

Piotr WOŹNY¹, Józef BŁACHNIO², Krzysztof DRAGAN²

¹ Military Aviation Works No. 2 (Wojskowe Zakłady Lotnicze Nr 2)

² Air Force Institute of Technology (Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych)

CORRELATION BETWEEN STRENGTH, HARDNESS AND THE SHARE OF WELDING IMPERFECTIONS IN AN AW 5754 ALUMINIUM ALLOY WELD EXECUTED WITH THE TIG METHOD

Korelacja pomiędzy wytrzymałością, twardością oraz udziałem niezgodności spawalniczych w spawie ze stopu aluminium AW 5754 wykonanego metodą TIG

Abstract: The article presents the impact of welding imperfections on the strength and microhardness of AW 5754 aluminium alloy welded joints executed with the TIG method. It presents the results of tomographic tests of welds. The results of strength and microhardness tests involving welds executed under various welding process parameters were shown. The impact of welding imperfections on the strength and microhardness of a welded joint was analysed. Based on analysing the relations between the r Pearson coefficient values and multiple correlation, significant relationships between strength, hardness and weld defects were evidenced. Furthermore, a very strong relation between the welding process parameters, welding imperfections, and weld strength and microhardness was shown.

Keywords: aluminium alloy, weld, welding imperfections, strength, microhardness

Streszczenie: W artykule przedstawiono wpływ niezgodności spawalniczych na wytrzymałość i mikrotwardość połączeń spawanych ze stopu aluminium AW 5754 wykonanych metodą TIG. Zaprezentowano wyniki badań tomograficznych spawów, badań wytrzymałościowych oraz mikrotwardości spawów wykonanych przy różnych parametrach procesu spawania. Dokonano analizy wpływu niezgodności spawalniczych na wytrzymałość oraz mikrotwardość połączenia spawanego. Wykazano istotne zależności pomiędzy wytrzymałością, twardością a niezgodnościami w spawach. Ponadto wykazano silny związek pomiędzy parametrami procesu spawania, niezgodnościami spawalniczymi, wytrzymałością i mikrotwardością spawów.
Słowa kluczowe: stop aluminium, spaw, niezgodności spawalnicze, wytrzymałość, mikrotwardość

1. Introduction

During operation of a machine, malfunctions and damage to elements executed with the use of a welding method, resulting from the impact of the external environment, ageing and wear processes [2, 3, 13] appear. Moreover, the weld imperfections arising as a result of incorrect selection of process parameters and execution errors associated with failure to comply with welding procedure requirements, contribute to their formation. The second very significant group of factors causing damage to the elements with welded joints includes mechanical and thermal loads of different value and nature [1, 11, 13]. They occur as both static and dynamic loads. A static load is constant or changes very slowly over time in terms of value, direction and point of application. Static forces induce strains caused by constant load of the structure. However, the dynamic loads are characterised by variable and sometimes rapid action of external or inertia forces generated as a result of mass acceleration [10, 12]. In order to ensure safe and reliable operation of welded structures, it is necessary to satisfy numerous process requirements. This led to conducting studies regarding the impact of microstructural imperfections of the EN AW 5754 aluminium alloy weld executed with the use of the TIG method TIG (tungsten inert gas, i.e. a method of welding with a non-consumable tungsten electrode shielded with inert gases) [6], on the weld microhardness.

2. Impact of welding imperfections on weld joint strength

Five sets of samples with the names of SPI to SPV, containing seven samples per set were adopted for tests. Welding technology parameters were changed in each set. After the welding process execution, the samples were tested for the participation of microstructural defects and welding imperfections. The tests were conducted with the use of computed tomography [1, 11]. Sample test results are shown in table 1, in the form of welding imperfection estimated area. Next, the samples were tested for static tensile strength.

The strength test results were used as a base to develop the functional dependencies of the limit tensile strength of the alloy R_m and the yield point of the alloy R_e on ΣP total area of imperfections in weld microstructure (figs. 1 and 2). The value of R_m and R_e parameters was adopted as a mean calculated for individual combinations of SPI÷SPV sample sets. The size of defect surfaces for individual welded joints was estimated based on tomograms [11]. The area of imperfections within a weld microstructure was adopted as the total imperfections for particular welds. The graph analysis constituted a base for finding a relationship between the strength parameters and the imperfections in the weld microstructure.

Table 1

Area of welding imperfections

TYPES OF IMPERFECTIONS IN INDIVIDUAL WELDS	SPI			SPII			SPIII			SPIV			SPV		
	Pr. 1	Pr. 2	Pr. 3	Pr. 1	Pr. 2	Pr. 3	Pr. 1	Pr. 2	Pr. 3	Pr. 1	Pr. 2	Pr. 3	Pr. 1	Pr. 2	Pr. 3
GAS CAVITY AREAS P [mm ²]															
SPHERICAL 1	0.3	---	0.3	0.3	---	---	0.13	0.3	---	0.3	0.8	0.5	0.1	0.3	---
LONGITUDINAL 2	---	---	---	---	---	---	---	---	0.12	---	---	0.1	---	---	---
TUBULAR 3	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
CAVITY CLUSTER 4	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
CAVITY CHAIN 5	---	---	---	---	---	---	0.5	---	---	---	---	---	---	---	---
SOLID INCLUSIONS 6	0.4	0.5	1.2	1	1	---	10	0.8	6	---	3.5	---	---	---	---
NO PENETRATION 7	80	5	---	90	90	60	15	---	15	---	15	---	---	---	---
Total area of imperfections ΣP [mm ²] in individual samples	80.7	5.5	1.5	91.3	91	60	25.6	1.1	21.1	0.3	19.3	0.6	0.1	0.3	0
Total area of imperfections ΣP [mm ²]	ΣP SPI 87.7			ΣP SPII 242.3			ΣP SPIII 47.8			ΣP SPIV 20.2			ΣP SPV 0.4		
Total weld volume ΣV [cm ³]	ΣV SPI 5.8			ΣV SPII 5.15			ΣV SPIII 6.29			ΣV SPIV 6.15			ΣV SPV 6.24		

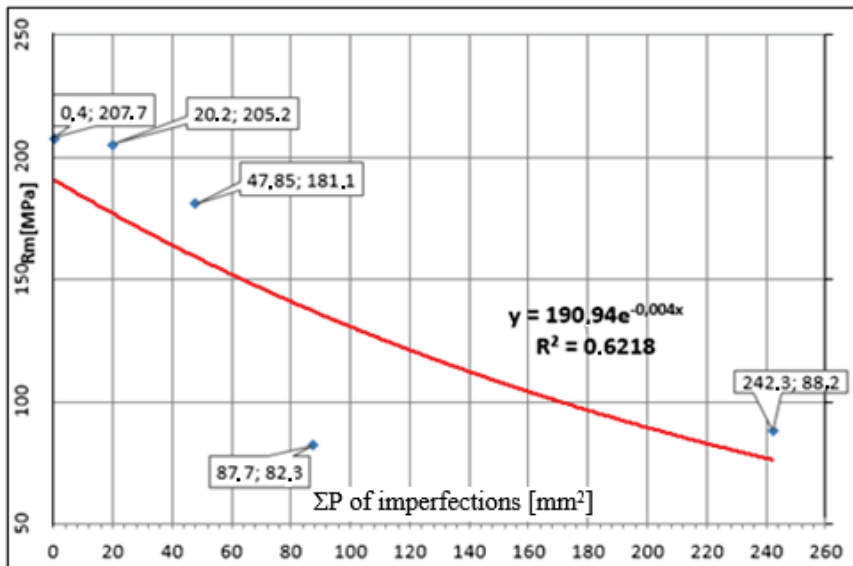


Fig. 1. Dependency of the Rm parameter on the total area ΣP of imperfections within a weld microstructure

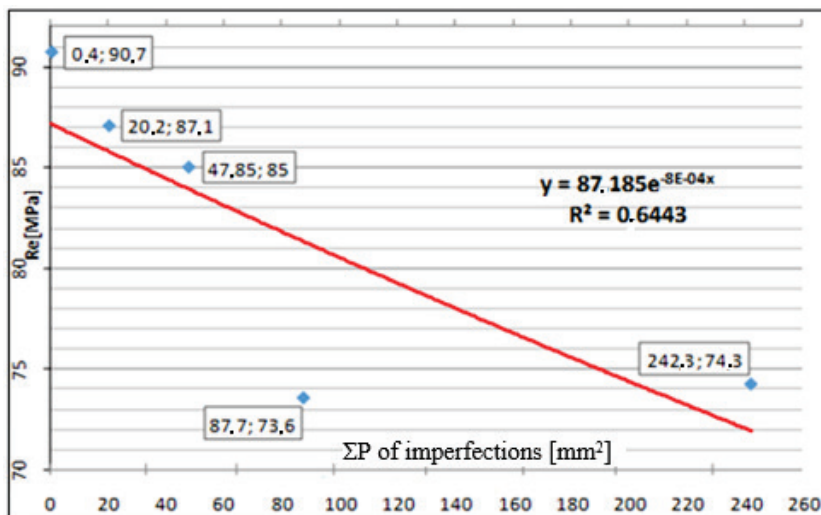


Fig. 2. Dependency of the Re parameter on the total ΣP area of imperfections in a weld microstructure

3. Impacts of welding imperfections on microhardness

Weld microhardness was measured using the Vickers method along paths 1, 2 and 3 (fig. 3). Diamond indenter load was used (in the shape of pyramid with an apex angle of 136°), with a force of 9.81N. The tests were conducted using five samples per each weld type. Based on the measurement results (fig. 3), it was concluded that the base material microhardness varied around $83.4 \div 88.5$ HV0.1. In the case of SPI - SPII weld sets, a slightly higher value of the HV0.1 parameter was demonstrated, whereas, in the heat-affected zone, the hardness values were slightly lower and similar to the base material in terms of parameters (fig. 4). Such slight differences may result from the application of the same grade of aluminium alloy both for the weld and for the base material, as well as insufficient input heat during welding. This result confirms lack of penetration in these joints.

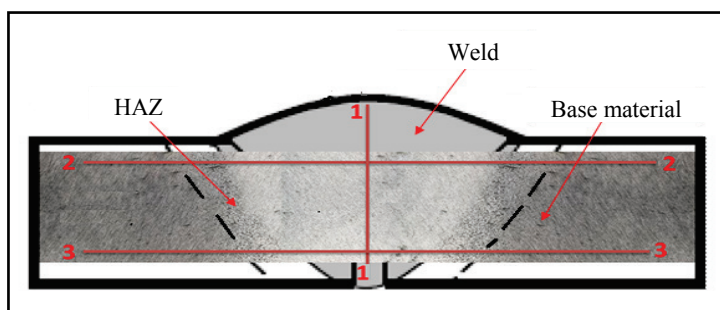


Fig. 3. Microhardness measurement paths of welded joints, HAZ – heat affected zone

Furthermore, it was found that the highest HV0.1 parameter value was exhibited by the weld, followed by the heat-affected zone, with the base material having the lowest value. The achievement of such an effect is associated with the use of another filler metal grade (AlMg5) than the base material, because the AlMg5 filler metal grade is characterised by higher strength parameters. A base material and filler metal (AlMg3 and AlMg5) mixture with intermediate strength properties for these alloys was formed in the penetration zone. Achieving full penetration for SPIII - SPV joints led to obtaining HV0.1 parameters within the heat-affected zone, which were lower than for the weld, and higher than for the base material. The latter is the result of fusion of two different aluminium alloys. In addition, the observed hardness increase in particular zones of joints for all tested welds, results from a decreasing number of welding imperfections owing to the changes introduced in the welding process.

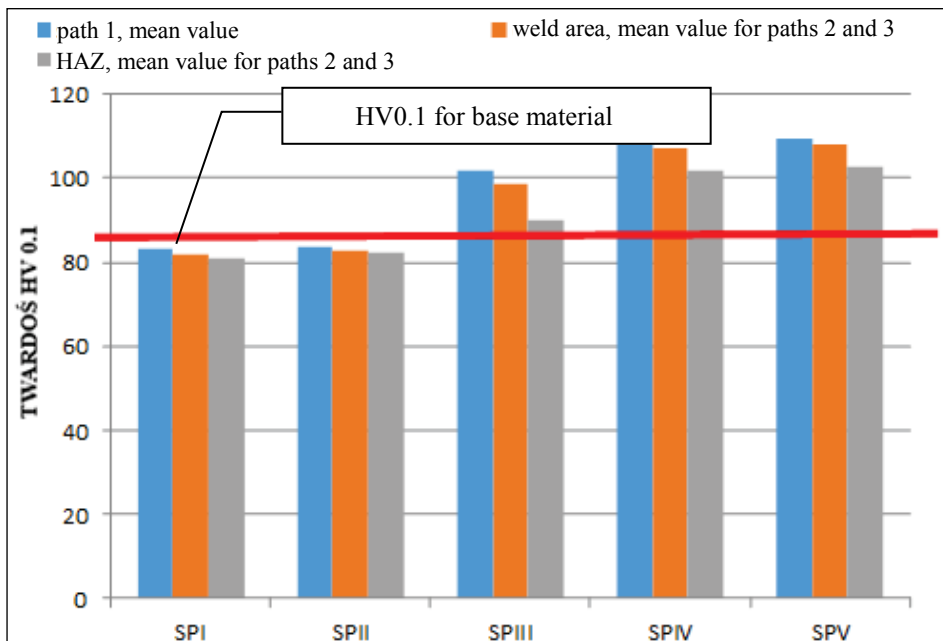


Fig. 4. Hardness distribution for the SPI-SPV welded joints in relation to the base material

Based on the measurement results, it was confirmed that the SPIII - SPV joints were characterised by the highest hardness value for the tested areas. No significant welding imperfections were observed in these weld joints. However, the SPI and SPII joints, in which several internal and external imperfections were identified, are characterised by the lowest hardness. The share of imperfections in the weld volume (fig. 5) was conducted in order to analyse the impact of imperfections on weld quality more thoroughly. The Un coefficient of imperfection share was adopted to evaluate the share of imperfection within a weld. As the value of this coefficient increases, the weld microhardness decreases (fig. 5).

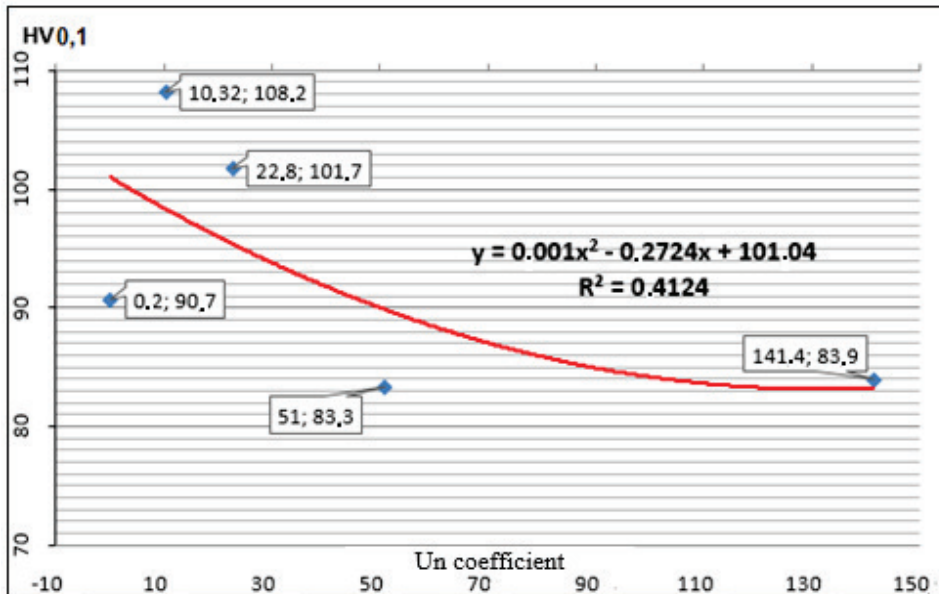


Fig. 5. Dependency of HV0.1 path 1 weld microhardness results on the Un coefficient

4. Correlation between strength parameters, hardness and imperfection share in a weld volume

In order to demonstrate the correlation between the strength parameters, microhardness and the share of imperfections in a weld volume, the r Pearson correlation coefficients were calculated. The formula of the Excel spreadsheet was used for this purpose [4]. The following set of variables was adopted: X_1 – HV0.1 (microhardness), X_2 – Rm – tensile strength and Re – yield stress, X_3 – Un (coefficient of imperfection share within a weld). Table 2 lists the values of variables for Rm and Re parameters, corresponding to individual welds from SPI to SPV.

The r_{ij} coefficients were calculated for the values of variables listed in tab. 2, for Rm:
 r_{12} – between variables 1 and 2 (X_1 and X_2) (HV and Rm) – 0.996801,
 r_{13} – between variables 1 and 3 (X_1 and X_3) (HV and Un) – (-0.81616),
 r_{23} – between variables 2 and 3 (X_2 and X_3) (Rm and Un) – (-0.84518).

Furthermore, the r_{ij} coefficients were calculated for the values of variables listed in tab. 2, for Re:

r_{12} – between variables 1 and 2 (X_1 and X_2) (HV and Re) – 0.984989,
 r_{13} – correlation between 1 and 3 (X_1 and X_3) (HV and Un) – (-0.81616),
 r_{23} – between variables 2 and 3 (X_2 and X_3) (Re and Un) – (-0.80286).

Table 2

Values of variables taking into account Rm and Re parameters

Joint No.	HV(X ₁)	Rm(X ₂)	Un(X ₃)	Re(X ₂)
SPI	83.3	88.2	51	73.6
SPII	83.9	82.3	141.4	74.3
SPIII	101.7	181.1	22.8	85.0
SPIV	108.2	205.2	10.23	86.4
SPV	109.3	207.7	0.2	90.7

The analysis of the r_{12} coefficient values both for Rm as well as Re, shows a full relationship between the HV microhardness of tested welds, and the Rm and Re strength parameters. A positive value of the r_{12} coefficient means that an increase of the HV0.1 microhardness is followed by an increase of mean Rm and Re values. Analysis of the r_{13} and r_{23} coefficients confirms a very high relationship (very strong correlation) between:

- HV0.1 weld microhardness and the Un coefficient (share of imperfections in a weld volume),
- Rm and Re strength parameters, and the Un coefficient.

A negative value of the r_{13} and r_{23} coefficients means that an increase of the HV0.1 and Rm and Re values is followed by a reduction of the mean Un coefficient values.

Next, based on the relationships (1) – (3) [11], the R_{ijk} multiple correlation coefficients were calculated.

- combined impact on the X₁ variable by the other two (X₂ and X₃)

$$R_{1.23} = \sqrt{\frac{r_{12}^2 + r_{13}^2 - 2 \cdot r_{12} \cdot r_{13} \cdot r_{23}}{(1 - r_{23}^2)}} \quad (1)$$

- combined impact on the X₂ variable by the other two (X₁ and X₃)

$$R_{2.13} = \sqrt{\frac{r_{12}^2 + r_{23}^2 - 2 \cdot r_{12} \cdot r_{13} \cdot r_{23}}{(1 - r_{13}^2)}} \quad (2)$$

- combined impact on the X₃ variable by the other two (X₁ and X₂)

$$R_{3.12} = \sqrt{\frac{r_{13}^2 + r_{23}^2 - 2 \cdot r_{12} \cdot r_{13} \cdot r_{23}}{(1 - r_{12}^2)}} \quad (3)$$

For the first set of variables - Rm, the following values were obtained:

$$R_{1.23} = 0.998016; R_{2.13} = 0.998302; R_{3.12} = 0.907026.$$

For the second set of variables - Rem, the following values were obtained:

$$R_{1.23} = 0.985907; R_{2.13} = 0.984991; R_{3.12} = 0.816187.$$

Analysis of the $R_{1.23}$ multiple correlation coefficient values shows a full relationship between weld microstructure, the Rm and Re strength parameters and the Un share of imperfections within a weld. The $R_{2.13}$ coefficient shows a full relationship between the Rm and Re strength parameters, and the HV0.1 weld microhardness as well as Un share of imperfection in a weld volume. Analysis of the $R_{3.12}$ correlation coefficient value shows a very high relationship (very strong correlation) between the Un share of imperfections within a weld, and the HV0.1 weld microstructure and the Rm and Re strength parameters.

5. Conclusions

Based on the tensile test results of TIG method welded joints, the impact of welding imperfections on the values of Rm and Re strength parameters of the joints was confirmed. Due to the highest strength and lowest presence of welding imperfections, confirmed by computed tomography, it should be stated that the parameters applied for the execution of SPIV and SPV welds enabled obtaining the best qualities of butt joints. Weld microhardness test results confirm the impact of welding imperfections on their value. The parameters used in order to execute the SPIII - SPV welds enabled obtaining the best quality butt joints. The highest negative share of welding imperfections was found in SP and SPII welds, which translated to lower microhardness values. Based on analysing the relations between the r Pearson coefficient values and multiple correlation, significant relationships between strength, hardness and weld imperfections was evidenced.

6. References

1. Błachnio J., Kułaszka A., Chalimoniuk M., Woźny P.: Exemplification of a computed tomography method for the evaluation of EN 5754 H22 alloy welded joint

- quality. Research Works of Air Force Institute of Technology, No. 39, 2016, DOI 10.1515/afit-2016-0018.
2. Czuchry J., B. Kupisz B.: *Badania złączy spawanych. Przegląd metod [Weld joint tests. Overview of methods]*, Krosno 2009.
 3. Ferenc K.: *Spawalnictwo [Welding]*, WNT, Warszawa 2007.
 4. Naukowiec.org, www.naukowiec.org/wzory/statystyka/korelacja-wieloraka_957.html
 5. PN-L-01426:1995 Aviation and aeronautics - Welding aerial structures – Inspection and acceptance guidelines for steel, heat-resistant alloys, high-temp creep resistant and aluminium alloys welded joints.
 6. PN-EN ISO 15614-2:2008 Specification and qualification of welding procedures for metallic materials - Welding procedure test - Part 2: Arc welding of aluminium and its alloys.
 7. PN-EN ISO 6892-1:2010- Metallic materials - Tensile testing - Part 1: Test method at room temperature.
 8. PN-EN ISO 10042:2008 Fusion welding - Fusion welded joints in aluminium and its alloys – Quality levels for welding imperfections
 9. PN-ISO 5817:2009 Fusion welding - Fusion welded joints in steel, nickel, titanium and their alloys (beam welding excluded) - Quality levels for welding imperfections.
 10. Woźny P., Błachnio J., Dragan K.: Welds' Quality of Aluminium Alloy Components of Military Aircraft Executed by Arc Welding Method. *Journal of KONBIN*, No. 44, 2017, DOI 10.1515/jok-2017-0076.
 11. Woźny P., Błachnio J., Kułaszka A., Chalimoniuk M.: Assessment of the technical condition of welds from Al alloy grade EN AN 5754 using the computed tomography method. *Aviation Advances & Maintenance*, Vol. 40, Iss. 2, 2017, DOI 10.1515/afit-2017-0012.
 12. Woźny P., Błachnio J.: Managing the influence of microstructure defects on the strength of EN AW 5754 aluminium alloy welded joints executed with the TIG method. 2018, DOI 10.1051/mateconf/201818202025.
 13. Woźny P., Błachnio J.: Analiza uszkodzeń eksploatacyjnych wielozadaniowego statku powietrznego na przykładzie procesu obsługi i napraw. In: *Problemy Badań i Eksploatacji Techniki Lotniczej [Analysis of operational damage to a multi-task aircraft based on the example of the maintenance and repair process. Chapter in a monograph titled: Issues of Aviation Technique Tests and Operation]*, T.9, 2016.

KORELACJA POMIĘDZY WYTRZYMAŁOŚCIĄ, TWARDOŚCIĄ ORAZ UDZIAŁEM NIEZGODNOŚCI SPAVALNICZYCH W SPAWIE ZE STOPU ALUMINIUM AW 5754 WYKONANEGO METODĄ TIG

1. Wprowadzenie

W trakcie eksploatacji maszyny pojawiają się niesprawności i uszkodzenia elementów wykonanych metodą spawania wynikające z wpływu środowiska zewnętrznego, procesów starzenia i zużywania [2, 3, 13]. Ponadto do ich powstania przyczyniają się niezgodności spoin powstające wskutek błędnego doboru parametrów procesu oraz błędów wykonawczych związanych z niezachowaniem wymogów technologii spawania. Drugą bardzo ważną grupą czynników powodujących uszkodzenia elementów zawierających połączenia spawane są obciążenia mechaniczne oraz cieplne o różnej wartości i charakterze [1, 11, 13]. Występują zarówno jako obciążenia statyczne, jak i dynamiczne. Obciążenie statyczne jest niezmiennie lub zmienia się bardzo powoli w czasie co do wartości, kierunku i punktu przyłożenia. Siły statyczne wywołują odkształcenia spowodowane stałym obciążeniem konstrukcji. Natomiast obciążenia dynamiczne charakteryzują się zmiennym, a niekiedy gwałtownym działaniem sił zewnętrznych lub bezwładnościowych, powstających wskutek przyspieszeń masy [10, 12]. W celu zapewnienia bezpiecznej i niezawodnej eksploatacji konstrukcji spawanych niezbędne jest spełnienie wielu wymogów technologicznych. W związku z tym przeprowadzono badania wpływu niezgodności mikrostruktury spawu ze stopu aluminium AW 5754 wykonanych metodą TIG (ang. *tungsten inert gas*, metoda spawania nietopliwą elektrodą wolframową w osłonie gazów obojętnych) [6] na wytrzymałość i mikrotwardość spoiny.

2. Wpływy niezgodności spawalniczych na wytrzymałość spawu

Do badań przyjęto pięć zestawów próbek o nazwach SPI do SPV zawierających po siedem próbek w zestawach. W każdym zestawie zmieniono parametry technologii spawania. Po spawaniu próbki poddano badaniom na obecność mikrostrukturalnych niezgodności spawalniczych. Badania realizowano metodą tomografii komputerowej [1,

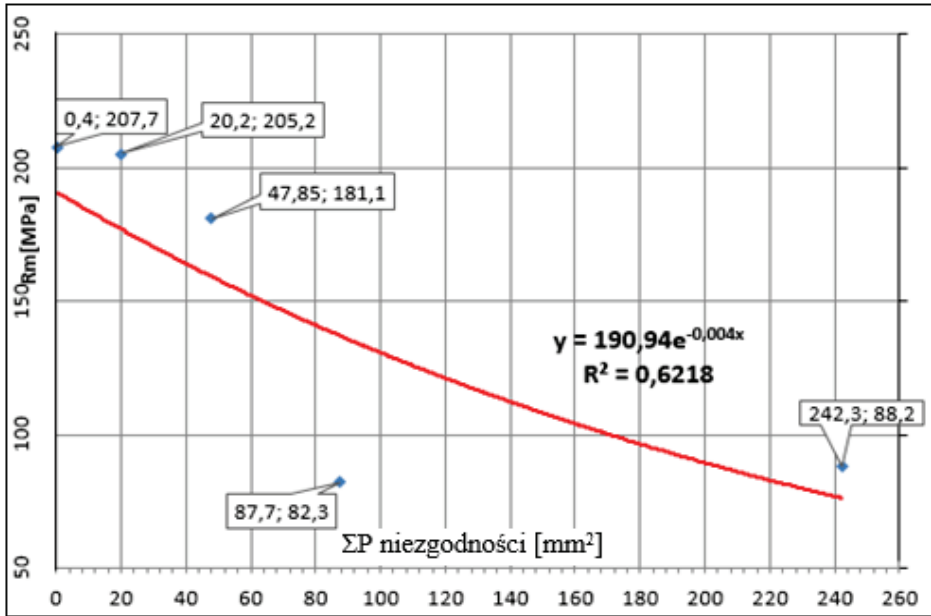
11]. Wyniki badań próbek w postaci oszacowanego pola powierzchni niezgodności spawalniczych przedstawiono w tab. 1. W następnej kolejności próbki poddano badaniom na wytrzymałość przy statycznym rozciąganiu.

Tabela 1

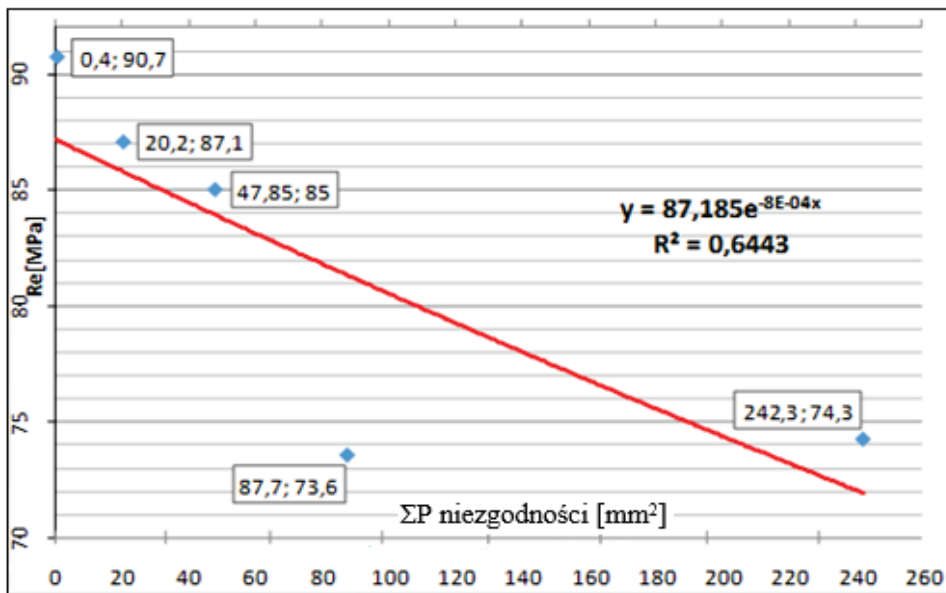
Pole powierzchni niezgodności spawalniczych

RODZAJE WAD W POSZCZEGÓLNYCH SPAWACH	SPI			SPII			SPIII			SPIV			SPV		
	Pr. 1	P. 2	Pr. 3	Pr. 1	Pr. 2	Pr. 3	Pr. 1	Pr. 2	Pr. 3	Pr. 1	Pr. 2	Pr. 3	Pr. 1	Pr. 2	Pr. 3
POWIERZCHNIE PĘCHERZY GAZOWYCH P [mm ²]															
KULISTE 1	0,3	---	0,3	0,3	---	---	0,13	0,3	---	0,3	0,8	0,5	0,1	0,3	---
PODŁUŻNE 2	---	---	---	---	---	---	---	---	0,12	---	---	0,1	---	---	---
KANALIKOWE 3	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
GNAZDO PĘCHERZY 4	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
ŁAŃCUCH PĘCHERZY 5	---	---	---	---	---	---	0,5	---	---	---	---	---	---	---	---
WTRACENIA STAŁE 6	0,4	0,5	1,2	1	1	---	10	0,8	6	---	3,5	---	---	---	---
BRAK PRZETOPU 7	80	5	---	90	90	60	15	---	15	---	15	---	---	---	---
Suma powierzchni niezgodności ΣP [mm ²] w pojedynczych próbkach	80,7	5,5	1,5	91,3	91	60	25,6	1,1	21,1	0,3	19,3	0,6	0,1	0,3	0
Suma powierzchni niezgodności ΣP [mm ²]	ΣP SPI 87,7			ΣP SPII 242,3			ΣP SPIII 47,8			ΣP SPIV 20,2			ΣP SPV 0,4		
Suma objętość spoin ΣV [cm ³]	ΣV SPI 5,8			ΣV SPII 5,15			ΣV SPIII 6,29			ΣV SPIV 6,15			ΣV SPV 6,24		

Na podstawie wyników badań wytrzymałościowych opracowano zależności funkcyjne granicy wytrzymałości na rozciąganie stopu R_m oraz granicy plastyczności stopu R_e od sumarycznej powierzchni ΣP niezgodności w mikrostrukturze spoin (rys. 1 i 2). Wartość parametrów R_m i R_e przyjęto jako wartość średnią obliczoną dla poszczególnych połączeń zestawów próbek SPI÷SPV. Wielkość powierzchni wad dla poszczególnych połączeń spawanych oszacowano na podstawie tomogramów [11]. Powierzchnia niezgodności w mikrostrukturze spoiny została przyjęta jako suma niezgodności dla poszczególnych spoin. Na podstawie analizy wykresów stwierdzono istnienie zależności pomiędzy parametrami wytrzymałościowymi a niezgodnościami w mikrostrukturze spoin.



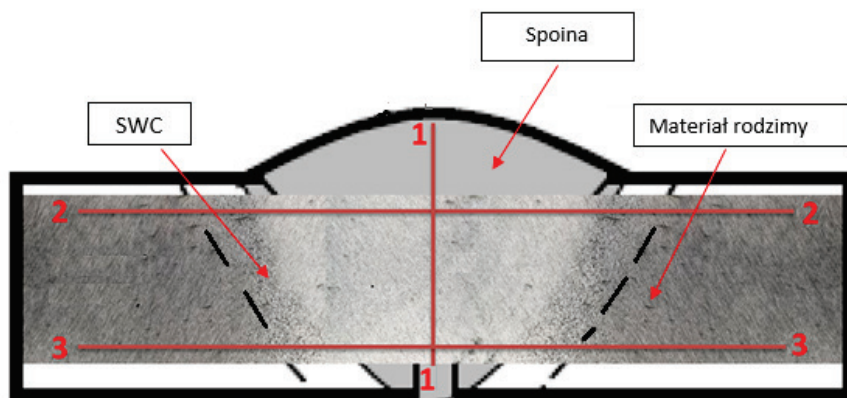
Rys. 1. Zależność parametru R_m od sumarycznej powierzchni ΣP niezgodności w mikrostrukturze spoiny



Rys. 2. Zależność parametru R_e od sumarycznej powierzchni ΣP niezgodności w mikrostrukturze spoiny

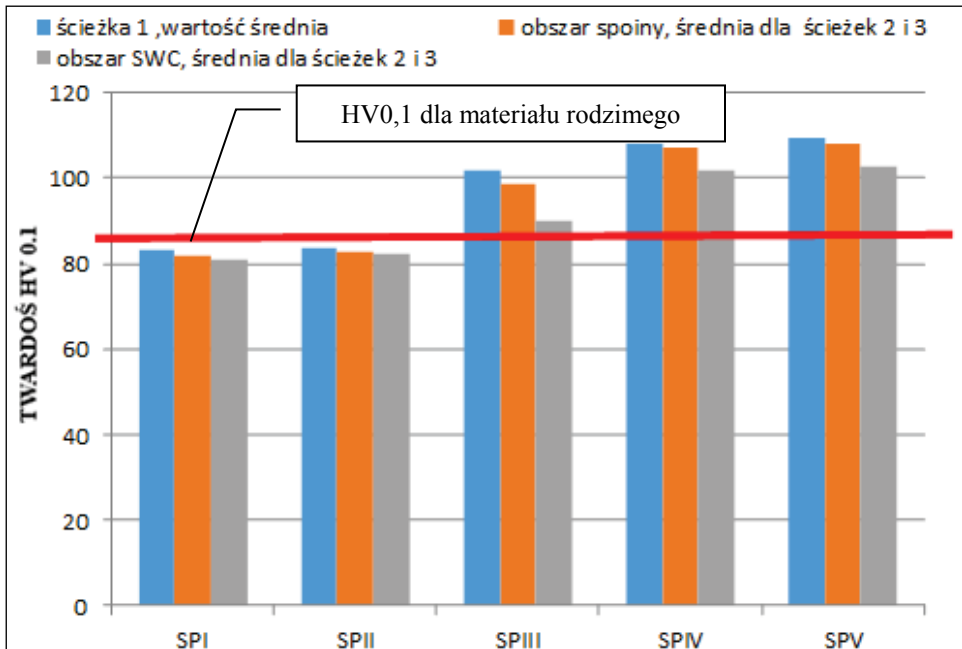
3. Wpływy niezgodności spawalniczych na mikrotwardość

Pomiary mikrotwardości spawów wykonano metodą Vickersa wzdłuż ścieżek 1, 2 i 3 (rys. 3). Stosowano obciążenie węgelnika diamentowego (w kształcie ostrosłupa o kącie wierzchołkowym 136°) siłą 9,81 N. Badania przeprowadzono, wykorzystując pięć próbek dla każdego rodzaju spawu. Na podstawie uśrednionych wyników pomiarów stwierdzono, że mikrotwardość materiału rodzimego oscyluje w granicach 83,4-88,5 HV0,1. W zestawach spawów SPI - SPII w obszarze spoin wykazano nieznacznie wyższą wartość parametru HV0,1 natomiast w strefie wpływu ciepła wartości mikrotwardości były nieznacznie niższe i zbliżone parametrami do materiału rodzimego (rys. 4). Tak niewielkie różnice mogą wynikać z zastosowania tego samego gatunku stopu aluminium zarówno dla spoiwa, jak i dla materiału rodzimego oraz za małej ilości dostarczonego ciepła podczas spawania. Wynik ten potwierdza brak przetopu w tych połączeniach.

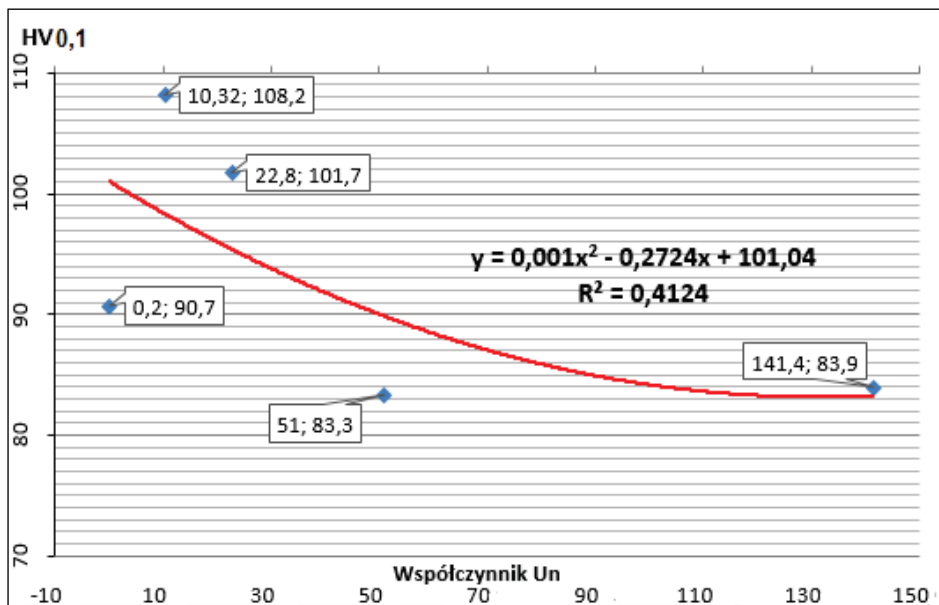


Rys. 3. Ścieżki pomiaru mikrotwardości złącza spawanego, SWC – strefa wpływu ciepła

Ponadto stwierdzono, że najwyższą wartością parametru HV0,1 charakteryzuje się spoina, następnie strefa wpływu ciepła, natomiast najniższą wartością materiał rodzimy. Uzyskanie takiego efektu jest związane z zastosowaniem innego gatunku spoiwa (AlMg5) niż materiał rodzimy, ponieważ gatunek spoiwa AlMg5 charakteryzuje się wyższymi parametrami wytrzymałościowymi. W strefie przetopu powstała mieszanina materiału rodzimego i spoiwa (AlMg3 i AlMg5) o właściwościach wytrzymałościowych pośrednich dla tych stopów. Uzyskanie pełnego przetopu dla połączeń SPIII - SPV spowodowało, że w strefie wpływu ciepła uzyskano parametry HV0,1 niższe niż spoina, a wyższe od materiału rodzimego. To ostatnie jest wynikiem przetopu dwóch różnych gatunków stopów aluminium. Ponadto zaobserwowany wzrost twardości w poszczególnych strefach połączeń dla wszystkich badanych spawów spowodowany jest zmniejszającą się ilością niezgodności spawalniczych na skutek wprowadzanych zmian w procesie spawania.



Rys. 4. Rozkład mikrotwardości dla połączeń spawanych SPI÷SPV w odniesieniu do materiału rodzimego



Rys. 5. Zależność wyników mikrotwardości spawu HV0,1 ścieżka 1 od wartości współczynnika Un

Na podstawie wyników pomiarów potwierdzono, że najwyższą wartością twardości dla badanych obszarów charakteryzują się połączenia SPIII – SPV (rys. 4). W połączeniach tych nie zaobserwowano istotnych niezgodności spawalniczych. Natomiast najniższą mikrotwardością charakteryzują się połączenia SPI i SPII, w których ujawniono szereg niezgodności wewnętrznych oraz zewnętrznych. W celu pogłębienia analizy wpływu niezgodności na jakość spoiny dokonano oceny udziału niezgodności w jej objętości (rys. 5). Do oceny udziału niezgodności w spoinie przyjęto współczynnik udziału niezgodności U_n . W zależności od zwiększania się wartości tego współczynnika następuje zmniejszanie się mikrotwardości spoiny.

4. Korelacja pomiędzy parametrami wytrzymałości, twardością oraz udziałem niezgodności w objętości spawu

W celu wykazania korelacji pomiędzy parametrami wytrzymałościowymi, mikrotwardością oraz udziałem niezgodności w objętości spoiny obliczono współczynniki korelacji r Pearsona. W tym celu wykorzystano formułę zawartą w arkuszu kalkulacyjnym Excel [11]. Przyjęto następujący zestaw zmiennych: X_1 – HV0,1 (mikrotwardość), X_2 – R_m – wytrzymałość na rozciąganie oraz Re – granica plastyczności, X_3 – U_n (współczynnik udziału niezgodności w spoinie). W tab. 2 zestawiono wartości zmiennych dla parametrów R_m i Re odpowiadające poszczególnym spawom od SPI do SPV.

Dla wartości zmiennych zawartych w tabeli 2 obliczono współczynniki korelacji r_{ij} dla R_m :
 r_{12} – pomiędzy zmiennymi 1 i 2 (X_1 i X_2) (HV i R_m) – wartość 0,996801,
 r_{13} – pomiędzy zmiennymi 1 i 3 (X_1 i X_3) (HV i U_n) – wartość (-0,81616),
 r_{23} – pomiędzy zmiennymi 2 i 3 (X_2 i X_3) (R_m i U_n) – wartość (-0,84518).

Ponadto dla zestawu zmiennych zawartych w tab. 2 obliczono współczynniki korelacji r_{ij} dla Re :

r_{12} – pomiędzy zmiennymi 1 i 2 (X_1 i X_2) (HV i Re) – wartość 0,984989,
 r_{13} – korelacji pomiędzy zmiennymi 1 i 3 (X_1 i X_3) (HV i U_n) – wartość (-0,81616),
 r_{23} – pomiędzy zmiennymi 2 i 3 (X_2 i X_3) (Re i U_n) – wartość (-0,80286).

Tabela 2

Wartości zmiennych z uwzględnieniem parametrów R_m oraz Re

Nr połączenia	HV(X_1)	R_m (X_2)	U_n (X_3)	Re (X_2)
SPI	83,3	88,2	51	73,6
SPII	83,9	82,3	141,4	74,3
SPIII	101,7	181,1	22,8	85,0
SPIV	108,2	205,2	10,23	86,4
SPV	109,3	207,7	0,2	90,7

Z analizy otrzymanej wartości współczynnika r_{12} , tak w przypadku dla Rm, jak i dla Re wynika pełna zależność pomiędzy mikrotwardością badanych spoin HV a parametrami wytrzymałościowymi Rm i Re. Wartość dodatnia współczynnika r_{12} oznacza, że wzrostowi mikrotwardości HV0,1 towarzyszy wzrost średnich wartości Rm i Re. Analiza współczynników r_{13} i r_{23} potwierdza bardzo dużą zależność (korelacja bardzo wysoka) pomiędzy:

- mikrotwardością spoin HV0,1 a współczynnikiem Un (udział niezgodności w objętości spoiny),
- parametrami wytrzymałościowymi Rm i Re a współczynnikiem Un.

Wartość ujemna współczynników r_{13} i r_{23} oznacza, że wzrostowi wartości HV0,1 oraz Rm i Re towarzyszy spadek średnich wartości współczynnika Un.

Następnie na podstawie zależności (1) – (3) [4] dokonano obliczeń współczynników korelacji wielorakiej R_{ijk} .

- łączny wpływ na zmienną X_1 dwóch pozostałych zmiennych (X_2 i X_3)

$$R_{1.23} = \sqrt{\frac{r_{12}^2 + r_{13}^2 - 2 \cdot r_{12} \cdot r_{13} \cdot r_{23}}{(1 - r_{23}^2)}} \quad (1)$$

- łączny wpływ na zmienną X_2 dwóch pozostałych (X_1 i X_3)

$$R_{2.13} = \sqrt{\frac{r_{12}^2 + r_{23}^2 - 2 \cdot r_{12} \cdot r_{13} \cdot r_{23}}{(1 - r_{13}^2)}} \quad (2)$$

- łączny wpływ na zmienną X_3 dwóch pozostałych (X_1 i X_2)

$$R_{3.12} = \sqrt{\frac{r_{13}^2 + r_{23}^2 - 2 \cdot r_{12} \cdot r_{13} \cdot r_{23}}{(1 - r_{12}^2)}} \quad (3)$$

Dla pierwszego zestawu zmiennych - Rm otrzymano następujące wartości:

$$R_{1.23} = 0,998016; R_{2.13} = 0,998302; R_{3.12} = 0,907026.$$

Dla drugiego zestawu zmiennych - Re otrzymano następujące wartości:

$$R_{1.23} = 0,985907; R_{2.13} = 0,984991; R_{3.12} = 0,816187.$$

Analiza wartości współczynników korelacji wielorakiej R1.23 wykazuje pełną zależność pomiędzy mikrotwardością spoiny a parametrami wytrzymałościowymi Rm i Re oraz udziałem niezgodności w spoinie Un. Współczynnik R2.13 świadczy o pełnej zależności pomiędzy parametrami wytrzymałościowymi Rm i Re a mikrotwardością spoiny HV0,1 i udziałem niezgodności Un w objętości spoiny. Analiza wartości współczynnika korelacji R3.12 wykazuje bardzo dużą zależność (korelacja bardzo wysoka) pomiędzy udziałem niezgodności w objętości spoiny Un a mikrotwardością spoiny HV0,1 oraz parametrami wytrzymałościowymi Rm i Re.

5. Wnioski

Na podstawie wyników prób rozciągania złączy spawanych metodą TIG potwierdzono istotny wpływ niezgodności spawalniczych na wartość parametrów wytrzymałościowych Rm oraz Re połączeń. Ze względu na najwyższą wytrzymałość i najmniejszy potwierdzony badaniem tomograficznym udział niezgodności spawalniczych należy stwierdzić, że parametry stosowane do wykonania spoin SPIV i SPV pozwoliły na uzyskanie spawów o największej wytrzymałości. Wyniki badań mikrotwardości spoin również potwierdzają wpływ niezgodności spawalniczych na ich wartość. Parametry zastosowane do wykonania spoin SPIII - SPV pozwoliły na uzyskanie najlepszych jakościowo złączy doczołowych. Największy negatywny udział niezgodności spawalniczych stwierdzono w spoinach SPI oraz SPII, co przełożyło się na niższą wartość mikrotwardości. Na podstawie analizy relacji wartości współczynników r Pearsona oraz korelacji wielorakiej wykazano istotne zależności pomiędzy wytrzymałością, twardością a niezgodnościami w spoinach.

6. Literatura

1. Błachnio J., Kułaszka A., Chalimoniuk M., Woźny P.: Exemplification of a computed tomography method for the evaluation of EN 5754 H22 alloy welded joint quality [Egzemplifikacja tomograficznej metody do oceny jakości połączeń spawanych ze stopu EN 5754 H22]. Research Works of Air Force Institute of Technology, No. 39, 2016, DOI 10.1515/afit-2016-0018.
2. Czuchryj J., B. Kupisz B.: Badania złączy spawanych. Przegląd metod [Weld joint tests. Overview of methods], Krosno 2009.
3. Ferenc K.: Spawalnictwo [Welding], WNT, Warszawa 2007.
4. Naukowiec.org, www.naukowiec.org/wzory/statystyka/korelacja-wieloraka_957.html
5. PN-L-01426:1995 Aviation and aeronautics - Welding aerial structures – Inspection and acceptance guidelines for steel, heat-resistant alloys, high-temp creep resistant and aluminium alloys welded joints.

6. PN-EN ISO 15614-2:2008 Specification and qualification of welding procedures for metallic materials - Welding procedure test - Part 2: Arc welding of aluminium and its alloys.
7. PN-EN ISO 6892-1:2010- Metallic materials - Tensile testing - Part 1: Test method at room temperature.
8. PN-EN ISO 10042:2008 Fusion welding - Fusion welded joints in aluminium and its alloys – Quality levels for welding imperfections
9. PN-ISO 5817:2009 Fusion welding - Fusion welded joints in steel, nickel, titanium and their alloys (beam welding excluded) - Quality levels for welding imperfections.
10. Woźny P., Błachnio J., Dragan K.: Welds' Quality of Aluminium Alloy Components of Military Aircraft Executed by Arc Welding Method. *Journal of KONBIN*, No. 44, 2017, DOI 10.1515/jok-2017-0076.
11. Woźny P., Błachnio J., Kułaszka A., Chalimoniuk M.: Assessment of the technical condition of welds from Al alloy grade EN AN 5754 using the computed tomography method [Ocena stanu technicznego spawów w próbkach ze stopu Al gatunku EN AN 5754 metodą tomografii komputerowej]. *Aviation Advances & Maintenance*, Vol. 40, Iss. 2, 2017, DOI 10.1515/afit-2017-0012.
12. Woźny P., Błachnio J.: Managing the influence of microstructure defects on the strength of EN AW 5754 aluminium alloy welded joints executed with the TIG method. 2018, DOI 10.1051/mateconf/201818202025.
13. Woźny P., Błachnio J.: Analiza uszkodzeń eksploatacyjnych wielozadaniowego statku powietrznego na przykładzie procesu obsługi i napraw. W: *Problemy Badań i Eksploatacji Techniki Lotniczej*, T.9, 2016.