–589, <http://dx.doi.org/10.17531/ein.2018.4.9>.
28. Archiwum firmy Techniki systemów Aplikacyjnych Sp. z o.o.

29. Coating plants – Spray booths for application of organic liquid coating materials – Safety requirements, European Standard, Final Draft, EN 12215, June 2004.
30. Guideline for Spray Finishing Particulate Recommended Practice, Virginia Beach VA, National Air Filtration Association, 2012, http://www.nafahq.org/wp-content/uploads/Spray_FinishingParticulateFiltrationa.pdf, dostep: 11.05.2015.
31. Guidance on the application of the dangerous substances and explosive atmospheres regulations (DSEAR) 2002 to motor vehicle repair (MVR), Health and Safety Executive, Information Document HSE, 2002, 803/71, http://www.hse.gov.uk/foi/internalops/ocs/800-899/803_71/803_71id.htm#app2, dostep: 04.12.2015.
32. Occupational safety and health act 1984 and occupational safety and health regulations 1996, Code of practice spray painting, West Perth, Australia WorkSafe Western Australia Commission, June 2009, https://www.commerce.wa.gov.au/sites/default/files/atoms/files/code_spray_painting.pdf, dostep: 24.03.2016.
33. Spray coating a guide to the spray coating regulations 1962, Wellington, New Zealand, Occupational Safety and Health Service, Department of Labour, 1962, July 2013, <http://legislation.govt.nz/regulation/public/1962/0054/latest/whole.html#DLM16295>.
34. United States Environmental Protection Agency (USEPA), National emission standards for hazardous air pollutants: Surface coating of miscellaneous metal parts and products; Final rule, Federal Register 69 (1), January 2, 2004, 130–192, <https://www.gpo.gov/fdsys/pkg/FR-2004-01-02/pdf/03-21917.pdf>.
35. United States Environmental Protection Agency (USEPA), Regulatory impact analysis for the proposed automobile and light duty truck coating NESHAP: Final Report, EPA-452/R-01-013, North Carolina, USEPA, Research Triangle Park, N.C., 2002.