

Wojciech WIĘCKOWSKI

Rafał BUREK

Piotr LACKI

Waldemar ŁOGIN

ANALYSIS OF WEAR OF TOOLS MADE OF 1.2344 STEEL AND MP159 ALLOY IN THE PROCESS OF FRICTION STIR WELDING (FSW) OF 7075 T6 ALUMINIUM ALLOY SHEET METAL

ANALIZA PROCESU ZUŻYCIA NARZĘDZI WYKONANYCH ZE STALI 1.2344 ORAZ STOPU MP159 W PROCESIE ZGRZEWANIA TARCIOWEGO Z PRZEMIESZANIEM (FSW) BLACH ZE STOPU ALUMINIUM 7075 T6*

The study presents an analysis of wear of tools made of 1.2344 steel and MP159 alloy for the process of obtaining an overlap joint in 1.0 mm and 0.8 mm sheet metal made of 7075 T6 aluminum alloy using friction stir welding (FSW) technology. Tool geometry was designed at the Czestochowa University of Technology. Evaluation of tool wear was conducted based on the measurements of geometry of working area of tools by means of a multisensory meter system and based on the assessment of the working area by means of a stereoscope after individual stages of wear tests. Furthermore, based on the results of a static tensile strength test and metallographic examinations of the specimens sampled from the joints obtained during tool wear tests, the effect of the degree of tool wear on joint quality was also evaluated. Analysis of the results revealed that both the tool made of 1.2344 steel and that made of MP159 alloy were substantially worn, increasing the risk of further use of the tools for the joint material (7075-T6) after obtaining the joint with length of 200m, which suggests their low durability. Furthermore, modification of tool geometry caused by wear led to insignificant improvements in joint strength. Therefore, the results of wear measurement set directions for further modification of tool geometry, also due to the fact that despite a substantial wear, the tools continued to yield high-quality joints without defects. As demonstrated in the study, the type of tool material does not only impact on tool life but also, as it was the case in their geometry, has a significant effect on the quality of obtained joints. Although the tool made of MP159 alloy was worn more than the tool made of 1.2344 steel, it allowed for obtaining the joints with substantially better strength parameters.

Keywords: wear of tools, friction stir welding, FSW, Al 7075 T6 alloy.

W pracy przedstawiono analizę procesu zużycia narzędzi wykonanych ze stali 1.2344 oraz stopu MP159 w procesie wykonywania złączy zakładkowych z blach ze stopu aluminium 7075 T6 o grubości 1,0mm i 0,8mm technologią zgrzewania tarcioowego z przemieszaniem materiału (FSW). Geometrię narzędzi użytych do badań opracowano na Politechnice Częstochowskiej. Ocena zużycia narzędzi przeprowadzono w oparciu o pomiary geometrii części roboczej narzędzi na maszynie multisensorycznej oraz na podstawie oględzin powierzchni roboczej przy użyciu stereoskopu po kolejnych etapach badań zużycia narzędzia. Dodatkowo, w oparciu o wyniki statycznej próby rozciągania oraz badania metalograficzne próbek pobranych ze złączy wykonywanych w trakcie badań zużycia narzędzi, przeprowadzono ocenę wpływu stopnia zużycia narzędzi na jakość wykonanych złączy. Na podstawie analizy wyników można stwierdzić, że zarówno narzędzie wykonane ze stali 1.2344 oraz ze stopu MP159 ulegają intensywnemu, zagrażającemu ich dalszej eksploatacji zużyciu, we współpracy z materiałem zgrzeiny (7075-T6) już po wykonaniu złącza o długości 200m, co świadczy o ich niskiej trwałości. Przy czym zmiany geometrii narzędzia spowodowane zużyciem pozwoliły na nieznaczną poprawę wytrzymałości złączy. Uzyskane wyniki pomiarów zużycia wyznaczają zatem kierunek w procesie dalszej modyfikacji geometrii badanych narzędzi, również z uwagi na fakt, iż pomimo znaczącego zużycia badanych narzędzi, pozwalały one w dalszym ciągu uzyskać dobre jakościowo złącza pozbawione wad. Jak wykazały badania, rodzaj materiału narzędzia wpływa nie tylko na trwałość narzędzi ale również, jak ma to miejsce w przypadku ich geometrii, ma on istotny wpływ na jakość uzyskanych połączeń. Pomimo tego, że narzędzie wykonane ze stopu MP159 uległo większemu zużyciu w porównaniu z narzędziem ze stali 1.2344, to pozwoliło ono uzyskać złącza o znacznie lepszych parametrach wytrzymałościowych.

Słowa kluczowe: zużycie narzędzi, zgrzewanie tarcioowe z przemieszaniem, FSW, stop Al 7075 T6.

1. Introduction

Friction stir welding (FSW) technology was developed in the early nineties of the 20th century in the Welding Institute in the UK. An advantage of the method is that the joints are without defects, with good mechanical and structural properties. Consequently, the FSW

technology started to be used on an industrial scale in the arms, aircraft and shipbuilding industries to join components of containers, decks, wings, shell plating etc. [1].

Friction stir welding (FSW) has been substantially popular in joining aluminium, its alloys and other soft metals. However, using

(*) Tekst artykułu w polskiej wersji językowej dostępny w elektronicznym wydaniu kwartalnika na stronie www.ein.org.pl

the FSW technology for joining hard metals represents an exceptional challenge due to the poor availability of tool materials that are capable of withstanding the welding process conditions, while its commercial use is limited by high costs and short life of the tools [1, 15, 16, 20, 21].

An important role in the FSW process is played by the tool. Along with process parameters, the tool is responsible for heating and mixing the material, which translates into the size of the joint zones and impacts on joint quality and properties [18].

During welding, FSW tools are exposed to wearing processes depending on interactions between the processed material, tool material, tool geometry and welding parameters. Tool wear, which is reflected by the change in geometry and caused by mechanical and thermal load to the working surface of the tool, may result from abrasion, plastic deformation, oxidation, adhesion, chipping etc. This can be prevented by using appropriately selected process parameters, right material and anti-adhesive and anti-wear coatings. Manifested by the change in the tool shape, excessive wear elevates the risk of defects and deteriorates joint quality. Particles of the tool material or a coating that remain in the joint material have an unfavourable effect on joint properties, are unacceptable and might promote formation of local corrosion cells [3, 6, 11, 15, 19, 24].

Due to the effect of high temperature and stress caused by friction and surface pressure, tools are exposed to thermal and mechanical fatigue, leading to accelerated wear. Examinations of the use of FSW tools showed that compared to the tool shoulder, elevated wear and deformation of the tool pin is observed, and tool damage occurs almost each time due to the pin damage [19].

Studies [9, 17] presented the results of examinations of 6000 aluminium alloy joints obtained using a tool made of SW7M (HS6-5-2) high-speed wolfram-molybdenum steel. It was demonstrated that with a relatively large range of process parameters, one can achieve the expected quality of joints in terms of strength and structure of the joint.

An important component of FSW tool degradation is its plastic deformation, being the most noticeable component of changes in tool geometry. Deformation leads to substantial changes in geometrical dimensions of the working part of the tool, such as length and diameter and substantial structural change in tool material. Understanding the microstructural changes that occur during welding a joint helps identify the mechanism and explain causes of tool degradation. The authors of the study [22] presented results of the examinations of wear for FSW tools made of wolfram alloys, including wolfram with rhenium, where changes in tool geometry and material microstructure that occurred during FSW welding of titanium and steel were evaluated.

The study [12] examined wear of the tool made of WC-Co material conducted for various configurations of process parameters (rotational tool speed, welding speed etc.). A tool wear index was used to evaluate tool wear quantitatively by determination of percentage changes in geometrical values of the tool compared to joint length and other process parameters. According to the authors, maximal intensity of tool wear was always observed in the initial phase of welding, whereas wear intensity reduced with the increase in joint length, with the decisive impact on wear observed for the welding velocity.

Furthermore, the authors argue [24] that excessive wear leads to changes in tool shape, thus increasing the likelihood of defects and deterioration of joint quality. Mechanisms of wear depend on interactions between the welded piece and tool material, selected tool geometry, and welding parameters. In the case of tools made of PCBN, wear at low rotational speeds of the tool is mainly caused by adhesive wear, whereas wear at high speeds results from friction wear.

The choice of the material and tool geometry is therefore an important element at the stage of planning of the process of joining materials using the FSW technology, because tool material properties determine the scope of its use for selected types of joined materials and parameters of the welding process.

The usefulness of the material for tool is mainly determined by its hardness, which should be higher than hardness of material welded under conditions typical of the process. High compression strength is also required due to the pressure on the working tool surface, and high impact and fatigue strength. Materials used in FSW tools should be characterized by resistance to abrasive, adhesive, diffusive and chemical wear. Additionally, good thermal properties are needed in the processes where substantial amount of heat is generated from tool material. An important characteristic of tool materials that determines process economy is their price [10].

Materials which are most often used for FSW tools for joining aluminium alloys are tool steels and nickel- and cobalt-based alloys [24].

High-speed alloy steels and hot work steels have been used for FSW tools for joining aluminium alloys due to their availability, easiness of processing, acceptable resistance to thermal fatigue, resistance to wear and low production costs [4,13,14]. Tool steels have been also popular for FSW tools in the process of welding of magnesium, copper and aluminium matrix composites (AMCs), for which accelerated tool wear have been observed. They can be also used for joining two different materials (e.g. copper with brass), both in overlap joints and butt joints [2, 5, 7, 8, 9, 19, 23, 24].

The material which was used to obtain FSW tools in the process of aluminium welding was cobalt-based alloy (**MP159**) with very high strength and ductility at temperature of 590 - 650°C and high resistance to corrosion and fatigue. These alloys have been also used for FSW tools for welding of Cu and Al-MMC composite materials [24].

Suitable combination of the tool material with the material of joined components and optimization of the tool shape allows for a substantial minimization of its wear, which ensures adequate tool life. Therefore, obtaining adequate quality of joints while maintaining low costs of the FSW process requires examinations of specific tool materials and design of new tools.

2. Aim and Scope of the Study

Examinations were aimed to identify a wear trend in FSW tools designed based on the geometry of the tool developed at the Czestochowa University of Technology and to gain experiences in the field of methodology of wear testing at specific parameters of the FSW technology for the selected grades and parameters of the material welded.

Two tools were used in the study, made of hot work steel (1.2344) and MP159 alloy in the Medical Devices Factory CHIRMED in Rudniki, Poland (Fig. 1). Tools have a flat shoulder and pin in the form of a truncated cone with smooth surface.

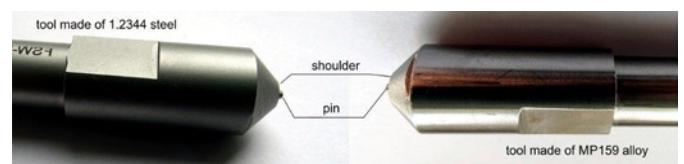


Fig. 1. FSW tools used in wear testing

During the wear tests, the overlap joints with the length of 325 mm were welded on the sheet metal with the length of 356 mm made of double-cladded aluminium alloy 7075-T6. Sheet metal thickness for the joint was 1 mm for the top sheet metal and 0.8 mm for the bottom sheet metal, see Fig. 2.

Based on the previous experimental examinations, the following parameters of welding process were determined: the tool rotational speed $n = 1,000$ rpm, tool feed $v_3 = 200$ mm/min, and the depth = 1.2 mm. Joints were welded using a DMC 104V machine in PZL Mielec.

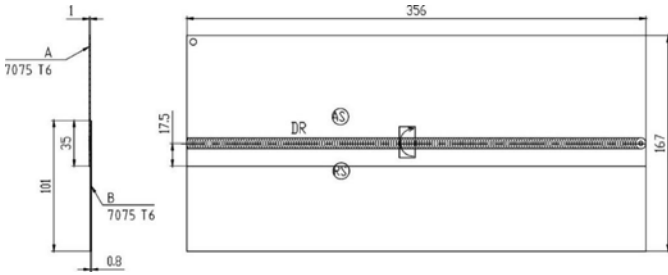


Fig. 2. The test joint welded during the FSW tool wear test

After each research stage where joints with total length of ~100 m were welded, the tool was cleaned and then the contour of the working part was measured. Furthermore, in order to evaluate the effect of tool wear on joint quality, each time after ~20 m of the joint was welded, four samples for tensile strength tests (1÷4) and three samples for metallographic tests were cut out from the test joints (5÷7). The example of a test overlap joint (1.0 7075-T6 + 0.8 7075-T6) welded during tool wear test was presented in Fig. 3.

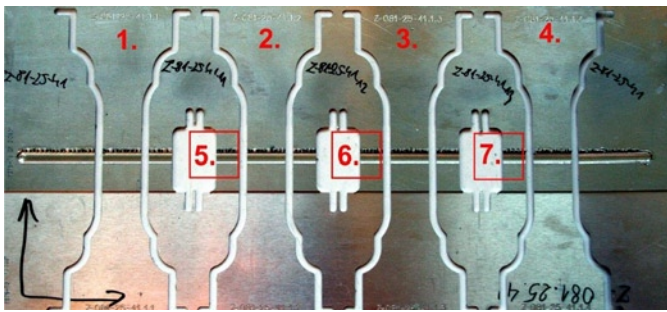


Fig. 3. Example of an FSW test joint with sample cut out for strength tests and metallographic examinations

Measurements of the geometry of the working part of the tool was made using the OGP Smart Scope FLASH 200 multisensory meter system, whereas wear of the FSW tools was evaluated based on comparisons of the contour of a new tool with the contour of the tool for which the wear was measured after individual research cycles.

In order to evaluate tool wear, absolute changes in selected geometrical values were determined with respect to the joint length (individual stages of research). As shown in the measurement design in Fig. 4, changes in the pin diameter d_p at pin heights of 0.2mm, 0.4mm, 0.6mm, 0.8mm and 1.0 mm, measured perpendicularly to the tool axis (radial wear) and changes in pin height h_p and shoulder height h_s measured in the direction of the tool axis were evaluated with respect to the adopted measurement basis.

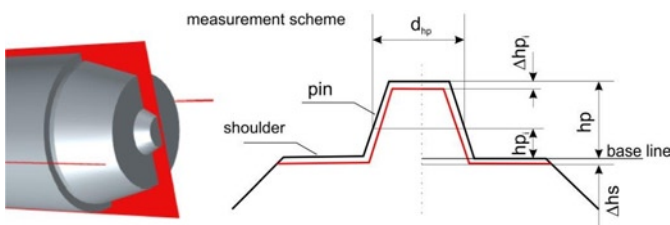


Fig. 4. Diagram of the measurements of changes in the working part contour in FSW tools

Visual inspection of the state of the working tool surface was made after completion of each cycle of tool work, based on the prepared photographic documentation from the stereoscopic examinations.

3. Results of the FSW tool wear tests

Figure 5 presents the results of measurements of the geometry of a new FSW tool made of 1.2344 steel and measurements performed after each operation (welding a joint for the expected length). The bar chart was used to present the values of absolute wear on the working surface of the tool, measured at individual research stages. Tool wear examinations were completed after obtaining the joint with total length of 202.150 m (after the 2nd research stage) due to the substantial wear of the tool working surface.

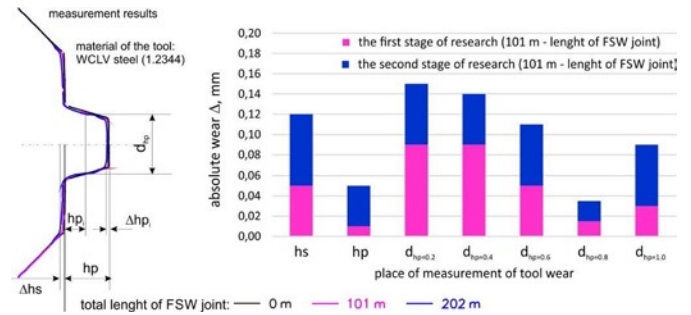


Fig. 5. The results of the wear of the FSW tool made of hot work steel (1.2344) after individual stages of wear tests

Intensive and varied wear over the entire working surface of the tool was observed during the FSW tool wear tests (1.2344), leading to changes in its shape.

Furthermore, gradual and varied wear of the lateral side of the pin was found after individual research stages. The highest radial wear of the pin occurred at the height of 0.2-0.4 mm, with wear intensity in this area greater in the first research stage and then decreasing. A substantial radial wear was also reported on the lateral surface of the pin at the height of 1.0-1.2 mm (along the edge of the front surface of the pin). Both in this case and for the front surface of the pin and shoulder, wear intensity increased during the research.

Photographic documentation of the visual inspection of the working surface of the tool made of 1.2344 steel and after completion of two consecutive stages of wear tests is presented in Fig. 6.

After the first stage of the research, noticeable marks of intensive tribological wear were observed on the working surface of the tool (both pin and shoulder). During the next research stage, a progressing increase in wear of lateral surface of the pin was observed, reflected by the change in its shape, and marks of the progressing wear on the front surfaces of the pin and shoulder, with substantial tool material depletion and numerous depressions, grooves and peripheral scratches.

The results of the measurements of working surface contour of the FSW tool made of MP159 alloy are presented in Fig. 7. Due to the substantial wear of the working surface of the tool, leading to the high risk of sudden damage at the following stages, the wear tests were terminated after the 2nd stage as it was the case for the tool made of 1.2344 steel.

The obtained results of tool measurements indicated gradual and substantially varied wear on the lateral surface of the pin. The highest radial wear was observed on the lateral surface of the pin at the height ranges of 0.2-0.4 mm and 1.0-1.2 mm. The lowest wear was observed for the lateral surface of the pin at the height of 0.8mm and the front surface of the pin. The increase in intensity of wear is noticeable on the entire working surface of the tool at the second stage of the examinations, with the only exception being the front surface of the pin, where its decline was observed.

Results of the measurements of tool wear were confirmed by the visual evaluation of the condition of the tool working surface conducted after completion of each cycle of wear tests. The appearance of the working surface of the new FSW tool made of MP159 alloy and

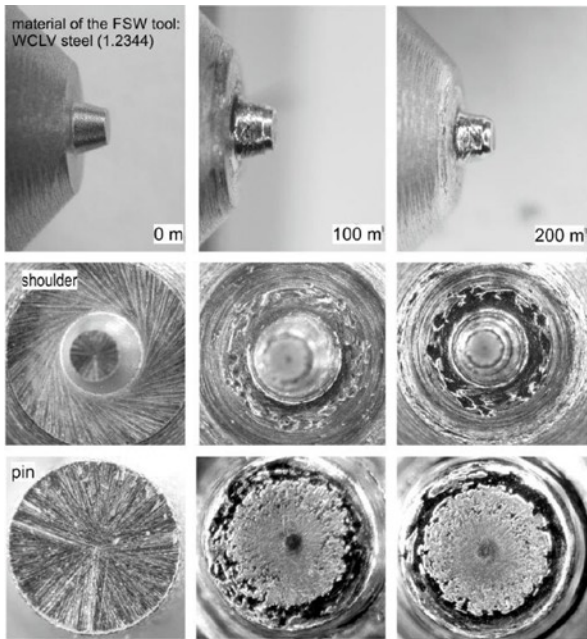


Fig. 6. Visual inspection of the working surface of the FSW tool made of 1.2344 steel following individual stages of wear tests

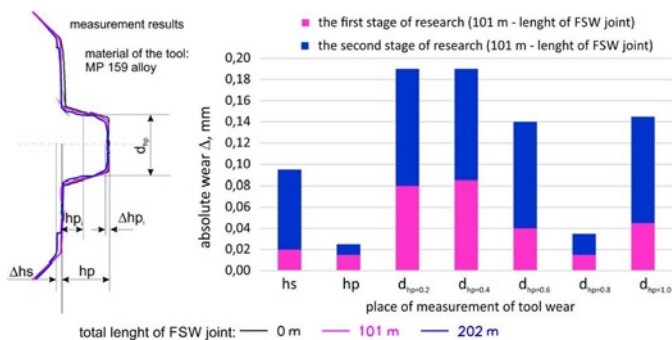


Fig. 7. The results of the wear of the FSW tool made of MP159 alloy after individual stages of wear tests

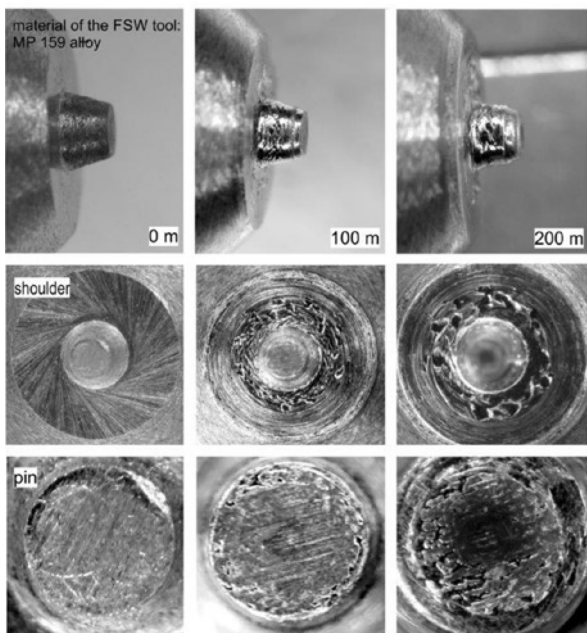


Fig. 8. Visual inspection of the working surface of the FSW tool made of MP159 alloy following individual stages of wear tests

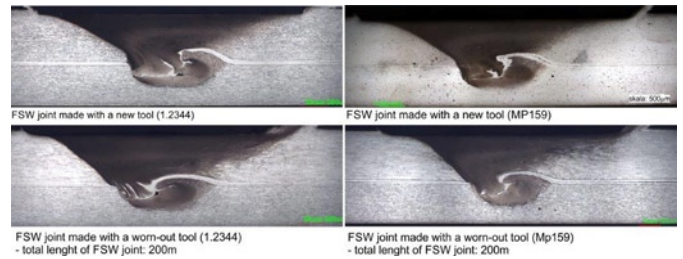


Fig. 9. Cross-section of the FSW joints welded using new and worn tools

following individual stages of the test was presented in Fig. 8. Marks of tribological wear can be noticed on the working surface of the tool, on the surface of shoulder at the pin base, its lateral surface and along the edge of the front surface of the pin. The shoulder and pin surfaces are covered with depressions and grooves of different size. Marks of peripheral scratches caused by friction were also observed on the working surface: they are considered to be the major cause of surface wear in tools for FSW processes.

A progressing increase in wear of working surface occurs with the increase in tool working time, manifested by continuous changing of its shape. Deep scratches and grooves caused by the progressing friction wear are observed on the lateral pin surface. The wear marks can be also noticed on the front surface of the pin.

The metallographic examinations of the samples of test joints showed that despite a substantial wear of the tools, it is possible to obtain joints without defects that would substantially impact on deterioration of their quality. Cross-sections of the joints obtained using the tools studied are presented in Fig. 9, for the initial and final phases of the wear tests.

Changes in geometrical parameters of the weld were observed with the change in the shape of the tool caused by its wear. Width of the joint welded with the tool made of 1.2344 steel, measured at the level of the sheet metal contact line increased from ~1.4 to ~1.5 mm, whereas mean material stirring depth in the area of the bottom sheet metal was maintained at a constant level of ~0.5mm. In the case of the tool made of MP159 alloy, the joint width increased from ~1.4 to ~1.6 mm, and an insignificant increase from ~0.4 to ~0.5 was also observed for mean material stirring depth in the bottom sheet metal.

Geometrical parameters of the joint (weld nugget width, material stirring depth in the bottom sheet metal) and type and number of defects in the joints determined the strength of the joints obtained during FSW wear tests. With the set process parameters, joint strength was also determined by accuracy of tool position with regard to the surfaces of the connected materials and geometrical changes of the working part of the tool caused by wear. The results of the strength tests of the samples from test FSW joints welded during the wear tests are presented in Fig. 10.

Compared to the FSW joints welded using the tool made of 1.2344 steel, those welded with the MP159 alloy tool had higher tensile strength. Differences in the values and substantial distribution of tensile strength of the test FSW joints obtained at the first stage of wear tests result from intensive wear (changes in geometry) of the tool and, consequently, variable conditions of the welding process. An insignificant increase in strength of the joints and reduced spread of its values were observed at the second stage of the wear tests.

Of all samples examined, 60% were broken (cut) in the joint at the level of sheet metal joining, whereas other samples were broken in the material of the lower and thinner sheet metal. An insignificant decline in the weld nugget width and depth of material stirring of the bottom sheet metal were observed for the joints with the lowest strength. Cold lap, wormholes and kissing bonds were observed in the cross-sections of these joints. Furthermore, the lack or insignificant thinning of the material of the top sheet metal in these joints may suggest too shallow

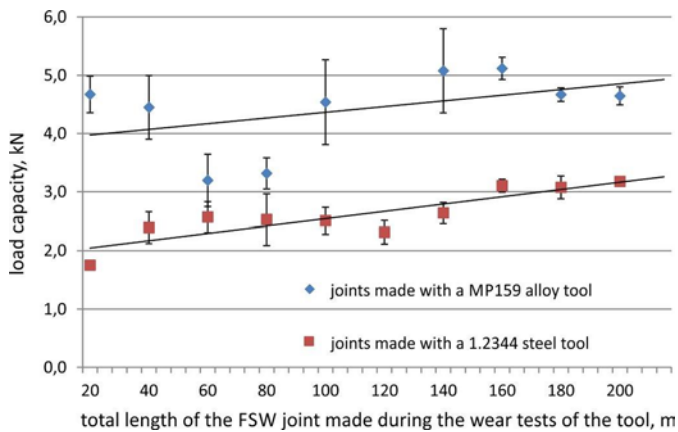


Fig. 10. Strength of test FSW joints welded during tool wear tests

tool infeed, which resulted in the lack of optimal conditions for the FSW process.

4. Conclusion

Working surfaces of FSW tools are exposed to a substantial mechanical load and high temperature during work. Therefore, the need arises for evaluation of their resistance to wear and their life. As one of main components of degradation of FSW tools, wear represents an effect of interactions between working surface of the tool and welded material. The character and intensity of the tool wear mechanism depends on interactions between welded material and tool material, and geometry of the working part of the tool and specific welding parameters. Changes in tool dimensions caused by friction suggest susceptibility of tool material to wear during contact with joint material, and its life. Therefore, symptoms of excessive tool wear should be analysed both in terms of geometrical changes and dimensions of the tool working part.

The examinations demonstrated that in addition to the set process parameters and type of joint material, an important factor that impacts on tool wear mechanisms is its geometry and type of tool material.

Changes in dimensions of the working part of the tools observed in the study that represent the measure of tool wear suggest high susceptibility of the materials used for tool tests (1.2344 steel and MP159 alloy) to wear a short life during contact with joint material

References

- Ambroziak A. Zgrzewanie tarciove materiałów o różnych właściwościach. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2011.
- Badarinarayan H, Shi Y, Li X, Okamoto K. Effect of tool geometry on hook formation and static strength of friction stir spot welded aluminum 5754-0 sheets. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 2009; 49: 814-823, <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2009.06.001>.
- Burek R, Wydrzyński D, Sęp J, Więckowski W. The Effect of Tool Wear on the Quality of Lap Joints Between 7075 T6 Aluminum Alloy Sheet Metal Created with the FSW Method. *Eksploracja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2018; 20(1): 100-106.
- Dobrzański L A. Metalowe materiały inżynierskie. WNT, Warszawa 2004.
- Don-Hyun Ch, Shae-Kwang K, Seung-Boo J. The microstructures and mechanical properties of friction stir welded AZ31 with CaO Mg alloy. *Journal of Alloys and Compounds* 2013; 554: 162-168, <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2012.11.143>.
- Fall A, Fesharaki M H, A Khodabandeh A R, Jahazi M. Tool Wear Characteristics and Effect on Microstructure in Ti-6Al-4V Friction Stir Welded Joints. *Metals* 2016; 6(11): 275: 1-12.
- Firouzdar V, Kou S. Al-to-Cu Friction Stir Lap Welded. *Metallurgical and Materials Transactions A* 2012; 43: 303-315, <https://doi.org/10.1007/s11661-011-0822-9>.
- Hwang Y M, Fan P L, Lin C H. Experimental study of Friction Stir Welding of copper metals. *Journal of Materials Processing Technology* 2010; 210(12): 1667-1672, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.05.019>.
- Kocańda D, Górka A. Nowe technologie łączenia tarciowego metali. *BIULETYN WAT*, 2010; LIX(2): 395-411.
- Lacki P, Kucharczyk Z, Śliwa R, Gałaczyński T. Effect of Tool Shape on Temperature Field in Friction Stir Spot Welding. *Archives of Metallurgy and Materials* 2013; 58(2): 595-599, <https://doi.org/10.2478/amm-2013-0043>.
- Lacki P, Więckowski W, Wieczorek P. Assessment of Joints Using Friction Stir Welding and Refill Friction Stir Spot Welding Methods. *Archives of Metallurgy and Materials* 2015; 60 (3B): 2297-2306, <https://doi.org/10.1515/amm-2015-0377>.

(7075-T6). The tools analysed in the study were substantially worn after the second stage of the study, which virtually excludes them from further use, with the highest wear observed for the MP159 tool.

Compared to the tool shoulder, increased wear and deformations were observed for the lateral side of the pin. This was mainly due to the fact that the pin is entirely submerged in the welded material and is more exposed to the effect of the welded material during the tool movement and, consequently, to greater load.

Inspection of the worn working surfaces of the tool with particular focus on pin surface indicated that one of the mechanisms of degradation of the FSW tools was, in addition to friction and adhesive wear, their plastic deformation resulting from increased stresses in tool material over yield point reducing at elevated temperatures.

Varied intensity of wear of the tool working surface leads to changes in geometrical parameters of the joint, such as weld nugget width, material stirring depth for the bottom sheet metal or material thinning in the top sheet metal, having an effect on joint quality. Joints welded in the final phase of the examinations were characterized by an increase in weld nugget width and stirring depth for the material of bottom sheet metal compared to joints welded using new tools, which translates into increased tensile strength of the joints welded during consecutive stages of examinations of tool wear.

Changes in the geometry of the working part of the tool caused by wear and the type of tool material lead to changes in the transport of plasticized material around the tool and changes in friction conditions, responsible for amount of heat generated in the joint, which additionally impacts on joint quality (strength).

The results of the measurements of wear of the FSW tools and the results of examinations of joints obtained during wear tests can be useful in the process of modification of both shape and dimensions of the working part of the tool so that it is possible to obtain a longer and high-quality joint while limiting wear and improving tool life. Further reduction in wear of the tools may be achieved by using anti-wear coatings on working surfaces.

Acknowledgements

Financial support of The National Centre for Research and Development, European Union, PZL Mielec / a Sikorsky Company, in the framework of European Regional Development Fund Project "Advanced techniques for the fabrication of airframe structures using innovative friction stir welding (FSW) technology", no. INNOLOT/14/NCBR/2013 is gratefully acknowledged.

12. Liua H J, Fenga J C, Fujiib H, Nogib K. Wear characteristics of a WC–Co tool in friction stir welding of AC4AC30 vol%SiCp composite. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 2005; 45: 1635–1639, <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2004.11.026>.
13. Meilinger Á, Török I. The Importance Of Friction Stir Welding Tool. *Production Processes and Systems* 2013; 6(1): 25-34.
14. Meldner B, Darlewski J. Narzędzia skrawające w zautomatyzowanej produkcji. WNT, Warszawa 1991.
15. Mishra S R, Ma Z Y. Friction Stir Welding and Processing. *Materials Science and Engineering* 2005; 50: 1-78, <https://doi.org/10.1016/j.msar.2005.07.001>.
16. Myśliwiec P, Śliwa R E, Ostrowski R. Possibility of joining thin sheets of Al, Mg alloys and Ti GRADE 3 in FSW process. *Metal Forming* 2017; XXVIII (4): 263–280.
17. Pietras A, Bogucki R. Rozwój technologii zgrzewania tarcowego z mieszaniem materiału uplastycznionego w strefie zgrzeiny. *Szybkobieżne Pojazdy Gąsienicowe* 2005; 1(21): 147-154.
18. Pietras A, Rams B, Węglowska A. Zgrzewanie tarcowe metodą FSW stopów aluminium serii 6000. *Archiwum Technologii Maszyn i Automatykacji* 2007; 27 (1): 93-102.
19. Rai R, De A, Bhadeshia H K D H, DebRoy T. Review: friction stir welding tools. *Science and Technology of Welding and Joining* 2011; 16(4): 325-342, <https://doi.org/10.1179/1362171811Y.0000000023>.
20. Rowe C E D, Wayne T. *Advances in Tooling Materials For Friction Stir Welding*. TWI and Cedar Metals Ltd. Internet Publication by TWI, Cambridge, January 13, 2005.
21. *Technical Handbook. Friction Stir Welding*. ESAB, www.esab.com
22. Thompson B T. *Tool Degradation Characterization in the Friction Stir Welding of Hard Metals*. Graduate Program in Welding Engineering The Ohio State University 2010.
23. Xu W, Liu J, Zhu H, Fu L. Influence of welding parameters and tool pin profile of microstructure and mechanical properties along the thickness in a friction stir welded aluminum alloy. *Materials and Design* 2013; 47: 599-606, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.12.065>.
24. Zhang Y N, Cao X, Larose S, Wanjara P. Review of tools for friction stir welding and processing. *Canadian Metallurgical Quarterly* 2012;51(3): 250-261, <https://doi.org/10.1179/1879139512Y.0000000015>.

Wojciech WIĘCKOWSKI

Faculty of Mechanical Engineering and Computer Science
Czestochowa University of Technology
ul. Dabrowskiego 69, 42-201 Czestochowa, Poland

Rafał BUREK

Development Projects Office DTR/B
Polskie Zakłady Lotnicze Sp. z o.o.
ul. Wojska Polskiego 3, 39 – 300 Mielec, Poland

Piotr LACKI

Faculty of Civil Engineering
Czestochowa University of Technology
ul. Dabrowskiego 69, 42-201 Czestochowa, Poland

Waldemar ŁOGIN

Development Projects Office DTR/B
Polskie Zakłady Lotnicze Sp. z o.o.
ul. Wojska Polskiego 3, 39 – 300 Mielec, Poland

E-mails: wieckowski@itm.pcz.pl, rafal.burek@lmco.com,
placki@bud.pcz.pl, waldemar.login@lmco.com

Dr inż. Wojciech Więckowski

Faculty of Mechanical Engineering and Computer Science
Czestochowa University of Technology
Dabrowskiego 69, 42-201 Czestochowa, Poland
E-mail: wieckowski@itm.pcz.pl

Mgr inż. Rafał Burek

Development Projects Office DTR/B
Polskie Zakłady Lotnicze Sp. z o.o.
ul. Wojska Polskiego 3, 39 – 300 Mielec, Poland
E-mail: rafal.burek@lmco.com

Dr hab. inż. Piotr Lacki, prof. nadzw.

Faculty of Civil Engineering
Czestochowa University of Technology
Dabrowskiego 69, 42-201 Czestochowa, Poland
E-mail: placki@bud.pcz.pl

Mgr inż. Waldemar Łogin

Development Projects Office DTR/B
Polskie Zakłady Lotnicze Sp. z o.o.
ul. Wojska Polskiego 3, 39 – 300 Mielec, Poland
E-mail: waldemar.login@lmco.com

**Analiza procesu zużycia narzędzi wykonanych ze stali 1.2344 oraz stopu MP159
w procesie zgrzewania tarcowego z przemieszaniem (FSW) blach ze stopu
Aluminium 7075 T6**

Słowa kluczowe: zużycie narzędzi, zgrzewanie tarcowe z przemieszaniem, FSW, stop Al 7075 T6

Streszczenie: W pracy przedstawiono analizę procesu zużycia narzędzi wykonanych ze stali 1.2344 oraz stopu MP159 w procesie wykonywania złączy zakładkowych z blach ze stopu aluminium 7075 T6 o grubości 1.0mm i 0.8mm technologią zgrzewania tarcowego z przemieszaniem materiału (FSW). Geometrię narzędzi użytych do badań opracowano na Politechnice Częstochowskiej. Ocenę zużycia narzędzi przeprowadzono w oparciu o pomiary geometrii części roboczej narzędzi na maszynie multisensorycznej oraz na podstawie oględzin powierzchni roboczej przy użyciu stereoskopu po kolejnych etapach badań zużycia narzędzia. Dodatkowo, w oparciu o wyniki statycznej próby rozciągania oraz badania metalograficzne próbek pobranych ze złączy wykonywanych w trakcie badań zużycia narzędzi, przeprowadzono ocenę wpływu stopnia zużycia narzędzi na jakość wykonanych złączy.

Na podstawie analizy wyników można stwierdzić, że zarówno narzędzie wykonane ze stali 1.2344 oraz ze stopu MP159 ulegają intensywnemu, zagrażającemu ich dalszej eksploatacji zużyciu, we współpracy z materiałem zgrzeiny (7075-T6) już po wykonaniu złącza o długości 200m, co świadczy o ich niskiej trwałości. Przy czym zmiany geometrii narzędzia spowodowane zużyciem pozwoliły na nieznaczną poprawę wytrzymałości złączy. Uzyskane wyniki pomiarów zużycia wyznaczają zatem kierunek w procesie dalszej modyfikacji geometrii badanych narzędzi, również z uwagi na fakt, iż pomimo znaczącego zużycia badanych narzędzi, pozwalały one w dalszym ciągu uzyskać dobre jakościowo złącza pozbawione wad. Jak wykazały badania, rodzaj materiału narzędzia wpływa nie tylko na trwałość narzędzi ale również, jak ma to miejsce w przypadku ich geometrii, ma on istotny wpływ na jakość uzyskanych połączeń. Pomimo tego, że narzędzie wykonane ze stopu MP159 uległo większemu zużyciu w porównaniu z narzędziem ze stali 1.2344, to pozwoliło ono uzyskać złącza o znacznie lepszych parametrach wytrzymałościowych.

1. Wprowadzenie

Technologia zgrzewania tarcowego z mieszaniem materiału zgrzeiny (Friction Stir Welding) została opracowana na początku lat dziewięćdziesiątych ubiegłego wieku przez The Welding Institute. Zaletą metody jest możliwość uzyskiwania złączy pozbawionych niedoskonałości o dobrych własnościach mechanicznych i strukturalnych, co spowodowało że technologia FSW znalazła zastosowanie na skalę przemysłową w przemyśle zbrojeniowym, lotniczym i okrętowym do łączenia elementów zbiorników, pokładów, części skrzydeł i poszyc kadłubów itp. [1].

Zgrzewanie tarcowe z przemieszaniem materiałów (FSW) odniosło znaczny sukces w procesie łączenia aluminium, jego stopów oraz innych metali miękkich. Łączenie technologią FSW twardych metali nadal jednak stanowi wyjątkowe wyzwanie, ze względu na ograniczoną dostępność rodzajów materiałów narzędziowych zdolnych do wytrzymywania warunków panujących podczas procesu zgrzewania, a jej komercyjne zastosowanie jest ograniczone poprzez wysokie koszty i małą żywotność narzędzi [1,15,16,20,21].

Istotną rolę w procesie FSW odgrywa narzędzie. Wraz z parametrami procesu jest ono odpowiedzialne za nagrzewanie oraz za wymieszanie materiału, co przekłada się na wielkość stref zgrzeiny oraz wpływa na jakość i właściwości złącza [18].

W trakcie procesu zgrzewania narzędzie FSW ulega procesom zużycia zależnych od interakcji między materiałem obrabianym i materiałem narzędzia oraz geometrii narzędzia i parametrów zgrzewania. Zużycie narzędzi objawiające się zmianą geometrii, a wywołane obciążeniem mechanicznym oraz cieplnym powierzchni roboczej narzędzia, jest efektem ścierania mechanicznego, odkształcenia plastycznego, utleniania, adhezji, wykruszenia itp. Zapobiec mu można stosując odpowiednio dobrane parametry procesu, odpowiedni materiał na narzędzie oraz powłoki antyadhezyjne ograniczające zużycie. Nadmierne zużycie objawiające się zmianą kształtu narzędzia zwiększa prawdopodobieństwo wystąpienia usterek i ewentualnie pogorszenia jakości spoin. Cząstki zużytego materiału narzędzia lub pokrycia pozostające w materiale złącza mają niekorzystny wpływ na właściwości złącza i są nie do zaakceptowania, dodatkowo mogą sprzyjać tworzeniu lokalnych ogniw korozyjnych [3,6,11,15,19,24].

Z powodu oddziaływania wysokiej temperatury i naprężeń spowodowanych tarciem oraz naciskami powierzchniowymi dochodzi do zmęczenia cieplno-mechanicznego narzędzi i przyspieszonego ich zużycia. Badania zużycia narzędzi FSW wskazują, iż w porównaniu z oporą narzędzia, zwiększonemu zużyciu oraz odkształceniom podlega trzpień, a zniszczenie narzędzia niemal zawsze zachodzi na skutek uszkodzenia trzpienia[19].

W pracy [9,17] zaprezentowano wyniki badań złączy ze stopów aluminium serii 6000, które uzyskano przy użyciu narzędzia wykonanego ze stali szybko tnącej wolframowo-molibdenowej gatunku SW7M (HS6-5-2). Wykazano, iż przy stosunkowo dużym zakresie parametrów procesu, można uzyskać odpowiednią jakość złączy pod względem wytrzymałości, jak też budowy strukturalnej zgrzeiny.

Ważnym składnikiem degradacji narzędzi FSW jest ich odkształcenie plastyczne, będące najbardziej widocznym elementem zmian geometrycznych narzędzi. Odkształcenie pociąga za sobą duże zmiany wymiarów geometrycznych części roboczej narzędzia, jak długość i średnica oraz znaczące zmiany strukturalne materiału narzędzia. Poprzez zrozumienie zmian mikrostruktury, które mają miejsce w ciągu wykonywania zgrzeiny, można zidentyfikować mechanizmy, oraz wyjaśnić przyczyny degradacji narzędzi. Autorzy pracy [22] prezentują wyniki badań zużycia narzędzi FSW wykonanych ze stopów wolframu oraz wolframu z renem, podczas których poddano ocenie zmiany geometrii narzędzi oraz mikrostruktury materiału narzędzi zachodzące w trakcie procesu zgrzewania FSW tytanu i stali.

W pracy [12] przedstawiono wyniki badania zużycia narzędzia wykonanego z Wc-Co prowadzone w różnej konfiguracji parametrów procesu (prędkości obrotowej narzędzia,

prędkości zgrzewania). W celu ilościowej oceny zużycia narzędzia, określono wskaźnik zużycia narzędzia poprzez określenie procentowych zmian wielkości geometrycznych narzędzia w odniesieniu do długości złącza oraz pozostałych parametrów procesu. Według autorów maksymalna intensywność zużycia narzędzi występowała zawsze w początkowej fazie zgrzewania następnie intensywność zużycia zmniejsza się wraz ze wzrostem długości złącza, a decydujący wpływ na zużycie ma prędkość zgrzewania.

Wg autorów [24] nadmierne zużycie narzędzi prowadzi do zmiany ich kształtu, zwiększając tym samym prawdopodobieństwo generacji wad i ewentualnie pogorszenia jakości zgrzein. Mechanizm zużycia zależy od interakcji między przedmiotem zgrzewanym i materiałem narzędzia, wybranej geometrii narzędzia i parametrów zgrzewania. W przypadku narzędzi wykonanych z PCBN, zużycie przy niskich obrotach jest spowodowane głównie przez zużycie adhezyjne, a zużycie przy dużych prędkościach obrotowych narzędzia wynika ze zużycia ściernego.

Wybór rodzaju materiału oraz geometrii narzędzia jest zatem bardzo ważnym elementem na etapie planowania procesu łączenia materiałów technologią FSW. Właściwości materiału narzędzia wyznaczają bowiem zakres jego stosowania do wybranych rodzajów łączonych materiałów oraz istotne parametry procesu zgrzewania.

O przydatności materiału narzędziowego decyduje przede wszystkim jego twardość, która powinna być większa od twardości zgrzewanego materiału w warunkach panujących podczas prowadzenia procesu. Wymagana jest również duża wytrzymałość na ściskanie ze względu na naciski panujące na powierzchni roboczej narzędzi oraz wysoka udarność i wytrzymałość zmęczeniowa. Materiały na narzędzia FSW powinny cechować się odpornością na zużycie ściernie, adhezyjne, dyfuzyjne i chemiczne. Dodatkowo w procesach gdzie generowane są znaczne ilości ciepła od materiałów narzędziowych wymaga się odpowiednich właściwości termicznych. Istotną cechą materiałów narzędziowych decydującą o ekonomiczności procesu jest także ich cena [10].

Materiałami znajdującymi najczęściej zastosowanie na narzędzia FSW do łączenia stopów aluminium są stale narzędziowe oraz stopy na bazie niklu i kobaltu [24].

Stale stopowe szybko tnące oraz stale narzędziowe do pracy na gorąco, znalazły zastosowanie na narzędzia FSW do łączenia stopów aluminium, ze względu na ich dostępność, łatwość w kształtowaniu, akceptowalną odporność na zmęczenie cieplne, odporność na zużycie oraz niski koszt produkcji [4,13,14]. Stale narzędziowe są również powszechnie stosowane na narzędzia FSW w procesie zgrzewania stopów magnezu, miedzi oraz materiałów kompozytowych w osnowie aluminium (AMCs), podczas zgrzewania których stwierdzono przyspieszone zużycie narzędzi. Można je także stosować do łączenia ze sobą różnych materiałów (np. miedzi z mosiądzem) zarówno w złączach zakładkowych jak też doczołowych [2,5,7,8,9,19,23,24].

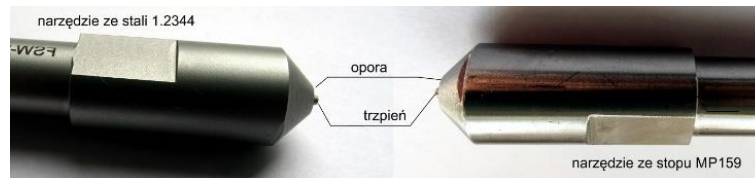
Stopem, który znalazł zastosowanie do wytwarzania narzędzi FSW w procesie zgrzewania stopów aluminium jest stop na bazie kobaltu MP159 posiadający doskonałą wytrzymałość i ciągliwość w temperaturze do 590 - 650⁰C oraz wysoką odporność na korozję i zmęczenie. Stopy te znajdują także zastosowanie na narzędzia FSW w procesie zgrzewania Cu oraz materiałów kompozytowych Al-MMC [24].

Odpowiednie skojarzenie materiału narzędzia z materiałem łączonych elementów oraz optymalizacja kształtu narzędzia pozwala w znacznym stopniu zminimalizować jego zużycie, co zapewni odpowiednią żywotność narzędzi. Zatem uzyskanie odpowiedniej jakości spoin przy zachowaniu niskich kosztów procesu FSW wymaga prowadzenia badań w zakresie doboru odpowiednich materiałów narzędziowych oraz projektowania konstrukcji nowych narzędzi.

2. Cel i zakres badań

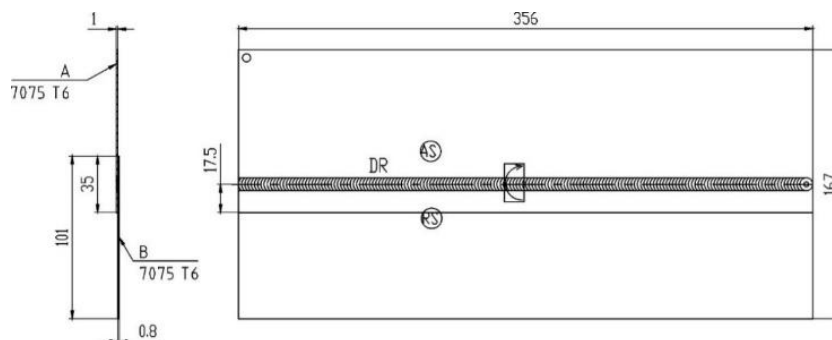
Badania miały na celu określenie trendu zużycia narzędzi FSW zaprojektowanych w oparciu o geometrię narzędzia zaprojektowanego na Politechnice Częstochowskiej oraz zebranie doświadczeń w zakresie metodyki badań zużycia przy ustalonych parametrach technologii FSW dla wybranego gatunku i parametrów zgrzewanego materiału.

Do badań użyto dwa narzędzia wykonane odpowiednio ze stali do pracy na gorąco 1.2344 oraz ze stopu MP159 w Fabryce Narzędzi Medycznych CHIRMED w Rudnikach (rys. 1). Narzędzia posiadają płaską oporę oraz trzpień w kształcie ściętego stożka o gładkiej powierzchni.



Rys. 1. Narzędzia FSW zastosowane do badań zużycia

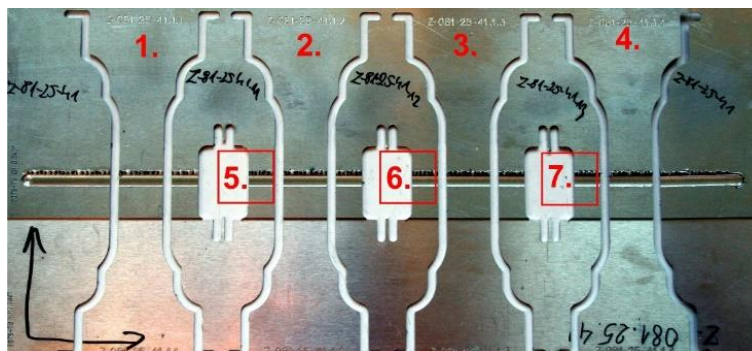
W trakcie trwania badań zużycia narzędzi wykonywano złącza zakładkowe o długości 325mm na blachach o długości 356mm ze stopu aluminium 7075-T6 obustronnie platerowanych. Grubość blach w złączu wynosiła odpowiednio: 1.0mm dla blachy górnej oraz 0.8mm dla blachy dolnej – rysunek 2.



Rys. 2. Złącze kontrolne wykonywane podczas badań zużycia narzędzi FSW

Na podstawie prowadzonych dotychczas badań doświadczalnych ustalono następujące parametry procesu zgrzewania: prędkość obrotowa narzędzia $n=1000\text{obr}/\text{min}$, prędkość posuwu narzędzia $v_3=200\text{mm}/\text{min}$ oraz zagłębienie narzędzia - 1,2mm. Złącza wykonane zostały na maszynie DMC 104V w PZL Mielec.

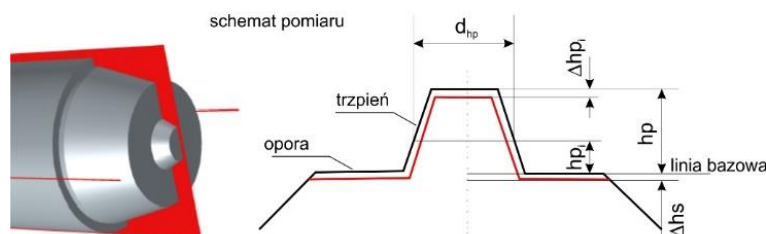
Po każdym etapie badawczym, w którym wykonano zgrzeiny o łącznej długości ~100m, narzędzie poddawano czyszczeniu, a następnie pomiarom zarysu profilu części roboczej. Dodatkowo, w celu oceny wpływu zużycia narzędzia na jakość zgrzeiny, każdorazowo po wykonaniu kolejnych ~20m zgrzeiny, pobierano do badań złącza kontrolne, z których wycinano po cztery próbki do badań wytrzymałościowych (1÷4) oraz po trzy próbki do badań metalograficznych (5÷7). Przykładowe kontrolne złącza zakładkowe (1.0 7075-T6 + 0.8 7075-T6) wykonane podczas badań zużycia narzędzi pokazano na rysunku 3.



Rys. 3. Przykładowe złącze kontrolne FSW z rozkrojem próbek do badań wytrzymałościowych i metalograficznych

Pomiaru geometrii części roboczej narzędzia wykonywano przy użyciu maszyny multisensorycznej OGP Smart Scope FLASH 200, natomiast ocenę zużycia badanych narzędzi FSW przeprowadzono na podstawie porównania zarysu profilu nowego narzędzia z profilem narzędzia poddanego badaniom zużycia po kolejnych cyklach badawczych.

W celu ilościowej oceny zużycia narzędzia, określono bezwzględne zmiany wybranych wielkości geometrycznych narzędzia w odniesieniu do długości wykonanego złącza (kolejnych etapów badań). Zgodnie ze schematem pomiarowym przedstawionym na rysunku 4, określono zmiany średnicy trzpienia dp odpowiednio na wysokościach trzpienia równych 0.2mm, 0.4mm, 0.6mm, 0.8mm oraz 1.0mm, mierzone w kierunku prostopadłym do osi narzędzia (zużycie promieniowe) oraz zmiany wysokości trzpienia hp i opory hs mierzone w kierunku osi narzędzia względem przyjętej bazy pomiarowej.

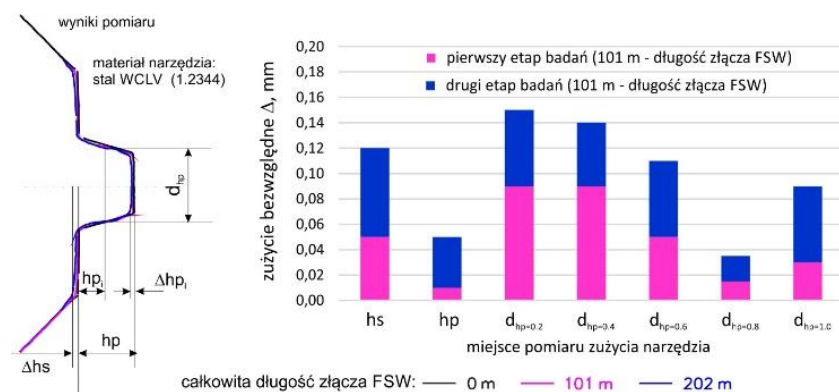


Rys. 4. Schemat pomiaru zmian profilu części roboczej narzędzi FSW

Po zakończeniu każdego cyklu pracy narzędzia, na podstawie sporządzonej dokumentacji fotograficznej z badań na stereoskopie, dokonywano wizualnej oceny stanu powierzchni roboczej narzędzi.

3. Wyniki badań zużycia narzędzi FSW

Na rysunku 5 zaprezentowano wyniki pomiarów geometrii nowego narzędzia FSW wykonanego ze stali 1.2344 oraz pomiarów wykonanych każdorazowo po ustalonym przebiegu (wykonaniu założonej długości złącza). W formie wykresu słupkowego zestawiono wartości bezwzględnego zużycia na powierzchni roboczej narzędzia, zmierzone w kolejnych etapach badawczych. Badania zużycia narzędzia zakończono po wykonaniu złącza o całkowitej długości 202.15m (po II etapie badawczym) z uwagi na znaczące zużycie powierzchni roboczej narzędzia.



Rys. 5. Wyniki pomiaru zużycia narzędzia FSW wykonanego ze stali do pracy na gorąco 1.2344 po kolejnych etapach badań zużycia

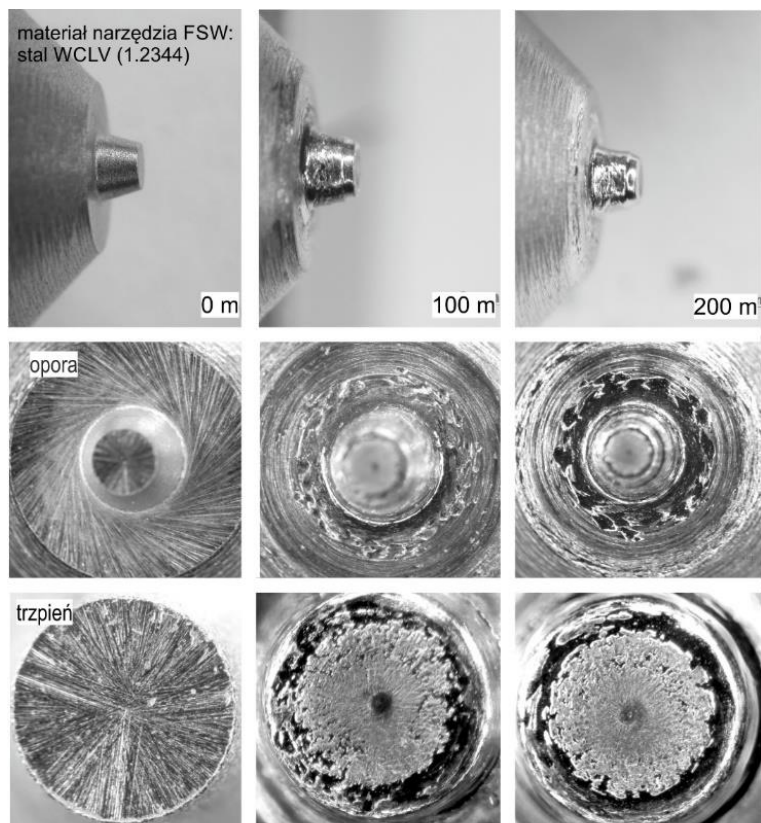
W trakcie prowadzonych badań zużycia narzędzia FSW (1.2344) zaobserwowano intensywne i zróżnicowane zużycie na całej powierzchni roboczej narzędzia prowadzące do zmiany jego kształtu.

Po kolejnych etapach badawczych stwierdzono stopniowe i zróżnicowane zużywanie powierzchni bocznej trzpienia. Największe zużycie promieniowe trzpienia zachodziło na wysokości w zakresie 0.2-0.4mm, przy czym intensywność zużycia we wspomnianym obszarze była większa w I etapie badań, a następnie zmalała. Znaczące zużycie promieniowe odnotowano także na powierzchni bocznej trzpienia na wysokości w zakresie 1.0-1.2mm (wzdłuż krawędzi powierzchni czołowej trzpienia). Zarówno w tym przypadku, jak i w przypadku powierzchni czołowej trzpienia i opory, intensywność zużycia wzrastała w czasie trwania badań.

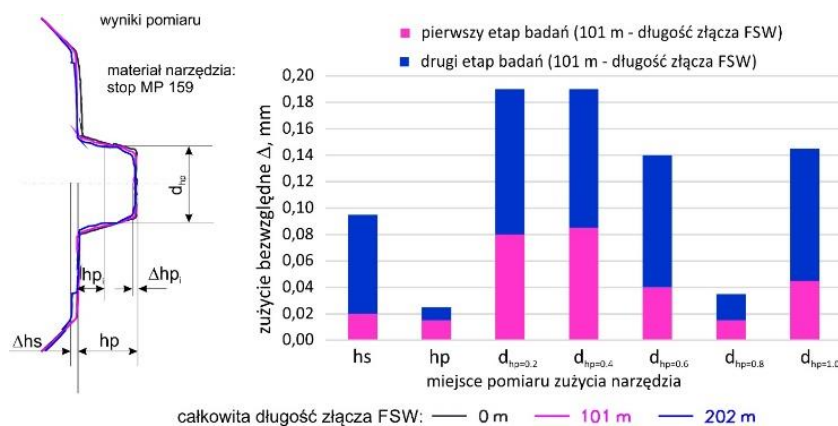
Dokumentację fotograficzną z przeprowadzonej oceny wizualnej stanu powierzchni roboczej nowego narzędzia wykonanego ze stali 1.2344 oraz po zakończeniu dwóch kolejnych etapów badań zużycia przedstawiono na rysunku 6.

Po I etapie badań na powierzchni roboczej narzędzia (zarówno trzpienia jak i opory) widnieją ślady intensywnego zużycia tribologicznego. W trakcie trwania kolejnego etapu badań zaobserwowano postępujący wzrost zużycia powierzchni bocznej trzpienia objawiający się zmianą jego kształtu, jak również ślady postępującego zużycia na powierzchni czołowej trzpienia oraz opory, na powierzchni których zaobserwować można znaczące ubytki materiału narzędzia, oraz liczne zagłębienia, bruzdy i obwodowe zarysowania.

Wyniki pomiaru zmian zarysu profilu części roboczej narzędzia FSW wykonanego ze stopu MP159 przedstawiono na rysunku 7. Z powodu znaczącego zużycia powierzchni roboczej narzędzia, zagrażającego jego nagłemu zniszczeniu w kolejnych etapach badań, podobnie jak to miało miejsce w przypadku narzędzia wykonanego ze stali 1.2344, badania zużycia przerwano po II etapie.



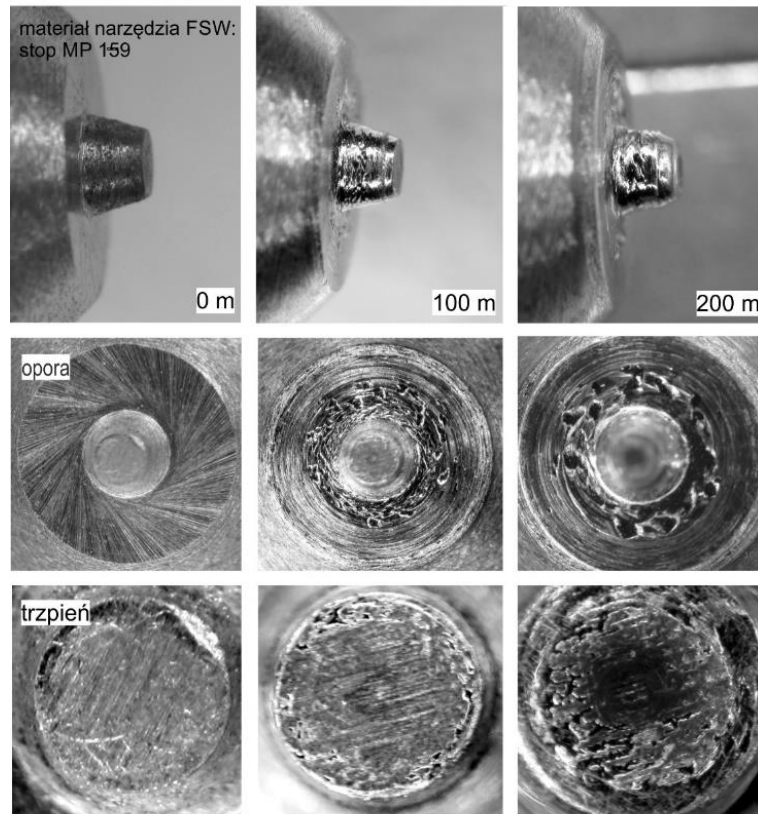
Rys. 6. Ocena wizualna powierzchni roboczej narzędzia FSW wykonanego ze stali 1.2344 po kolejnych etapach badań zużycia



Rys. 7. Wyniki pomiaru zużycia narzędzia FSW wykonanego ze stopu MP159 po kolejnych etapach badań zużycia

Otrzymane wyniki pomiarów narzędzia wskazują na stopniowe i silnie zróżnicowane zużywanie powierzchni bocznej trzcienia. Największe zużycie promieniowe zaobserwowano na powierzchni bocznej trzcienia na wysokości w zakresie 0.2-0.4mm oraz 1.0-1.2mm. W najmniejszym stopniu ulegała zużyciu powierzchnia boczna trzcienia na wysokości 0.8mm oraz jego powierzchnia czołowa. Widoczny jest wzrost intensywności zużywania na całej powierzchni roboczej narzędzia w II etapie badań, wyjątek stanowi jedynie powierzchnia czołowa trzcienia gdzie zaobserwowano jej spadek.

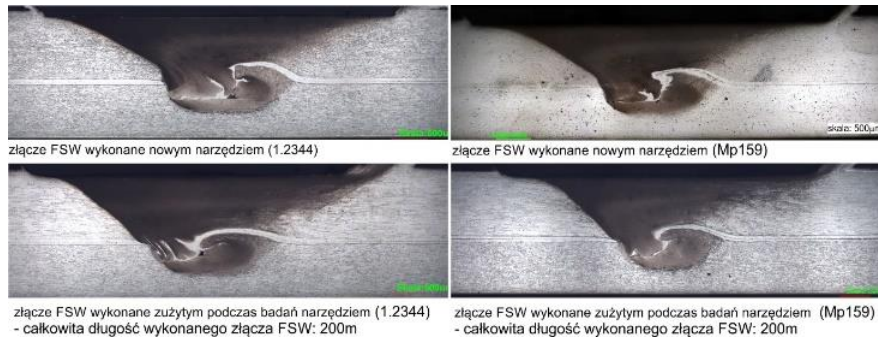
Wyniki pomiarów zużycia narzędzia znajdują potwierdzenie w przeprowadzonej ocenie wizualnej stanu powierzchni roboczej narzędzia przeprowadzonej po zakończeniu każdego cyklu badań zużycia. Wygląd powierzchni roboczej nowego narzędzia FSW wykonanego ze stopu MP159 oraz po kolejnych etapach badań przedstawiono na rysunku 8. Na powierzchni roboczej narzędzia widoczne są ślady zużycia tribologicznego zarówno na powierzchni opory u podstawy trzpienia, na jego bocznej powierzchni oraz wzdłuż krawędzi powierzchni czołowej trzpienia. Powierzchnia opory jak i trzpienia pokryta jest wgłębieniami i bruzdami o różnej wielkości. Na powierzchni roboczej narzędzia widoczne są także ślady obwodowych zarysowań będących efektem ścierania, które uważa się za główną przyczynę zużywania powierzchniowego narzędzi w procesach FSW.



Rys. 8. Ocena wizualna powierzchni roboczej narzędzia FSW wykonanego ze stopu MP159 po kolejnych etapach badań zużycia

Wraz z ze wzrostem czasu pracy narzędzia zaobserwować można postępujący wzrost zużycia jego powierzchni roboczej objawiający się ciągłą zmianą jego kształtu. Na powierzchni bocznej trzpienia oraz opory widnieją głębokie rysy oraz bruzdy świadczące o postępującym zużyciu ściernym. Ślady postępującego zużycia widoczne są także na powierzchni czołowej trzpienia.

Badania metalograficzne próbek pobranych ze złączy kontrolnych wykazały, że pomimo znacznego zużycia badanych narzędzi możliwe jest w dalszym ciągu wykonanie zgrzein pozbawionych wad, które mogłyby znacząco wpłynąć na pogorszenie ich jakości. Przekroje złączy wykonane przy użyciu badanych narzędzi odpowiednio na początku oraz w końcowej fazie badań zużycia przedstawiono na rysunku 9.

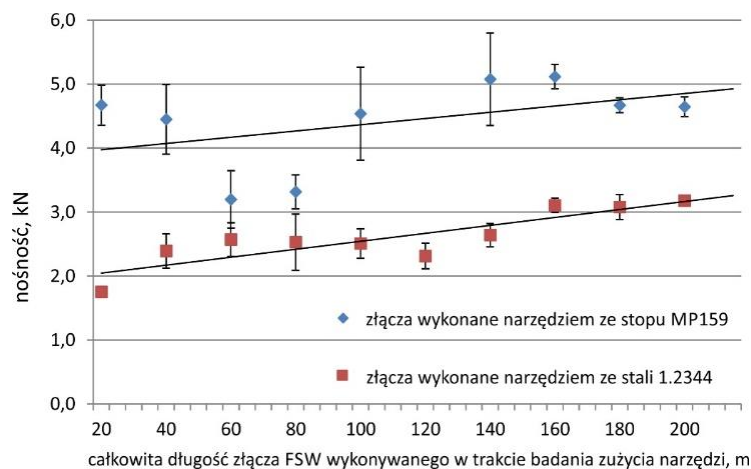


Rys. 9. Przekrój zgrzein FSW wykonanych odpowiednio nowymi i zużytymi narzędziami w trakcie badań

Wraz ze zmianą kształtu narzędzia spowodowaną jego zużyciem zaobserwowano zmiany parametrów geometrycznych zgrzeiny. Szerokość zgrzeiny, wykonanej narzędziem ze stali 1.2344, mierzona na poziomie linii styku łączonych blach wzrosła z ~ 1.4 do ~ 1.5 mm, a średnia głębokość przemieszania materiału w obszarze dolnej blachy utrzymywała się na stałym poziomie ~ 0.5 mm. Natomiast w przypadku narzędzia wykonanego ze stopu MP159 szerokość zgrzeiny wzrosła z ~ 1.4 do ~ 1.6 mm, niewielkiemu wzrostowi z ~ 0.4 do ~ 0.5 mm uległa także średnia głębokość przemieszania materiału w obszarze dolnej blachy.

Parametry geometryczne zgrzeiny (szerokości jądra zgrzeiny, głębokości przemieszania materiału dolnej blachy) oraz rodzaj i ilość wad występujących w złączu decydowały o wytrzymałości złączy uzyskanych podczas badań zużycia narzędzi FSW. Przy ustalonych parametrach prowadzenia procesu o wytrzymałości złączy decydowała także dokładność ustawienia narzędzia względem powierzchni łączonych materiałów jak też zmiany geometryczne części roboczej narzędzia wywołane procesem zużycia. Wyniki badań wytrzymałość próbek pobranych ze złączy kontrolnych FSW wykonywanych w trakcie trwania badań zużycia narzędzi przedstawiono na rysunku 10.

Złącza FSW wykonane narzędziem ze stopu MP159, w porównaniu ze złączami wykonanymi narzędziem ze stali 1.2344, posiadały wyższą wytrzymałość na rozciąganie. Zróżnicowanie wartości oraz duży rozrzut wytrzymałości na rozciąganie złączy FSW złączy kontrolnych uzyskanych w pierwszym etapie badań zużycia, jest efektem intensywnego zużycia (zmiany geometrii) narzędzia, a tym samym zmieniających się warunków procesu zgrzewania. W drugim etapie badań zużycia zaobserwowano nieznaczny wzrost wartości wytrzymałości badanych złączy oraz zmniejszenie jej rozrzutu.



Rys. 10. Wytrzymałość złączy kontrolnych FSW wykonywanych w trakcie badań zużycia narzędzi

60% ze wszystkich badanych próbek uległa zerwaniu (ścięciu) w złączu na poziomie łączenia blach, natomiast pozostałe próbki uległy zerwaniu w materiale dolnej, cieńszej blachy. W złączach o najniższej wytrzymałości zaobserwowano nieznaczny spadek szerokości jądra zgrzeiny oraz głębokości przemieszania materiału dolnej blachy. W przekroju tych złączy stwierdzono wady typu cold lap, tunele oraz przyklejenia. Dodatkowo brak lub nieznaczne pocienienie materiału górnej blachy w tych złączach wskazywać może na zbyt płytkie zagłębienie narzędzia, co skutkowało brakiem optymalnych warunków prowadzenia procesu zgrzewania FSW.

4. Podsumowanie

Powierzchnie robocze narzędzi FSW są narażone na duże obciążenia mechaniczne, a także na wysoką temperaturę podczas pracy, stąd też istnieje konieczność podejmowania badań, których celem jest określenie ich odporności na zużycie oraz ich trwałości. Zużycie, będące jednym z głównych składników degradacji narzędzi FSW jest efektem oddziaływania powierzchni roboczej narzędzia z materiałem zgrzewanym. Charakter oraz intensywność mechanizmu zużycia narzędzi zależy od interakcji między materiałem zgrzewanym i materiałem narzędzia oraz geometrii części roboczej narzędzia i ustalonych parametrów zgrzewania. Zmiany wymiarów narzędzia, wywołanych tarciem, świadczą o podatności na zużycie materiału narzędzia we współpracy z materiałem zgrzeiny oraz o jego trwałości. Zatem oznaki nadmiernego zużycia narzędzia należy rozpatrywać pod kątem zarówno zmiany geometrii jak i wymiarów części roboczej narzędzi.

Badania wykazały, że poza ustalonymi parametrami procesu oraz rodzajem materiału złącza, istotnym czynnikiem wpływającym na przebieg mechanizmów zużycia narzędzi jest jego geometria oraz rodzaj materiału narzędzia.

Stwierdzone w czasie badań zmiany wymiarów części roboczej badanych narzędzi, będące miarą ich zużycia, świadczą o dużej podatności na zużycie materiałów zastosowanych na badanie narzędzia (stal 1.2344 oraz stop MP159) we współpracy z materiałem zgrzeiny (7075-T6) oraz o ich niskiej trwałości. Badane narzędzia są wyraźnie zużyte już po drugim etapie badań, co praktycznie wyklucza je z dalszej eksploatacji, przy czym w większym stopniu zużyciu uległo narzędzie wykonane ze stopu MP159.

W porównaniu z oporą narzędzia, zwiększonemu zużyciu oraz odkształceniom podlega powierzchnia boczna trzpienia, spowodowane jest to głównie tym, że trzpień zanurzony jest całkowicie w obrabianym materiale i jest on w większym stopniu narażony na oddziaływanie zgrzewanego materiału w trakcie ruchu narzędzia, a przez to przenosi on znacznie większe obciążenia.

Oględziny zużytej powierzchni roboczej narzędzi, ze szczególnym uwzględnieniem powierzchni trzpienia, wskazują na to, iż jednym z mechanizmów degradacji badanych narzędzi FSW, po za zużyciem ściernym i adhezyjnym, może być także ich odkształcenie plastyczne wynikające ze wzrostu naprężeń w materiale narzędzia powyżej obniżającej się w podwyższonej temperaturze granicy plastyczności.

Zróźnicowana intensywność zużycia powierzchni roboczej narzędzia prowadzi do zmian parametrów geometrycznych złącza takich jak szerokości jądra zgrzeiny, głębokości wymieszania materiału dolnej blachy czy też pocienienie materiału górnej blachy, co ma wpływ na jakość uzyskanych zgrzein. Złącza wykonane w końcowej fazie badań charakteryzowały się wzrostem szerokości jądra zgrzeiny oraz głębokości wymieszania materiału dolnej blachy w porównaniu ze złączami wykonanymi nowymi narzędziami, co przekłada się na wzrost wytrzymałości na rozciąganie złączy wykonanych podczas kolejnych etapów badań zużycia narzędzi.

Zmiana geometrii części roboczej narzędzia wywołana zużyciem jak też rodzaj materiału narzędzia prowadzą do zmian w transporcie uplastycznionego materiału wokół narzędzia oraz do zmian warunków tarcia, odpowiedzialnych za ilość ciepła generowanego w zgrzeinie, co dodatkowo wpływa na jakość (wytrzymałość) złączy.

Uzyskane wyniki pomiarów zużycia badanych narzędzi FSW jak też wyniki badań złączy uzyskanych w trakcie badań zużycia narzędzi mogą być przydatne w procesie modyfikacji zarówno kształtu jak i w korekcie wymiarów części roboczej narzędzi, tak aby możliwe było wykonanie dłuższej, dobrej jakościowo zgrzeiny przy jednoczesnym ograniczeniu zużycia i poprawie trwałości narzędzia. Dodatkowo dalsze zmniejszenie zużycia badanych narzędzi, można próbować osiągnąć poprzez zastosowanie powłok przeciwzużyciowych na ich powierzchniach roboczych.

Podziękowanie: Badania zostały sfinansowane ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju, Unii Europejskiej oraz PZL Mielec A Sikorsky Company w ramach Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego. Projekt pt. „Zaawansowane techniki wytwarzania elementów struktury płatowca przy wykorzystaniu innowacyjnej technologii FSW”, Nr INNOLOT/I/4/NCBR/2013.

Literatura:

1. Ambroziak A. Zgrzewanie tarciove materiałów o różnych właściwościach. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2011.
2. Badarinarayan H, Shi Y, Li X, Okamoto K. Effect of tool geometry on hook formation and static strength of friction stir spot welded aluminum 5754-0 sheets. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 2009; 49: 814-823, <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2009.06.001>.
3. Burek R, Wydrzyński D, Sęp J, Więckowski W. The Effect of Tool Wear on the Quality of Lap Joints Between 7075 T6 Aluminum Alloy Sheet Metal Created with the FSW Method. *Eksploracja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2018; 20(1): 100-106.
4. Dobrzański L A. Metalowe materiały inżynierskie. WNT, Warszawa 2004.
5. Don-Hyun Ch, Shae-Kwang K, Seung-Boo J. The microstructures and mechanical properties of friction stir welded AZ31 with CaO Mg alloy. *Journal of Alloys and Compounds* 2013; 554: 162-168, <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2012.11.143>.
6. Fall A, Fesharaki M H, A Khodabandeh A R, Jahazi M. Tool Wear Characteristics and Effect on Microstructure in Ti-6Al-4V Friction Stir Welded Joints. *Metals* 2016; 6(11): 275: 1-12.
7. Firouzdor V, Kou S. Al-to-Cu Friction Stir Lap Welded. *Metallurgical and Materials Transactions A* 2012; 43: 303-315, <https://doi.org/10.1007/s11661-011-0822-9>.
8. Hwang Y M, Fan P L, Lin C H. Experimental study of Friction Stir Welding of copper metals. *Journal of Materials Processing Technology* 2010; 210(12): 1667-1672, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.05.019>.
9. Kocańda D, Górka A. Nowe technologie łączenia tarciovego metali. *BIULETYN WAT*, 2010; LIX(2): 395-411.

10. Lacki P, Kucharczyk Z, Śliwa R, Gałaczyński T. Effect of Tool Shape on Temperature Field in Friction Stir Spot Welding. *Archives of Metallurgy and Materials* 2013; 58(2): 595–599, <https://doi.org/10.2478/amm-2013-0043>.
11. Lacki P, Więckowski W, Wiczorek P. Assessment of Joints Using Friction Stir Welding and Refill Friction Stir Spot Welding Methods. *Archives of Metallurgy and Materials* 2015; 60 (3B): 2297-2306, <https://doi.org/10.1515/amm-2015-0377>.
12. Liua H J, Fenga J C, Fujiib H, Nogib K. Wear characteristics of a WC–Co tool in friction stir welding of AC4AC30 vol%SiCp composite. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 2005; 45: 1635–1639, <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2004.11.026>.
13. Meilinger Á, Török I. The Importance Of Friction Stir Welding Tool. *Production Processes and Systems* 2013; 6(1): 25-34.
14. Meldner B, Darlewski J. Narzędzia skrawające w zautomatyzowanej produkcji. WNT, Warszawa 1991.
15. Mishra S R, Ma Z Y. Friction Stir Welding and Processing. *Materials Science and Engineering* 2005; 50: 1-78, <https://doi.org/10.1016/j.msar.2005.07.001>.
16. Myśliwiec P, Śliwa R E, Ostrowski R. Possibility of joining thin sheets of Al, Mg alloys and Ti GRADE 3 in FSW process. *Metal Forming* 2017; XXVIII (4): 263–280.
17. Pietras A, Bogucki R. Rozwój technologii zgrzewania tarcowego z mieszaniami materiału uplastycznionego w strefie zgrzeiny. *Szybkobieżne Pojazdy Gąsienicowe* 2005; 1(21): 147-154.
18. Pietras A, Rams B, Węglowska A. Zgrzewanie tarcowe metodą FSW stopów aluminium serii 6000. *Archiwum Technologii Maszyn i Automatykacji* 2007; 27 (1): 93-102.
19. Rai R, De A, Bhadeshia H K D H, DebRoy T. Review: friction stir welding tools. *Science and Technology of Welding and Joining* 2011; 16(4): 325-342, <https://doi.org/10.1179/1362171811Y.0000000023>.
20. Rowe C E D, Wayne T. *Advances in Tooling Materials For Friction Stir Welding*. TWI and Cedar Metals Ltd. Internet Publication by TWI, Cambridge, January 13, 2005.
21. Technical Handbook. Friction Stir Welding. ESAB, www.esab.com
22. Thompson B T. *Tool Degradation Characterization in the Friction Stir Welding of Hard Metals*. Graduate Program in Welding Engineering The Ohio State University 2010.
23. Xu W, Liu J, Zhu H, Fu L. Influence of welding parameters and tool pin profile of microstructure and mechanical properties along the thickness in a friction stir welded aluminum alloy. *Materials and Design* 2013; 47: 599-606, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.12.065>.
24. Zhang Y N, Cao X, Larose S, Wanjara P. Review of tools for friction stir welding and processing. *Canadian Metallurgical Quarterly* 2012;51(3): 250-261, <https://doi.org/10.1179/1879139512Y.0000000015>.