

Jan ŻUREK¹
Katarzyna PETA¹

OCENA WYTRZYMAŁOŚCI POŁĄCZEŃ NIEROZŁĄCZNYCH W SKRAPLACZACH SAMOCHODOWYCH ZA POMOCĄ ANALIZY SYGNAŁÓW WIBROAKUSTYCZNYCH

W pracy omówiono ważniejsze właściwości eksploatacyjne skraplaczy stosowanych w układzie klimatyzacji samochodowej. Porównano metody badań połączeń nierozłącznych stosowanych w przemyśle motoryzacyjnym, w tym helowy test szczelności, badanie wytrzymałości na rozrywanie, badanie mikrograficzne oraz ocena wizualna. Szczególną uwagę zwrócono na nieniszczącą metodę badania trwałości połączeń nierozłącznych, polegającą na analizie sygnałów wibroakustycznych oraz zaproponowano rozwiązania poprawiające wykrywanie ewentualnych wad połączeń.

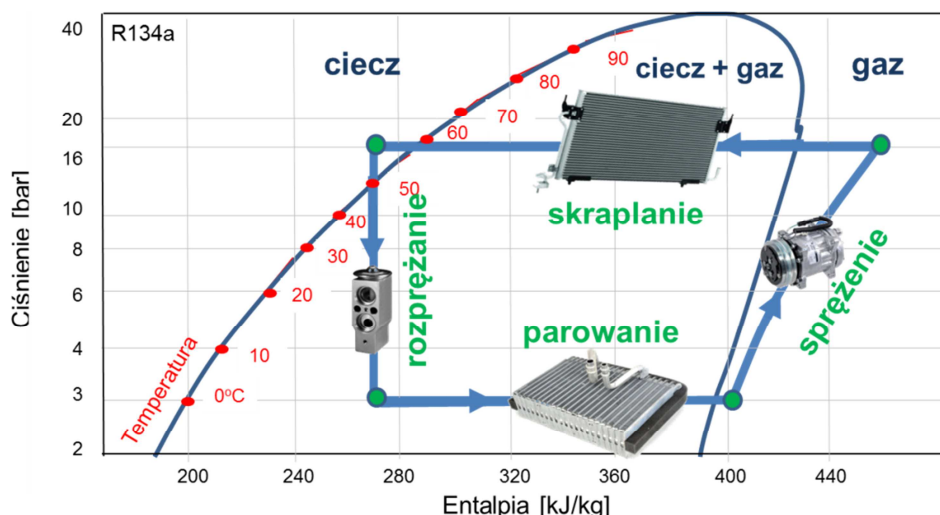
1. WPROWADZENIE

W układzie klimatyzacji samochodowej zachodzi obieg czynnika chłodniczego, który podlega przemianom termodynamicznym, tzn. sprężaniu, skraplaniu, rozprężaniu i parowaniu (rys. 1). Sprężarka po zwiększeniu ciśnienia czynnika chłodniczego (R134a) z około 3 do 16 bar i jego temperatury z około 0°C do 60°C, wtłacza go do skraplacza, gdzie w wyniku przekazywania ciepła do otoczenia zmienia stan skupienia z gazowego na ciekły. Następnie zawór rozprężny zmniejsza jego ciśnienie z około 16 do 3 bar i temperaturę do około 0°C, aby następnie w parowniku pobrać ciepło z otoczenia i odparować do fazy gazowej [1],[2],[3].

Wymienniki ciepła muszą spełniać szereg wymagań eksploatacyjnych wynikających z warunków pracy. Zgodnie z przedstawionym opisem działania układu klimatyzacji samochodowej, szczególnie narażonymi na działanie temperatury i ciśnienia wymiennikami ciepła są skraplacze. Ich szczelność, wydajność cieplna, wytrzymałość mechaniczna (trwałość) oraz odporność na korozję, czyli podstawowe właściwości eksploatacyjne, zależą przede wszystkim od konstrukcji, technologii i dokładności wykonania części składowych oraz jakości ich montażu, tzn. dokładności wykonania połączeń nierozłącznych.

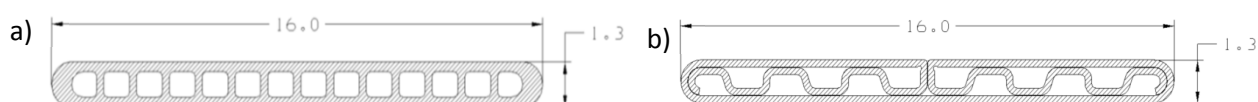
¹ Zakładu Projektowania Technologii Instytutu Technologii Mechanicznej, Politechnika Poznańska, Poznań,

* E-mail: Jan.Zurek@put.poznan.pl



Rys. 1. Wykres przemian termodynamicznych czynnika chłodniczego R134a w układzie klimatyzacji samochodowej
Fig. 1. Thermodynamics of the refrigeration cycle (R134a) in air conditioning system

Jedno z rozwiązań konstrukcyjno-technologicznych skraplaczy, wykonanych ze stopów aluminium, polega na naprzemiennym ułożeniu rurek, przez które przepływa czynnik chłodniczy, oraz taśm zwiększających powierzchnię wymiany ciepła. Te pierwsze wytwarzane są wg opatentowanej technologii rurki zwijanej MFTC (ang. *Multi-Port Folded Tube Condenser*), polegającej na wielokrotnym zwijaniu taśmy na walcu. Rurki zwijane wytwarzane są z materiałów wielowarstwowych na bazie stopów aluminium. Zastosowanie rurek zwijanych, w porównaniu z konwencjonalnymi ekstrudowanymi (rys. 2), uzyskiwanymi przez wytłaczanie termoplastycznego materiału, umożliwia poprawę wielu ich właściwości technicznych i eksploatacyjnych, np.: wytrzymałości mechanicznej, odporności korozyjnej i wydajności cieplnej [4].



Rys. 2. Rurka czynnika chłodniczego a) przekrój rurki ekstrudowanej, b) przekrój rurki zwijanej [4]
Fig. 2. Refrigerant tube a) Extruded tube design profile b) Folded tube design profile [4]

Połączenia nierozłączne w skraplaczach samochodowych, w tym wewnątrz rurki zwijanej, powstają w wyniku stopienia jednej z warstw materiału (spoiwa lutowniczego). Jakość finalna połączeń nierozłącznych, czyli wytrzymałość mechaniczna jest uwarunkowana parametrami operacji lutowania piecowego, w tym przede wszystkim: temperaturą, czasem, ilością topnika, natężeniem przepływu atmosfery ochronnej, czystością łączonych powierzchni. Dobór parametrów lutowania wpływa ponadto na grubość warstwy dyfuzyjnej, chroniącej przed korozją i zapewniającej dobrą spójność warstw materiału rurki zwijanej.

2. METODY BADAŃ JAKOŚCI POŁĄCZEŃ NIEROZŁĄCZNYCH

Zgodnie z normą PN-EN 12797:2002 „*Lutowanie twarde. Badania niszczące złączy lutowanych na twardo*” oraz normą PN-EN 12799:2003 „*Lutowanie twarde. Badania nieniszczące złączy lutowanych na twardo*” wyróżnia się następujące metody badań jakości połączeń lutowanych: badania na ścinanie, rozciąganie, odrywanie, zginanie, badania metalograficzne, twardości, wizualne, penetracyjne, ultradźwiękowe, radiograficzne, szczelności, termograficzne i na obciążenie [5],[6]. Kontrola jakości połączeń lutowanych, w warunkach produkcji wielkoseryjnej, powinna umożliwiać otrzymanie dokładnych wyników pomiarów, w możliwie najkrótszym czasie, najlepiej w sposób zautomatyzowany. Dobór metod badania jakości połączeń lutowanych zależy od oczekiwanych właściwości eksploatacyjnych skraplaczy, z których najważniejszymi są szczelność, wytrzymałość na rozrywanie (trwałość) oraz poprawny przepływ czynnika chłodniczego przez rurki zwijane i zbiorniki. Przykładowymi metodami kontroli jakości połączeń lutowanych skraplaczy, znajdującymi zastosowanie w przemyśle motoryzacyjnym, są: helowe testy szczelności, próby rozrywania, badania mikrograficzne, badania wytrzymałości mechanicznej połączeń, poprzez analizę sygnałów wibroakustycznych oraz ocena wizualna. Porównanie metod badań jakości połączeń lutowanych przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Porównanie metod badań jakości połączeń lutowanych
Table 1. Comparison of quality testing methods of brazing bonds

	Helowy test szczelności	Próba rozrywania skraplaczy	Badanie mikrograficzne	Badanie wytrzymałości połączeń (metoda analizy sygnałów wibroakustycznych)	Ocena wizualna
Czas badania *ponad 3min. **między 1-3min. ***mniej niż 1min.	***	*	*	***	***
Dokładność wyników *metoda niedokładna **metoda średnio-dokładna ***metoda dokładna	***	**	***	***	*
Informacja o szczelności połączeń	*		*	*	*
Informacja o wytrzymałości mechanicznej połączeń		*		*	
Informacja o przepływie czynnika chłodniczego				*	
Metoda nieniszcząca	*			*	*
Informacja o jakości połączeń wewnątrz rurki zwijanej			*	*	

Najlepszą metodą badania jakości połączeń lutowanych, ze względu na kryteria przytoczone w tabeli 1, jest badanie wytrzymałości mechanicznej połączeń, polegające na analizie sygnałów wibroakustycznych.

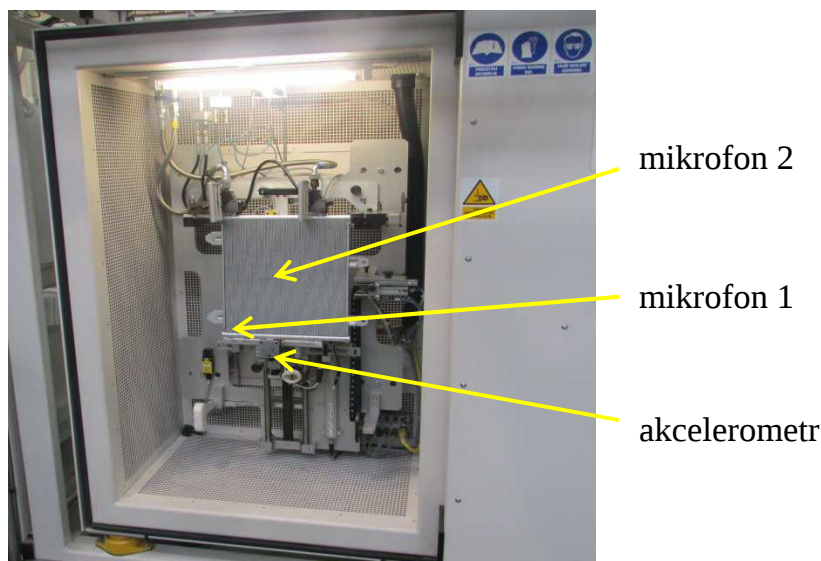
3. BADANIA TRWAŁOŚCI POŁĄCZEŃ NIEROZŁĄCZNYCH

W układzie klimatyzacji samochodowej stosowane są dwa wymienniki ciepła: parownik i skraplacz. Ten ostatni zmienia stan skupienia czynnika chłodniczego, poprzez oddawanie jego ciepła do otoczenia, z gazowego na ciekły. Spośród wszystkich podzespołów układu klimatyzacji samochodowej, stawia się im największe wymagania konstrukcyjno-eksploatacyjne. Z warunków pracy skraplaczy, tzn. przepływów czynnika chłodniczego pod ciśnieniem około 16 bar w temperaturze około 60°C (rys. 1), wynika że połączenia w skraplaczach oraz wewnątrz rurki zwijanej powinny charakteryzować się szczelnością i odpowiednią wytrzymałością mechaniczną. Podczas eksploatacji narażone są bowiem bardziej niż inne podzespoły układu klimatyzacji samochodowej na rozrywanie, a w konsekwencji zaburzenia przepływu czynnika chłodniczego i pogorszenie funkcji wymiany ciepła.

Jedna z nieniszczących metod badania trwałości połączeń lutowanych polega, jak już wspomniano, na analizie sygnałów wibroakustycznych. W porównaniu z innymi metodami stosowanymi do oceny jakości tych połączeń charakteryzuje się możliwością sprawdzenia wytrzymałości bez konieczności ich niszczenia, i co ważne czas badania wynosi mniej niż 1 minutę, co odpowiada czasowi cyklu produkcyjnego. Metoda ta stosowana jest w szczególności do skraplaczy wytwarzanych w technologii rurki zwijanej MFTC, ponieważ pozwala ocenić trwałość połączeń w jej wnętrzu, co jest niemożliwe w przypadku zastosowania innych metod nieniszczących wymienionych w tabeli 1. Helowy test szczelności umożliwia pomiar wartości przecieku helu do kabiny urządzenia za pomocą spektrometru masowego. Pozwala identyfikować nieszczelności połączeń zewnętrznych, np. połączenia rurki zwijanej ze zbiornikiem, natomiast uniemożliwia diagnozowanie nieszczelności połączeń wewnętrznych (wewnątrz rurki zwijanej). W takim bowiem przypadku hel nie przecieka do kabiny urządzenia, lecz do sąsiedniego portu rurki zwijanej, a w związku z tym nie można go wykryć przez spektrometr masowy. Również ocena wizualna uniemożliwia obserwację wad połączeń lutowanych wewnątrz rurki zwijanej.

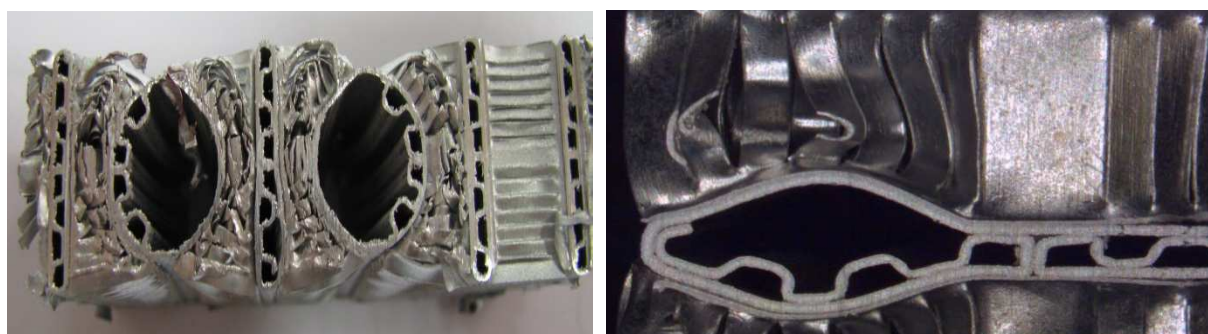
Badanie wytrzymałości połączeń lutowanych odbywa się na podstawie analizy sygnałów wibroakustycznych rejestrowanych przez akcelerometr i dwa mikrofony, podczas napełniania skraplacza technicznie czystym azotem pod ciśnieniem około 35-50 bar. Takie ciśnienia nie występują w eksploatowanym układzie klimatyzacji samochodowej, jednak ze względów bezpieczeństwa, wymaga się, aby połączenia lutowane były trwałe przy tak dużych ich wartościach. Wymogi te gwarantują późniejszą trwałość i niezawodność działania skraplaczy. W celu wyeliminowania czynników zewnętrznych pomiary wykonywane są w dźwiękochłonnej kabinie o izolacyjności akustycznej około 30dB (rys. 3). Metoda badania wytrzymałości połączeń lutowanych na podstawie analizy sygnałów wibroakustycznych jest podstawową metodą kontroli jakości połączeń, którą uzupełnia się innymi metodami badawczymi, najczęściej wg kontroli statystycznej, m.in. badaniami mikrograficznymi, oceną wizualną, próbami rozrywania.

Pod wpływem ciśnienia wywieranego na skraplacz może następować odrywanie się materiału wewnątrz rurki zwijanej oraz jej odkształcenie plastyczne (rys. 4), powodujące



Rys. 3. Widok urządzenia do badania trwałości połączeń nierozłącznych
Fig. 3. View of the device for durability study of brazing bonds

niszczenie sąsiadującej z nią taśmy. Zniszczenie rurki zwijanej powstaje od siły zależnej od włączanego do niej ciśnienia, i sygnalizowane jest dźwiękiem i drganiem skraplacza. Rejestrowane są one przez mikrofony i akcelometr, znajdując odzwierciedlenie na wykresach poziomu dźwięku i drgań w funkcji czasu (rys. 7).



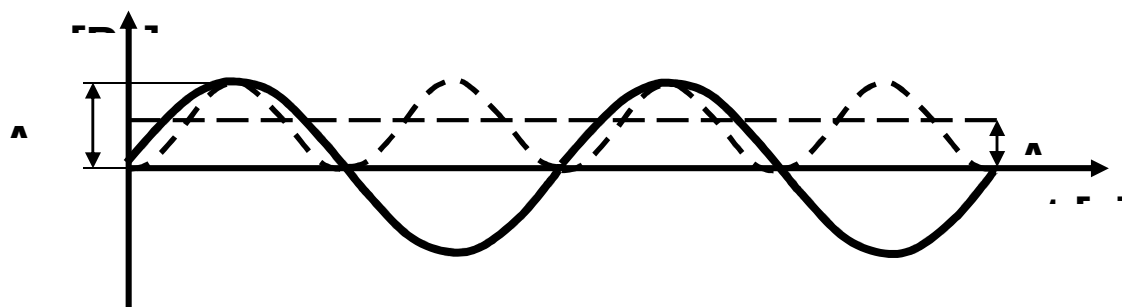
Rys. 4. Zniszczona rurka zwijana
Fig. 4. Folded tube deformation

Zniszczenie rurki zwijanej powoduje, jak wspomniano, powstanie dźwięku rejestrowanego przez mikrofony. Poziom dźwięku L_p wyrażony w decybelach oblicza się na podstawie zmierzonej wartości ciśnienia akustycznego p [Pa] i stałej wartości ciśnienia odniesienia p_0 [Pa], zgodnie z wzorem [7]:

$$L_p = 10 \cdot \log \frac{p^2}{p_0^2} [dB] \quad (1)$$

Z wykresów poziomu dźwięku odczytuje się wartość szczytową PEAK, która jest maksymalną wartością amplitudy sygnału akustycznego w czasie obserwacji (T) oraz wartość skuteczną RMS, będącą pierwiastkiem ze średniej kwadratowej amplitudy ciśnienia p^2 z czasu obserwacji [7],[8] (rys. 5), zgodnie ze wzorem:

$$A_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p^2(t) dt} \quad (2)$$



Rys. 5. Wartość skuteczna i szczytowa dźwięku
Fig. 5. RMS and PEAK sound

Drgania definiowane są jako ruchy oscylacyjne ciał o określonej masie w stosunku do określonego układu odniesienia. Przyspieszenie w ruchu harmonicznym opisane jest następującą zależnością [9]:

$$a(t) = \frac{dv}{dt} = -A\omega^2 \sin(\omega t + \varphi) \quad (3)$$

gdzie:

a – przyspieszenie ruchu,

t – czas,

v – prędkość ruchu,

ω – częstość kołowa,

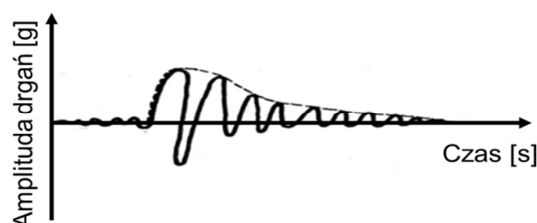
A – amplituda przyspieszenia,

φ – przesunięcie fazowe.

Drgania odebrane przez akcelerometr przedstawia się na wykresach funkcji przyspieszenia a [m/s^2] od czasu t [s]. W praktyce przemysłowej drgania odnoszone są do wartości przyspieszenia ziemskiego g [m/s^2] (rys. 6). Z doświadczeń wynika, że do wartości progowej $0,6g$ nie następuje niszczenie skraplacza, w tym rurek zwijanych, natomiast po przekroczeniu tej wartości obserwuje się rozrywanie połączeń lutowanych i niszczenie taśmy chłodzącej, powodowane deformacją rurki zwijanej.

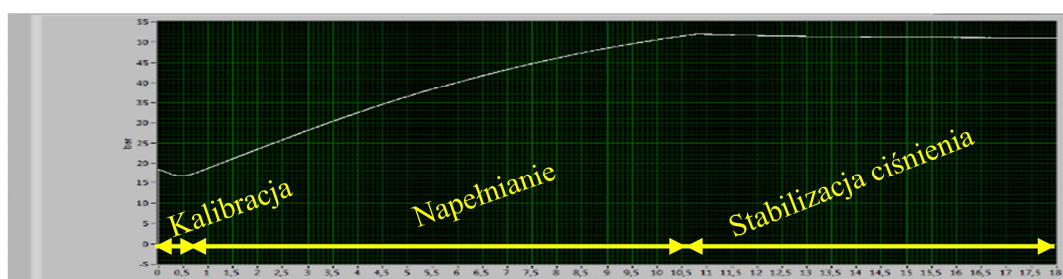
Przykładowe wyniki pomiarów poziomu dźwięku i drgań, rejestrowanych w kabinie urządzenia do badania wytrzymałości połączeń lutowanych, przedstawiono na rys. 7. Badanie wykonuje się w trzech etapach. Pierwszym jest kalibracja, polegająca na sprawdzeniu poprawności umieszczenia skraplacza oraz poprawności działania mikrofonów i akcelerometru w zamkniętej kabinie. Drugi etap stanowi napełnianie skraplacza

technicznie czystym azotem do wartości ciśnienia 35-50 bar, a trzeci, wykonanie pomiarów poziomu dźwięku i drgań, przy stałej wartości ciśnienia.

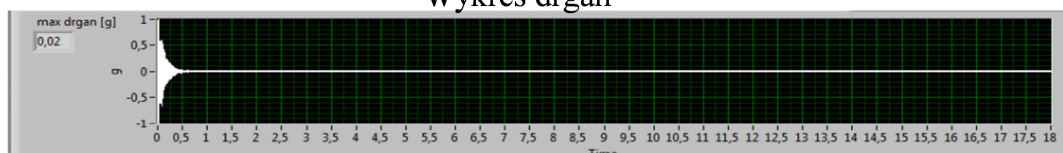


Rys. 6. Drgania w funkcji czasu
Fig. 6. Vibrations in function of time

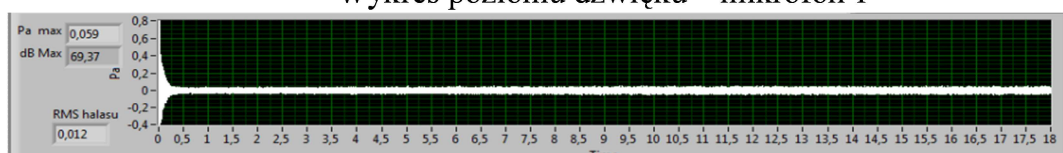
Wykres ciśnienia w skraplaczu w funkcji czasu



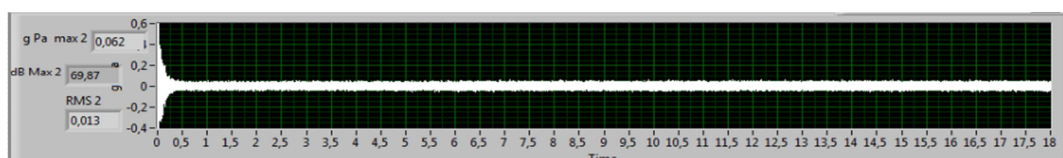
Wykres drgań



Wykres poziomu dźwięku – mikrofon 1



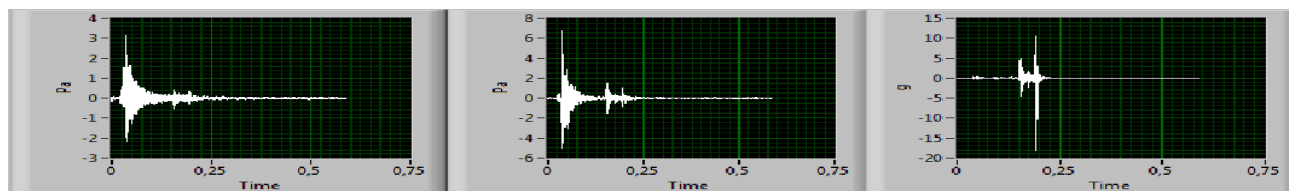
Wykres poziomu dźwięku – mikrofon 2



Rys. 7. Wykresy zarejestrowanego poziomu dźwięku i drgań w funkcji czasu
Fig. 7. Recorded sound and vibration graphs as a function of time

Występowanie pików na wykresach poziomu dźwięku i drgań w tym samym czasie, oznacza że pochodzą one z tego samego źródła odkształceń plastycznych skraplacza. W obliczeniach pomija się prędkości rozchodzenia się dźwięku i drgań. Na rys. 8

przedstawiono przykłady potwierdzające występowanie drgań skraplacza zarejestrowane przez dwa mikrofony.



Rys. 8. Piki dźwięków i drgań
Fig. 8. Peaks of sound and vibration

4. LOKALIZACJA ŹRÓDŁA ZNISZCZENIA SKRAPLACZA

Na podstawie zarejestrowanego przez mikrofony 1 i 2 (rys. 3) wartości piku, na wykresie zależności poziomu ciśnienia akustycznego od czasu, podaje się z pewnym prawdopodobieństwem lokalizację źródła zniszczenia skraplacza, w tym wnętrza rurki zwijanej. Przykładowo, jeżeli rozerwanie połączenia lub odkształcenie plastyczne rurki, niszczące taśmę zwiększającą powierzchnię wymiany ciepła, wystąpiły w pobliżu mikrofonu 1, wartość ciśnienia akustycznego (na wykresie przedstawiona jako pik) zarejestrowanego przez mikrofon 1 będzie większa niż wartość ciśnienia akustycznego zarejestrowanego przez mikrofon 2. Na podstawie tej zależności będą podjęte próby wyposażenia urządzenia do analizy sygnałów wibroakustycznych w dodatkowe mikrofony, umożliwiające uzyskanie mapy akustycznej skraplacza. Wydaje się, że ich analiza i ocena pozwolą zawęzić obszar i czas poszukiwań wad lutowanych połączeń nierozłącznych, co ma szczególne znaczenie w produkcji wielkoseryjnej.

Urządzenie do nieniszczącego badania wytrzymałości połączeń lutowanych powinno wykrywać dźwięki i drgania nie pochodzące od niszczonego skraplacza, ponieważ ich źródłem mogą być czynniki zewnętrzne, np. węże doprowadzające ciśnienie do skraplacza, szczęki zaciskające skraplacz po zamknięciu drzwi kabiny (etap kalibracji), luzy w zespole doszczelniającym skraplacz, dźwięki pochodzące z hali produkcyjnej. Z występowaniem tych zjawisk, w przeciwieństwie do niszczonego skraplacza, związany najczęściej jest sam dźwięk lub same wibracje. Dlatego wprowadzono funkcję MULTI:

$$MULTI = (A_{PEAK_DRGAŃ} \cdot A_{PEAK_DŹWIĘKU} \cdot 1000) \quad (4)$$

gdzie:

$A_{PEAK_DRGAŃ}$ – amplituda piku drgań,

$A_{PEAK_DŹWIĘKU}$ – amplituda piku dźwięku.

Funkcja MULTI znacząco wzmacnia sygnały odbierane przez przetworniki pomiarowe (mikrofony i akcelerometr), umożliwiając potwierdzenie jednoczesności wystąpienia dźwięków i drgań. W przypadku pojawienia się dźwięku, który nie jest

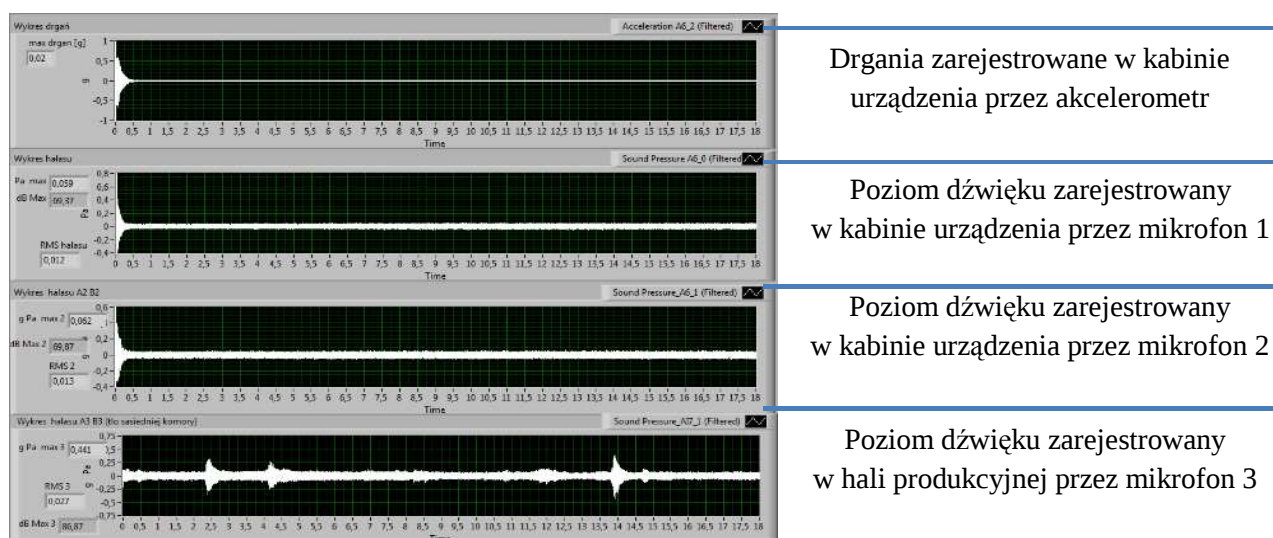
jednoczesny z drganiami, funkcja MULTI może ten sygnał osłabić, traktując go jako nie pochodzący od skraplacza.

Do analizy i wizualizacji sygnałów zarejestrowanych przez mikrofony i akcelerometr, w tym obliczeń funkcji MULTI, stosuje się aplikację wykonaną w programie LabVIEW. Dane do obliczeń rejestrowane są od momentu rozpoczęcia napełniania skraplacza azotem, aż do jego opróżnienia. Czas badania dzieli się na krótsze odcinki i dla każdego z nich podaje wynik funkcji MULTI. Na rys. 9 przedstawiono przykładowy wykres słupkowy iloczynów pików dźwięków i drgań, które nie powinny przekroczyć wartości 30.



Rys. 9. Wykres słupkowy iloczynów drgań i dźwięków
Fig. 9. The bar graph ratio of vibrations and sounds

Mikrofon podczas badania może odebrać dźwięk pochodzący z hali produkcyjnej. W celu wyeliminowania takiego przypadku jako efektu zniszczenia skraplacza, wykonuje się pomiary poziomu dźwięku pochodzącego z hali produkcyjnej i analizuje, czy mają one wpływ na wyniki uzyskiwane podczas badania wytrzymałości połączeń lutowanych (rys. 10).



Rys. 10. Przykłady rejestrowanego poziomu dźwięku i drgań
Fig. 10. Examples of recorded sounds and vibrations

5. PODSUMOWANIE

Badania lutowanych połączeń nierozłącznych metodą analizy sygnałów wibroakustycznych umożliwiają sprawdzanie ich wytrzymałości mechanicznej bez konieczności niszczenia skraplacza. Pozwalają na skuteczną kontrolę skraplaczy po procesie technologicznym montażu, od którego zależy ich jakość finalna. Autorzy są przekonani, że wyposażenie urządzenia w zestaw dodatkowych mikrofonów zminimalizuje obszar poszukiwań źródeł ewentualnych wad wykonanych połączeń nierozłącznych. Dalsze ich badania mają się przyczynić do poprawy jakości wymienników ciepła oraz stosowanych metod badawczych.

LITERATURA

- [1] Katalog NISSENS, *Podstawy napraw i obsługi klimatyzacji samochodowych*, Poręczny Przewodnik.
- [2] ŁĘGIEWICZ J., 2009, *Temperatura*, *Auto Technika Motoryzacyjna*, 4, 18–27.
- [3] SHAHID I., 2013, *Design of air conditioning system in automobile*, *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 2/12, 7460–7464.
- [4] MOTOFOCUS.PL, <http://motofocus.pl>.
- [5] Norma PN-EN 12797:2002, *Lutowanie twarde. Badania niszczące złączy lutowanych na twardo*.
- [6] Norma PN-EN 12799:2003, *Lutowanie twarde. Badania nieniszczące złączy lutowanych na twardo*.
- [7] KIRPLUK M., 2011, *Podstawy akustyki*, NTL–M.Kirpluk.
- [8] MICKIEWICZ W., JABŁOŃSKI M., 2012, *Obrazowanie wartości skutecznej prędkości akustycznej na bazie pomiarów PIV*, PAK, 11, 930–933.
- [9] LIPSKI J., 2013, *Wibroakustyczne systemy diagnostyczne*, Diagnostyka procesów wytwarzania, Wyd. Politechniki Lubelskiej, 78–98.

ASSESSMENT OF INSEPARABLE JOINTS DURABILITY IN CAR CONDENSERS USING VIBROACOUSTIC SIGNALS ANALYSIS

Dissertation contains the most important exploitation properties of condensers used in air conditioning system. There is presented comparison of research methods used in automotive industry to quality assessment of inseparable joints, such as helium leak test, breaking strength test, micrographic and visual assessment. Particular attention was paid to the non-destructive method for testing the durability of inseparable joints, involving the vibroacoustic signals analysis and proposed solutions to improve possible defect joints detection.

Keywords: *quality, inseparable joints, heat exchanger, vibroacoustic*