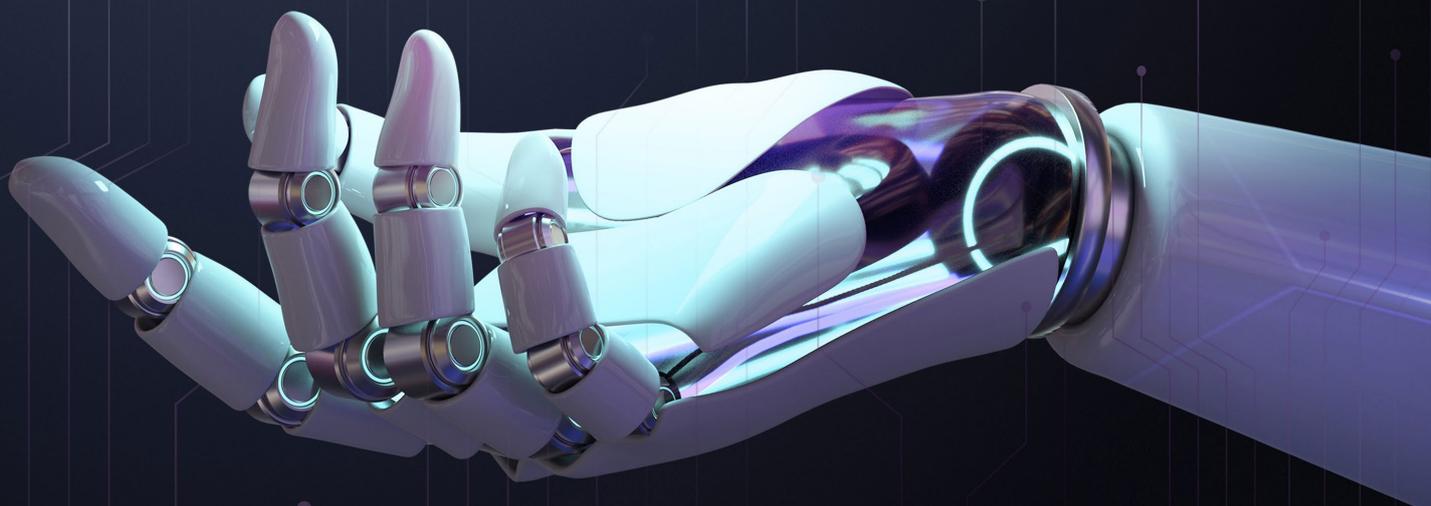


MEBUTRA

CZASOPISMO KATEDRY BUDOWNICTWA,
KATEDRY INŻYNIERII MECHANICZNEJ,
KATEDRY ELEKTROTECHNIKI I KATEDRY TRANSPORTU



WELDING FIXTURE DESIGN

STANDARDIZATION OF TESTS WITH A FOUR-BALL APPARATUS

DESIGN AND CONSTRUCTION OF LAB RIG FOR TESTING BOLT EFFICIENCY

3D PRINTING IN PROTOTYPING A CAR DRIVE ADAPTER

LASER CUTTING TECHNOLOGY

AND MORE



ANS

Akademia Nauk Stosowanych
im. Stanisława Staszica w Pile

ZESPÓŁ REDAKCYJNY

mgr inż. **Karolina Pikulik**

dr inż. **Jarosław Mikołajczyk**

mgr **Ewa Fijałkowska**

© Copyright by Akademia Nauk Stosowanych w Pile
j.mikolajczyk@ans.pila.pl | wydawnictwo@ans.pila.pl

KOMITET NAUKOWY

prof. dr hab. inż. **Bogdan Żółtowski**, UTH WARSZAWA

dr hab. **Stanisław Różański**, AKADEMIA NAUK STOSOWANYCH W PILE

dr inż. **Jan Deskur**, AKADEMIA NAUK STOSOWANYCH W PILE

dr inż. **Jarosław Mikołajczyk**, AKADEMIA NAUK STOSOWANYCH W PILE

dr **Małgorzata Kozłowska**, UNIWERSYTET JANA KOCHANOWSKIEGO W KIELCACH

prof. zw. dr hab. inż. **Krzysztof Zawirski**, AKADEMIA NAUK STOSOWANYCH W PILE

dr hab. inż. **Roman Muszyński**, prof. ANS, AKADEMIA NAUK STOSOWANYCH W PILE

dr inż. **Piotr Stanowski**, AKADEMIA NAUK STOSOWANYCH W PILE

prof. dr hab. inż. **Jan Kołodziej**, AKADEMIA NAUK STOSOWANYCH W PILE

dr **Krzysztof Leśniak**, UNIWERSYTET MIKOŁAJA KOPERNIKA W TORUNIU

dr inż. **Jarosław Kołodziej**, AKADEMIA NAUK STOSOWANYCH W PILE

dr inż. **Piotr Gorzelańczyk**, AKADEMIA NAUK STOSOWANYCH W PILE

prof. dr. hab. inż. **Henryk Tylicki**, AKADEMIA NAUK STOSOWANYCH W PILE

RECENZENCI

mgr inż. **Jolanta Olechnowicz**, ANS PILA

dr **Małgorzata Kozłowska**, UJK KIELCE

dr inż. **Wiktor Kupraszewicz**, ANS PIŁA

dr inż. **Jarosław Mikołajczyk**, ANS PIŁA

mgr inż. **Łukasz Fornal**, ANS PIŁA

dr inż. **Piotr Stanowski**, ANS PIŁA

Foreword

The year 2025 is the fourth year of the MEBUTRA periodical, and this issue is its fourth edition. We are very proud, especially as in April we received the ISSN number 3071-9216 assigned to this magazine from the ISSN National Center, the Periodicals Department of the National Library in Warsaw.

I would like to take this opportunity to encourage all students, especially students of the Department of Electrical Engineering, Department of Transport, Department of Mechanical Engineering and the Department of Civil Engineering of Stanisław Staszic State University of Applied Sciences in Piła, to submit their articles.



dr inż. Jarosław Mikołajczyk
jmikolajczyk@ans.pila.pl

Spis treści

WELDING FIXTURE DESIGN	03
STANDARDIZATION OF TESTS WITH A FOUR-BALL APPARATUS.....	44
DESIGN AND CONSTRUCTION OF LAB RIG FOR TESTING BOLT EFFICIENCY	54
3D PRINTING IN PROTOTYPING A CAR DRIVE ADAPTER.....	90
LASER CUTTING TECHNOLOGY.....	100
DETERMINING THE CORRELATION BETWEEN THE NUMBER OF CONSTRUCTION DISASTERS AND THE NUMBER OF PEOPLE INJURED	108
HARD-FACING AS A METHOD OF REGENERATING RAILWAY OR TRAM TURNOUTS	122
HYDROGEN CARS AS THE FUTURE OF TRANSPORT.....	139

Welding fixture design

PSM0000004116

inż. Tomasz Dokudowicz

Department of Mechanical Engineering

Stanisław Staszic State University of Applied Sciences in Piła, Poland

<https://orcid.org/0009-0001-9348-6702>

corresponding e-mail: tomaszdok706@gmail.com

Abstract: This paper presents the process of designing a welding fixture intended to improve the quality and efficiency of the manufactured finished product. Flat (2D) and spatial (3D) documentation was prepared for the designed fixture. The entire fixture is made up of five components: profile base assembly, leg base assembly, mounting assembly, profile pressure assembly and base assembly. Because technological holes were used, the weight of the fixture was reduced to 21.63 kg. The PSM0000004116 welding fixture has a design solution that allows the height of the leg base to be adjusted within the range of ± 1 mm. This small adjustment range is dictated by the ability to position the welds correctly.

Key words: welding technology, design process, welding fixtures

1. Introduction

Welding is a process of joining materials (mainly metals) by locally melting their edges with or without the addition of a filler metal. The joined elements are not pressed against each other during the welding process [212]. The document containing information on the welding process of a given product is the Welding Technology Manual. It contains, inter alia, guidelines such as:

- type of joint;
- type of weld;
- welding position;
- blowpipe angle;
- welding method;
- joint details;
- method of preparing and cleaning the material;
- name of the machine (welding machine);
- diameter of additional material (filler metal);
- wire feed speed (m/min);
- arc intensity;
- arc voltage;
- welding speed;
- type of additional material;
- type of shielding gas.

The second important document for the welding process of a given product is the Welding Plan which is an instruction for the assembly of elements. This manual shows, step by step, where the weld should be placed to properly complete the product. The use of such a plan is expected to bring benefits in the form of reduced training time for welders and increased control of welds [13]. This document contains, inter alia, information such as:

- number of the welding drawing;
- type of joint testing;
- regulations, standards and related documents;
- degree of welding mechanization: manual or robotic welding;
- number of the welding fixture;
- order of the assembly;
- welding sequence.

Because of the fact that welded joints are subjected to high loads and work in difficult conditions associated with changes in stresses resulting from variable forces acting on a given product, they should be subjected to thorough tests in terms of strength and compliance with technological requirements. Testing of welded joints can be divided into destructive testing and non-destructive testing. Destructive testing includes:

- breaking test;
- impact test;
- hardness test;
- bending test;
- tensile test;
- macroscopic tests;
- microscopic tests;

- metallographic tests.

Non-destructive testing includes:

- LT leaktightness tests;
- VT visual testing;
- UT ultrasonic testing;
- MT magnetic-particle testing ;
- PT penetration testing;
- RT radiographic testing.

One of the above-mentioned methods of destructive testing of welded joints is macroscopic examination. It involves cutting a sample and observing its cross-section without magnification or with magnification up to thirty times. The preparation of a sample involves cutting the element perpendicularly to the weld axis and polishing the surface with sandpaper of various granulations. The prepared polished section is etched with a strong acid in order to reveal the weld, its shape, and the number of layers in the weld. We can also obtain information on internal defects that occurred on the polished section, e.g. gas bubbles, sticking, non-metallic inclusions [212]. An example of a macroscopic examination is shown in Fig. 1.

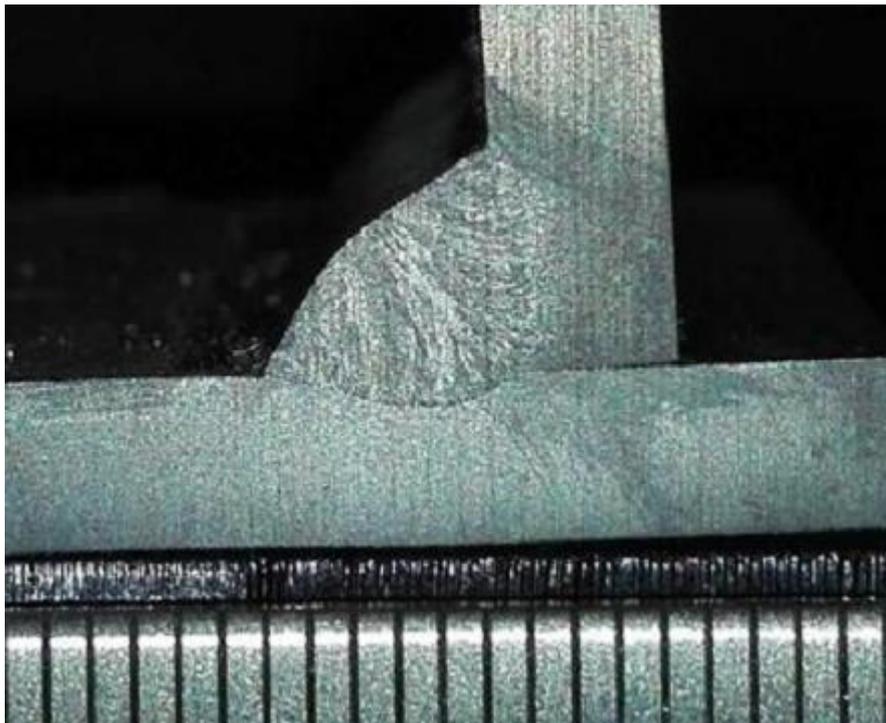


Fig. 1. Example of macroscopic examination (author's own research)

The most common non-destructive testing method is visual testing (VT) (Fig. 2), also called external inspection. This test involves a thorough visual observation of the weld, and taking its measurements. The tools used for this test are a slide caliper and a weld gauge. VT tests are mainly aimed at determining the dimensions of the weld and detecting most of the external defects of the welded joint, such as: [212]:

- weld asymmetry;
- craters;
- cracks;

- undercut of the welded material on both the face and root sides.



Fig. 2. Example of a sample subjected to visual examination (author's own research)

A welded product with imperfections may be repaired (the imperfections may be removed) by means of technological procedures (e.g. grinding, electro-air gouging). An item that has irreparable welding defects after the welding process is unfortunately usually not suitable for use [212].

The PN-EN- ISO 5817 standard lists the following external (surface) welding imperfections and defects:

- cracks
- surface blowholes;
- crater pipe end discordance;
- incomplete fusion;
- undercut;
- excessive weld protrusion;
- excess penetration bead;
- improper toe of weld;
- excessive weld asymmetry;
- root concavity;
- improper restart of welding;
- insufficient throat of fillet weld;
- excessive weld throat thickness;
- erratic arc;
- weld overlap;
- weld sagging;
- incompletely filled groove;
- melt-through.

The above-mentioned standard also enumerates the following types of internal imperfections and welding defects:

- gas cavities;
- cracks;
- metallic inclusions;
- copper inclusions;
- incomplete fusion;
- no weld penetration.

A very important feature of steel is its weldability, i.e. the ability to create strong and durable welded joints without the occurrence of welding defects such as cracks, lack of joint penetration, or porosity. To determine the weldability of steel, the carbon equivalent index C_E is used.

Information on the chemical composition and the C_E carbon equivalent index should be included in the material certificate delivered together with the steel products [15].

Welding is one of the most important methods of joining metals. In order to ensure high quality of manufactured elements and precision of joints, in addition to the welder's experience, it is also necessary to prepare the process, including the use of appropriate welding equipment. Designing and implementing these fixtures is an important step in optimizing the production process.

Welding fixtures is a set of special devices and tools designed to support the welding process. Their design ensures accuracy, repeatability and positioning of elements before and during the welding process. If it were not for the use of welding fixtures, welders during mass production would have to struggle with difficulties related to the assembly of elements and deformation of the material after welding. Currently, there are many different solutions of welding fixtures on the commercial market (Fig. 3).



Fig. 3. Example of Siegmund S16 Extreme 8.7 welding table with accessories [16]

Among the many types of welding fixtures we can find, inter alia, turnover fixtures and positioners. A turnover fixture is a device with the help of which we turn the element around its own axis during the welding process. This solution eliminates the need for manual manipulation of the welded object, and also affects the quality and precision of welding. Turnover fixtures are mainly used when welding elements such as pipes and construction elements where the welds performed are often subjected to detailed examination. The ability to adjust the position of the element vertically, horizontally and at any angle allows the welder to focus only on the welding process itself. Positioners are used in both individual and serial production.

In addition to the above-mentioned devices, there is also a group of special welding fixtures dedicated to specific elements that are to be welded. They enable quick and convenient attachment and precise welding of a given product. Such solutions ensure repeatability and high accuracy of the welding process, which is particularly important in the

case of details that require precision. Welding fixtures are mounted on special frames, mounting plates or welding positioners, which allows for their stable mounting and adjustment to the needs of a given project. Various types of clamps are used to build such devices, both manual and pneumatic, depending on the level of automation and the degree of complexity of the structure. This allows the fixture to be adapted to production requirements, ensuring optimal efficiency and quality of the work performed (Fig. 4).

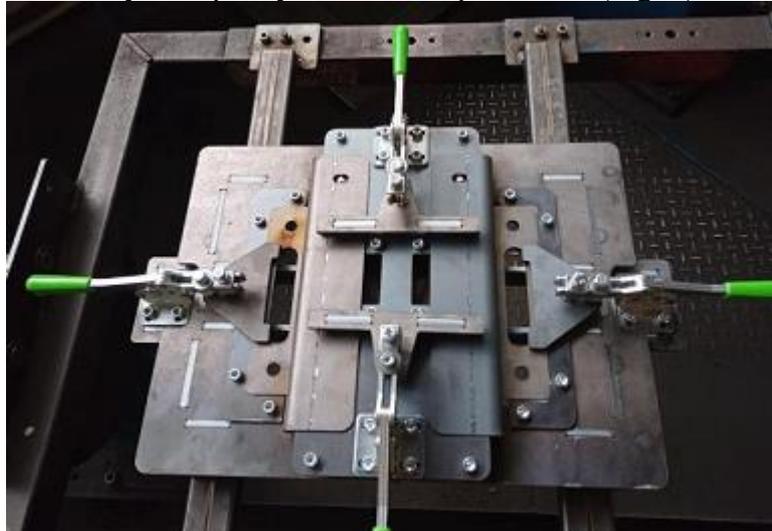


Fig. 4. Special welding fixture mounted on the welding robot table (author's own research)

2. Design of a welding fixture for a product called "LEG"

For the purposes of this work, a product called "LEG" was used – a construction element that can be used, inter alia, in public transport. "LEG" performs a key load-bearing function ensuring the stability and durability of the structure, e.g. a seat, and ensures the possibility of its safe attachment to the vehicle (chassis).

The type of material used for this construction of the product called "LEG" was S235JR structural steel, selected for its good plastic properties and ease of welding.

S235JR steel is a material that is widely used in the construction and machinery industry due to its universal properties such as [14]:

- strength;
- plasticity;
- ease of machining.

The individual steel abbreviations are:

- S – structural steel;
- 235 – minimum yield point expressed in [MPa] for samples up to 16 mm thick;
- JR – indicates that the steel meets the impact strength requirements at 20°C.

Concentrations of chemical elements in S235JR steel are included in Table 1 based on the material certificate 3.1 EN10204.

Table 1. Concentrations of chemical elements in S235JR steel based on the material certificate EN10204 .

Concentration of elements		
Chemical element	Symbol	Concentration value [%]
carbon	C	0.12
silicon	Si	0.014
phosphorus	P	0.006

manganese	Mn	0.42
sulfur	S	0.006
copper	Cu	0.02
vanadium	V	0.001
aluminum	Al	0.034
molybdenum	Mo	0.002
titanium	Ti	0.001
boron	B	0.0002
niobium	Nb	0.001
nickel	Ni	0.005
nitrogen	N	0.0059
chromium	Cr	0.02

The mechanical properties of steel grade S235JR according to material certificate 3.1 EN10204 are presented in Table 2.

Table 2. The mechanical properties of steel grade S235JR according to material certificate 3.1 EN10204

Mechanical properties	
Property	Value
Yield point	259 MPa
Tensile strength	371 MPa
Elongation	34.5%

Based on the material certificate 3.1 EN10204 the C_E carbon equivalent index is 0.2%, and the $C_{E'}^*$ carbon equivalent index value calculated using the formula given in the standard is 0.196%. The above results confirm the good weldability of S235JR steel.

Overall dimensions of the “LEG” type product (Fig. 5) are:

- height: 361mm;
- length: 672.4mm;
- width: 240mm.

The production process of the above-mentioned product includes the following operations:

- 2D and 3D laser cutting;
- bending;
- welding;
- shot peening;
- powder coating.

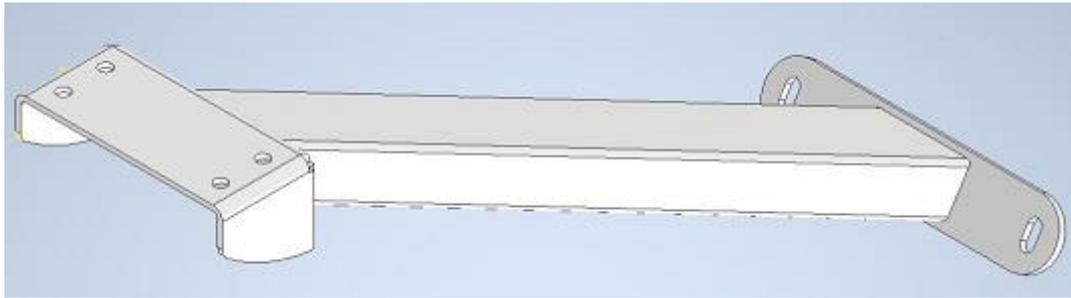


Fig. 5. 3D model of "LEG" product designed in Solid Works

The 3D model of the designed welding fixture was made using CAD Solid Works 2016, and the flat documentation was made in Autodesk Inventor Professional 2022. Before starting the design work, the welding fixture was assigned a unique number for verification purposes: PSM 0000004116.

In order to create an appropriate 3D model that meets a number of technical factors and to implement the project, the following design assumptions were made:

- the material used for the construction of the fixture is S235JR steel;
- a fixture designed for manual welding;
- elements cannot be displaced (use of clamps);
- the weight of the fixture should not exceed 25kg;
- elements should be made of sheet metal using laser cutting;
- fixture assembled using welded joints (TIG method) and screw joints;
- ergonomics of use: minimization of welder's effort and ease of operation;
- fixture consisting of several smaller components;
- possibility of placing tack welds as well as welding the entire product;
- preparation of flat documentation (2D) for the person assembling the fixture;
- round all edges of elements;
- components should be positioned in relation to each other using mounting locks or screw joints;
- possibility of replacing elements;
- using a solution that allows the MOUNTING element to be moved.

Because of limited technical possibilities, the following purchased components in the form of mounting clamps were selected:

a) horizontal quick clamp with horizontal base type 903

In order to protect against the possibility of displacement of elements such as the MOUNTING and PROFILE 80x40x2, a RAIS-TOOLS clamp No. 903 was taken (Fig. 6). The selection was made based on the dimensions of the clamp.

The above-mentioned clamp is made of galvanized structural steel. Stainless steel pins, mounted in thermo-chemically improved knurled bushings. The joints of the parts are greased [33÷74]. Flexible handle, made of plastic. The workpiece (welded object) is fixed when the handle is in a horizontal position. [<https://www.rais.pl>].

The specifications of the 903 clamp are as follows:

- mass: ≈ 0.40 kg;
- clamping force: ≈ 210 daN [kG];
- length: 234mm;
- height: 65mm.

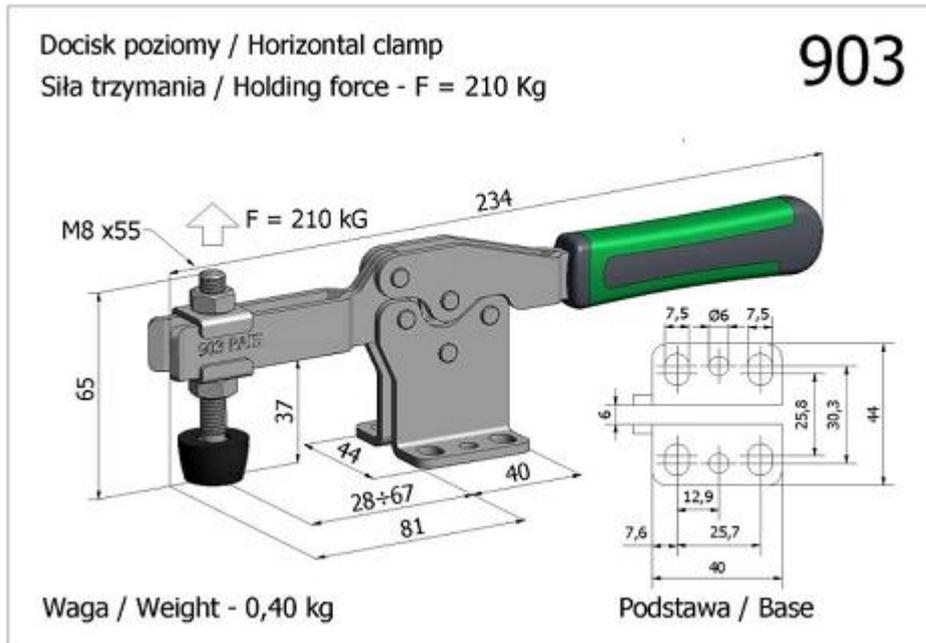


Fig. 6. Horizontal clamp 903 [<https://www.rais.pl>]

b) horizontal quick clamp with base type 952 [12]

In this project, a RAIS-TOOLS 952 (882) clamp was used which was selected due to its properties enabling effective immobilization of the welded element, small dimensions, and the possibility of mounting the clamp resulting from its construction.

The technical data of the 952 clamp are as follows [<https://www.rais.pl>]:

- mass: $\approx 0.19 \text{ kg}$;
- clamping force: $\approx 130 \text{ daN [kG]}$;
- length: 163mm;
- height: 59mm.

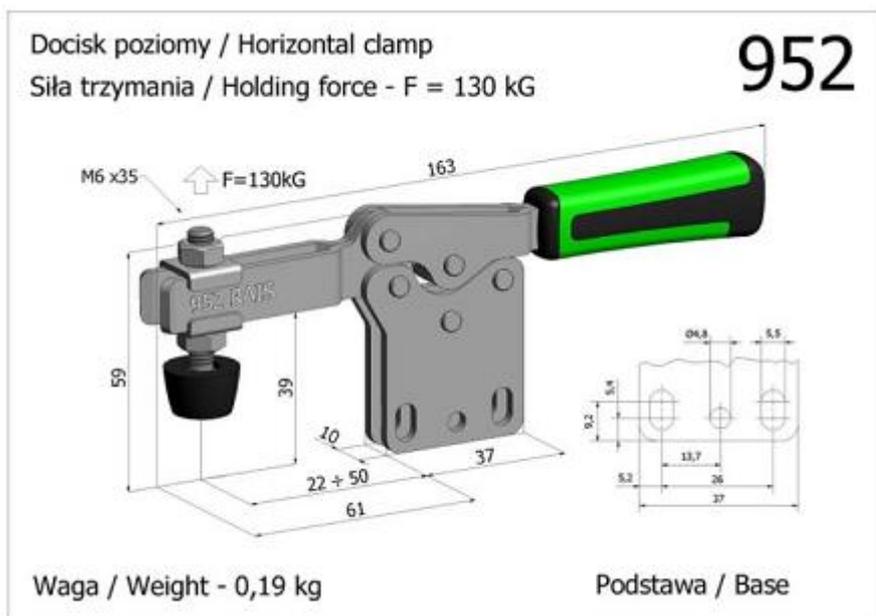


Fig. 7. Horizontal clamp 952 [<https://www.rais.pl>]

In order to make the welding fixture, an important step was to build a 3D model using Solid Works. This software allows very accurate mapping of the geometry of the designed

components, makes it possible to assign the appropriate type of material (e.g. steel) to solids, and visualize the assembly in order to obtain information including the number of components used in the assembly.

In order to avoid unnecessary names of elements, they were given a main member Base and an auxiliary member with the number and thickness of the sheet metal from which they are to be made, e.g. Base 1-5mm.

All mounting locks are enlarged by 0.1 mm around the circumference (Fig. 9). For a better fit of the fixture elements, circular cutouts with a radius of 1 mm were created in the corners of locks as shown in Fig. 8.

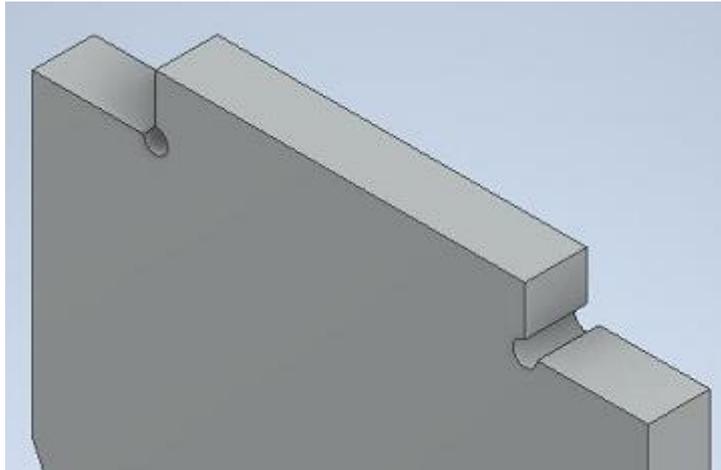


Fig. 8. Example of a mounting lock



Fig. 9. Example of a model of a mounting lock

The first step in the welding fixture modeling process was to import the STEP file containing a model of a component named “LEG” into a new Solid Works – Assembly document. Then, taking into account the design assumptions, the welding fixture design was started.

After analyzing the overall dimensions of the product, a Base1-5mm sketch was made (Fig. 10), and then a solid model was created using a simple extrusion operation by a distance of 5 mm (Fig. 11), to which a material was assigned by the program (in our case it was steel). The obtained model is a base measuring 850mm in length, 200mm in width and 5mm in height. A welding fixture will be built on this model.

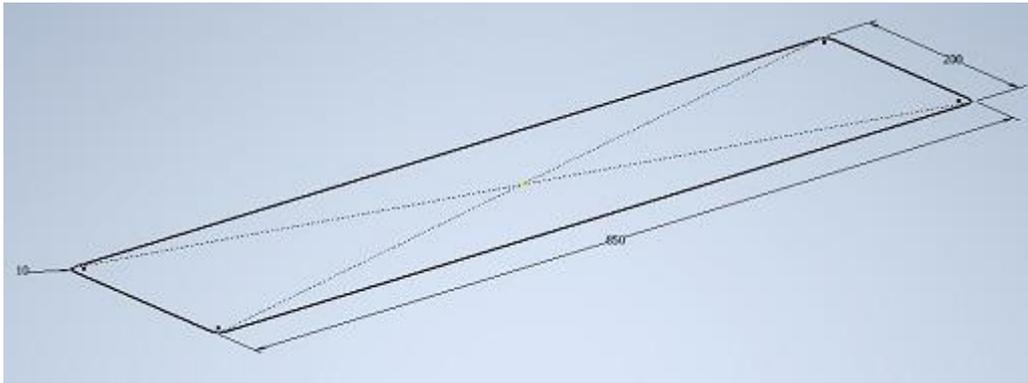


Fig. 10. Base 1-5mm sketch

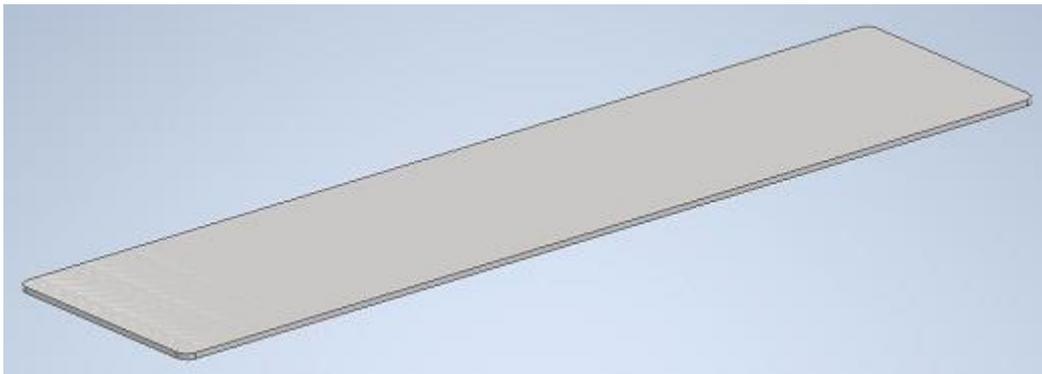


Fig. 11. 3D model of the welding fixture base

In the next step of modeling the welding fixture, the “LEG” element model was programmatically linked to the welding fixture base using links (Fig. 12).



Fig. 12. Model of "Base 1-5mm" assembly with "LEG" element

In the next stages, the following assemblies were made to form the components of the welding fixture PSM0000004116:

- profile base assembly (Fig. 13);
- leg base assembly (Fig. 14);
- fixing assembly (Fig. 15);
- profile clamp assembly (Fig. 16);
- base assembly (Fig. 17);
- model of the entire fixture (Fig. 18).

As part of the design, the following were used in the Solid Works program: sketch tools, plane extrusion, plane cuts, fillets, threaded holes. Additionally, common, concentric, width and distance joints were used.

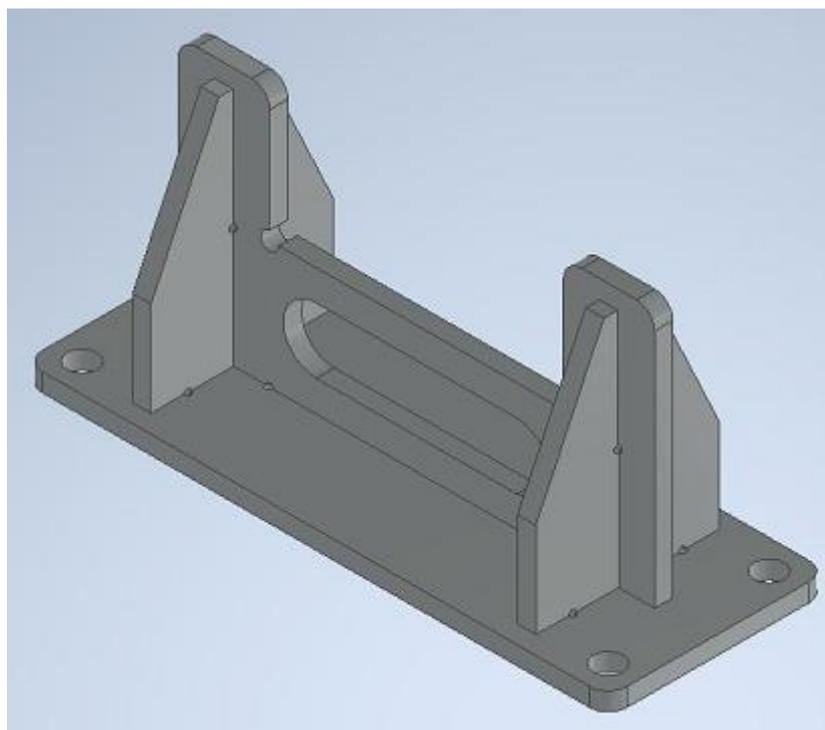


Fig. 13. 3D model of the profile base assembly

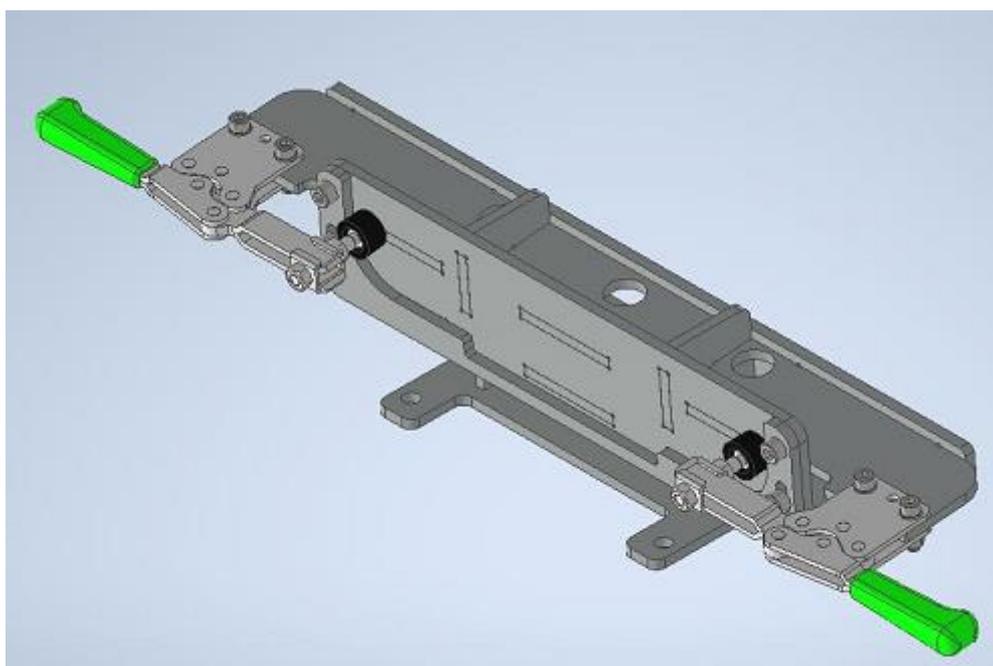


Fig. 14. 3D model of the leg base assembly

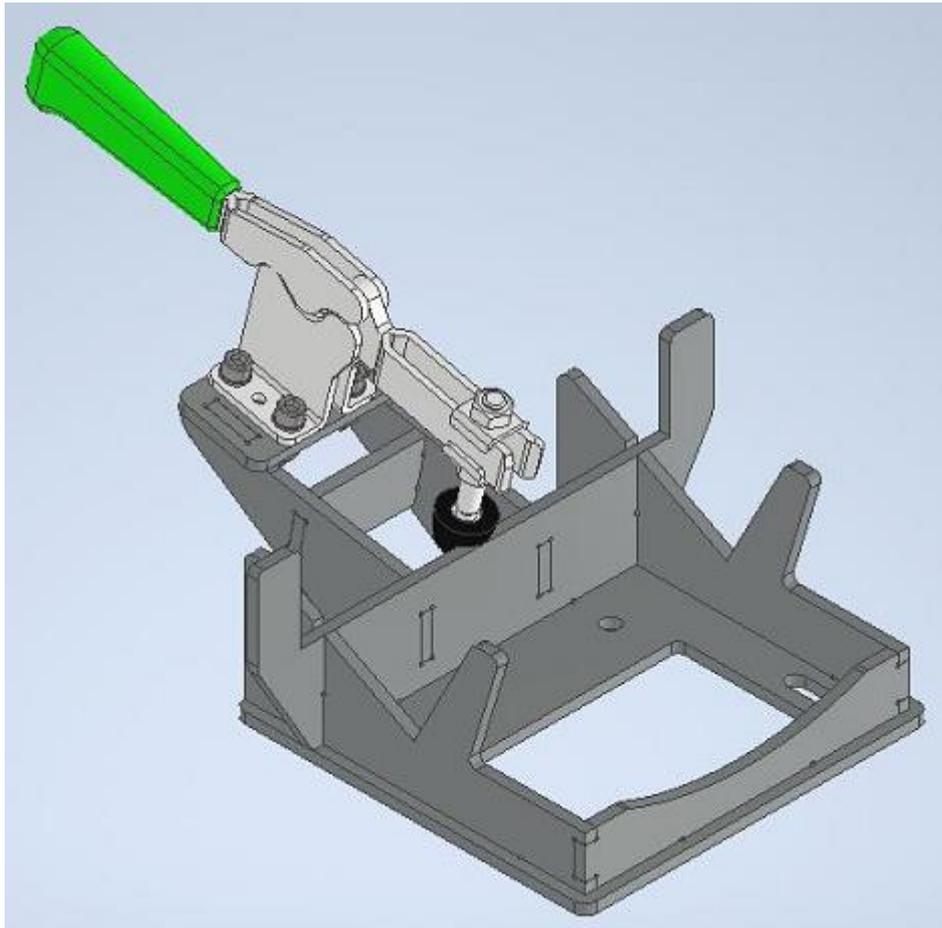


Fig. 15. 3D model of the mounting assembly

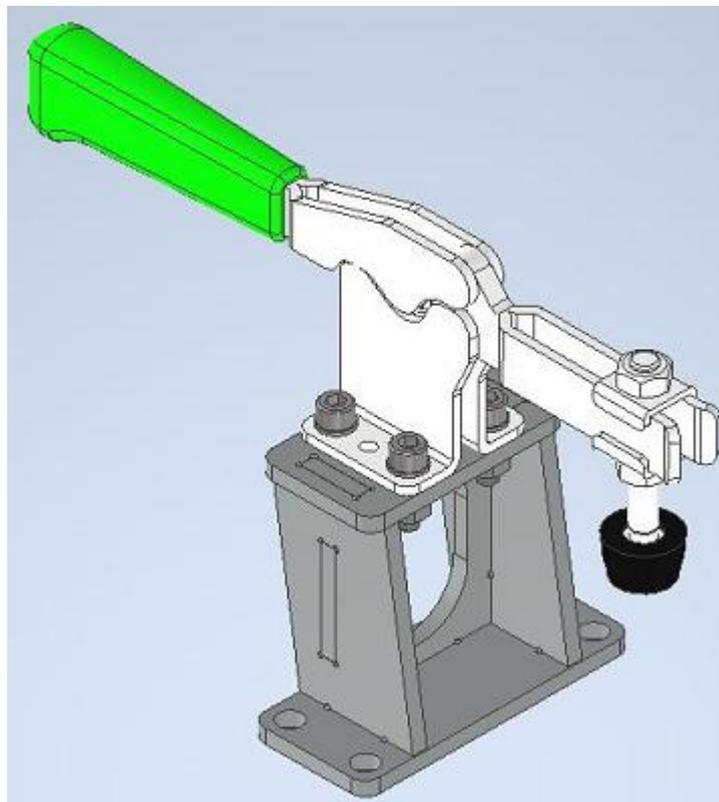


Fig. 16. 3D model of the profile pressure assembly

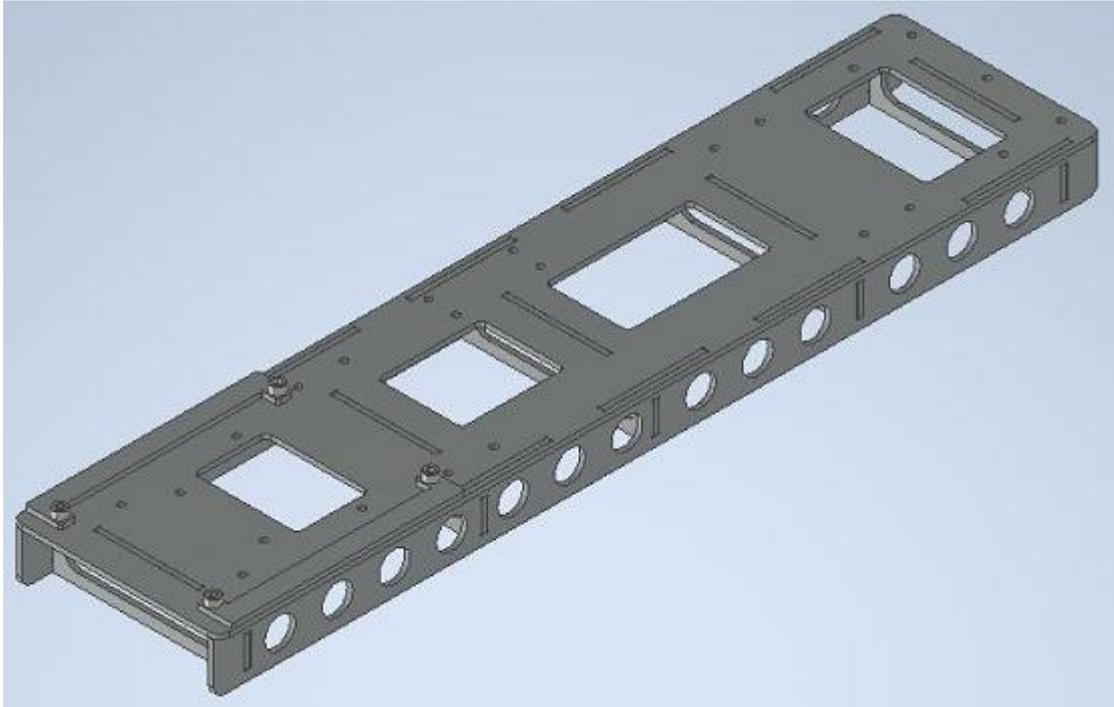


Fig. 17. 3D model of the base assembly

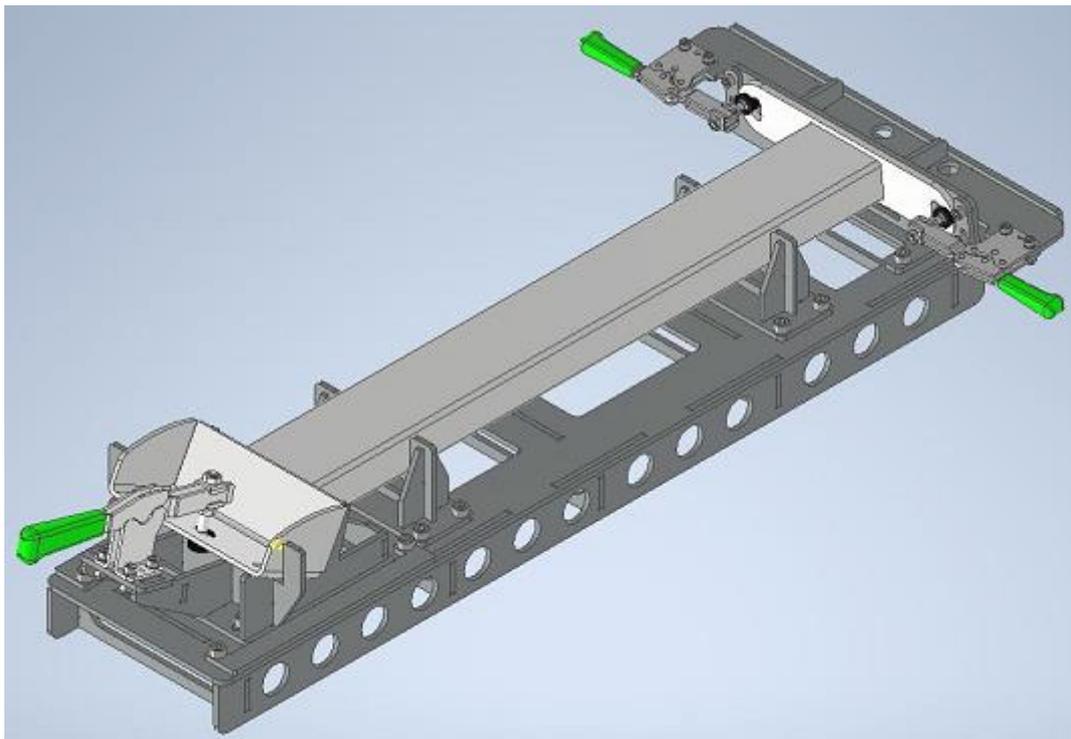


Fig. 18. 3D model of the finished welding fixture PSM0000004116

To finish the design, the element planes were exported to a DXF file which allowed the laser cutting operator to produce the designed components.

The implementation of the PSM0000004116 welding fixture project began with cutting out the elements using a laser cutter. Files with compact surface outlines were laid out on a 5mm thick sheet of metal by the laser operator. The cutting process is shown in Fig. 19, and the operating parameters are given in Table 3.



Fig. 19. The process of cutting the components using a plasma cutter

Table 3. Laser cutting parameters

Parameter	Value
Breakdown power	5000[W]
Cutting power	3500[W]
Velocity	3000 [mm/min]
Nozzle height	0.7[mm]
Pressure	0.8[bar]
Gas	Oxygen
Focus	4[mm]

The next step in the technological process was to complete all the elements according to the developed technical documentation. The quality of burning was checked to see if there were any defects during the realization of elements. All elements made with a laser cutter are shown in Fig. 20.

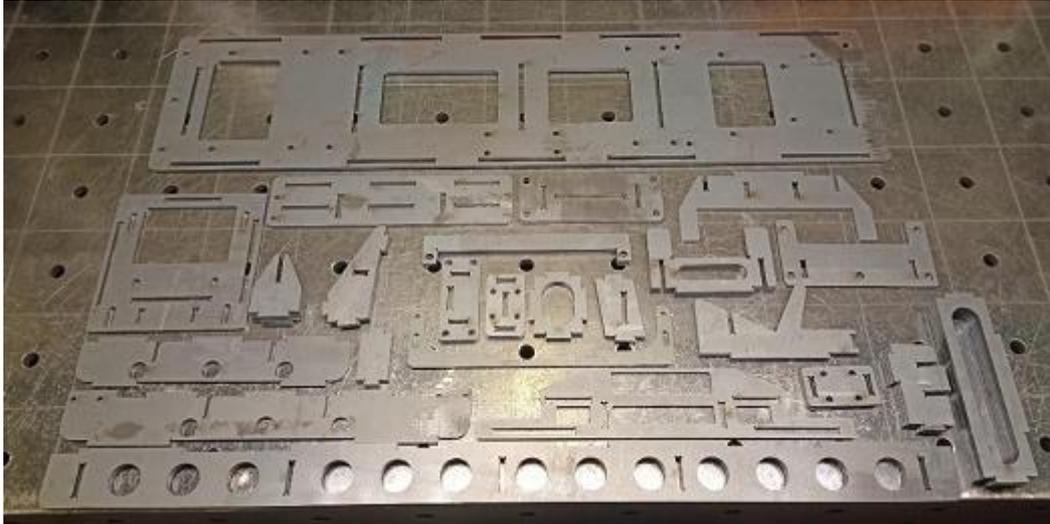


Fig. 20. Completion and checking after the laser cutting process

Then, elements were selected that included screw connections in the design. Conical countersinks were made in the burnt holes, and then threads were made using a table drill (Fig. 21).

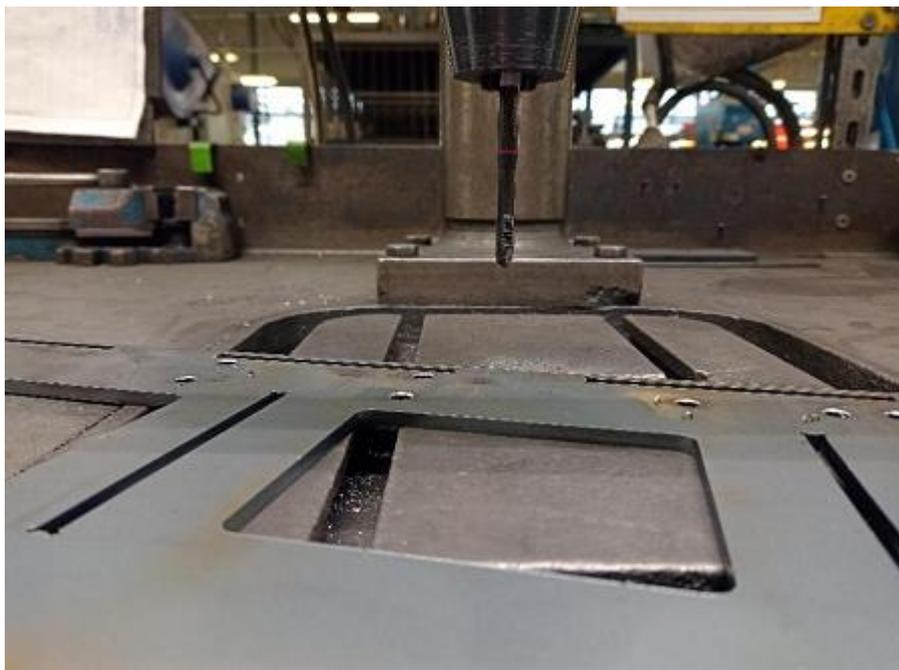


Fig. 21. Threading in burnt holes

After laser cutting, it is necessary to remove burr from the edges of the burned elements as well as smoke. For this purpose, an orbital sander was used with 180-grit sandpaper. The cleaning process was then started (Fig. 22).

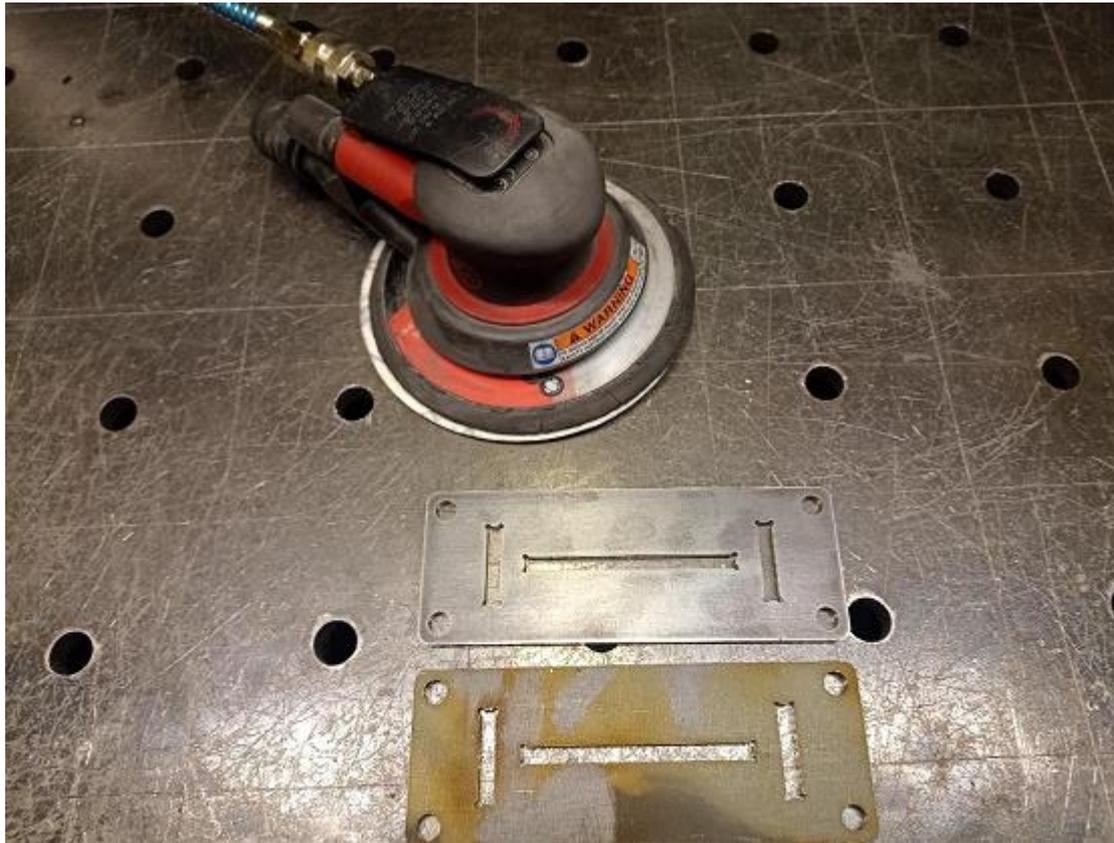


Fig. 22. Elements of the PSM0000004116 welding fixture before (lower element) and after (upper element) cleaning with an orbital sander

After threading and cleaning, the elements of PSM0000004116 welding fixture were welded with spot welds using the TIG 141 method. This method was used due to the lack of chipping, no possibility of having incomplete fusion weld, and because of flat face which meant no further finishing treatment was necessary in the form of grinding. The main locations of welds are marked at the mounting locks. The welding rig for assembling the PSM0000004116 welding fixture is shown in Fig. 23. The welding rig is equipped with:

- universal assembly table with extraction of welding gases and fluids;
- mounting clamps;
- OTH DAIHEN DA300P welder;
- Allen, flat and tubular wrenches.

The following welding parameters were applied when making spot and continuous welds:

- current intensity; $I=150$ [A];
- shielding gas: mixture II (100% Argon);
- gas flow: 6 [l/min];
- purple electrode with a diameter of $\varnothing 2.4$ mm, sharpening angle 30° ;
- additional material: TIG bars Tigrod 12.64 2.4Esab.



Fig. 23. View of the TIG welding rig

The first to be assembled was the profile base assembly. Prepared elements (Fig. 24) were assembled in accordance with the previously prepared working drawing No. ANS-4116-Z2 (Fig. 25). In order to lock the parts against movement, a screw clamp was used (Fig. 26).



Fig. 24. Elements of the profile basing set ready for assembly

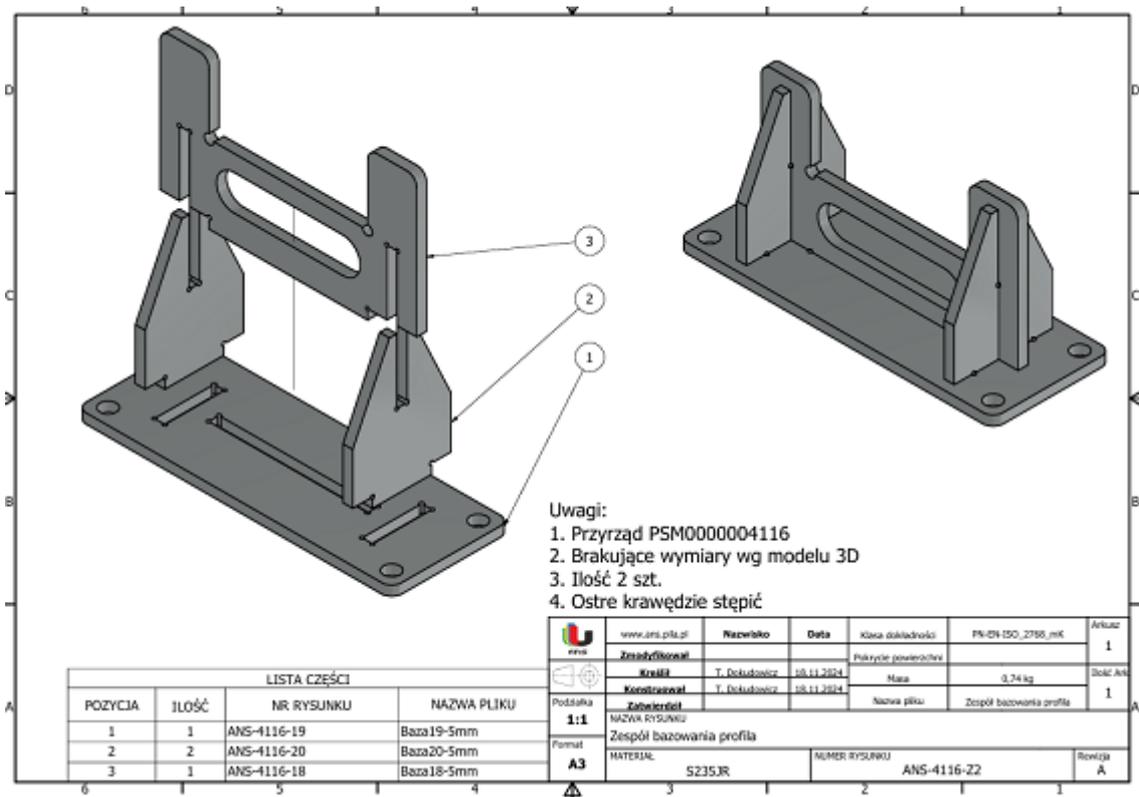


Fig. 25. Drawing ANS-4116-Z2. Profile base assembly

In the next step, the leg bases were assembled according to the previously prepared assembly drawing number ANS-4116-Z5 (Fig. 27). The elements shown in Fig. 28 were pressed together with a screw clamp. Self-clamping pliers were also used for assembly (Fig. 29). Then, the welding process was started.

The mounting assembly was made as the third one. For its implementation, a previously developed assembly drawing No. ANS-4116-Z3 was used (Fig. 30). The components of the mounting assembly are shown in Fig. 31, and the erection of the mounting assembly is shown in Fig. 32.

The last assembly of the PSM0000004116 welding fixture was the base assembly made in accordance with the previously prepared assembly drawing number ANS-4116-Z4 (Fig. 33). During its installation, screw clamps were used to obtain flat surfaces of the joined elements. The whole thing was welded in places where mounting locks were located. The making of the base assembly is shown in Fig. 34 and Fig. 35.

The last step was to assemble all the units into one whole in linw with the previously prepared drawing number ANS-4116-Z6 (Fig. 36). M8x1.25 screws and Allen keys were used to assemble the whole thing. The finished welding fixture PSM0000004116 is shown in Fig. 37.

After putting together the PSM0000004116 welding fixture, assembly tests were carried out on the finished product, which is the seat leg. It was checked whether the clearances between the bases and individual elements were not too large. The clamp screws were adjusted so that they properly pressed the elements to the bases. For this purpose, flat and tubular wrenches were used. The components of the finished seat leg assembled in the PSM0000004116 welding fixture are shown in Fig. 38.



Fig. 26. The process of fitting the profile base assembly

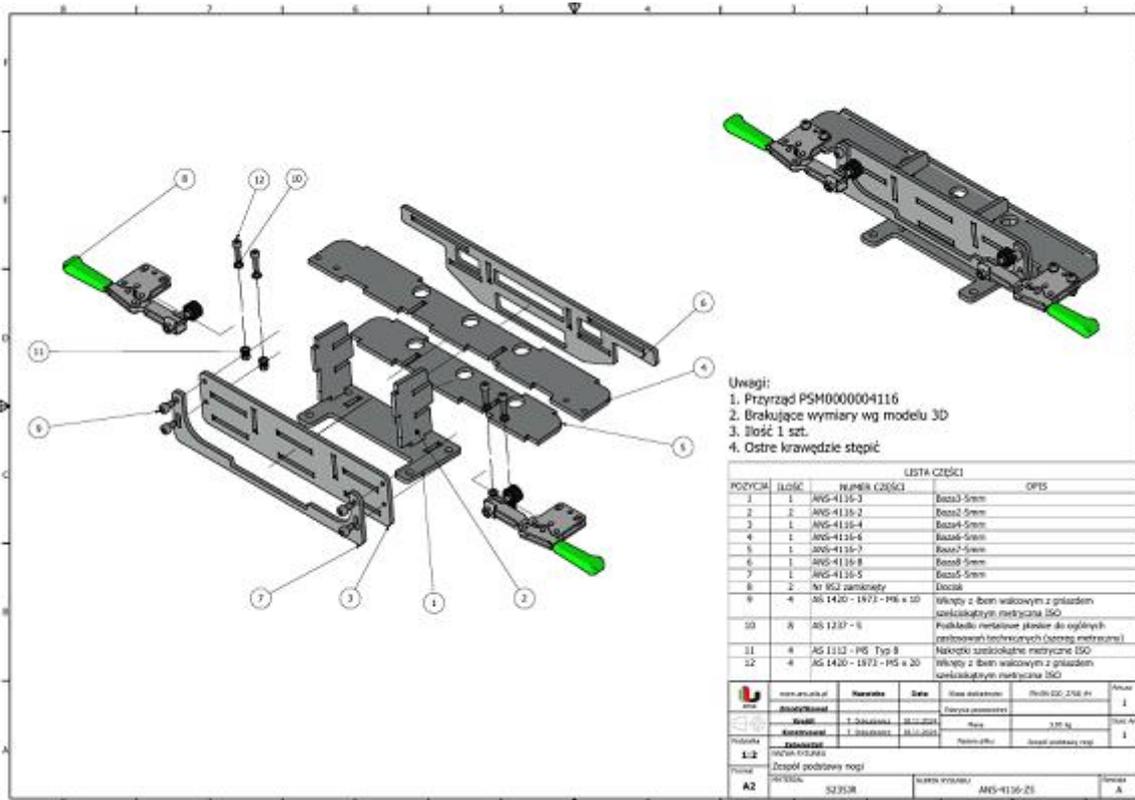


Fig. 27. Drawing ANS-4116-Z5 leg base assembly



Fig. 28. Components of the leg base assembly



Fig. 29. Installation of the leg base assembly according to the assembly drawing ANS-4116-Z5

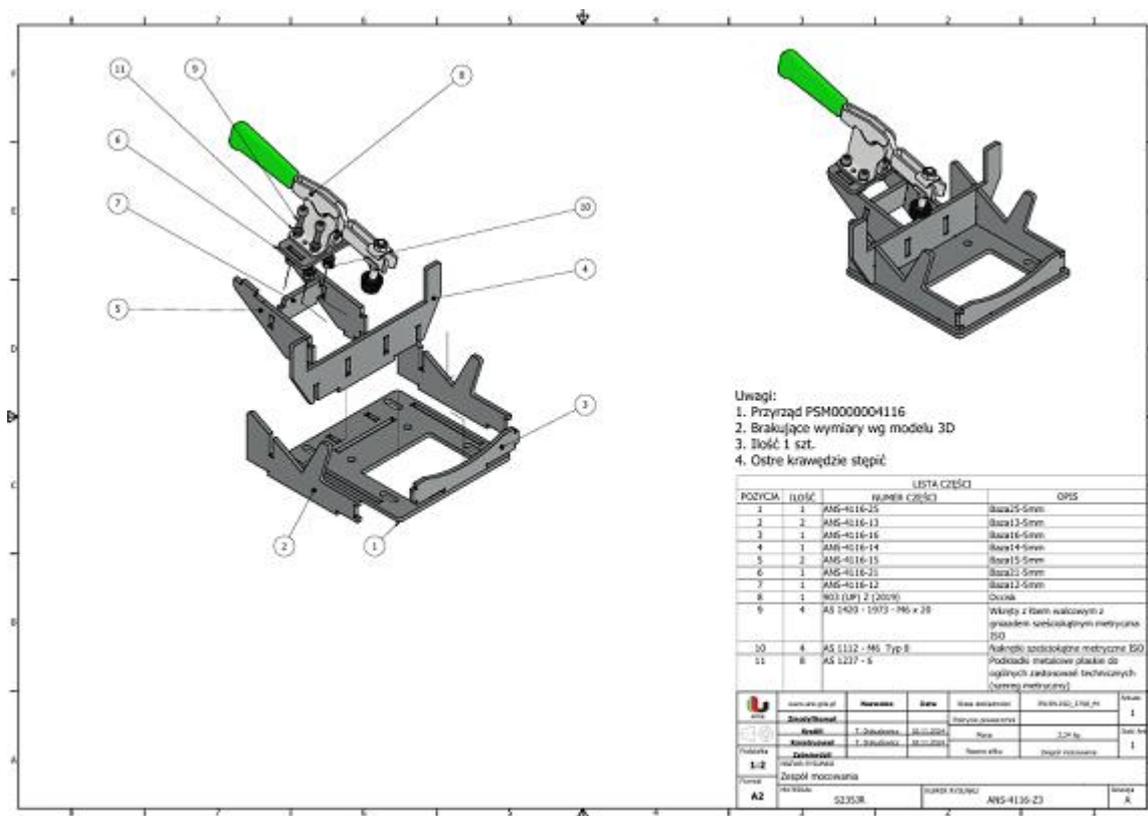


Fig. 30. Assembly drawing ANS-4116-Z3 of the mounting assembly



Fig. 31. Elements of the mounting assembly



Fig. 32. Installation of the mounting assembly according to the assembly drawing ANS-4116-Z3 of the PSM0000004116 welding fixture

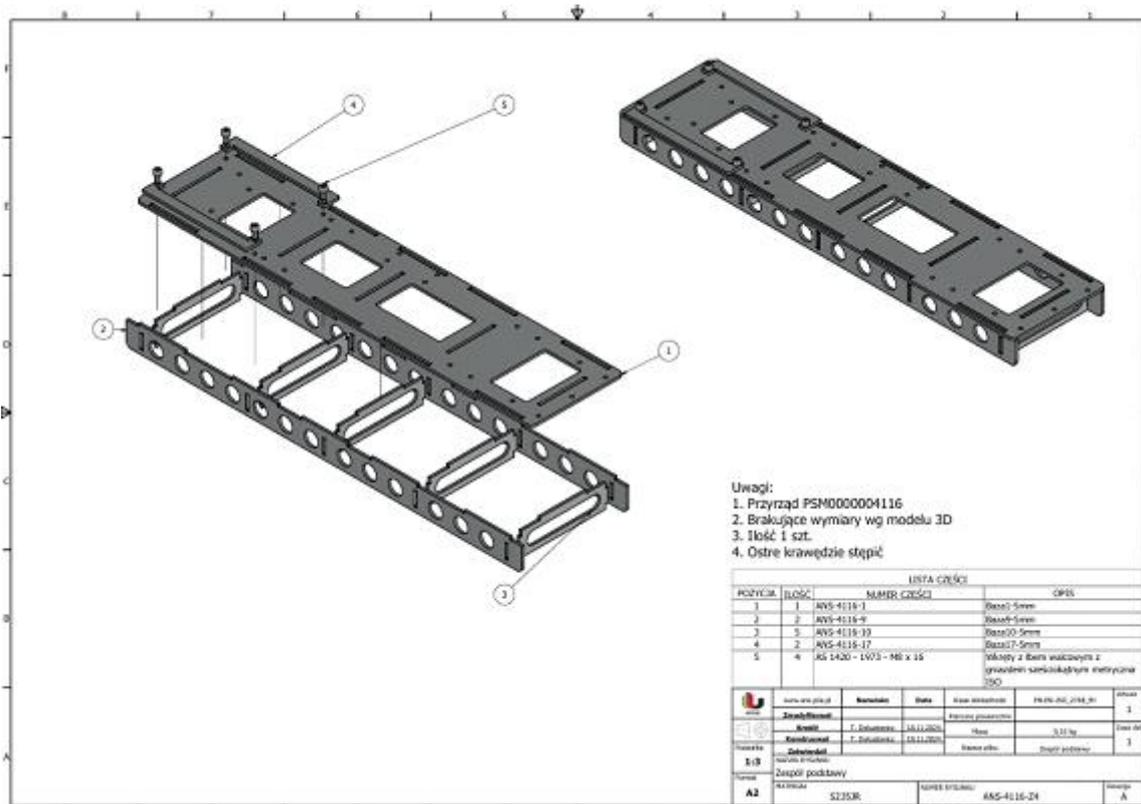


Fig. 33. Assembly drawing ANS-4116-Z4 of the base assembly



Fig. 34. Components included in the base assembly



Fig. 35. Installation of the base assembly according to the assembly drawing number ANS-4116-Z4 of the PSM0000004116 welding fixture

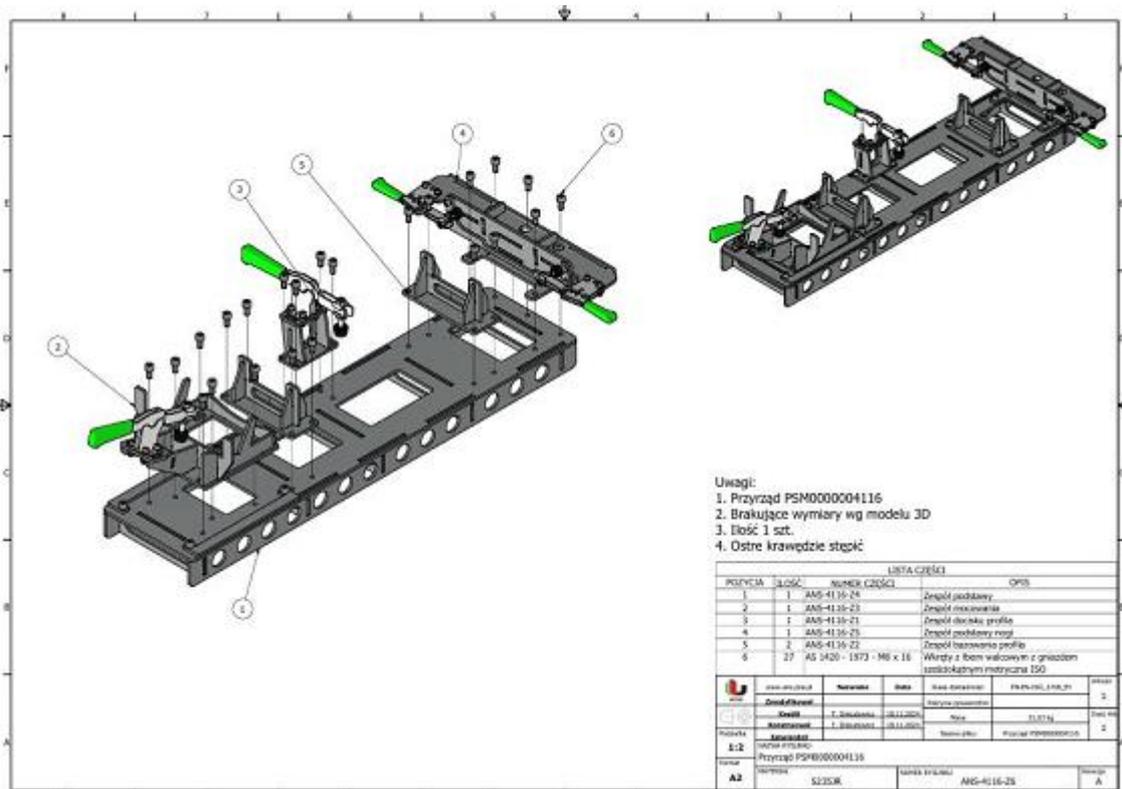


Fig. 36. Assembly drawing ANS-4116-Z6 of the entire welding fixture PSM0000004116

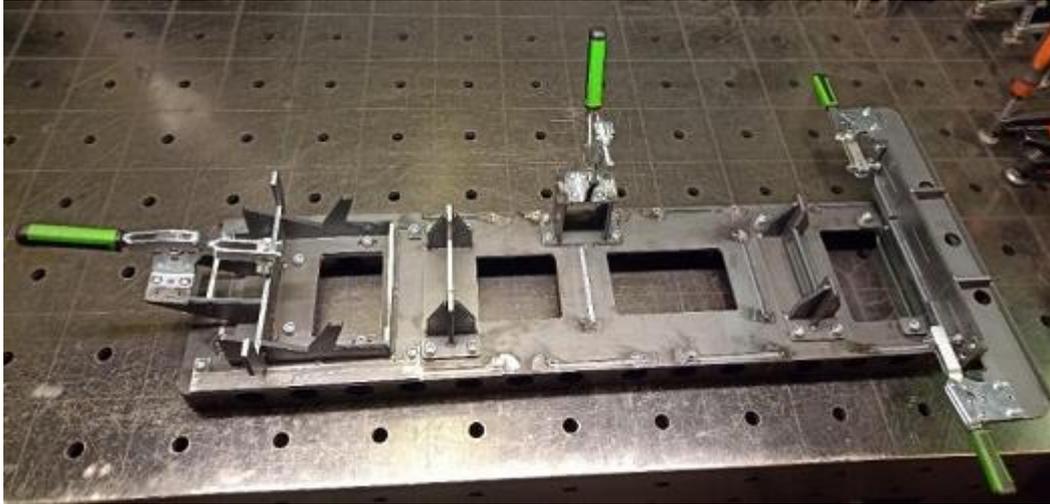


Fig. 37. View of the finished welding fixture PSM0000004116

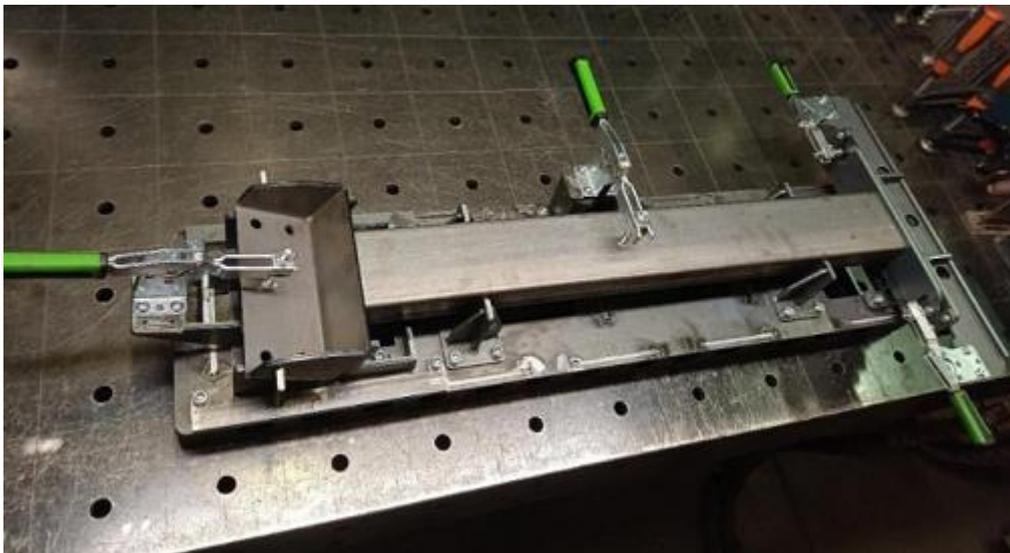


Fig. 38. Assembly tests of individual elements of the finished product of the seat leg in the welding fixture PSM0000004116

Finally, it is worth mentioning that the list of general standards in the field of gas and electric welding is included, inter alia, in many standards [191÷207]. And the list of standards for carbide and welding gases refers to the standard [185÷190]. The discussion of filler metals and fluxes refers to the standard [165÷184]. The discussion of gas welding equipment refers to the standard [136÷164]. The discussion of electric welding equipment refers to the standard [124÷135]. The shapes of welds refer to the standard [111÷123]. Mechanical tests of welded, spot-welded and soldered joints are discussed in standards [97÷110]. Weld defects, radiographic and ultrasonic testing are discussed in standards [82÷96]. And steel intended for welding is discussed in standards [76÷81]. Of course, before applying a given standard, it is necessary to check whether the given standard is currently valid.

A lot of interesting information on welding processes can be found, inter alia, in the following literature [1, 10, 11, 20, 18, 19, 75, 209, 210, 211, 237]. Welding is also used in construction (reinforcement of building structures) and may have an impact on the number of construction disasters [73, 74].

3. Conclusion

The designed and manufactured welding fixture did improve the quality of manufactured elements and contributed to more efficient welding operations. Thanks to the use of technological holes, the weight of the welding fixture was reduced to 21.63 kg. It was assumed in the design that the weight of the fixture should not exceed 25 kg, which was achieved.

The PSM0000004116 welding fixture has a design solution that allows the height of the leg base to be adjusted within the range of ± 1 mm. This small adjustment range is dictated by the ability to position the welds correctly.

4. Literature

1. Dobrowolski Z.: Podręcznik spawalnictwa. Wydawnictwo WNT, Warszawa 1978.
2. Domański A., Mikołajczyk J.: Dimensional analysis of the selected type of rolling bearing depending on the manufacturer. **W:** Szkoła Logistyki 2023 / redakcja naukowa Janusz Zawiła-Niedźwiecki, Katarzyna Białczak. Radom: Instytut Naukowo-Wydawniczy "Spatium", 2023, Poland. **Szczegóły:** s. 79-89, **p-ISBN:** 978-83-67033-75-6; **e-ISBN:** 978-83-67033-58-9.
3. Galon M., Mikołajczyk J.: The effect of laser cutting speed on the bearing surface of peaks and valleys of the cut surface. **W:** Logistyka w ratownictwie 2024 / pod redakcją Andrzeja Chudzikiewicza i Andrzeja Krzyszkowskiego. Radom: Instytut Naukowo-Wydawniczy Spatium, 2024, Poland. **Szczegóły:** s. 71-84, **p-ISBN:** 978-83-68026-24-5; **e-ISBN:** 978-83-68026-25-2.
4. Galon M., Mikołajczyk J.: The effect of laser cutting speed on the weight of the workpiece. **W:** Logistyka w ratownictwie 2024 / pod redakcją Andrzeja Chudzikiewicza i Andrzeja Krzyszkowskiego. Radom: Instytut Naukowo-Wydawniczy Spatium, 2024, Poland. **Szczegóły:** s. 85-96, **p-ISBN:** 978-83-68026-24-5; **e-ISBN:** 978-83-68026-25-2.
5. Galon M., Mikołajczyk J.: Wpływ wartości posuwu podczas cięcia laserem na chropowatość powierzchni przecięcia. **Źródło:** Obróbka Metalu. **Szczegóły:** 2024, nr 3, s. 48-53, **p-ISSN:** 2081-7002;
<https://obrobkametalu.tech/nasze-czasopismo/archiwum/>
6. Grabowska M., Mikołajczyk J.: Zastosowanie tomografii komputerowej CAT w inżynierii materiałowej. Application of CAT scanning for materials engineering. **Źródło:** Postępy w Inżynierii Mechanicznej [Developments in Mechanical Engineering]. 2017, nr 9 (5), s. 15-26, **p-ISSN:** 2300-3383; Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego w Bydgoszczy, Poland. <http://wu.utp.edu.pl/oferta,8,1>
7. Grabowska M., Mikołajczyk J.: Próba zastosowania tomografii komputerowej CAT do określania struktury grafitu naturalnego w zależności od rozmiaru ziarna. An attempt to apply cat scanning to determine the natural graphite structure depending on the grain size. **Źródło:** Postępy w Inżynierii Mechanicznej [Developments in Mechanical Engineering]. 2018, nr 12 (6), s. 5-14, **p-ISSN:** 2300-3383; Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego w Bydgoszczy, Poland.
<http://wu.utp.edu.pl/oferta,8,1>
8. Grabowska M., Mikołajczyk J., Basiak S.: Zastosowanie tomografii komputerowej CAT w nieniszczących badaniach teowych złączy spawanych. Application of cat scanning in non-destructive testing of welded t-joints. **Źródło:** Postępy w Inżynierii Mechanicznej [Developments in Mechanical Engineering]. **Szczegóły:** 2018, nr 11 (6), s. 31-44, **p-**

ISSN: 2300-3383; Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego w Bydgoszczy, Poland.

<http://wu.utp.edu.pl/oferta,8,1>

9. Grabowska M., Piochacz A., Mikołajczyk J.: Attempt to use computed tomography CAT to analyze the anodized layer. **Źródło:** Postępy w Inżynierii Mechanicznej [Developments in Mechanical Engineering]. **Szczegóły:** 2020, nr 15 (8), s. 25-33, **p-ISSN:** 2300-3383; Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego im. J.J. Śniadeckich w Bydgoszczy, Poland.

[https://dme.utp.edu.pl/art/15\(8\)2020/25.pdf](https://dme.utp.edu.pl/art/15(8)2020/25.pdf)

DOI: 10.37660/dme.2020.15.8.3

10. Hillar J., Jarmoszuk S.: Technologia. Spawalnictwo. Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne, Warszawa 1987.

11. Hillar J.: Spawanie gazowe. Wiadomości specjalistyczne. Wydawnictwo ZZDZ, nr M-120.

12. Hołubowska A., Szałański B., Mikołajczyk J.: Laboratorium termodynamiki. Piła: Wydawnictwo Państwowej Uczelni im. Stanisława Staszica, 2020, Poland. **Szczegóły:** 164 s., **e-ISBN:** 978-83-62617-93-7;

https://wydawnictwo.puss.pila.pl/files/Laboratorium_termodynamiki_POL_version.pdf

13. <http://blog.perfectwelding.fronius.com/pl.plan-kolejnosci-spawania-definicja-zalety-informacje/>

14. <https://stalpact.pl/stal-235jr-kluczowe-parametry-i-wlasciwosci/>

15. <https://www.inzynier-spawalnik.pl/spawalnosc-stali>

16. <https://figel.pl/oferta/stoly-spawalnicze/produkt/stol-spawalniczy-s16-extreme-8-7/>

17. Jarmoliński Z., Mikołajczyk J.: Badania wpływu technologii cięcia stali na twardość powierzchni bijaka. Research of the influence of steel cutting technology on the strength of the hammer. **Źródło:** Postępy w Inżynierii Mechanicznej [Developments in Mechanical Engineering]. 2018, nr 12 (6), s. 15-30, **p-ISSN:** 2300-3383. Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego w Bydgoszczy, Poland.

<http://wu.utp.edu.pl/oferta,8,1>

18. Jarmoszuk S.: Spawanie elektryczne. Wiadomości specjalistyczne. Wydawnictwo ZZDZ, nr M-121.

19. Jarmoszuk S.: Spawanie w osłonie argonu elektrodą wolframową. Wydawnictwo ZZDZ, nr M-158.

20. Jarmoszuk S.: Spawanie w osłonie dwutlenku węgla. Wydawnictwo ZZDZ, nr M-157.

21. Jędrzejczyk D., Mikołajczyk J.: Defining the correlation between the cutting speed and roughness parameter Rz. **W:** MIK-21 : Międzynarodowa Innowacyjność i Konkurencyjność w XXI wieku : aspekty innowacyjne / redakcja naukowa Radosław Luft. Lublin : Fundacja Innowacji i Nowoczesnych Technologii INOTECH, 2022. Radom : nakładem Instytutu Naukowo-Wydawniczego "Spatium", 2022. **Szczegóły:** s. 39-46, **p-ISBN:** 978-83-67033-43-5; **e-ISBN:** 978-83-67033-44-2;

<http://inw-spatium.pl/wp-content/uploads/2022/09/MIK-21-2022-Aspekty-innowacyjne-2.pdf>

22. Jędrzejczyk D., Mikołajczyk J.: Mathematical models of the influence of cutting speed on Ra parameter. **Źródło:** Developments in Mechanical Engineering. **Szczegóły:** 2022, nr 18 (10), s. 115-129, **p-ISSN:** 2720-0639; Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego im. J.J. Śniadeckich w Bydgoszczy, Poland.

DOI: 10.37660/dme.2022.18.10.11

23. Jędrzejczyk D., Mikołajczyk J.: Wpływ prędkości skrawania na wybrany parametr warstwy wierzchniej. **W:** Logistyka w ratownictwie 2022 / pod redakcją Andrzeja

- Chudzikiewicza i Andrzeja Krzyszkowskiego. Radom: Instytut Naukowo-Wydawniczy Spatium, 2022, Poland. **Szczegóły:** s. 75-90, **p-ISBN:** 978-83-67033-57-2; **e-ISBN:** 978-83-67033-70-1
24. Latoś H., Mikołajczyk J.: Effect of partial wear of the tool point on the selected indicator of the machining process. **W:** Logistyka w ratownictwie 2023 / pod redakcją Andrzeja Chudzikiewicza i Anny Stelmach. Radom: Instytut Naukowo-Wydawniczy "Spatium", 2023, Poland. **Szczegóły:** s. 195-210, **p-ISBN:** 978-83-67033-95-4; **e-ISBN:** 978-83-67033-96-1.
25. Latoś H., Mikołajczyk J.: Thickness of the machined layer at milling with single-edge straight blades with an angle of $\lambda_s \neq 0^\circ$. **W:** MIK-21 : Międzynarodowa Innowacyjność i Konkurencyjność w XXI wieku : Aspekty innowacyjne / redakcja naukowa dr Łukasz Wojtowicz. Lublin: Fundacja Innowacji i Nowoczesnych Technologii INOTECH : nakładem Instytutu Naukowo-Wydawniczego "Spatium", 2023, Poland. **Szczegóły:** s. 23-27, **p-ISBN:** 978-83-67033-89-3; **e-ISBN:** 978-83-67033-90-9.
26. Latoś H., Mikołajczyk J., Konarski J., Mikołajczyk T.: Turning using self-induced vibration. **W:** MIK-21 : Międzynarodowa Innowacyjność i Konkurencyjność w XXI wieku : aspekty innowacyjne / redakcja naukowa dr Łukasz Wojtowicz, 2023, Poland. **Szczegóły:** s. 187-200, **p-ISBN:** 978-83-67033-89-3; **e-ISBN:** 978-83-67033-90-9
27. Latoś H., Mikołajczyk J.: Vibration in machining. **W:** Logistyka w ratownictwie 2023 / pod redakcją Andrzeja Chudzikiewicza i Anny Stelmach. Radom: Instytut Naukowo-Wydawniczy "Spatium", 2023, Poland. **Szczegóły:** s. 187-194, **p-ISBN:** 978-83-67033-95-4; **e-ISBN:** 978-83-67033-96-1
28. Latoś H., Mikołajczyk J.: The effect of feed rate on the roughness of machined surface. **W:** Szkoła Logistyki 2024 / redakcja naukowa Janusz Zawiła-Niedźwiecki, Adam Płaczek. Radom: Instytut Naukowo-Wydawniczy "Spatium", 2024, Poland. **Szczegóły:** s. 217-226, **p-ISBN:** 978-83-68026-07-8; **e-ISBN:** 978-83-68026-08-5.
29. Matuszewski M., Mikołajczyk J., Styp-Rekowski M.: Modyfikacja cech środka smarującego za pomocą standardowych dodatków smarowych. Modification of lubricants features by means of standard additives. Źródło: Postępy w Inżynierii Mechanicznej [Developments in Mechanical Engineering]. 2013, nr 1 (1), s. 57-65, Wydawnictwo Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego w Bydgoszczy; p-ISSN: 2300-3383; http://wu.utp.edu.pl/uploads/oferta/Postepy_1_1_2013.pdf
30. Matuszewski M., Mikołajczyk J., Mikołajczyk T., Styp-Rekowski M.: Logistyczne aspekty zarządzania procesem naprawy. Logistical aspects of the repair process management. Źródło: Logistyka, 2015, nr 4, s. 1991-1997, **p-ISSN:** 1231-5478; <https://www.czasopismologistyka.pl/o-czasopismie/wydania>
31. Matuszewski M., Mikołajczyk J., Mikołajczyk T., Styp-Rekowski M.: The influence of cooling and lubrication liquid quantity on the isotropy of a machine component surface during machining = Wpływ warunków chłodzenia i smarowania podczas obróbki elementów maszyn na stopień izotropowości ich powierzchni. Źródło: Tribologia. 2016, vol. 265, No. 1, s. 57-65, **p-ISSN:** 0208-7774; **e-ISSN:** 1732-422X; <https://t.tribologia.eu/resources/html/article/details?id=158175>
32. Michalski R.: Zgrzewanie oporowe. Poradnik. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne. Warszawa 1970.
33. Mikołajczyk J., Styp-Rekowski M., Świerk K.: Modyfikowanie cech środka smarującego za pomocą dodatków i komputerowe wspomaganie ich doboru. **W:** CAX'2009 : komputerowe wspomaganie nauki i techniki : VI warsztaty naukowe, Bydgoszcz - Duszniki Zdrój 2009 : praca zbiorowa pod redakcją Tadeusza Mikołajczyka. **p-ISBN:** 978-83-61314-65-3. Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego w Bydgoszczy, Bydgoszcz 2009.

34. Mikołajczyk J.: Zestawienie porównawcze dodatków depresujących do olejów. W: Zaawansowana tribologia : XXX Ogólnopolska Konferencja Tribologiczna, Nałęczów, 21-24 września 2009 r. Ogólnopolska Konferencja Naukowa XXX Szkoły Tribologicznej "Zaawansowana Tribologia" : Wydział Materiałoznawstwa, Technologii i Wzornictwa Politechniki Radomskiej, Instytut Technologii Eksploatacji - PIB Radom oraz Komitet Budowy Maszyn, Sekcja Podstaw Eksploatacji Maszyn PAN. Wydawnictwo Naukowe Instytutu Technologii Eksploatacji - PIB, Radom, 2009.
35. Mikołajczyk J.: Zestawienie porównawcze własności fizykochemicznych dodatków smarnych w oleju podstawowym SAE-30. W: Terotechnologia 2009 : materiały konferencji na ekspozycji Metal i Control-Tech : Targi - Kielce (29.09-01.10.2009). VI Konferencja Naukowo-Techniczna "Terotechnologia 2009" : Politechnika Świętokrzyska, Centrum Laserowych Technologii Metali, Katedra Inżynierii Eksploatacji, Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn, Polskie Towarzystwo Naukowo-Techniczne, Towarzystwo Eksploatacyjne, Kielce: Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, 2009. Seria: Zeszyty Naukowe - Politechnika Świętokrzyska, nr 13.
36. Mikołajczyk J., Matuszewski M.: Konstrukcja i sterowanie stanowiska do badań tribologicznych. W: CAX'2010 : komputerowe wspomaganie nauki i techniki : VII warsztaty naukowe, Bydgoszcz - Duszniki Zdrój 2010 : praca zbiorowa / pod red. Tadeusza Mikołajczyka. Bydgoszcz : Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego w Bydgoszczy, 2010. p-ISBN: 9788361314387
37. Mikołajczyk J.: System rejestracji i wizualizacji warunków pracy stanowiska do badań tribologicznych. W: CAX'2011 : komputerowe wspomaganie nauki i techniki : VIII warsztaty naukowe, Bydgoszcz - Duszniki Zdrój 2011 : praca zbiorowa / pod redakcją Tadeusza Mikołajczyka. Bydgoszcz : Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego w Bydgoszczy, 2011. p-ISBN: 9788361314981
38. Mikołajczyk J.: Badanie wpływu preparatu eksploatacyjnego Mind M na zmianę własności smarnych oleju bazowego SN-150. Źródło: Inżynieria i aparatura chemiczna [Chemical Engineering and Equipment]. 2012, nr 5, s. 235-236, p-ISSN: 0368-0827. <http://inzynieria-aparatura-chemiczna.pl/rok-2012-nr-5/>
39. Mikołajczyk J., Styp-Rekowski M., Matuszewski M., Musiał J.: Einfluß der kompositionen von schmierzusätzen auf die exploitations-eigenschaften der mischung mit Basisöl SN-150. W: Tribologie und mobilität : beiträge der tribotechnik zur optimierung von fertigungsprozessen, wartung, schmierung (reibungskonditionierung) und betriebssicherheit von verkehrsmitteln und verkehrswegen. Wien, 15 November 2012. Symposium 2012 "Tribologie und mobilität" : Österreichische Tribologische Gesellschaft. Österreichische Tribologische Gesellschaft, Wien, 2012.
40. Mikołajczyk J.: Einfluß der ausgewählten schmierzstoffzusätze auf betriebseigenschaften der mischung mit Basisöl SN-150. W: Reibung, schmierung und verschleiß : forschung und praktische anwendungen. Band 1. Tribologische systeme maschinenelemente und antriebstechnik fahrzeugtechnik prüfen, messen, kontrollieren. Göttingen, 22-24 September 2014. 55. Tribologie Fachtagung "Reibung, Schmierung und Verschleiß" : Gesellschaft für Tribologie e.V. Stolberg-Venwegen : Gesellschaft für Tribologie e.V., 2014. Germany.
41. Mikołajczyk J.: Einfluss der ausgewählten zusatzschmierstoffe auf die intensivität des verschleißprozesses (Ra, Rq, Δm) mit Basisöl SN-150. W: Tribologie in industrie und forschung : werkstoffe, konstruktion und technologie. Leoben, 26 November 2014. ÖTG Symposium 2014 "Tribologie in industrie und forschung" : Österreichische Tribologische Gesellschaft. Wien : Österreichische Tribologische Gesellschaft, 2014. Austria.
42. Mikołajczyk J., Matuszewski M.: Einfluss der ausgewählten schmierzstoffzusätze auf ΔT und ΔP mit Basisöl SN-150. W: Tribologie in industrie und forschung : werkstoffe, schmierzstoffe und technologie. Wiener Neustadt, 25 November 2015, Austria. ÖTG

- Symposium 2015 "Tribologie in industrie und forschung" : Österreichische Tribologische Gesellschaft. Wiener Neustadt : Österreichische Tribologische Gesellschaft, 2015, s. 145-152.
43. Mikołajczyk J.: Vergleich charakteristischer parameter des abbott-firestone-diagramms für ein kinematisches paar mit konformem kontakt. **W:** Tribologie in industrie und forschung : verschleißschutz, instandhaltung und anlagenzuverlässigkeit. Linz, 22-23 November 2016, Austria. ÖTG Symposium 2016 "Tribologie in industrie und forschung" : Österreichische Tribologische Gesellschaft. Wiener Neustadt : Österreichische Tribologische Gesellschaft, 2016; s. 105-110.
44. Mikołajczyk J.: Wpływ dodatków smarowych na transformację warstwy wierzchniej. Piła : Wydawnictwo Państwowej Wyższej Szkoły Zawodowej im. Stanisława Staszica, 2017r., Poland. 215, [1] s., **p-ISBN:** 978-83-62617-76-0; www.ans.pila.pl
45. Mikołajczyk J.: Maszyny tarciove : budowa, przeznaczenie. Piła, Wydawnictwo Państwowej Wyższej Szkoły Zawodowej im. Stanisława Staszica, 2018, Poland; 256 s., **p-ISBN:** 978-83-62617-86-9
46. Mikołajczyk J.: Analiza statystyczna zmiany poboru mocy podczas procesu zużywania. Statistical analysis of the power variation of tribotester as a result of the wear process. **Źródło:** Autobusy. Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe. **Szczegóły:** 2019, nr 10-11, s. 83-88, **p-ISSN:** 1509-5878; **e-ISSN:** 2450-7725; <http://yadda.icm.edu.pl/yadda/element/bwmeta1.element.baztech-21189602-884a-4d1a-bb60-9edaeae4af8d>
47. Mikołajczyk J.: Influence of consumables on the amount of power consumption of kinematic vapor of conformal contact. Wpływ PE na pobór mocy pary kinematycznej o styku konforemnym. **Źródło:** Postępy w Inżynierii Mechanicznej [Developments in Mechanical Engineering]. **Szczegóły:** 2019, nr 13 (7), s. 39-50, **p-ISSN:** 2300-3383; Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu technologiczno-Przyrodniczego im. J. J. Śniadeckich w Bydgoszczy, Poland. <http://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-2faf200b-3010-4192-9fd0-062f53b49d38>
48. Mikołajczyk J.: Statistical analysis of the mass variation of samples as a result of the wear process. Analiza statystyczna zmiany masy próbek w wyniku procesu zużywania. **Źródło:** Postępy w Inżynierii Mechanicznej [Developments in Mechanical Engineering]. **Szczegóły:** 2019, nr 13 (7), s. 51-61, **p-ISSN:** 2300-3383; Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego im. J.J. Śniadeckich w Bydgoszczy, Poland. <http://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-2faf200b-3010-4192-9fd0-062f53b49d38>
49. Mikołajczyk J.: Tribotestery : budowa i przeznaczenie. Piła: Wydawnictwo Państwowej Wyższej Szkoły Zawodowej im. Stanisława Staszica, 2019, Poland. **Szczegóły:** 160 s., **e-ISBN:** 978-83-62617-90-6; <https://wydawnictwo.pwsz.pila.pl/files/Tribotestery.pdf>
50. Mikołajczyk J.: Determining the energy validity of the Kostetsky's hypothesis on the basis of models for relative motion velocity $v = 0.08$ m/sec. **Źródło:** Developments in Mechanical Engineering. **Szczegóły:** 2020, nr 16 (8), s. 17-29, **p-ISSN:** 2720-0639; Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego im. J.J. Śniadeckich w Bydgoszczy, Poland. **DOI:** [10.37660/dme.2020.16.8.2](https://doi.org/10.37660/dme.2020.16.8.2)
51. Mikołajczyk J.: Finding the correlation between wear of samples kinematic pair of conformal contact and electric power consumption. **Źródło:** Postępy w Inżynierii Mechanicznej [Developments in Mechanical Engineering]. **Szczegóły:** 2020, nr 15 (8), s. 59-68, **p-ISSN:** 2300-3383; Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego im. J.J. Śniadeckich w Bydgoszczy, Poland.

[https://dme.utp.edu.pl/art/15\(8\)2020/59.pdf](https://dme.utp.edu.pl/art/15(8)2020/59.pdf)

DOI: 10.37660/dme.2020.15.8.6

52. Mikołajczyk J.: The effect of temperature lag on the value of power-temperature correlation for frictional pair of conformal contact. **Źródło:** Postępy w Inżynierii Mechanicznej [Developments in Mechanical Engineering]. **Szczegóły:** 2020, nr 15 (8), s. 79-86, **p-ISSN:** 2300-3383; Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego im. J.J. Śniadeckich w Bydgoszczy, Poland.

[https://dme.utp.edu.pl/art/15\(8\)2020/79.pdf](https://dme.utp.edu.pl/art/15(8)2020/79.pdf)

DOI: 10.37660/dme.2020.15.8.8

53. Mikołajczyk J.: Określenie na podstawie modeli zmiany masy próbek w wyniku procesu zużywania. **W:** Szkoła Logistyki 2021 / redakcja naukowa Janusz Zawila-Niedźwiecki, Piotr Korneta. **Adres wydawniczy:** Radom : Instytut Naukowo-Wydawniczy "Spatium", 2021. **Szczegóły:** s. 167-174, Poland; **p-ISBN:** 978-83-66550-75-9; **e-ISBN:** 978-83-66550-89-6.

54. Mikołajczyk J.: A method of determining mathematical models of a seizure test of friction pairs. **W:** MIK-21 : Międzynarodowa Innowacyjność i Konkurencyjność w XXI wieku : aspekty innowacyjne / redakcja naukowa Radosław Luft. Lublin : Fundacja Innowacji i Nowoczesnych Technologii INOTECH, 2022. Radom : nakładem Instytutu Naukowo-Wydawniczego "Spatium", 2022. **Szczegóły:** s. 7-24, **p-ISBN:** 978-83-67033-43-5; **e-ISBN:** 978-83-67033-44-2.

<http://inw-spatium.pl/wp-content/uploads/2022/09/MIK-21-2022-Aspekty-innowacyjne-2.pdf>

55. Mikołajczyk J.: Friction machines. Piła: Wydawnictwo Akademii Nauk Stosowanych im. Stanisława Staszica, 2022, Poland. **Szczegóły:** 488 s., **e-ISBN:** 978-83-62617-96-8.

https://wydawnictwo.ans.pila.pl/files/FRICTION_MACHINES.pdf

56. Mikołajczyk J., Jędrzejczyk D.: Określenie korelacji między prędkością skrawania a parametrem chropowatości Ra. **Źródło:** Obróbka Metalu. **Szczegóły:** 2022, nr 3, s. 11-15, **p-ISSN:** 2081-7002; <https://obrobkametalu.tech/>

57. Mikołajczyk J.: Rolling bearing heating charakter. **W:** Szkoła Logistyki 2022. Radom: Instytut Naukowo-Wydawniczy "Spatium", 2022, Poland. **Szczegóły:** s. 231-239, Materiały z IX Konferencji Naukowej "Szkoła Logistyki 2022"; **p-ISBN:** 978-83-67033-33-6; **e-ISBN:** 978-83-67033-34-3

58. Mikołajczyk J.: Tribological properties of carbon black. **W:** Szkoła Logistyki 2022. Radom: Instytut Naukowo-Wydawniczy "Spatium", 2022, Poland. **Szczegóły:** s. 217-230, Materiały z IX Konferencji Naukowej "Szkoła Logistyki 2022"; **p-ISBN:** 978-83-67033-33-6; **e-ISBN:** 978-83-67033-34-3

59. Mikołajczyk J.: Determination of the modified coefficient of variation from the number of samples. **W:** MIK-21 : Międzynarodowa Innowacyjność i Konkurencyjność w XXI wieku : Aspekty innowacyjne / redakcja naukowa dr Łukasz Wojtowicz. Lublin: Fundacja Innowacji i Nowoczesnych Technologii INOTECH : nakładem Instytutu Naukowo-Wydawniczego "Spatium", 2023, Poland. **Szczegóły:** s. 111-122, **p-ISBN:** 978-83-67033-89-3; **e-ISBN:** 978-83-67033-90-9.

60. Mikołajczyk J.: Effect of cutting speed on the shape of the machined surface profile. **Źródło:** Mebutra. **Szczegóły:** 2023, nr 1, s. 47-63, Wydawnictwo Akademii Nauk Stosowanych im. S. Staszica w Pile, Piła 2023, Poland.

<https://online.fliphtml5.com/vliuj/yunw/p=48>

61. Mikołajczyk J.: Friction Machines II. Piła: Wydawnictwo Akademii Nauk Stosowanych im. Stanisława Staszica w Pile, 2023, Poland. **Szczegóły:** 598 s., **p-ISBN:** 978-83-67684-00-2; https://wydawnictwo.ans.pila.pl/files/FRICTION_MACHINES_V_ANS_PILA.pdf

62. Mikołajczyk J.: Oil can talk. **W:** Szkoła Logistyki 2023 / redakcja naukowa Janusz Zawila-Niedźwiecki, Katarzyna Białczak. Radom: Instytut Naukowo-Wydawniczy

"Spatium", 2023, Poland. **Szczegóły:** s. 109-115, **p-ISBN:** 978-83-67033-75-6; **e-ISBN:** 978-83-67033-58-9.

63. Mikołajczyk J.: Pobór mocy elektrycznej przez parę kinematyczną jako parametr oceny jakości oleju. **W:** Logistyka w ratownictwie 2023 / pod redakcją Andrzeja Chudzikiewicza i Anny Stelmach. Radom: Instytut Naukowo-Wydawniczy "Spatium", 2023, Poland. **Szczegóły:** s. 223-230, **p-ISBN:** 978-83-67033-95-4;

e-ISBN: 978-83-67033-96-1.

64. Mikołajczyk J.: Rola dodatków smarowych w olejach. **W:** Logistyka w ratownictwie 2023 / pod redakcją Andrzeja Chudzikiewicza i Anny Stelmach. Radom: Instytut Naukowo-Wydawniczy "Spatium", 2023, Poland. **Szczegóły:** s. 231-237, **p-ISBN:** 978-83-67033-95-4; **e-ISBN:** 978-83-67033-96-1

65. Mikołajczyk J.: Temperature as a parameter for assessing the work of a friction pair. **W:** Szkoła Logistyki 2023 / redakcja naukowa Janusz Zawiła-Niedźwiecki, Katarzyna Białczak. Radom: Instytut Naukowo-Wydawniczy "Spatium", 2023, Poland. **Szczegóły:** s. 101-107, **p-ISBN:** 978-83-67033-75-6; **e-ISBN:** 978-83-67033-58-9.

66. Mikołajczyk J.: Tire as a selected element of a car subject to diagnostics. **W:** Szkoła Logistyki 2023 / redakcja naukowa Janusz Zawiła-Niedźwiecki, Katarzyna Białczak. Radom: Instytut Naukowo-Wydawniczy "Spatium", 2023, Poland. **Szczegóły:** s. 117-131, **p-ISBN:** 978-83-67033-75-6; **e-ISBN:** 978-83-67033-58-9.

67. Mikołajczyk J.: Wpływ dodatku modyfikującego cechy płynu obróbkowego na zmianę temperatury w strefie kontaktu współpracujących powierzchni. **Źródło:** Obróbka Metalu. **Szczegóły:** 2023, nr 2, s. 43-46, **p-ISSN:** 2081-7002;

https://obrobkametalu.tech/media/2023/05/2023_2_52_ObrobkaMetalu.pdf

68. Mikołajczyk J., Kozłowska M.A., Krasicki K.: Wpływ kompetencji cyfrowych pracowników na poziom rozwoju procesów przemysłowych. **W:** MIK-21 : Międzynarodowa Innowacyjność i Konkurencyjność w XXI wieku : aspekty społeczne / redakcja naukowa Radosław Luft. Lublin-Radom : Fundacja Innowacji i Nowoczesnych Technologii INOTECH : nakładem Instytutu Naukowo-Wydawniczego "Spatium", 2023, Poland. **Szczegóły:** s. 149-169, **p-ISBN:** 978-83-67033-92-3; **e-ISBN:** 978-83-67033-93-0.

69. Mikołajczyk J.: Zmiana geometrycznych cech współpracujących powierzchni miarą intensywności procesu zużywania ostrzy skrawających. **Źródło:** Obróbka Metalu. **Szczegóły:** 2023, nr 1, s. 50-54, **p-ISSN:** 2081-7002;

<https://yadda.icm.edu.pl/yadda/element/bwmeta1.element.baztech-9e73eb05-2a91-4df5-853b-22abf7a6ee77>

70. Mikołajczyk J., Góra F., Jędrzejczyk D.: Analysis of selected surface roughness parameters for wear processes. Analiza wybranych parametrów chropowatości powierzchni pod kątem procesów zużywania. **W:** MIK-21 : Międzynarodowa Innowacyjność i Konkurencyjność w XXI wieku : Aspekty innowacyjne / redakcja naukowa Radosław Luft. Lublin: Wydawnictwo Naukowe FNCE, 2024. **Szczegóły:** s. 93-117, **p-ISBN:** 978-83-68074-82-6; **e-ISBN:** 978-83-68319-03-3.

71. Mikołajczyk J., Galon M.: Mathematical model of straight regression determining the effect of laser cutting speed on the mass of the workpiece. **W:** MIK-21 : Międzynarodowa Innowacyjność i Konkurencyjność w XXI wieku : Aspekty innowacyjne / redakcja naukowa Radosław Luft. Lublin: Wydawnictwo Naukowe FNCE, 2024, Poland. **Szczegóły:** s. 71-92, **p-ISBN:** 978-83-68074-82-6; **e-ISBN:** 978-83-68319-03-3.

72. Mikołajczyk J., Sądej I.: Spinning speed and balancing accuracy. **W:** MIK-21 : Międzynarodowa Innowacyjność i Konkurencyjność w XXI wieku : Aspekty innowacyjne / redakcja naukowa Radosław Luft. Lublin: Wydawnictwo Naukowe FNCE, 2024, Poland. **Szczegóły:** s. 118-132, **p-ISBN:** 978-83-68074-82-6; **e-ISBN:** 978-83-68319-03-3.

73. Mikołajczyk J.: The correlation between the population and number of construction disasters. **Źródło:** Mebutra. **Szczegóły:** 2025, nr 3, s. 44-55, Wydawnictwo Akademii Nauk Stosowanych im. S. Staszica w Pile, Poland.

<https://wydawnictwo.ans.pila.pl/files/MEBUTRA2025.pdf>

74. Mikołajczyk J.: The relationship between the type of structure and the number of construction disasters. Zależność między rodzajem konstrukcji, a liczbą katastrof budowlanych. **Źródło:** Mebutra. **Szczegóły:** 2025, 3, s. 30-43, Wydawnictwo Akademii Nauk Stosowanych im. S. Staszica w Pile, Poland.

<https://wydawnictwo.ans.pila.pl/files/MEBUTRA2025.pdf>

75. Mistur L.: Spawanie gazowe i elektryczne. Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne. Warszawa 1983.

76. Norma PN-86/H-84018. Stal niskostopowa o podwyższonej wytrzymałości. Gatunki.

77. Norma PN-75/H-84019. Stal węglowa konstrukcyjne wyższej jakości ogólnego przeznaczenia. Gatunki.

78. Norma PN-72/H-84020. Stal węglowa konstrukcyjna zwykłej jakości ogólnego przeznaczenia. Gatunki.

79. Norma PN-75/H-84024. Stal do pracy przy podwyższonych temperaturach. Gatunki.

80. Norma PN-71/H-86020. Stal odporna na korozję (nierdzewna i kwasoodporna). Gatunki.

81. Norma PN-71/H-86022. Stal żaroodporna. Gatunki.

82. Norma PN-75/M-69703. Spawalnictwo. Wady złączy spawanych. Nazwy i określenia (zmiana 1, Biul. PKNiM nr 9/76, poz. 85).

83. Norma PN-78/M-69760. Spawalnictwo. Badania skłonności do tworzenia zimnych pęknięć w złączach spawanych łukowo.

84. Norma PN-79/M-69761. Spawalnictwo. Metody badań skłonności do tworzenia pęknięć krystalizacyjnych w spoinach stalowych złączy spawanych łukowo.

85. Norma PN-72/M—69770. Radiografia przemysłowa. Radiogramy spoin czołowych w złączach doczołowych ze stali. Wymagania jakościowe i wytyczne wykonania.

86. Norma PN-74/M-69771. Spawanie. Wady złączy doczołowych wykrywane badaniami radiograficznymi. Nazwy i określenia (zmiana 1, Biul. PKNiM nr 9/76, poz. 85).

87. Norma PN-87/M-69772. Spawalnictwo. Klasyfikacja wadliwości złączy spawanych na podstawie radiogramów.

88. Norma PN-85/M-69775. Spawalnictwo. Wadliwość złączy spawanych. Oznaczenia klasy wadliwości na podstawie oględzin zewnętrznych.

89. Norma PN-77/M-70001. Przemysłowe badania radiograficzne. Wskaźniki jakości obrazu. Wymagania.

90. Norma PN-75/M-70020. Badania nie niszczące. Metody radiologiczne. Nazwy i określenia.

91. Norma PN-76/M-70050. Badania nie niszczące. Metody ultradźwiękowe. Nazwy i określenia.

92. Norma PN-75/M-70051. Badania nie niszczące metodami ultradźwiękowymi. Wzorzec kontrolny W1.

93. Norma PN-74/M-70052. Badania nie niszczące. Metody penetracyjne. Nazwy i określenia.

94. Norma PN-75/M-70054. Badania nie niszczące metodami ultradźwiękowymi. Wzorzec kontrolny W2.

95. Norma PN-77/M-70055. Badania nie niszczące. Metody ultradźwiękowe. Badanie spoin w złączach doczołowych.

96. Norma PN-75/M-70056. Badania nie niszczące metodami ultradźwiękowymi. Wzorce mikrosekundowe.

97. Norma PN-86/M-69707. Spawalnictwo. Zasady wykonywania próbnych złączy spawanych lub zgrzewanych.
98. Norma PN-78/M-69710. Spawalnictwo. Próba statyczna rozciągania doczołowych złączy spawanych lub zgrzewanych.
99. Norma PN-80/M-69714. Spawalnictwo. Próba statyczna rozciągania złączy ze spoinami pachwinowymi.
100. Norma PN-57/M-69715. Spawanie. Próba statyczna rozciągania złącza nakładkowego z pachwinowymi spoinami poprzecznymi.
101. Norma PN-57/M-69716. Spawanie. Próba statyczna rozciągania złącza nakładkowego z pachwinowymi spoinami podłużnymi.
102. Norma PN-78/M-69720. Spawalnictwo. Próby zginania doczołowych złączy spawanych lub zgrzewanych.
103. Norma PN-70/M-69733. Spawalnictwo. Próba udarności złączy spawanych lub zgrzewanych doczołowo.
104. Norma PN-69/M-69734. Próba starzenia stalowych płaskich złączy spawanych doczołowo.
105. Norma PN-58/M-69740. Spawanie. Próba łamania płaskiego złącza doczołowego o grubości powyżej 4 mm.
106. Norma PN-58/M-69741. Spawanie. Próba łamania złącza kąтового ze spoiną pachwinową.
107. Norma PN-58/M-69742. Spawanie. Próba łamania złącza nakładkowego ze spoiną pachwinową.
108. Norma PN-64/M-69751. Próba twardości złączy spawanych i zgrzewanych.
109. Norma PN-76/M-69783. Spawalnictwo. Próby statyczne ścinania i rozciągania zgrzein liniowych.
110. Norma PN-67/M-69790. Próby statyczne rozciągania i ścinania złączy lutowanych.
111. Norma PN-65/M-69013. Spawanie gazowe stali niskowęglowych i niskostopowych. Rowki do spawania.
112. Norma PN-75/M-69014. Spawanie łukowe elektrodami otulonymi stali węglowych i niskostopowych. Przygotowanie brzegów do spawania.
113. Norma PN-73/M-69015. Spawanie łukiem krytym stali węglowych i niskostopowych. Przygotowanie brzegów do spawania.
114. Norma PN-74/M-69016. Spawanie w osłonie dwutlenku węgla stali węglowych i niskostopowych. Przygotowanie brzegów do spawania.
115. Norma PN-65/M-69017. Spawanie argonowe elektroda nietopliwą stali stopowych. Rowki do spawania.
116. Norma PN-67/M-69018. Spawanie żuźłowe stali węglowych i niskostopowych. Rowki do spawania.
117. Norma PN-69/M-69019. Spawanie doczołowe rur stalowych. Rowki do spawania.
118. Norma PN-70/M-69023. Spawanie łukowe stali platerowanych stalą odporną na korozję. Wytyczne projektowania i wykonywania złączy spawanych.
119. Norma PN-70/M-69024. Spawanie łukowe aluminium i jego stopów elektrodą wolframową w osłonie argonu. Przygotowanie brzegów do spawania.
120. Norma PN-70/M-69025. Spawanie gazowe miedzi. Przygotowanie brzegów do spawania.
121. Norma PN-72/M-69026. Spawanie łukowe miedzi w osłonie argonu elektrodą wolframową. Przygotowanie brzegów do spawania.
122. Norma PN-73/M-69027. Spawanie łukowe aluminium i jego stopów elektrodą topliwą w osłonie argonu. Przygotowanie brzegów do spawania.

123. Norma PN-78/M-69028. Spawalnictwo. Spawanie łukowe miedzi w osłonie argonu elektrodą topliwą. Przygotowanie brzegów do spawania.
124. Norma PN-76/M-69070. Spawalnictwo. Urządzenia do mechanizacji spawania. Nazwy i określenia.
125. Norma PN-61/M-69100. Spawalnictwo. Źródła prądu do ręcznego spawania łukowego. Klasyfikacja.
126. Norma PN-75/M-69101. Spawalnictwo. Szpule elektrodowe do automatów i półautomatów spawalniczych. Główne wymiary.
127. Norma PN-75/M-69104. Automaty i półautomaty do spawania łukiem krytym i w osłonie gazów ochronnych elektrodą topliwą. Nazwy i określenia.
128. Norma PN-75/M-69105. Spawalnictwo. Półautomaty spawalnicze do spawania łukowego w osłonie gazu ochronnego elektrodą topliwą. Ogólne wymagania i badania.
129. Norma PN-79/M-69106. Spawalnictwo. Automaty spawalnicze. Ogólne wymagania i badania.
130. Norma PN-83/M-69108. Spawalnictwo. Źródło energii elektrycznej do spawania łukowego. Nazwy i określenia.
131. Norma PN-69/M-69124. Elektrody wolframowe do celów spawalniczych.
132. Norma PN-76/M-69160. Spawalnictwo. Osłony twarzy przed promieniowaniem łuku spawalniczego. Tarcze spawalnicze.
133. Norma PN-80/M-69161. Spawalnictwo. Uchwyty elektrodowe do spawania ręcznego izolowane.
134. Norma PN-79/M-69010. Wyroby z węgla uszlachetnionych. Elektrody spawalnicze.
135. Norma PN-85/E-81106. Spawalnictwo. Jednostanowiskowe transformatory spawalnicze. Wymagania i badania.
136. Norma PN-74/M-69102. Spawalnictwo. Przecinarki do cięcia termicznego. Dokładność odwzorowania.
137. Norma PN-74/M-69103. Spawalnictwo. Przecinarki półautomatyczne do cięcia tlenem stali. Wymagania i badania.
138. Norma PN-80/M-69107. Spawalnictwo. Przecinarki do cięcia termicznego. Nazwy i określenia.
139. Norma PN-80/M-69180. Spawalnictwo. Palniki, oznaczenia i cechowanie.
140. Norma PN-81/M-69181. Spawalnictwo. Dysze palników gazowych. Określenia, podział i oznaczenia.
141. Norma PN-76/M-69182. Spawalnictwo. Palniki do spawania gazowego i cięcia tlenem. Wymagania i badania.
142. Norma PN-75/M-69200. Spawalnictwo. Wytwornice acetylenowe. Podział.
143. Norma PN-76/M-69202. Spawalnictwo. Zawory bezpieczeństwa.
144. Norma PN-75/M-69210. Zbiorniki transportowe do gazów. Barwy rozpoznawcze i oznakowanie.
145. Norma PN-79/M-69221. Butle do gazów. Butle stalowe do gazów.
146. Norma PN-76/M-69222. Butle do gazów. Butle stalowe bez szwu.
147. Norma PN-82/M-69223. Butle do gazów. Gwinty stożkowe. Wymiary i tolerancje.
148. Norma PN-60/M-69224. Butle do gazów. Gwinty Whitwortha o średnicach 21,8 i 24,3 mm.
149. Norma PN-80/M-69225. Butle do gazów. Gwint Whitwortha o średnicy 80 mm.
150. Norma PN-63/M-69226. Butle do gazów. Gwint stożkowy metryczny.
151. Norma PN-67/M-69227. Zawory butlowe do acetylenu VA1.
152. Norma PN-81/M-69228. Butle do gazów. Zawory do butli. Wymagania i badania.
153. Norma PN-81/M-69229. Butle do gazów. Złącza zaworów butlowych.
154. Norma PN-74/M-69240. Reduktory spawalnicze. Główne wskaźniki.

155. Norma PN-80/M-69242. Spawalnictwo. Reduktory do tlenu.
156. Norma PN-77/M-69243. Spawalnictwo. Reduktory butlowe do gazów płynnych.
157. Norma PN-78/M-69244. Spawalnictwo. Reduktory do acetylenu.
158. Norma PN-72/M-69260. Spawalnictwo. Króćce do przyłączenia węży gumowych. Główne wymiary.
159. Norma PN-71/M-69261. Spawalnictwo. Przyłączki i złączki do węży gumowych.
160. Norma PN-76/M-69774. Spawalnictwo. Cięcie gazowe stali węglowych o grubości 5÷100 mm. Jakość powierzchni cięcia.
161. Norma PN-63/M-74905. Opaski zaciskowe przewodów giętkich.
162. Norma PN-77/C-94250.47. Węże gumowe. Węże tłoczne gumowe ze wzmocnieniem tekstylnym do tlenu.
163. Norma PN-77/C-94250.48. Węże gumowe. Węże tłoczne ze wzmocnieniem tekstylnym do acetylenu.
164. Norma BN-68/4122-02. Zawory butlowe do tlenu technicznego VT1.
165. Norma PN-67/M-69350. Topniki spawalnicze. Klasyfikacja.
166. Norma PN-81/M-69354. Spawalnictwo. Topniki do gazowego spawania miedzi, mosiądzów, brązów, aluminium i stopów aluminium.
167. Norma PN-73/M-69355. Topniki do spawania i napawania łukiem krytym.
168. Norma PN-67/M-69356. Topniki do spawania żuźłowego.
169. Norma PN-76/M-69400. Spoiwa cynowo-ołowiowe do lutowania miękkiego. Gatunki.
170. Norma PN-80/M-69411. Spawalnictwo. Spoiwa srebrne do lutowania.
171. Norma PN-73/M-69412. Spawalnictwo. Druty do gazowego i łukowego metalizowania natryskowego.
172. Norma PN-70/M-69413. Spoiwa miedziane, mosiężne, brązowe i nikłowe do spawania i lutowania.
173. Norma PN-75/M-69414. Spawalnictwo. Spoiwa do spawania aluminium i stopów aluminium.
174. Norma PN-77/M-69420. Spawalnictwo. Spoiwa stalowe do spawania i napawania.
175. Norma PN-74/M-69430. Spawalnictwo. Elektrody stalowe otulone do spawania i napawania. Ogólne wymagania i badania.
176. Norma PN-77/M-69433. Spawalnictwo. Elektrody stalowe otulone do spawania stali węglowych i niskostopowych.
177. Norma PN-74/M-69434. Elektrody otulone do spawania stali niskostopowych przeznaczonych do pracy w podwyższonych temperaturach.
178. Norma PN-79/M-69435. Spawalnictwo. Elektrody stalowe do spawania stali wysokostopowych.
179. Norma PN-74/M-69436. Elektrody stalowe do napawania.
180. Norma PN-57/M-69451. Spawanie. Spoiwa. Pręty żeliwne.
181. Norma PN-64/M-69708. Spawalnictwo. Próby mechaniczne stopiwa.
182. Norma PN-57/M-69712. Spawanie. Próba statyczna rozciągania materiału spoiny.
183. Norma PN-58/M-69717. Spawanie gazowe. Próba statyczna rozciągania stopiwa.
184. Norma PN-58/M-69730. Spawanie gazowe. Próba udarności stopiwa.
185. Norma PN-82/C-23050. Karbid.
186. Norma PN-71/C-84905. Acetylen rozpuszczony.
187. Norma PN-61/C-84908. Wodór techniczny sprężony.
188. Norma PN-70/C-84910. Tlen sprężony (zmiana Biul. PKNiM nr 10/76, poz. 93).
189. Norma PN-72/C-84912. Azot sprężony techniczny.
190. Norma PN-82/C-96000. Przetwory naftowe. Gazy węglowodorowe (płynne C₃-C₄).
191. Norma PN-77/M-69000. Spawalnictwo. Spawanie metali. Nazwy i określenia.
192. Norma PN-84/M-69001. Spawalnictwo. Spajanie metali i procesy pokrewne. Podział.

193. Norma PN-75/M-69002. Spawalnictwo. Pozycje spawania. Klasyfikacja i oznaczenia.
194. Norma PN-87/M-69008. Spawalnictwo. Klasyfikacja konstrukcji spawanych.
195. Norma PN-87/M-6990/01. Spawalnictwo. Egzaminy spawaczy i zgrzewaczy. Postanowienia ogólne.
196. Norma PN-87/M-69900/02. Spawalnictwo. Podstawowy egzamin spawacza.
197. Norma PN-87/M-69900/03. Spawalnictwo. Ponadpodstawowy egzamin spawacza.
198. Norma PN-87/M-69900/04. Spawalnictwo. Egzamin spawacza-operatora.
199. Norma PN-87/M-69900/05. Spawalnictwo. Egzamin zgrzewacza.
200. Norma PN-87/M-69900/06. Spawalnictwo. Egzamin rozszerzający oraz sprawdzający spawacza i zgrzewacza.
201. Norma PN-79/M- 01134. Rysunek techniczny maszynowy. Uproszczenia rysunkowe. Zasady oznaczania spoin.
202. Norma PN-64/M-01138. Rysunek techniczny maszynowy. Połączenia spawane i powierzchnie napawane (zmiana Biul. PKN nr 6/67, poz. 67).
203. Norma PN-64/M-01139. Rysunek techniczny maszynowy. Połączenia zgrzewane i lutowane (bez lutowania). Biul. PKNiM nr 28/76.
204. Norma PN-83/N-01635. Rysunek techniczny. Uproszczenia rysunkowe. Połączenia nitowane, lutowane, klejone i zszywane.
205. Norma PN-64/B-01043. Rysunek konstrukcyjny budowlany. Konstrukcje stalowe.
206. Norma PN-81/M-Z-53201. Sprzęt ochrony osobistej-oczu. Optyczne filtry i szybki ochronne. Ogólne wymagania i badania.
207. Norma PN-73/Z-53205. Sprzęt ochrony osobistej oczu. Szybki ochronne przeciwodpryskowe.
208. Olechnowicz J., Mikołajczyk J.: Truck scales : the key to safe transport and road protection. **Źródło:** Mebutra. **Szczegóły:** 2024, nr 2, s. 03-08, Wydawnictwo Akademii Nauk Stosowanych im. S. Staszica w Pile, Poland.
<https://wydawnictwo.ans.pila.pl/files/MEBUTRA2024.pdf>
209. Pałasz J.: Poradnik spawacza gazowego. Wydawnictwa naukowo-Techniczne. Warszawa 1986.
210. Piwowar S.: Spawanie i zgrzewanie elektryczne. Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne. Warszawa 1981.
211. Piwowar S.: Kontrola procesów spawalniczych. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1979.
212. Piątek P.: Spawanie (materiały dydaktyczne). Wydawnictwo SANNORT, Sandomierz, 2014.
213. Pikulik K.W., Mikołajczyk J.: The influence of the welding current on the air pollution emissions. Wpływ prądu spawania na emisję zanieczyszczeń powietrza. **Źródło:** Postępy w Inżynierii Mechanicznej [Developments in Mechanical Engineering]. **Szczegóły:** 2019, nr 14 (7), s. 33-46, **p-ISSN:** 2300-3383; Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego im. J.J. Śniadeckich w Bydgoszczy, Poland.
<http://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element/baztech-2faf200b-3010-4192-9fd0-062f53b49d38>
214. Pikulik K.W., Mikołajczyk J.: Determination of emission of iron oxides from the welding process on the basis of mathematical models. **Źródło:** Welding Technology Review. **Szczegóły:** 2021, vol. 93, No 2, s. 35-43, **p-ISSN:** 0033-2364; **e-ISSN:** 2449-7959;
<http://www.pspaw.wip.pw.edu.pl/index.php/pspaw/article/view/1132>
DOI: 10.26628/wtr.v93i2.1132
215. Pikulik J., Pikulik K.W., Mikołajczyk J.: The relationship between the clearance of the coupling mechanism used in uniaxial light car trailers and the date of their production. **W:** MIK-21 : Międzynarodowa Innowacyjność i Konkurencyjność w XXI wieku : aspekty

innowacyjne / redakcja naukowa Radosław Luft. Lublin : Fundacja Innowacji i Nowoczesnych Technologii INOTECH, 2022, Poland. Radom : nakładem Instytutu Naukowo-Wydawniczego "Spatium", 2022. **Szczegóły:** s. 221-233, **p-ISBN:** 978-83-67033-43-5; **e-ISBN:** 978-83-67033-44-2;

<http://inw-spatium.pl/wp-content/uploads/2022/09/MIK-21-2022-Aspekty-innowacyjne-2.pdf>

216. Pikulik J., Pikulik K.W., Mikołajczyk J.: Zależność wielkości luzu mechanizmu sprzęgającego stosowanego w jednoosiowych lekkich przyczepach samochodowych od wartości współczynnika przylegania. **W:** Logistyka w ratownictwie 2022 / pod redakcją Andrzeja Chudzikiewicza i Andrzeja Krzyszkowskiego. Radom: Instytut Naukowo-Wydawniczy "Spatium", 2022, Poland. **Szczegóły:** s. 157-167, **p-ISBN:** 978-83-67033-57-2; **e-ISBN:** 978-83-67033-70-1.

217. Pikulik J., Pikulik K.W., Mikołajczyk J.: Determination of the degree of contact of the movable part of the coupling head with the ball part of the coupling of single-axle light car trailers. **W:** MIK-21 : Międzynarodowa Innowacyjność i Konkurencyjność w XXI wieku : aspekty innowacyjne / redakcja naukowa dr Łukasz Wojtowicz. Lublin: Fundacja Innowacji i Nowoczesnych Technologii INOTECH : nakładem Instytutu Naukowo-Wydawniczego "Spatium", 2023, Poland. **Szczegóły:** s. 97-109, **p-ISBN:** 978-83-67033-89-3; **e-ISBN:** 978-83-67033-90-9.

218. Piochacz A., Mikołajczyk J.: Wpływ czasu trwania procesu anodowania stopu aluminium EN AW-6060 na grubość i twardość otrzymanej warstwy. Influence of aluminium type EN AW-6060 anodizing process duration on the thickness and hardness of the obtained layer. **Źródło:** Postępy w Inżynierii Mechanicznej [Developments in Mechanical Engineering], **Szczegóły:** 2018, nr 12 (6), s. 49-56, **p-ISSN:** 2300-3383; Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego w Bydgoszczy, Poland.

<http://wu.utp.edu.pl/oferta,8,1>

219. Piochacz A., Mikołajczyk J.: Analiza statystyczna wpływu czasu anodowania na grubość otrzymanej powłoki. Statistical analysis of the influence of anodizing time on the thickness of obtained layers. **Źródło:** Autobusy. Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe. **Szczegóły:** 2019, vol. 233, nr 9, s. 48-51, **p-ISSN:** 1509-5878; **e-ISSN:** 2450-7725;

<http://cerref.pl/index.php/Autobusy/article/view/956>

DOI: 10.24136/atest.2019.201

220. Piochacz A., Mikołajczyk J.: Determination of the thickness of anodized layer on the basis mathematical models. **Źródło:** Developments in Mechanical Engineering. **Szczegóły:** 2020, nr 16 (8), s. 31-39, **p-ISSN:** 2720-0639; Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego im. J.J. Śniadeckich w Bydgoszczy, Poland.

DOI: 10.37660/dme.2020.16.8.3

221. Piotrowski Ł., Góra F., Mikołajczyk J.: Construction of an electric longboard with one-wheel driver. **Źródło:** Mebutra. **Szczegóły:** 2024, nr 2, s. 16-27, Wydawnictwo Akademii Nauk Stosowanych im. S. Staszica w Pile, Poland.

<https://wydawnictwo.ans.pila.pl/files/MEBUTRA2024.pdf>

222. Piotrowski Ł., Góra F., Mikołajczyk J.: Design and construction of an electric longboard. **W:** Logistyka w ratownictwie 2024 / pod redakcją Andrzeja Chudzikiewicza i Andrzeja Krzyszkowskiego. Radom: Instytut Naukowo-Wydawniczy Spatium, 2024, Poland. **Szczegóły:** s. 167-178, **p-ISBN:** 978-83-68026-24-5; **e-ISBN:** 978-83-68026-25-2.

223. Praca zbiorowa: Poradnik inżyniera spawalnictwa. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne. Warszawa 1983.

224. Przybył B., Kabat M., Mikołajczyk J.: Wpływ prędkości drukowania 3D na dokładność zarysu kół zębatach. **Źródło:** Obróbka Metalu. **Szczegóły:** 2023, nr 4, s. 26-30,

p-ISSN: 2081-7002;

https://obrobkametalu.tech/media/2023/08/2023-4_Nr54_ObrobkaMetalu.pdf

225. Przybył B., Mikołajczyk J.: Efektywność technik przyrostowych.

Źródło: Obróbka Metalu. **Szczegóły:** 2024, nr 1, s. 22-25, **p-ISSN:** 2081-7002;

https://obrobkametalu.tech/media/2024/03/2024_1_nr55_ObrobkaMetalu-1.pdf

226. Przybył B., Mikołajczyk J.: The influence of 3D printing speed on profile accuracy.

W: Szkoła Logistyki 2024 / redakcja naukowa Janusz Zawila-Niedźwiecki, Adam Płaczek.

Radom: Instytut Naukowo-Wydawniczy "Spatium", 2024, Poland. **Szczegóły:** s. 199-216,

p-ISBN: 978-83-68026-07-8; **e-ISBN:** 978-83-68026-08-5.

227. Radomski T., Ciszewski A.: Lutowanie. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne. Warszawa 1985.

228. Sądej I., Mikołajczyk J.: Machine tool compensation and mass unbalance measurements.

W: Logistyka w ratownictwie 2024 / pod redakcją Andrzeja Chudzikiewicza i Andrzeja

Krzyszczkowskiego. Radom: Instytut Naukowo-Wydawniczy Spatium, 2024, Poland.

Szczegóły: s. 187-196, **p-ISBN:** 978-83-68026-24-5; **e-ISBN:** 978-83-68026-25-2.

229. Styp-Rekowski M., Mikołajczyk J.: The influence of Mind M preparation on the

lubricant properties of base oil SN-150. **W:** Reinigung, Schmierung und Verschleiß : forschung

und praktische anwendungen : Band 1 : tribologische systeme schmierstoffe und

schmierungstechnik zerspanungs : und umformtechnik prüfen, messen, kontrollieren / 53.

Tribologie-Fachtagung. 24.bis 26. Septembet 2012 in Göttingen. Aachen : Gesellschaft für

Tribologie e.V., 2012. **p-ISBN:** 978-3-00-039201-6

230. Styp-Rekowski M., Mikołajczyk J.: Wpływ dodatku na własności smarowe oleju

bazowego SN-150. **Źródło:** Tribologia. 2012, vol. 244, No. 4, s. 227-232, **p-ISSN:** 0208-7774;

e-ISSN: 1732-422X; <https://t.tribologia.eu/resources/html/article/details?id=167726>

231. Styp-Rekowski M., Mikołajczyk J.: Wpływ preparatu eksploatacyjnego stanowiący

kompleks węglowodorowy na zmianę własności smarnych oleju bazowego SN-150.

W: Tribologia bliżej praktyki : XXXII Ogólnopolska Konferencja "Jesienna Szkoła

Tribologiczna 2012". XXXII Ogólnopolska Konferencja "Jesienna Szkoła Tribologiczna

2012", Kudowa Zdrój, 18-21 września 2012r. Politechnika Wroclawska Wydział

Mechaniczny, Instytut Konstrukcji Eksploatacji Maszyn, Polskie Towarzystwo Tribologiczne,

Sekcja Podstaw Eksploatacji KBM PAN. Wrocław : Polskie Towarzystwo Tribologiczne,

2012

232. Styp-Rekowski M., Mikołajczyk J.: Zmiana temperatury na drodze tarcia dla kompozycji

olej bazowy SN-150 - preparat eksploatacyjny Mind M. Temperature variability during

friction for composition bese oil SN-150 - exploatational preparation Mind M. **W:** III krajowa

konferencja nano- i mikromechaniki / Komitet Mechaniki Polskiej Akademii Nauk,

Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza, Instytut Podstawowych Problemów

Techniki Polskiej Akademii Nauk. Warszawa, 4-6 lipca 2012 r. III Krajowa Konferencja

Nano- i Mikromechaniki pod Patronatem Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego Prof.

Barbary Kudryckiej : Komitet Mechaniki Polskiej Akademii Nauk, Politechnika Rzeszowska,

Instytut Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk, Warszawa, 2012.

233. Styp-Rekowski M., Mikołajczyk J., Matuszewski M.: Wybrane zagadnienia stosowania

płynów obróbkowych w obróbce skrawaniem. **W:** Obróbka Metalu, 2014, nr 3, s. 10-14,

p-ISSN: 2081-7002; <http://www.e-obrobkametalu.pl/>

234. Syrek S., Mikołajczyk J.: Analiza matematyczna podstawowych wymiarów złącza

spawanego. **W:** Logistyka w ratownictwie 2022 / pod redakcją Andrzeja Chudzikiewicza i

Andrzeja Krzyszczkowskiego. Radom : Instytut Naukowo-Wydawniczy "Spatium", 2022.

Szczegóły: s. 169-190, **p-ISBN:** 978-83-67033-57-2; **e-ISBN:** 978-83-67033-70-1.

235. Syrek S., Mikołajczyk J.: Modele liniowe wpływu częstotliwości prądu spawania na

grubość spoiny. **W:** MIK-21 : Międzynarodowa Innowacyjność i Konkurencyjność w XXI

wieku : aspekty innowacyjne / redakcja naukowa Radosław Luft. Lublin: Fundacja Innowacji i Nowoczesnych Technologii INOTECH, 2022. Radom : nakładem Instytutu Naukowo-Wydawniczego "Spatium", 2022. **Szczegóły:** s. 153-170, **p-ISBN:** 978-83-67033-43-5; **e-ISBN:** 978-83-67033-44-2;

<http://inw-spatium.pl/wp-content/uploads/2022/09/MIK-21-2022-Aspekty-innowacyjne-2.pdf>

236. Syrek S., Mikołajczyk J.: Modele liniowe wpływu częstotliwości prądu spawania na szerokość spoiny. **Źródło:** Obróbka Metalu. **Szczegóły:** 2022, nr 4, s. 24-31, **p-ISSN:** 2081-7002; <https://obrobkametalu.tech/>

237. Szustakowski J.: Poradnik spawacza elektrycznego. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1977.

238. Wesołowski L., Mikołajczyk J.: Hammer mill design and construction analysis. **W:** MIK-21 : Międzynarodowa Innowacyjność i Konkurencyjność w XXI wieku : aspekty innowacyjne / redakcja naukowa dr Łukasz Wojtowicz. Lublin: Fundacja Innowacji i Nowoczesnych Technologii INOTECH : nakładem Instytutu Naukowo-Wydawniczego "Spatium", 2023, Poland. **Szczegóły:** s. 159-185, **p-ISBN:** 978-83-67033-89-3; **e-ISBN:** 978-83-67033-90-9.

239. Zandecki R., Kmita C., Mikołajczyk J.: Mathematical models of the surface layer microhardness for a selected grade of ion nitrided steel. **W:** Szkoła Logistyki 2022. Radom : Instytut Naukowo-Wydawniczy "Spatium", 2022, Poland. **Szczegóły:** s. 203-216, Materiały z IX Konferencji Naukowej "Szkoła Logistyki 2022". **p-ISBN:** 978-83-67033-33-6; **e-ISBN:** 978-83-67033-34-3.

STANDARDIZATION OF TESTS WITH A FOUR-BALL APPARATUS

Bartłomiej Gemza

Maria Curie-Skłodowska High School No. 1 in Złotów, Poland

<https://orcid.org/0009-0006-8849-1271>

inż. Mirosław Gemza

Stanisław Staszic State University of Applied Sciences in Piła, Poland

Department of Mechanical Engineering

ul. Podchorążych 10, Piła, Poland

<https://orcid.org/0009-0007-9303-3539>

corresponding e-mail: miroslawgemza@wp.pl

Abstract: This paper presents a general construction of a four-ball apparatus and an outline of changes in standards related to tests carried out on this type of devices.

Key words: four-ball apparatus, friction, lubricating properties of oil

1. Introduction

Four-ball apparatuses because of their simple construction are commonly used to perform anti-wear and anti-seize tests. However, it was necessary to standardize the methods of conducting individual tests, including in European Union countries. The first national normative acts in this area date back to 1963. The PN-C-04147:1963 standard, published on 10 DEC 1963, is the first national standard describing the method of conducting tests on a four-ball apparatus.

Initially, [kG] was used as the unit of friction contact load, and in the second version of the standard PN-C-04127: 1976 it was replaced with [daN].

The next standard replacing the above-mentioned one introduced minor changes, such as the use of the conversion factor $1\text{kG} = 0.980665 \text{ [daN]}$ and also specified the following parameters:

- wear index under load I_h , expressed in [daN], and calculated on the basis of 10 consecutive runs with increasing load, carried out until welding;
- welding load P_z , expressed in [daN], the minimum preset load at which a friction contact composed of four balls will be welded;
- seizing load P_t , expressed in [daN], the minimum preset load at which there will be a significant increase in friction resistance in the contact, meaning there will be a lubricating film interrupt causing an increase in the diameters of wear marks on the balls;
- the maximum non-seizing load P_n , expressed in [daN], at which the mean flaw diameter d does not exceed the compensated flaw diameter d_s by more than 5% at a given load;
- wear limit load G_{oz} , expressed in $[\text{daN}/\text{mm}^2]$, load intensity defining the pressure in the friction contact at a constant preset load P , calculated on the basis of the average diameter of flaws d which were formed on the three fixed balls during the operation of the apparatus under this load;
- wear-load characteristic $d=f(P)$, i.e. the quotient of wear marks on three fixed balls to the given load, presented in the form of a graph.

The above standard was consistent with other European legal acts in this field, such as ASTM D 2596/69, ASTM D 2783/71 and the Italian FIAT 50 500 standard. The PN-C-04147:1976 standard was withdrawn on 26 OCT 2012, and on 27 MAR 2017 the Polish Committee for Standardization published a new standard PN-C-04362:2017. In order to ensure compliance of national standards with European standards and to unify their designation, the PN-EN ISO 20623:2010 standard was introduced, and on 3 JUL 2019, the Polish version of the PN-EN ISO 20623:2018-02 standard was published, which is still in force.

Polish Standard PN-EN ISO 20623:2018-02: "Petroleum and related products. Designation of anti-seize and anti-wear properties of lubricants. The four-ball method (European conditions)" was adopted by the European Committee for Standardization on 6 DEC 2017 and it replaces the EN ISO 20623:2003 standard. It has the status of a national standard.

One of the goals of introducing the new standard was to systematize the parameters subject to testing, including setting a single rotational speed of the electric motor driving the friction contact at 1450 rpm [42, 42, 44, 45, 46, 47].

The above standard introduces the following terms and definitions:

- wear – loss of material from the elements being tested;
- seizure – point melting of metal at the point of friction between the tested elements;
- welding – joining of metal at the point of friction between the tested elements;
- Load Wear Index LWI – index of the lubricant's ability to minimize wear for the applied load in [N];
- wear-load curve – a graph presented on a logarithmic scale of the load relationship as a function of the average diameter of the wear scar;
- lowest seizing load ISL – the lowest load at which seizure occurs;
- mean wear scar diameter MWSD – the average of six wear scar diameter measurements, two from each of the stationary balls, made in the direction of ball friction and at right angles to it.

The extreme pressure four-ball lubricant testing apparatus can perform the following tests:

- test run to determine the load wear index (LWI);
- test run to determine the wear-load curve;
- test run to determine wear.

Depending on the needs, the scope of tests performed can be modified only to the selected user needs according to individual requirements [1, 2, 4, 7, 9, 11]

Fig. 1 shows a cross-section of a typical four-ball extreme pressure apparatus. The tested lubricant is in an oil pan which also contains three passive balls and a fourth, upper, driving ball [12, 17, 18, 21, 25, 27, 30, 41]. More and more often, newer versions of four-ball apparatuses may have the balance beam replaced with electric, pneumatic or hydraulic devices that exert the load via a pressure actuator [16, 28, 29, 31, 33, 42, 48, 49, 51, 52]. In old versions of four-ball apparatuses the load is changed discretely in steps, whereas in newer ones it can be changed smoothly, depending on the nature of work of a given friction contact and user's needs [3, 5, 8, 12, 22, 24, 33, 35].

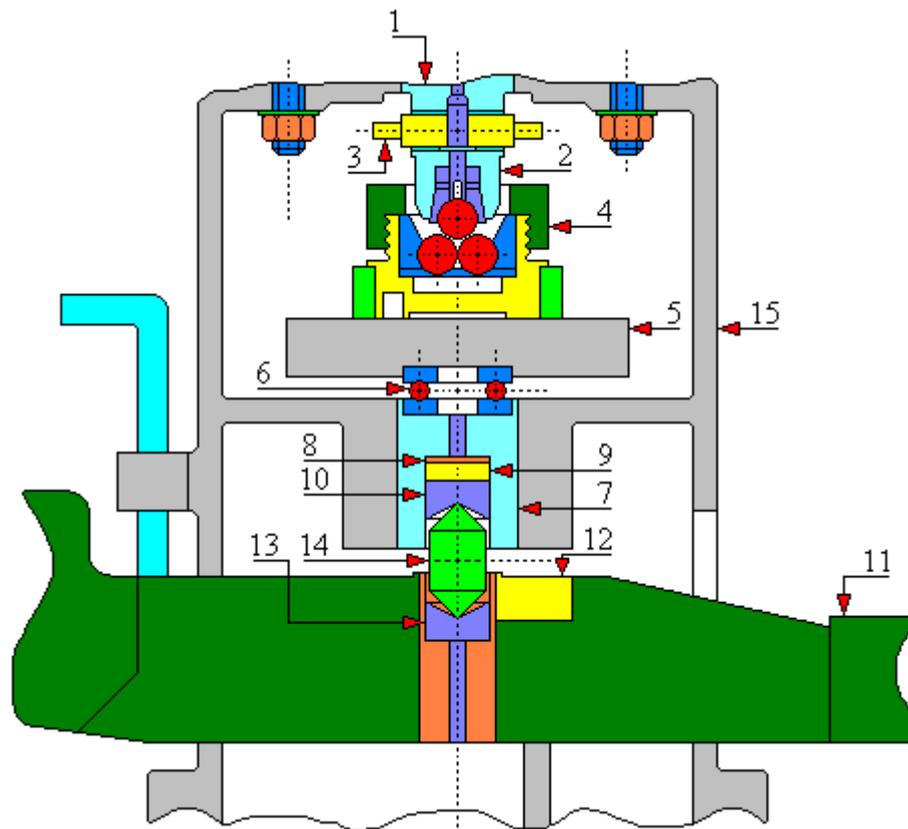


Fig. 1. Cross-section of a four-ball extreme pressure testing apparatus

1 – ball clamp holder; 2 – ball clamp; 3 – ball clamp mounting device; 4 – ball holder; 5 – ball cup mounting disc; 6 – thrust bearing; 7 – load-bearing piston; 8 – bronze washers; 9 – rubber ring; 10 – thrust insert; 11 – balance beam with counterweight; 12 – support; 13 – thrust insert; 14 – pressure pin; 15 – machine body

2. Conclusion

Four-ball apparatuses have been in use for a very long time. They have quite limited tribological applications, nevertheless there is a visible development in this type of construction. This means that there is still a need for this type of research to determine the parameters of a given lubricant. Invariably, steel bearing balls are used as a friction pair in this type of construction. Unfortunately, there is no mention of, for example, bearing rollers, bearing barrels or needle rollers. And this type of rolling elements are also commonly found in bearings. This approach demonstrates a certain conservatism on the part of legislators. However, many users build their own "four-ball devices" equipped with four barrels, four rollers or four cones that interact with each other. Of course, the principle of operation is identical [17, 18, 22, 28, 29, 30, 33].

3. Literature

1. Domański A., Mikołajczyk J.: Dimensional analysis of the selected type of rolling bearing depending on the manufacturer. **W:** Szkoła Logistyki 2023 / redakcja naukowa Janusz Zawila-Niedźwiecki, Katarzyna Białczak. Radom: Instytut Naukowo-Wydawniczy "Spatium", 2023, Poland. **Szczegóły:** s. 79-89, **p-ISBN:** 978-83-67033-75-6; **e-ISBN:** 978-83-67033-58-9.

2. Grabowska M., Mikołajczyk J.: Próba zastosowania tomografii komputerowej CAT do określania struktury grafitu naturalnego w zależności od rozmiaru ziarna. An attempt to apply cat scanning to determine the natural graphite structure depending on the grain size.

Źródło: Postępy w Inżynierii Mechanicznej [Developments in Mechanical Engineering]. 2018, nr 12 (6), s. 5-14, **p-ISSN:** 2300-3383; Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego w Bydgoszczy, Poland.

<http://wu.utp.edu.pl/oferta,8,1>

3. Matuszewski M., Mikołajczyk J., Styp-Rekowski M.: Modyfikacja cech środka smarującego za pomocą standardowych dodatków smarowych. Modification of lubricants features by means of standard additives. **Źródło:** Postępy w Inżynierii Mechanicznej [Developments in Mechanical Engineering]. 2013, nr 1 (1), s. 57-65, Wydawnictwo Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego w Bydgoszczy; **p-ISSN:** 2300-3383;

http://wu.utp.edu.pl/uploads/oferta/Postepy_1_1_2013.pdf

4. Matuszewski M., Mikołajczyk J., Mikołajczyk T., Styp-Rekowski M.: Logistyczne aspekty zarządzania procesem naprawy. Logistical aspects of the repair process management. **Źródło:** Logistyka, 2015, nr 4, s. 1991-1997, **p-ISSN:** 1231-5478;

<https://www.czasopismologistyka.pl/o-czasopismie/wydania>

5. Matuszewski M., Mikołajczyk J., Mikołajczyk T., Styp-Rekowski M.: The influence of cooling and lubrication liquid quantity on the isotropy of a machine component surface during machining = Wpływ warunków chłodzenia i smarowania podczas obróbki elementów maszyn na stopień izotropowości ich powierzchni.

Źródło: Tribologia. 2016, vol. 265, No. 1, s. 57-65, **p-ISSN:** 0208-7774; **e-ISSN:** 1732-422X;

<https://t.tribologia.eu/resources/html/article/details?id=158175>

6. Mikołajczyk J., Styp-Rekowski M., Świerk K.: Modyfikowanie cech środka smarującego za pomocą dodatków i komputerowe wspomaganie ich doboru. W: CAX'2009 : komputerowe wspomaganie nauki i techniki : VI warsztaty naukowe, Bydgoszcz - Duszniki Zdrój 2009 : praca zbiorowa pod redakcją Tadeusza Mikołajczyka. **p-ISBN: 978-83-61314-65-3**. Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego w Bydgoszczy, Bydgoszcz 2009.
7. Mikołajczyk J.: Zestawienie porównawcze dodatków depresujących do olejów. W: Zaawansowana tribologia : XXX Ogólnopolska Konferencja Tribologiczna, Nałęczów, 21-24 września 2009 r. Ogólnopolska Konferencja Naukowa XXX Szkoły Tribologicznej "Zaawansowana Tribologia" : Wydział Materiałoznawstwa, Technologii i Wzornictwa Politechniki Radomskiej, Instytut Technologii Eksploatacji - PIB Radom oraz Komitet Budowy Maszyn, Sekcja Podstaw Eksploatacji Maszyn PAN. Wydawnictwo Naukowe Instytutu Technologii Eksploatacji - PIB, Radom, 2009.
8. Mikołajczyk J.: Zestawienie porównawcze własności fizykochemicznych dodatków smarnych w oleju podstawowym SAE-30. W: Terotechnologia 2009 : materiały konferencji na ekspozycji Metal i Control-Tech : Targi - Kielce (29.09-01.10.2009). VI Konferencja Naukowo-Techniczna "Terotechnologia 2009" : Politechnika Świętokrzyska, Centrum Laserowych Technologii Metali, Katedra Inżynierii Eksploatacji, Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn, Polskie Towarzystwo Naukowo-Techniczne, Towarzystwo Eksploatacyjne, Kielce: Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, 2009. Seria: Zeszyty Naukowe - Politechnika Świętokrzyska, nr 13.
9. Mikołajczyk J., Matuszewski M.: Konstrukcja i sterowanie stanowiska do badań tribologicznych. W: CAX'2010 : komputerowe wspomaganie nauki i techniki : VII warsztaty naukowe, Bydgoszcz - Duszniki Zdrój 2010 : praca zbiorowa / pod red. Tadeusza Mikołajczyka. Bydgoszcz : Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego w Bydgoszczy, 2010. **p-ISBN: 9788361314387**
10. Mikołajczyk J.: System rejestracji i wizualizacji warunków pracy stanowiska do badań tribologicznych. W: CAX'2011 : komputerowe wspomaganie nauki i techniki : VIII warsztaty naukowe, Bydgoszcz - Duszniki Zdrój 2011 : praca zbiorowa / pod redakcją Tadeusza Mikołajczyka. Bydgoszcz : Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego w Bydgoszczy, 2011. **p-ISBN: 9788361314981**
11. Mikołajczyk J.: Badanie wpływu preparatu eksploatacyjnego Mind M na zmianę własności smarnych oleju bazowego SN-150. Źródło: Inżynieria i aparatura chemiczna [Chemical Engineering and Equipment]. 2012, nr 5, s. 235-236, **p-ISSN: 0368-0827**. <http://inzynieria-aparatura-chemiczna.pl/rok-2012-nr-5/>
12. Mikołajczyk J., Styp-Rekowski M., Matuszewski M., Musiał J.: Einfluß der kompositionen von schmierzusätzen auf die exploitations-eigenschaften der mischung mit Basisöl SN-150. W: Tribologie und mobilität : beiträge der tribotechnik zur optimierung von fertigungsprozessen, wartung, schmierung (reibungskonditionierung) und betriebssicherheit von verkehrsmitteln und verkehrswegen. Wien, 15 November

2012. Symposium 2012 "Tribologie und mobilität" : Österreichische Tribologische Gesellschaft. Österreichische Tribologische Gesellschaft, Wien, 2012.

13. Mikołajczyk J.: Einfluß der ausgewählten schmierstoffzusätze auf betriebseigenschaften der mischung mit Basisöl SN-150. **W:** Reibung, schmierung und verschleiß : forschung und praktische anwendungen. Band 1. Tribologische systeme maschinenelemente und antriebstechnik fahrzeugtechnik prüfen, messen, kontrollieren. Göttingen, 22-24 September 2014. 55. Tribologie Fachtagung "Reibung, Schmierung und Verschleiß" : Gesellschaft für Tribologie e.V. Stolberg-Venwegen : Gesellschaft für Tribologie e.V., 2014. Germany.

14. Mikołajczyk J.: Einfluss der ausgewählten zusatzschmierstoffe auf die intensivität des verschleißprozesses (R_a , R_q , Δm) mit Basisöl SN-150. **W:** Tribologie in industrie und forschung : werkstoffe, konstruktion und technologie. Leoben, 26 November 2014. ÖTG Symposium 2014 "Tribologie in industrie und forschung" : Österreichische Tribologische Gesellschaft. Wien : Österreichische Tribologische Gesellschaft, 2014. Austria.

15. Mikołajczyk J., Matuszewski M.: Einfluss der ausgewählten schmierstoffzusätze auf ΔT und ΔP mit Basisöl SN-150. **W:** Tribologie in industrie und forschung : werkstoffe, schmierstoffe und technologie. Wiener Neustadt, 25 November 2015, Austria. ÖTG Symposium 2015 "Tribologie in industrie und forschung" : Österreichische Tribologische Gesellschaft. Wiener Neustadt : Österreichische Tribologische Gesellschaft, 2015, s. 145-152.

16. Mikołajczyk J.: Vergleich charakteristischer parameter des abbott-firestone-diagramms für ein kinematisches paar mit konformem kontakt. **W:** Tribologie in industrie und forschung : verschleißschutz, instandhaltung und anlagenzuverlässigkeit. Linz, 22-23 November 2016, Austria. ÖTG Symposium 2016 "Tribologie in industrie und forschung" : Österreichische Tribologische Gesellschaft. Wiener Neustadt : Österreichische Tribologische Gesellschaft, 2016; s. 105-110.

17. Mikołajczyk J.: Wpływ dodatków smarowych na transformację warstwy wierzchniej. Piła : Wydawnictwo Państwowej Wyższej Szkoły Zawodowej im. Stanisława Staszica, 2017r., Poland. 215, [1] s., **p-ISBN:** 978-83-62617-76-0; www.ans.pila.pl

18. Mikołajczyk J.: Maszyny tarciove : budowa, przeznaczenie. Piła, Wydawnictwo Państwowej Wyższej Szkoły Zawodowej im. Stanisława Staszica, 2018, Poland; 256 s., **p-ISBN:** 978-83-62617-86-9.

19. Mikołajczyk J.: Analiza statystyczna zmiany poboru mocy podczas procesu zużywania. Statistical analysis of the power variation of tribotester as a resultat of the wear process. **Źródło:** Autobusy. Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe. **Szczegóły:** 2019, nr 10-11, s. 83-88, **p-ISSN:** 1509-5878; **e-ISSN:** 2450-7725; <http://yadda.icm.edu.pl/yadda/element/bwmeta1.element.baztech-21189602-884a-4d1a-bb60-9edaeae4af8d>

20. Mikołajczyk J.: Influence of consumables on the amount of power consumption of kinematic vapor of conformal contact. Wpływ PE na pobór mocy pary kinematycznej o

styku konforemnym. **Źródło:** Postępy w Inżynierii Mechanicznej [Developments in Mechanical Engineering]. **Szczegóły:** 2019, nr 13 (7), s. 39-50, **p-ISSN:** 2300-3383; Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu technologiczno-Przyrodniczego im. J. J. Śniadeckich w Bydgoszczy, Poland.

<http://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-2faf200b-3010-4192-9fd0-062f53b49d38>

21. Mikołajczyk J.: Statistical analysis of the mass variation of samples as a result of the wear process. Analiza statystyczna zmiany masy próbek w wyniku procesu zużywania. **Źródło:** Postępy w Inżynierii Mechanicznej [Developments in Mechanical Engineering]. **Szczegóły:** 2019, nr 13 (7), s. 51-61, **p-ISSN:** 2300-3383; Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego im. J.J. Śniadeckich w Bydgoszczy, Poland.

<http://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-2faf200b-3010-4192-9fd0-062f53b49d38>

22. Mikołajczyk J.: Tribotestery : budowa i przeznaczenie. Piła: Wydawnictwo Państwowej Wyższej Szkoły Zawodowej im. Stanisława Staszica, 2019, Poland. **Szczegóły:** 160 s., **e-ISBN:** 978-83-62617-90-6;

<https://wydawnictwo.pwsz.pila.pl/files/Tribotestery.pdf>

23. Mikołajczyk J.: Determining the energy validity of the Kostetsky's hypothesis on the basis of models for relative motion velocity $v = 0.08$ m/sec. **Źródło:** Developments in Mechanical Engineering. **Szczegóły:** 2020, nr 16 (8), s. 17-29, **p-ISSN:** 2720-0639; Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego im. J.J. Śniadeckich w Bydgoszczy, Poland. **DOI:** [10.37660/dme.2020.16.8.2](https://doi.org/10.37660/dme.2020.16.8.2)

24. Mikołajczyk J.: Finding the correlation between wear of samples kinematic pair of conformal contact and electric power consumption. **Źródło:** Postępy w Inżynierii Mechanicznej [Developments in Mechanical Engineering]. **Szczegóły:** 2020, nr 15 (8), s. 59-68, **p-ISSN:** 2300-3383; Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego im. J.J. Śniadeckich w Bydgoszczy, Poland.

[https://dme.utp.edu.pl/art/15\(8\)2020/59.pdf](https://dme.utp.edu.pl/art/15(8)2020/59.pdf)

DOI: [10.37660/dme.2020.15.8.6](https://doi.org/10.37660/dme.2020.15.8.6)

25. Mikołajczyk J.: The effect of temperature lag on the value of power-temperature correlation for frictional pair of conformal contact. **Źródło:** Postępy w Inżynierii Mechanicznej [Developments in Mechanical Engineering]. **Szczegóły:** 2020, nr 15 (8), s. 79-86, **p-ISSN:** 2300-3383; Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego im. J.J. Śniadeckich w Bydgoszczy, Poland.

[https://dme.utp.edu.pl/art/15\(8\)2020/79.pdf](https://dme.utp.edu.pl/art/15(8)2020/79.pdf)

DOI: [10.37660/dme.2020.15.8.8](https://doi.org/10.37660/dme.2020.15.8.8)

26. Mikołajczyk J.: Określenie na podstawie modeli zmiany masy próbek w wyniku procesu zużywania. **W:** Szkoła Logistyki 2021 / redakcja naukowa Janusz Zawila-Niedźwiecki, Piotr Korneta. **Adres wydawniczy:** Radom : Instytut Naukowo-Wydawniczy "Spatium", 2021. **Szczegóły:** s. 167-174, Poland; **p-ISBN:** 978-83-66550-75-9; **e-ISBN:** 978-83-66550-89-6.

27. Mikołajczyk J.: A method of determining mathematical models of a seizure test of friction pairs. **W:** MIK-21 : Międzynarodowa Innowacyjność i Konkurencyjność w XXI wieku : aspekty innowacyjne / redakcja naukowa Radosław Luft. Lublin : Fundacja Innowacji i Nowoczesnych Technologii INOTECH, 2022. Radom : nakładem Instytutu Naukowo-Wydawniczego "Spatium", 2022. **Szczegóły:** s. 7-24, **p-ISBN:** 978-83-67033-43-5; **e-ISBN:** 978-83-67033-44-2.
<http://inw-spatium.pl/wp-content/uploads/2022/09/MIK-21-2022-Aspekty-innowacyjne-2.pdf>
28. Mikołajczyk J.: Friction machines. Piła: Wydawnictwo Akademii Nauk Stosowanych im. Stanisława Staszica, 2022, Poland. **Szczegóły:** 488 s., **e-ISBN:** 978-83-62617-96-8.
https://wydawnictwo.ans.pila.pl/files/FRICTION_MACHINES.pdf
29. Mikołajczyk J.: Rolling bearing heating charakter. **W:** Szkoła Logistyki 2022. Radom: Instytut Naukowo-Wydawniczy "Spatium", 2022, Poland. **Szczegóły:** s. 231-239, Materiały z IX Konferencji Naukowej "Szkoła Logistyki 2022"; **p-ISBN:** 978-83-67033-33-6; **e-ISBN:** 978-83-67033-34-3.
30. Mikołajczyk J.: Tribological properties of carbon black. **W:** Szkoła Logistyki 2022. Radom: Instytut Naukowo-Wydawniczy "Spatium", 2022, Poland. **Szczegóły:** s. 217-230, Materiały z IX Konferencji Naukowej "Szkoła Logistyki 2022"; **p-ISBN:** 978-83-67033-33-6; **e-ISBN:** 978-83-67033-34-3.
31. Mikołajczyk J.: Determination of the modified coefficient of variation from the number of samples. **W:** MIK-21 : Międzynarodowa Innowacyjność i Konkurencyjność w XXI wieku : Aspekty innowacyjne / redakcja naukowa dr Łukasz Wojtowicz. Lublin: Fundacja Innowacji i Nowoczesnych Technologii INOTECH : nakładem Instytutu Naukowo-Wydawniczego "Spatium", 2023, Poland. **Szczegóły:** s. 111-122, **p-ISBN:** 978-83-67033-89-3; **e-ISBN:** 978-83-67033-90-9.
32. Mikołajczyk J.: Effect of cutting speed on the shape of the machined surface profile. **Źródło:** Mebutra. **Szczegóły:** 2023, nr 1, s. 47-63, Wydawnictwo Akademii Nauk Stosowanych im. S. Staszica w Pile, Piła 2023, Poland.
<https://online.fliphtml5.com/vliuj/yunw/> p=48
33. Mikołajczyk J.: Friction Machines II. Piła: Wydawnictwo Akademii Nauk Stosowanych im. Stanisława Staszica w Pile, 2023, Poland. **Szczegóły:** 598 s., **p-ISBN:** 978-83-67684-00-2;
https://wydawnictwo.ans.pila.pl/files/FRICTION_MACHINES_V_ANS_PILA.pdf
34. Mikołajczyk J.: Oil can talk. **W:** Szkoła Logistyki 2023 / redakcja naukowa Janusz Zawiła-Niedźwiecki, Katarzyna Białczak. Radom: Instytut Naukowo-Wydawniczy "Spatium", 2023, Poland. **Szczegóły:** s. 109-115, **p-ISBN:** 978-83-67033-75-6; **e-ISBN:** 978-83-67033-58-9.
35. Mikołajczyk J.: Pobór mocy elektrycznej przez parę kinematyczną jako parametr oceny jakości oleju. **W:** Logistyka w ratownictwie 2023 / pod redakcją Andrzeja Chudzikiewicza i Anny Stelmach. Radom: Instytut Naukowo-Wydawniczy "Spatium", 2023, Poland. **Szczegóły:** s. 223-230, **p-ISBN:** 978-83-67033-95-4;

e-ISBN: 978-83-67033-96-1.

36. Mikołajczyk J.: Rola dodatków smarowych w olejach. **W:** Logistyka w ratownictwie 2023 / pod redakcją Andrzeja Chudzikiewicza i Anny Stelmach. Radom: Instytut Naukowo-Wydawniczy "Spatium", 2023, Poland. **Szczegóły:** s. 231-237, **p-ISBN:** 978-83-67033-95-4; **e-ISBN:** 978-83-67033-96-1.

37. Mikołajczyk J.: Temperature as a parameter for assessing the work of a friction pair. **W:** Szkoła Logistyki 2023 / redakcja naukowa Janusz Zawiła-Niedźwiecki, Katarzyna Białczak. Radom: Instytut Naukowo-Wydawniczy "Spatium", 2023, Poland. **Szczegóły:** s. 101-107, **p-ISBN:** 978-83-67033-75-6; **e-ISBN:** 978-83-67033-58-9.

38. Mikołajczyk J.: Tire as a selected element of a car subject to diagnostics. **W:** Szkoła Logistyki 2023 / redakcja naukowa Janusz Zawiła-Niedźwiecki, Katarzyna Białczak. Radom: Instytut Naukowo-Wydawniczy "Spatium", 2023, Poland. **Szczegóły:** s. 117-131, **p-ISBN:** 978-83-67033-75-6; **e-ISBN:** 978-83-67033-58-9.

39. Mikołajczyk J.: Wpływ dodatku modyfikującego cechy płynu obróbkowego na zmianę temperatury w strefie kontaktu współpracujących powierzchni. **Źródło:** Obróbka Metalu. **Szczegóły:** 2023, nr 2, s. 43-46, **p-ISSN:** 2081-7002; https://obrobkametalu.tech/media/2023/05/2023_2_52_ObrobkaMetalu.pdf

40. Mikołajczyk J.: Zmiana geometrycznych cech współpracujących powierzchni miarą intensywności procesu zużywania ostrzy skrawających. **Źródło:** Obróbka Metalu. **Szczegóły:** 2023, nr 1, s. 50-54, **p-ISSN:** 2081-7002; <https://yadda.icm.edu.pl/yadda/element/bwmeta1.element.baztech-9e73eb05-2a91-4df5-853b-22abf7a6ee77>

41. Mikołajczyk J., Góra F., Jędrzejczyk D.: Analysis of selected surface roughness parameters for wear processes. Analiza wybranych parametrów chropowatości powierzchni pod kątem procesów zużywania. **W:** MIK-21 : Międzynarodowa Innowacyjność i Konkurencyjność w XXI wieku : Aspekty innowacyjne / redakcja naukowa Radosław Luft. Lublin: Wydawnictwo Naukowe FNCE, 2024. **Szczegóły:** s. 93-117, **p-ISBN:** 978-83-68074-82-6; **e-ISBN:** 978-83-68319-03-3.

42. Norma PN-EN ISO 20623.

43. Norma PN-EN ISO 20626:2010.

44. Norma ISO 4259, Petroleum products – Determination and application of precision data in relation to methods of test.

45. Norma ISO 6743-9, Lubricants, industrial oils and related products (class L) – Classification – Part 9: Family X (Greases).

46. Norma ISO 6743-99, Lubricants, industrial oils and related products (class L) – Classification – Part 99: General.

47. Norma EN 10027, Designation system for steels.

48. Styp-Rekowski M., Mikołajczyk J.: The influence of Mind M preparation on the lubricant properties of base oil SN-150. W: *Reinigung, Schmierung und Verschleiß : forschung und praktische anwendungen : Band 1 : tribologische systeme schmierstoffe und schmierungstechnik zerspanungs : und umformtechnik prüfen, messen, kontrollieren / 53. Tribologie-Fachtagung. 24.bis 26. Septembet 2012 in Göttingen. Aachen : Gesellschaft für Tribologie e.V., 2012. p-ISBN: 978-3-00-039201-6*
49. Styp-Rekowski M., Mikołajczyk J.: Wpływ dodatku na własności smarowe oleju bazowego SN-150. Źródło: *Tribologia*. 2012, vol. 244, No. 4, s. 227-232, **p-ISSN: 0208-7774; e-ISSN: 1732-422X**;
<https://t.tribologia.eu/resources/html/article/details?id=167726>
50. Styp-Rekowski M., Mikołajczyk J.: Wpływ preparatu eksploatacyjnego stanowiący kompleks węglowodorowy na zmianę własności smarnych oleju bazowego SN-150. W: *Tribologia bliżej praktyki : XXXII Ogólnopolska Konferencja "Jesienna Szkoła Tribologiczna 2012". XXXII Ogólnopolska Konferencja "Jesienna Szkoła Tribologiczna 2012"*, Kudowa Zdrój, 18-21 września 2012r. Politechnika Wrocławska, Wydział Mechaniczny, Instytut Konstrukcji Eksploatacji Maszyn, Polskie Towarzystwo Tribologiczne, Sekcja Podstaw Eksploatacji KBM PAN. Wrocław : Polskie Towarzystwo Tribologiczne, 2012.
51. Styp-Rekowski M., Mikołajczyk J.: Zmiana temperatury na drodze tarcia dla kompozycji olej bazowy SN-150 - preparat eksploatacyjny Mind M. Temperature variability during friction for composition bese oil SN-150 - exploatational preparation Mind M. **W:** III krajowa konferencja nano- i mikromechaniki / Komitet Mechaniki Polskiej Akademii Nauk, Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza, Instytut Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk. Warszawa, 4-6 lipca 2012 r. III Krajowa Konferencja Nano- i Mikromechaniki pod Patronatem Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego Prof. Barbary Kudryckiej : Komitet Mechaniki Polskiej Akademii Nauk, Politechnika Rzeszowska, Instytut Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk, Warszawa, 2012.
52. Styp-Rekowski M., Mikołajczyk J., Matuszewski M.: Wybrane zagadnienia stosowania płynów obróbkowych w obróbce skrawaniem. **W:** *Obróbka Metalu*, 2014, nr 3, s.10-14, **p-ISSN: 2081-7002**; <http://www.e-obrobkametalu.pl/>

DESIGN AND CONSTRUCTION OF A LAB RIG FOR TESTING BOLT EFFICIENCY

Natalia Grabianowska

Stanislaw Staszic State University of Applied Sciences in Piła, Poland

Department of Transport

ul. Podchorążych 10, Piła, Poland

<https://orcid.org/0009-0007-6010-5882>

inż. Maciej Grabianowski

Stanislaw Staszic State University of Applied Sciences in Piła, Poland

Department of Mechanical Engineering

ul. Podchorążych 10, Piła, Poland

<https://orcid.org/0009-0008-6985-7658>

corresponding e-mail: m.g.74@op.pl

Abstract: The paper presents the construction of a laboratory test rig for determining the friction factor for threaded connections. The lab rig enables tests to be carried out with or without lubrication between the mating threaded surfaces.

Key words: thread, threaded connection, coefficient of friction

Symbols and acronyms used in the work

Table 1. List of symbols and acronyms

Symbol	Units	Parameter name
d	mm	outside diameter of thread
D_1	mm	nut inside diameter
d_2	mm	average thread diameter
d_3	mm	core diameter of thread
d_m	mm	average diameter of the contact area
d_s	mm	average working diameter of thread
E	-	Young's modulus
F	N	force
H	N	resisting force
l	mm	length
M_n	N	moment needed to overcome the frictional resistance of the nut
N	mm	nut height
N	N	normal force to the contour
P	mm	pitch of thread
Q	N	axial force acting on the bolt
Q_T	N	transverse force acting on the threaded connection
Q_w	N	initial tension of the bolt
R	N	radial force
z	-	thread multiplicity
α	$^\circ$	thread angle
α_r	$^\circ$	working angle of the thread flank
γ	-	helix angle
η	%	efficiency
ρ	-	friction angle
ρ'	-	apparent friction angle of the bolt in the nut
μ	-	coefficient of friction in a nut or between nut and washer
μ_1	-	coefficient of friction at the contact surface

1. Introduction

Threaded connections belong to the group of friction-shaped connections in which it is possible to use simultaneously the forces of connected elements and the friction force that occur on the contact surface of connected elements – the nut and bolt. These are also separable tension-shape connections. Transmitting of forces is made possible thanks to their appropriate shape and initial tension [1, 2].

Threaded connections are related to the concept of the screw which was invented by Archytas of Tarentum around 400 BC. It is now associated with Archimedes. Pliny in the 1st century AD described the use of wooden screws in presses, but he did not specify how they were made. The first threads were made by hand by cutting into the wood. This technology was described by Pappus [30].

The first machine tool for cutting threads on shafts and the first tool for producing threads in holes were described by Leonardo da Vinci. The first screws were made by twisting metal bars. The first "screwing dies" were made as hardened nuts, and screwtaps as bolts. These tools did not cut the thread but simply kneaded it [30].

The first satisfactory results of thread cutting on a lathe were not recorded until 1770; the first correctly cutting three-edged die was made and used by Joseph Whitworth in 1834. The fluted screwtap was developed and patented by Johann Georg Bodmer in 1841. In 1864, William Sellers in the USA proposed the introduction of an American standard for screws, which was adopted in 1901–1905. Earlier, in 1898 in Zurich, an international standard for metric threads was established [30].

Threaded connections are among the most popular detachable connections used in machine construction. The basic feature of threaded connections is the ability to withstand loads after re-assembly.

2. Basic concepts

Thread pitch is the distance between adjacent threads measured along the axis of the thread profile.

The thread pitch is the displacement along the axis of the thread profile after one full rotation. The thread pitch can be equal to the pitch $h = h_z$ (single thread) or a multiple thread that is a multiplicity of $h = z \cdot h_z$.

A helix is the trajectory of a point moving with constant speed on the surface of a cone and shifting towards the cone's axis while simultaneously rotating about that axis.

The pitch P of a helix is the distance of the axial displacement of a point corresponding to one rotation of this point around the axis.

A transverse jump is the distance of a radial displacement of a point corresponding to one rotation around the base axis of the surface [2, 3].

Self-locking occurs when it is not possible to reverse the direction of the torque (torque is only possible on one side). In self-locking threaded connections, rotation of the bolt or nut will cause linear movement of the bolt or nut which will transfer the load Q . The determined self-locking limit is shown in Fig. 1. Self-locking of the mechanism occurs when it is not possible to reverse the drive direction (drive is only possible on one side). Self-locking occurs when the resisting force $H = 0$, or when the direction changes $H \leq 0$ [1, 2, 3, 4].

$$H = Q \cdot \operatorname{tg}(\gamma \pm \rho') \leq 0 \quad (1)$$

where: H – resisting force; Q – axial force acting on the screw; γ – helix angle; ρ' – apparent friction angle

From the above formula it follows that the conditions will be met when the helix angle γ of the threads is smaller than the apparent friction angle ρ' or equal to its value [1, 2, 3, 4, 31].

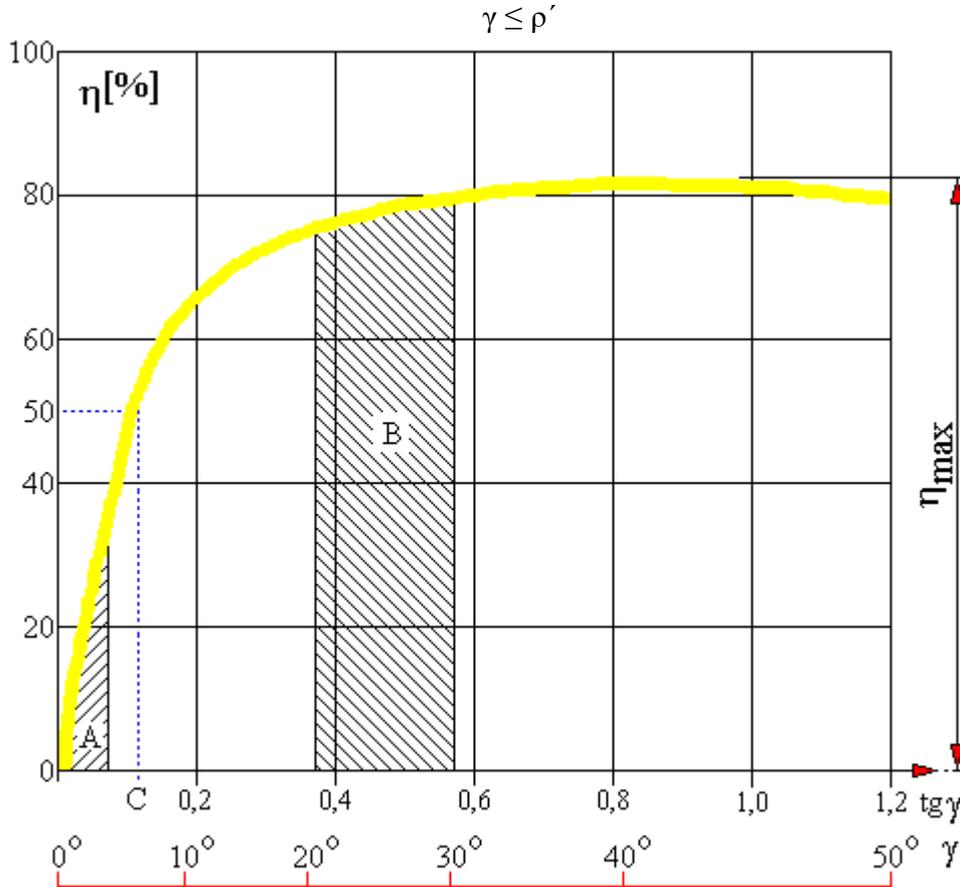


Fig. 1. Graph of self-locking limit [31]

where: η [%] – thread efficiency; η_{max} – maximum efficiency; tgy – helix angle tangent; A – area of coupling bolts; B – area of moving bolts; C – self-locking limit

3. Basic symbols

d [mm] – outside diameter of thread; d_2 [mm] – average thread diameter;

d_3 [mm] – core diameter of thread; D_1 [mm] – nut inside diameter;

N [mm] – nut height; P [mm] – thread pitch; Q [N] – axial force acting on the bolt; Q_T [N] – transverse force acting on threaded connections; Q_w [N] – bolt initial load; S [mm] – bolt wrench size; z – thread multiplicity;

α – thread angle; γ – helix angle; μ – coefficient of friction in a nut or between nut and washer; ρ' – apparent friction angle of the bolt in the nut [5, 14]

4. Basic dimensions of selected metric thread diameters

Table 2 presents the basic dimensions of selected metric thread diameters which are standardized according to PN-ISO-2:2001. They are divided into privileged ones

(adopted according to the above-mentioned standard, without the need to mark the thread pitch on the technical drawing) and non-privileged ones, which require thread pitch marking [5, 14].

Table 2. Basic dimensions of selected metric thread diameters according to PN- ISO-2:2001

Thread diameter d [mm]	P [mm]	d ₂ [mm]	d ₃ [mm]	D ₁ [mm]	Thread diameter d [mm]	P [mm]	d ₂ [mm]	d ₃ [mm]	D ₁ [mm]	
6	1	5,35	4,77	4,92	30	3,5	27,73	25,71	26,21	
	0,75	5,51	5,08	5,19		3	28,05	26,31	26,75	
	0,5	5,68	5,39	5,46		2	28,70	27,55	27,84	
8	1,25	7,19	6,47	6,65		1,5	29,03	28,16	28,38	
	1	7,35	6,77	6,92		1	29,35	28,77	28,92	
	0,75	7,51	7,08	7,19		0,75	29,51	29,08	29,19	
10	0,5	7,68	7,39	7,46	36	4	33,40	31,09	31,67	
	1,5	9,03	8,16	8,38		3	34,05	32,31	32,75	
	1,25	9,19	8,47	8,65		2	34,7	33,55	33,84	
	1	9,35	8,77	8,92		1,5	35,03	34,16	34,38	
12	0,75	9,51	9,08	9,19	42	1	35,35	34,77	34,92	
	0,5	9,68	9,39	9,46		4,5	39,08	36,48	37,13	
	1,75	10,86	9,85	10,11		4	39,40	37,09	37,67	
	1,5	11,03	10,16	10,38		3	40,05	38,31	38,75	
	1,25	11,19	10,47	10,65		2	40,70	39,55	39,84	
16	1	11,35	10,77	10,92	48	1,5	41,03	40,16	40,38	
	0,75	11,51	11,08	11,19		1	41,35	40,77	40,92	
	0,5	11,68	11,39	11,46		56	5	44,75	41,87	42,59
	2	14,70	13,55	13,84			4	45,40	43,09	43,67
	31,5	15,03	14,16	14,38			3	46,05	44,31	44,75
1	15,35	14,77	14,92	2	46,70		45,55	45,84		
20	0,75	15,51	15,08	15,19	64	1,5	47,03	46,16	46,38	
	0,5	15,68	15,39	15,46		1	47,35	46,77	46,92	
	2,5	18,38	16,93	17,29		5,5	52,43	49,25	50,05	
	2	18,7	17,55	17,84		4	53,40	51,09	51,67	
	1,5	19,03	18,16	18,38		3	54,05	52,31	52,75	
	1	19,35	18,77	18,92		2	54,70	53,55	53,84	
24	0,75	19,51	19,08	19,19	64	1,5	55,03	54,16	54,38	
	0,5	19,68	19,39	19,46		1	55,35	54,77	54,92	
	3	22,5	20,31	20,75		6	60,10	56,64	57,51	
	2	22,70	21,55	21,84		4	61,40	59,09	59,67	
	1,5	23,03	22,16	22,38		3	62,05	60,31	60,75	
24	1	23,35	22,77	22,92	64	2	62,70	61,55	61,84	
	0,75	23,51	23,08	23,19		1,5	63,03	62,16	62,38	
						1	63,35	62,77	62,92	

where: d [mm] – outside diameter of thread; P [mm] – thread pitch; d₂ [mm] – average thread diameter; d₃ [mm] – core diameter of thread; D₁ [mm] – nut inside diameter

5. Basic dimensions of symmetrical trapezoidal threads

Table 3 shows selected dimensions of trapezoidal threads which are typically used to carry significant loads in two directions but at low rotational speeds [4, 5, 14].

Table 3. Basic dimensions of symmetrical trapezoidal threads according to PN – ISO 2902 : 1996

Thread diameter d [mm]	P [mm]	d ₂ [mm]	d ₃ [mm]	D ₁ [mm]	Thread diameter d [mm]	P [mm]	d ₂ [mm]	d ₃ [mm]	D ₁ [mm]
12	2	11	9,5	10	60	3	58,5	56,5	57
	3	10,5	8,5	9		9	55,5	50	51
16	2	15	13,5	14	70	14	53	44	46
	4	14	11,5	12		4	68	65,5	66
20	2	19	17,5	18	80	10	65	59	60
	4	18	15,5	16		16	62	52	54
24	3	22,5	20,5	21	90	4	78	75,5	76
	5	21,5	18,5	19		10	75	69	70
	8	20	15	16		16	72	62	64
28	3	26,5	24,5	25	100	4	88	85	86
	5	25,5	22,5	23		12	84	77	78
	8	20	19	20		18	81	70	72
32	3	34,5	28,5	29	120	4	98	95,5	96
	6	29	25	26		12	94	87	88
	10	27	21	22		18	90	78	80
36	3	34,5	32,5	33	140	6	117	113	114
	6	33	29	30		14	113	104	106
	10	31	25	26		22	109	96	98
40	3	38,5	36,5	37	160	6	137	133	134
	7	36,5	32	33		14	133	124	126
	10	35	29	30		24	128	114	116
44	3	42,5	40,5	41	180	6	157	153	154
	7	40,5	36	37		16	152	142	144
	12	38	31	32		28	146	130	132
48	3	46,5	44,5	45	200	8	176	171	172
	8	44	39	40		18	171	160	162
	12	42	35	36		28	166	150	152
52	3	50,5	48,5	49		8	196	191	192
	8	48	43	44		18	191	180	182
	12	46	39	40		32	184	166	168

6. Principle of obtaining capacity to transfer loads

A combination of line segments of any shape that remains in the reference plane of a convex figure. Each point of the reference surface profile lies simultaneously on a cylindrical helix or on a conical helix (Fig. 2). A profile point on a cylindrical helix is when the thread is created on a cylindrical surface and when the thread is created on a conical surface it is said to be a conical helix. The path of a point moving with constant speed on the surface of a cone or cylinder, shifting towards the axis while rotating about the axis, is called a helix. The pitch of a helix is the distance of the axial displacement of a point corresponding to one rotation of this point around the axis. The transverse pitch of a helix is the radial distance a point moves and corresponds to one revolution about an axis. The pitch of the helix is constant in each subsequent rotation of the point, and ratio of axial and circumferential translational speed is maintained constant. The helix angle γ determines the quotient of these velocities [2, 4, 5, 16, 18, 19].

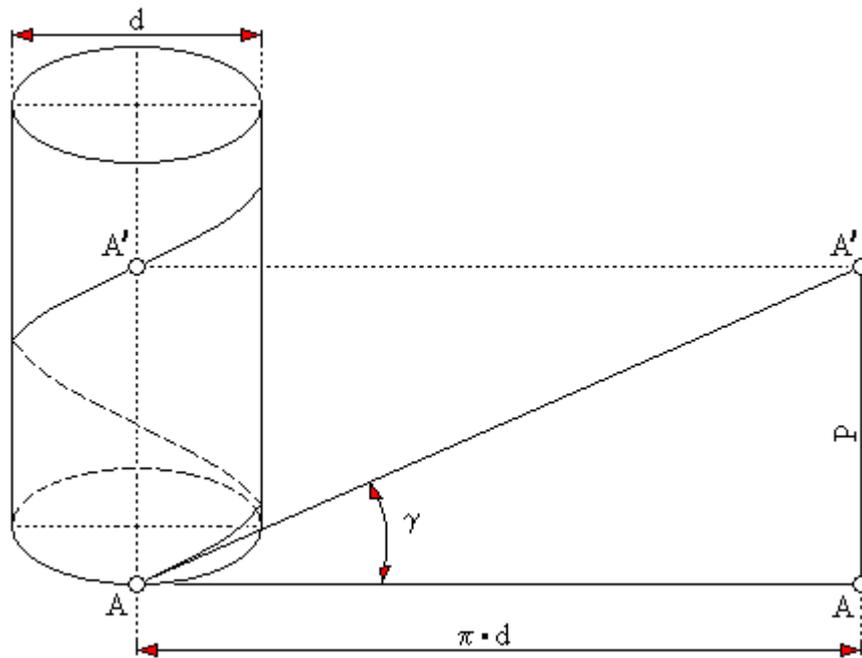


Fig. 2. Cylindrical helix

where: d – outside diameter of thread; P – thread pitch; A, A' – surface reference points; γ – helix angle

Maintaining the constant pitch of the helices at all points is called the principle of creating a threaded surface. This principle leads to different helix angles (Fig. 3). The nominal thread surface angle is the angle of inclination of the selected point of the profile [2, 3, 4, 5, 17, 18].

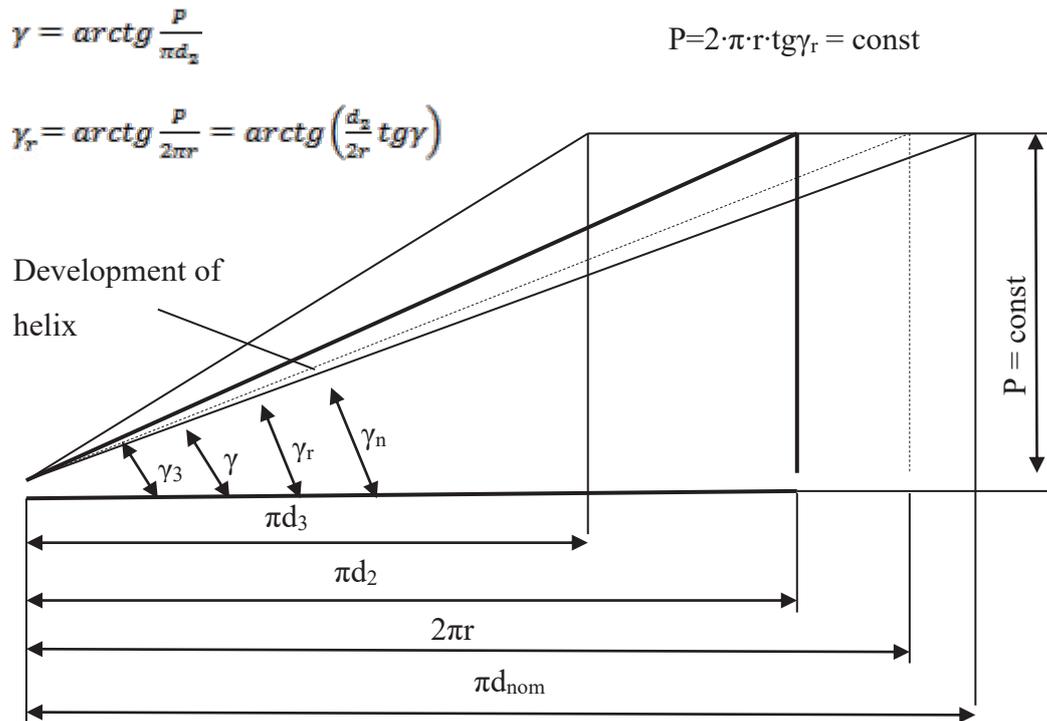


Fig. 3. Helix inclination angle

The value of the inclination angle is a function of the reference profile multiplicity, i.e. the total number of repetitions with the same pitch of the profile figure along the length of the thread surface pitch (Fig. 4 a, b). A fixed distance between points of the same helix measured along the surface axis and corresponding to one revolution around this axis is the thread pitch [2, 3, 4, 5, 16, 17, 18].

a) bolt

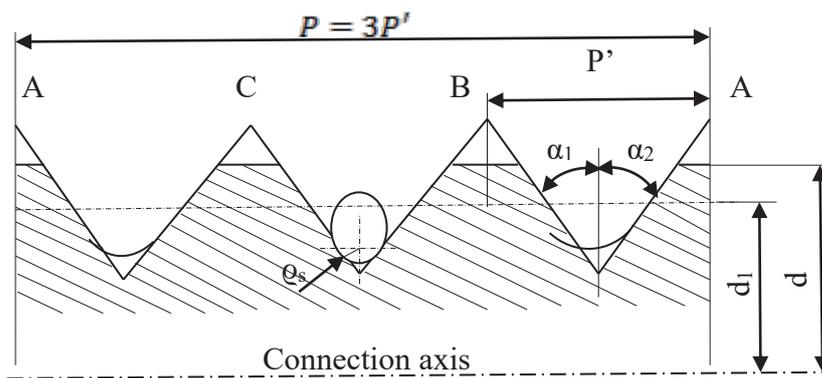


Fig. 4.a) Thread reference for the bolt

b) nut

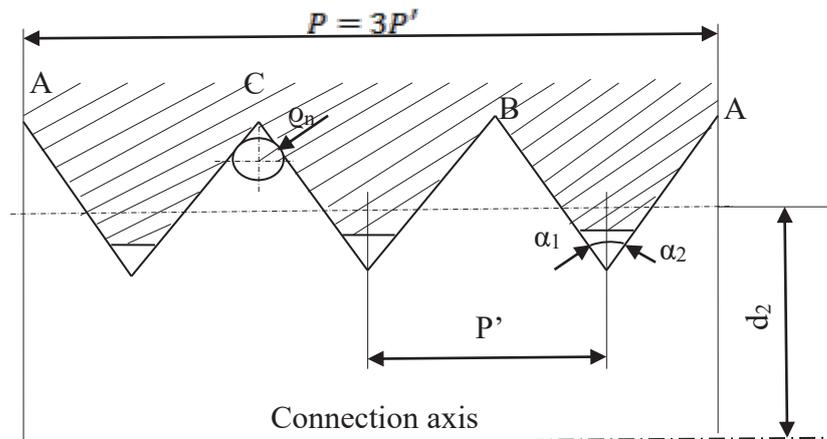


Fig. 4.b) Thread reference for the nut

The external threaded surface is the surface that externally limits the area of the connecting element - the bolt, and internally limited surface of the structural element is the nut. The thread rotation can be either right or left. The right one is created when the outline point rotates clockwise, and the left one is created counterclockwise.

Depending on the shape of the figure creating the outline, we distinguish threads [2, 3, 4, 5, 16]:

- triangular (a),
- square (b),
- trapezoidal symmetrical (c) and asymmetrical (d),
- round (e).

The above mentioned threads are those commonly used ones. In addition, threads can be divided into:

- regular – they most often occur in low-precision elements in mass or serial production;
- fine (fine thread) – characterized by high self-locking, i.e. there is a small angle γ . A small angle prevents the connection from loosening. They are most often used on pipes and sleeves;
- coarse (coarse thread) – most often used in trapezoidal profiles in stationary connections that are often unscrewed;
- single-start (single thread) – used in stationary connections due to self-locking, protection against loosening;
- multiple (two-, three-fold) – most often used in pipe connections where a large displacement is required in one turn [4, 14].

Table 4 presents the thread types along with the formation angle α and the designation. They are divided into: metric, metric fine pitch, symmetrical trapezoidal, asymmetrical trapezoidal, pipe straight and round [4, 14].

Table 4. Designation of general purpose threads

No.	Thread name	α	Marking	Standards of	
				measurements	tolerance
1	Metric	60^0	M (d)	PN-M-02013:1970	PN-M-02113:1970
2	Metric fine thread	60^0	M (dxP)	PN-M-02013:1970	PN-M-02113:1970
3	Trapezoidal symmetrical	30^0	Tr (dxP)	PN-M-02017:1979	PN-M-02117:1979
4	Trapezoidal asymmetrical	3^0+30^0	S (dxP)	PN-M-02019:1988	PN-M-02119:1988
5	Trapezoidal asymmetrical	3^0+45^0	S (dxP)	PN-M-02027:1987	
6	Pipe straight	55^0	G (d) ²	PN-ISO 228-1:1995	
7	Round	30^0	Rd (d)	PN-M-02035:1984	

7. Bolt loading, determination of forces, anti-torque, efficiency of the threaded mechanism and strength calculations.

Bolt loads have one criterion, the so-called criterion of identity of bolt loads with the connection load. The first group of connections are mechanical connections or certain stationary connections. These are axial loads that cause the bolt to stretch or compress over appropriate sections of its length and torque loads that cause the bolt to twist and transfer this torque to the external elements of the structure. Most often, such connections are single-bolt connections. The second group of connections are pre-tensioned systems (i.e. during assembly of the structural connection). They take or transmit complex external loads (usually during operation). The main principle of this group of connections is to create such assembly or operating conditions that the loads on these bolts should be limited only to axial loads. Bolt loads during operation may not be affected at all as regards design values. This type of load can be observed in connections transferring transverse loads or during active torque. In this group, single-bolt connections are rare; most often, they are multi-bolt connections. The purpose of such multi-bolt connections is diverse and varies in terms of operating loads on individual bolts. For this reason, this group of connections is computationally and structurally difficult [2]. The value of resisting force H depends on the direction of the nut movement and on the friction coefficient of the bolt and nut material (thread tensioning, loosening) – (Fig. 5) [4, 31]. Figure 2.6 shows the load diagram of a bolt and nut for a square thread $\alpha = 0^0$.

$$M_s = 0,5 \cdot H \cdot d_2 \quad (2)$$

where: H – resisting force; d_2 – average thread diameter

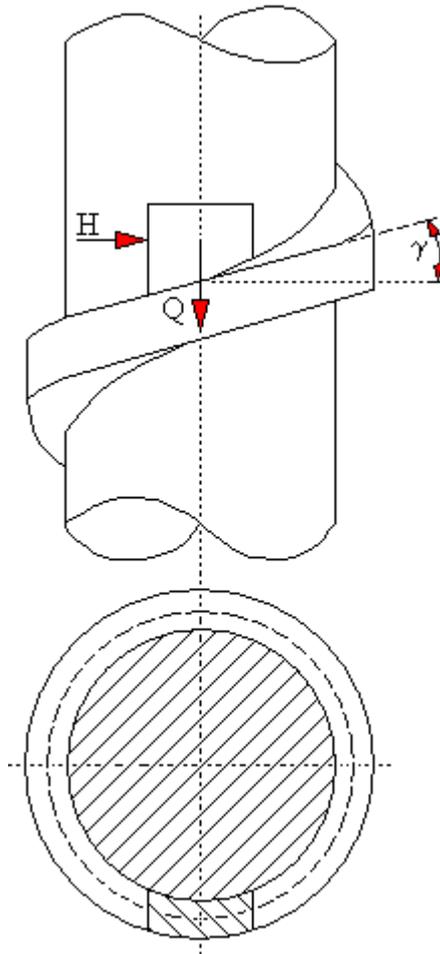
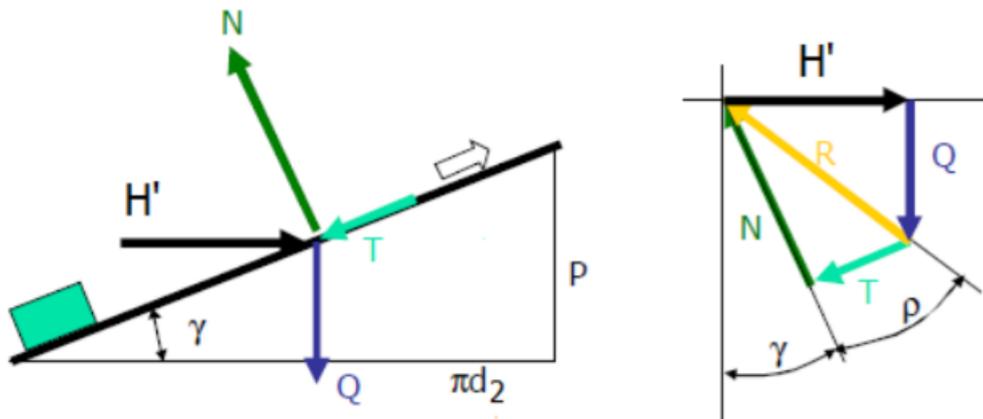


Fig. 5. Bolt and nut load diagram for square thread $H' = Q \cdot \operatorname{tg}(\gamma + \rho)$ (3)

where: Q – feed force; γ – helix angle; ρ – friction angle; $\operatorname{tg} \rho = \mu$

Fig. 6 and 7 show how to determine resisting forces H for a square thread $\alpha = 0^\circ$ [14, 30].

a) path of nut motion is opposite to the direction of force



Q:
Fig. 6. Pulling, tensioning

b) path of nut motion is in line with the force direction Q:

$$H'' = Q \cdot \operatorname{tg}(\gamma - \rho) \quad (4)$$

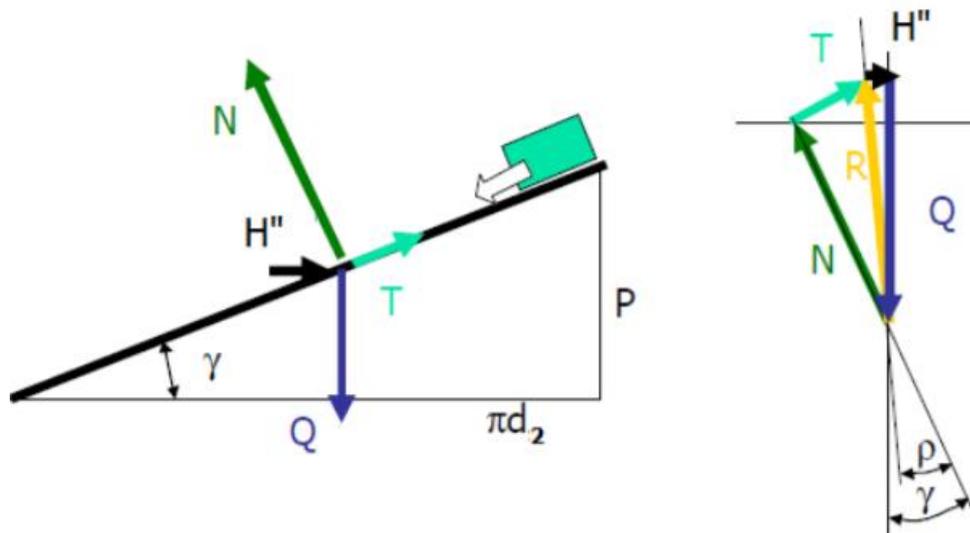


Fig. 7. Unbolting

$$H = Q \cdot \operatorname{tg}(\gamma \pm \rho) \quad (5)$$

$$\operatorname{tg}\gamma = \frac{P}{\pi \cdot d_2} \quad (6)$$

where:

Q – feed force; P – thread pitch; d_2 – average thread diameter; γ – helical angle; “+” – when the direction of the nut motion is opposite to the direction of force Q; “-” – when the direction of the nut motion is in the direction of force Q; ρ – friction angle; $\operatorname{tg}\rho = \mu$; μ – coefficient of friction of the bolt and nut material.

Anti-torque M_s for a square thread $\alpha = 0$ between the bolt and nut, when the loading force is force Q, is equal to [5]:

$$M_s = 0.5 \cdot Q \cdot d_2 \cdot \operatorname{tg}(\gamma \pm \rho) \quad (7)$$

where: Q – feed force; d_2 – average thread diameter; γ – helical angle; ρ – friction angle, $\operatorname{tg}\rho = \mu$, μ – coefficient of friction of the bolt and nut material

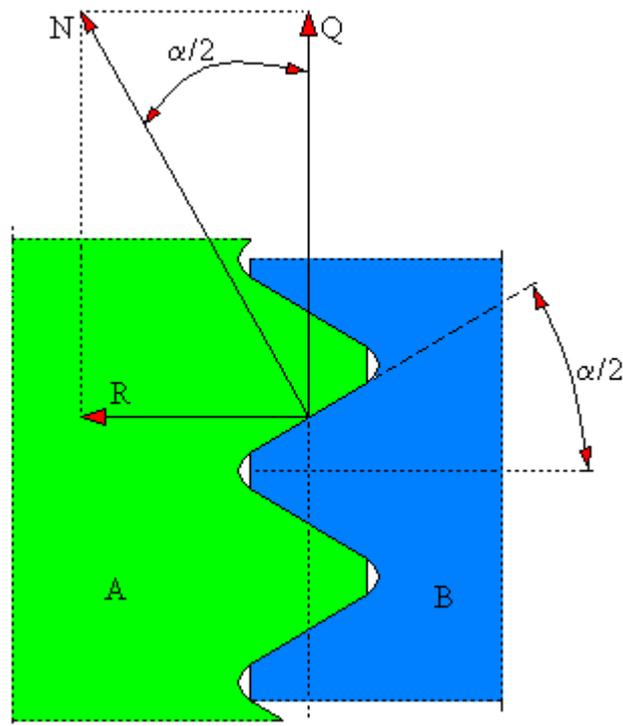


Fig. 8. Distribution of forces in threaded connections
 where: Q – feed force; α – thread angle; N – normal force to the profile; R – radial force; A – bolt; B – nut

$$T = \mu \cdot N = \frac{\mu}{\cos \frac{\alpha}{2}} \cdot Q = \mu' \cdot Q \quad (8)$$

$$N = \frac{Q}{\cos \frac{\alpha}{2}} \quad (9)$$

$$\mu' = \frac{\mu}{\cos \frac{\alpha}{2}} \quad (10)$$

$$\mu' = \operatorname{tg} \rho' \quad (11)$$

The moment of friction M'_s of a metric thread is greater than the friction moment M_s of a square thread of the same diameter because the apparent friction angle ρ' is greater than the friction angle ρ [4, 32].

The friction moment M'_s between a nut and bolt when the load is an axial force is given by the following formula [4, 32]:

$$M'_s = 0,5 \cdot Q \cdot d_2 \cdot \operatorname{tg}(\gamma \pm \rho') \quad (12)$$

where:

Q – feed force; d_2 – average thread diameter; γ – helix angle; ρ' - apparent friction angle

Tightening and unscrewing with the torque M_d of a metric thread with an angle of $\alpha = 60^\circ$.

On the resistance surface, the moment of friction M_m is equal to:

$$M_m = 0,5 \cdot Q \cdot d_m \cdot \mu_1 \quad (13)$$

where:

Q – feed force; d_m – average diameter of the contact area; μ_1 – coefficient of friction on the bearing surface

The moment M_d is equal to:

$$M_d = 0,5 \cdot Q \cdot [d_2 \cdot \operatorname{tg}(\gamma \pm \rho') + d_m \cdot \mu_1] \quad (14)$$

where: Q – feed force (tensioning the bolt) of the joint elements; d_2 – average thread diameter; γ – helical angle; ρ' - apparent friction angle; d_m – average contact area diameter; μ_1 – coefficient of friction on the bearing surface; "+" and "-" – these signs are used in the following relationships:

- when tightening "+";

- when loosening "-" [4, 32].

Efficiency of a threaded mechanism [4, 32]

The ratio of the work received L_{wy} to the work supplied L_{we} in a unit of time is the efficiency of the thread η . In a threaded mechanism, it looks as follows:

- work delivered in full rotation

$$L_{we} = 2\pi \cdot M_n \quad (15)$$

where: π – mathematical constant

M_n – torque needed to overcome frictional resistance of the nut and bolt:

$$M_n = 0,5 \cdot Q \cdot d_2 \cdot \operatorname{tg}(\gamma \pm \rho') \quad (16)$$

where: Q – feed force (tensioning the bolt) of the joint elements; d_2 – average thread diameter; γ – helical angle; ρ' - apparent friction angle;

- work obtained during the shift of element by the pitch P

$$L_{wy} = Q \cdot P \quad (17)$$

The following relationship results from the thread geometry (Fig. 9):

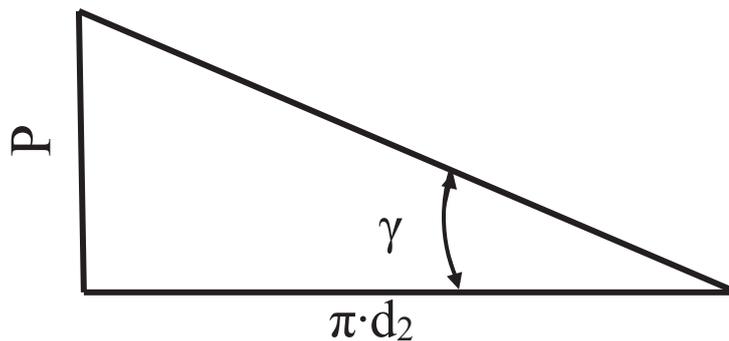


Fig. 9. Thread geometry [32]

P – pitch of a thread; γ - helix angle

$$P = \pi \cdot d_2 \operatorname{tg} \gamma \quad (18)$$

After transformations, the efficiency formula is:

$$\eta = \frac{\operatorname{tg} \gamma}{\operatorname{tg}(\gamma \pm \rho')} \quad (19)$$

The apparent friction angle ρ' is defined by the relationship:

$$\rho' = \operatorname{arctg} \frac{\mu}{\cos \frac{\alpha}{2}} \quad (20)$$

where:

α – thread angle; μ - coefficient of friction of the nut and bolt material; d_2 - average thread diameter; γ - helix angle; ρ' - apparent friction angle.

Strength calculations:

The axial force Q in the bolt core is generated by tightening the connection with the torque M_d [32].

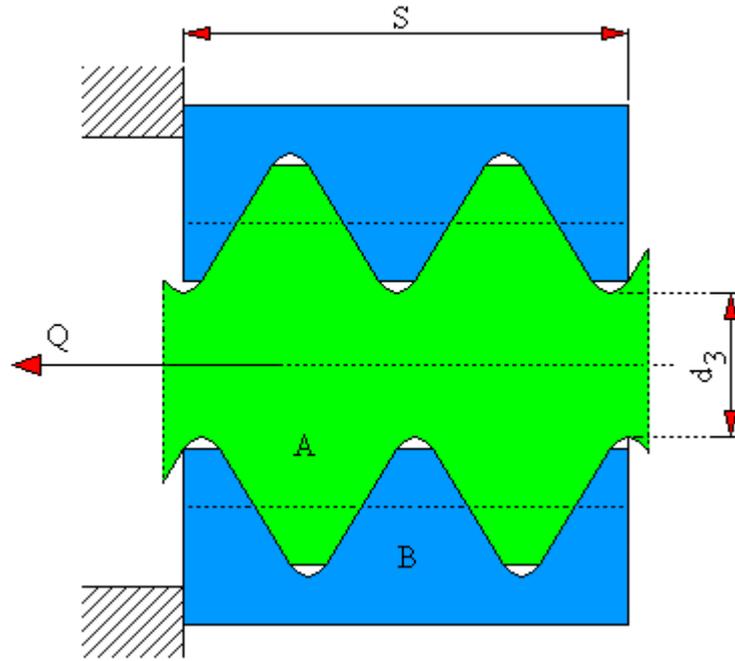


Fig. 10. Generation of axial force Q

d_3 – bolt core diameter; A – bolt; B – nut; S – nut height

a) stretching (compression)

$$\sigma_{r,c} = \frac{Q}{\frac{\pi d_3^2}{4}} \leq w \cdot k_{r,c} \quad (21)$$

where:

Q – resistance force; $w = 1$ – precise execution; $w = 0.75$ – medium-precision execution; $w = 0.5$ – rough execution; $k_{r,c}$ – allowable tensile (compression) stresses.

b) shearing of the nut and bolt threads

$$\tau_s \leq k_t \quad (22)$$

where:

k_t – allowable shear stresses of the weaker material;

τ_s – shear stresses.

c) surface pressures – it is assumed that there is an even distribution of pressure in both elements

$$p \leq p_{dop} \quad (23)$$

where:

p – actual calculation pressures; p_{dop} – allowable calculation pressures

It should be remembered that of the three types of loads mentioned above, surface pressure is the most dangerous [32].

8. Definitions of mechanical properties for bolts

Tensile strength R_m [N/mm^2] – the minimum tensile strength of a bolt is the value of the tensile stress at which the thread breaks or strips. If whole bolts are tested, the yield strength can be determined in an approximate way [25].

Tensile strength at thread stripping:

$$R_m = \frac{F}{A_s} \left[\frac{N}{mm^2} \right] \quad (24)$$

where:

F – max. tensile force; A_s – active transverse area of the thread

Yield strength R_{eL} [N/mm^2] – the yield strength is determined by the tensile stress value from which, with increasing tensile force, the elongation increases more than proportionally. After removing the tensile force, the bolt material permanently elongates and plastic deformation occurs – the material becomes soft. Fig. 11 presents the dependence of elongation Δl on the tensile force F [25].

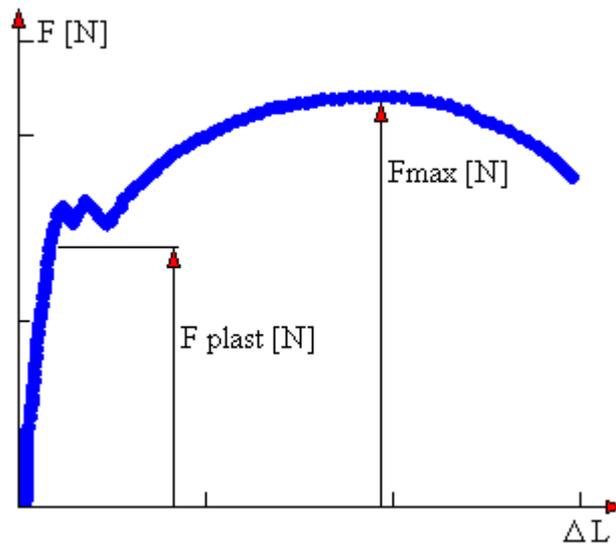


Fig. 11. Relationship between elongation Δl and tensile force F [25]

Yield strength $R_{p0.2}$ [N/mm^2] – the material from which the tensile force was removed exhibits a permanent relative elongation of 0.2%, this is called an offset yield strength.

Elongation after stripping A [%] – is the permanent elongation measured on the broken bolt in relation to the measured length. The exception are bolts from A1 to A4 in which the elongation is measured on whole bolts ISO 3506 (Fig. 12) [25].

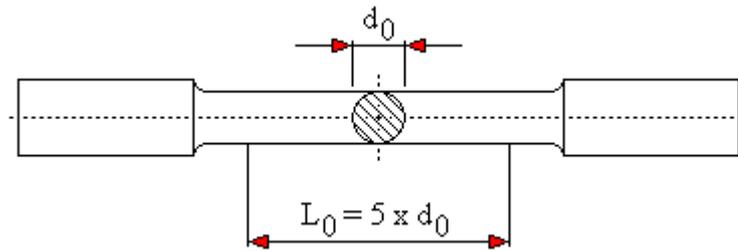


Fig. 12. Graphical representation of the gauge length L_0 of the test piece [25]

Wedge tensile strength – is determined by performing a test with a wedge placed under the bolt head. Bolts are subjected to such a load test in order to determine the ductility and strength of the bolt head. As a result of tension or stretching, the bolt strips at the thread (Fig. 13) [25].

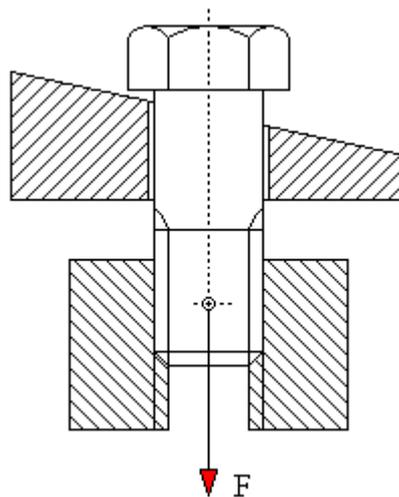


Fig. 13. Graphic representation of a wedge placed under the bolt head [25]

Hardness – is a measure of resistance of a material to penetration by an indenter.

Vickers Hardness HV: ISO 6507

- a pyramid-shaped indentation with a square base

Brinell Hardness HB: ISO 6506

- ball-shaped indentation

Rockwell Hardness HRC: ISO 6508

- cone-shaped indentation [25].

Head strength – the bolt head must withstand several hammer blows. After bending to a given angle the bolt should not reveal any cracks at transition from the plain part to the head.

Table 5 shows the marking system for nuts under a test load of height:

$$0,5d \leq H < 0,8d$$

These bolt classes correspond to the resistance to thread stripping. If the nuts are paired with bolts of lower strength classes, the external thread will be stripped, whereas if they are paired with bolts of higher strength classes, the nut thread will be stripped [27].

Table 5. The system of marking for nuts under a test load [27]

Class of mechanical properties of nuts	Stress in the nut under test load [N/mm ²]	Minimum stress in a bolt before thread stripping when paired with a bolt of the following class of properties [N/mm ²]			
		6.8	8.8	10.9	12.9
04	380	260	300	330	350
05	500	290	370	410	480

9. Hardness scale comparison tables

Table 6 shows a fragment of the scale of tensile strength of bolts according to the Vickers, Brinell, Rockwell methods. The Vickers HV hardness measurement method is applicable to a wide range of hardness. ISO 898 part 1 specifies the Vickers method as the definitive hardness measurement when in doubt. The Rockwell C hardness measurement method is suitable for hardened steel, Rockwell A method for hard alloys, and Rockwell B method for soft steel, copper and zinc alloys, and bronzes. However, the Brinell hardness measurement method is used for a large range of hardness scale [24].

Table 6. Tensile strength according to Vickers, Brinell, and Rockwell method [24]

Tensile strength [N/mm ²]	Vickers Hardness HF [F ≥ 98 N]	Brinell Hardness HB	Rockwell Hardness		
			HRB	HRC	HRA
255	80	76	-	-	-
270	85	80,7	41	-	-
285	90	85,5	48	-	-
305	95	90,2	52	-	-
320	100	95	56.2	-	-
335	105	99,8	-	-	-
350	110	105	62.3	-	-
370	115	109	-	-	-
385	120	114	66.7	-	-
400	125	119	-	-	-

415	130	124	71.2	-	-
430	135	128	-	-	-
450	140	133	75	-	-
465	145	138	-	-	-
480	150	143	78,7	-	-
495	155	147	-	-	-
510	160	152	81.7	-	-
530	165	156	-	-	-
545	170	162	85	-	-
560	175	166	-	-	-

10. Properties of fasteners at elevated temperatures

As temperature increases there may occur a progressive reduction in the lower yield strength at 0.2% non-uniform elongation or there may be stress at 0.0048d non-uniform elongation for ready fasteners. The tensile strength also decreases. Elevated operating temperatures can result in stress relaxation which increases along with temperature. Class 4.8, 5.8, 6.8 fasteners are very sensitive to relaxation compared to stress relieved or hardened fasteners.

11. Presentation of the concept of didactic test rigs

During the analysis when selecting a laboratory test rig design, several design concepts of such rigs were analyzed. Various models of such test rigs are presented later in this paper.

1. Lab test rig I (Fig. 14)

Thanks to the use of resistance strain gauges in this design, it is possible to measure torque values. The advantage of this design is that the measured values are transferred directly to the computer which records measurement results, and obtained results are very accurate.

The installed hydraulic cylinder allows for quick application of load to the nut through increasing the pressure.

Performing lab exercises on this model design allows to:

- determine the moment,
- determine the value of coefficient of friction,
- determine the efficiency of tested connections under given loads.

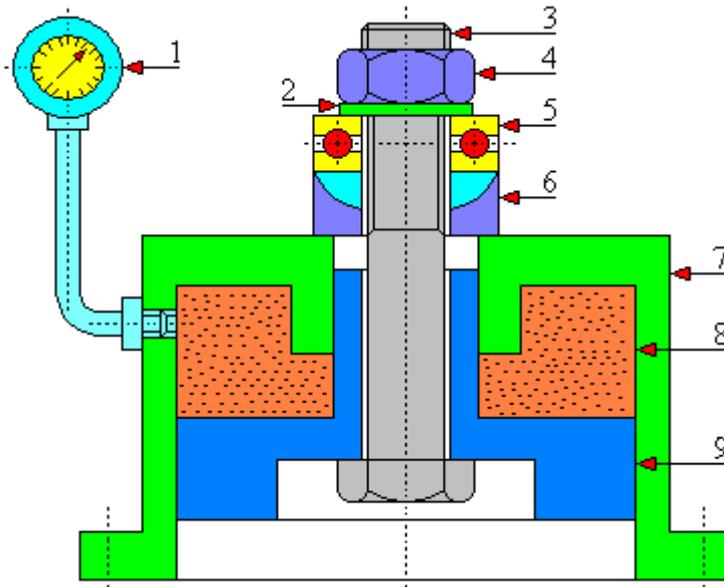


Fig. 14. Lab test rig I [28]

1 – pressure gauge; 2 – washer; 3 – tested bolt; 4 – nut; 5 – thrust bearing; 6 – ball joint; 7 – cylinder; 8 – hydraulic oil; 9 – piston

2. Lab test rig II (Fig. 15)

This testing rig consists of three basic elements:

- screw press,
- axial load mechanism of the bolt,
- assembly for developing and measuring the torque on the bolt;

In this model, the tested bolt is loaded with force Q using weights and a double-arm lever supported at the joint.

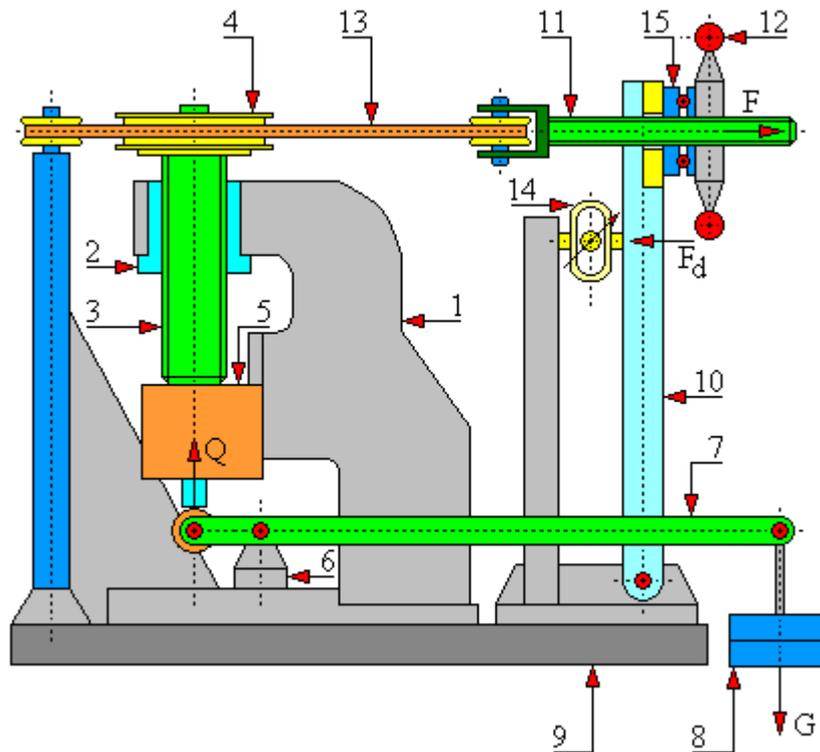


Fig. 15. Lab test rig II [29]

1 – screw press body, 2 – nut, 3 – bolt, 4 – rope pulley, 5 – movable jaw, 6 – lever support, 7 – two-arm lever, 8 – set of weights, 9 – test rig body, 10 – lever, 11 – tensioning screw, 12 – knob, 13 – set of rope pulleys with a cable, 14 – force sensor, 15 – thrust bearing; F_d – force acting on the dynamometer; Q – force loading the tested bolt; G – force of the weight of the weights

3. Lab test rig III (Fig. 16)

The third test rig (Fig.16) shows how to test the bolt efficiency. The tested screw is mounted between two flat springs and tightened with two nuts. As a result of tightening the nuts, the flat springs deflect (the distance between them decreases), which in turn creates a force Q that stretches the bolt. After applying force Q , a torque wrench is used to measure the torque required to turn the bolt with the nuts being locked.

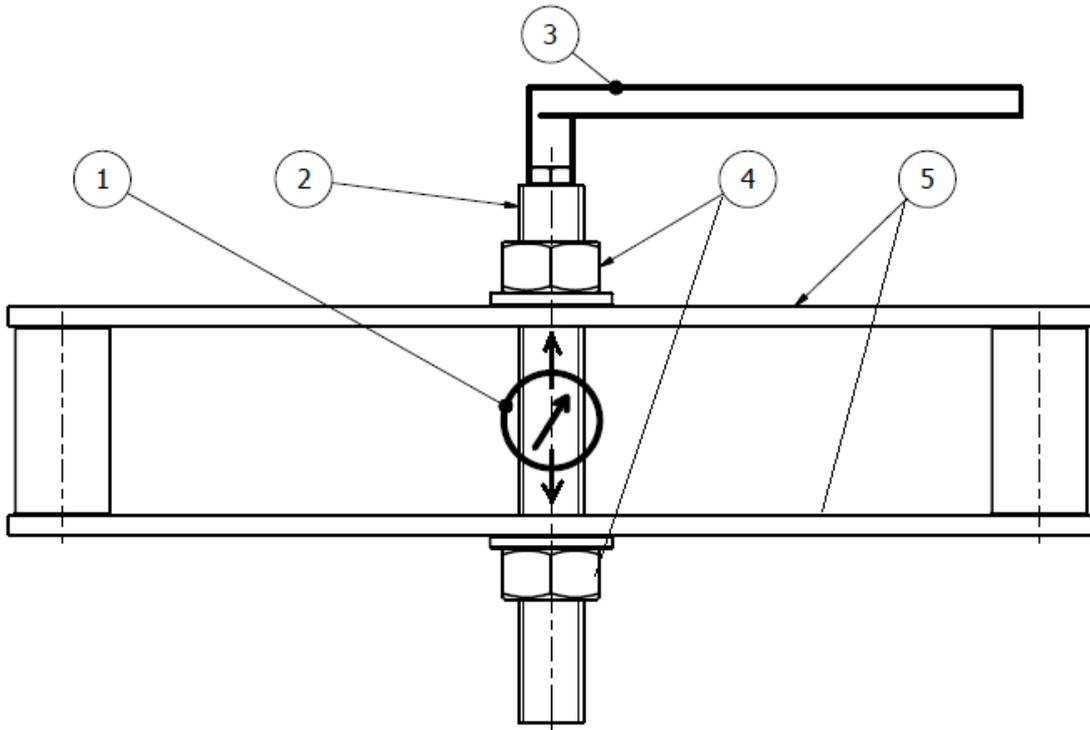


Fig. 16. Schematic diagram of the thread efficiency test rig
 1 – dial gauge; 2 – bolt; 3 – torque wrench; 4 – nut (two); 5 – flat spring (two)

12. Analysis and selection of a test rig

In order to facilitate the analysis of individual design models, certain criteria were established to assist in selecting a didactic test rig. The criteria taken into account in the analysis include:

- cost,
- easy replacement of tested elements,
- construction of the rig.

For the above-mentioned criteria, points from 1 to 3 were established, where number one indicates the best solution. Table 7 presents the evaluation of the above laboratory rigs.

Table 7. Evaluation of laboratory test rigs

Model	Criteria			Points Total
	Cost	Easy replacement of tested elements	Rig construction and assembly	
Lab test rig I	3	2	3	8
Lab test rig II	3	2	2	7
Lab test rig III	2	1	1	4

After analysing all the pros and cons, laboratory test rig III was chosen because of its simplicity, relatively low cost of building the rig, and also due to safety and ease of replacing the tested elements.

13. Design and construction of a didactic test rig

The design basis was to build a lab test rig for testing the efficiency of bolts. The test rig that has been built can be used for laboratory exercises at the university, which will allow students to learn about the phenomenon of self-locking and the phenomenon of thread friction between bolt and nut.

The rig will be made of two flat springs and two steel (S235JR) spacer sleeves separating the springs. Everything will be connected with screws. To protect against corrosion, the structural elements were coated with protective paint. The components of the test rig are presented later in this paper.

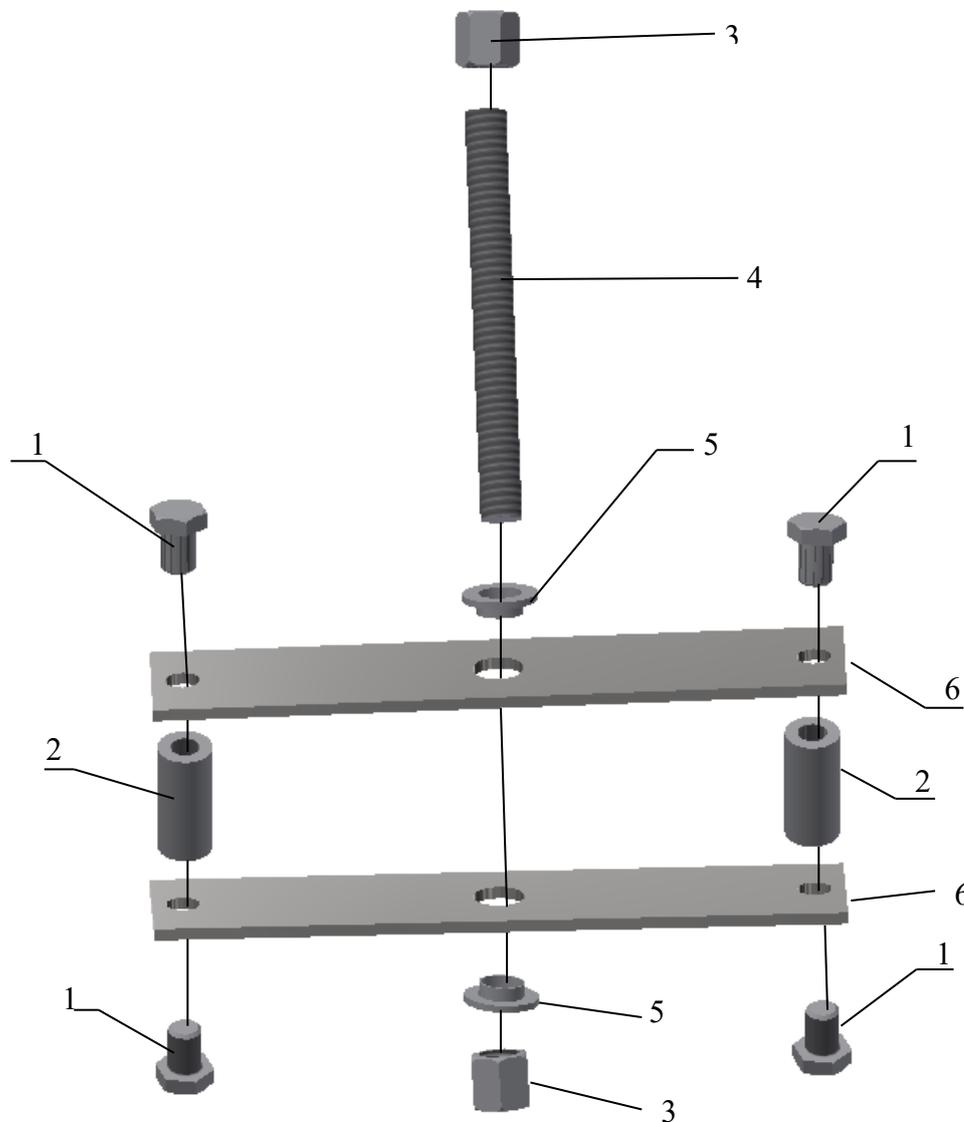


Fig. 17. Test rig for testing the efficiency of bolts

1 – screws, 2 – spacer sleeves, 3 – nuts, 4 – tested bolt, 5 – reduction sleeve washer, 6 – flat springs

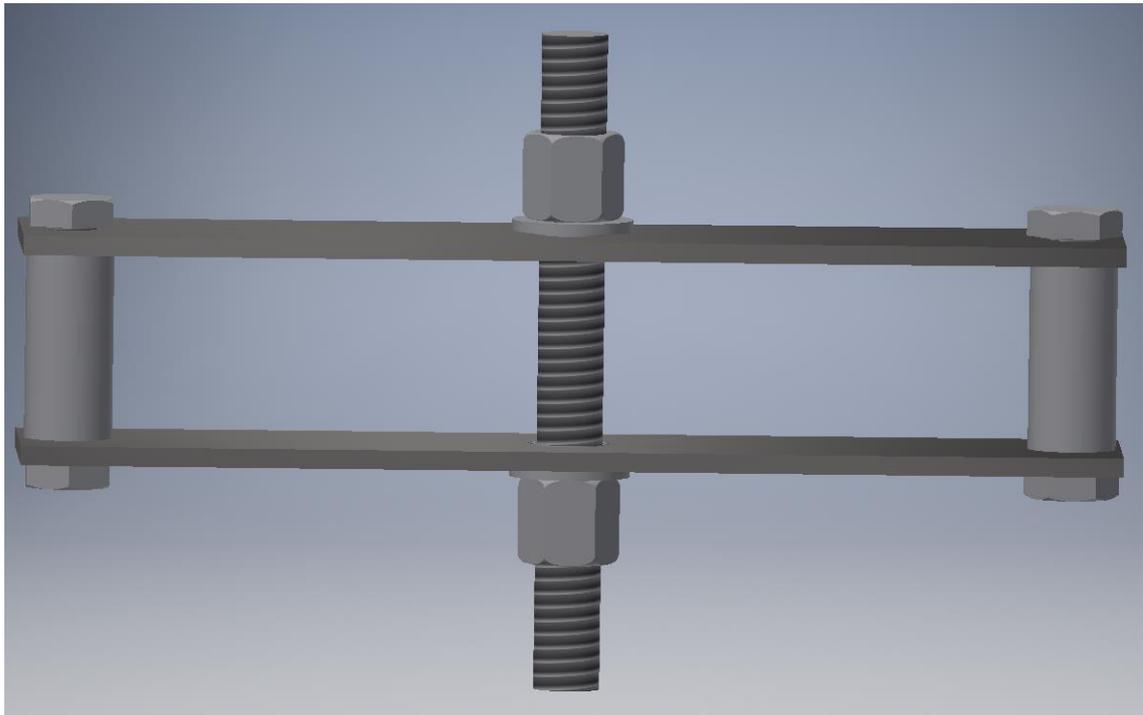


Fig. 18. View of the test rig designed in INVENTOR software

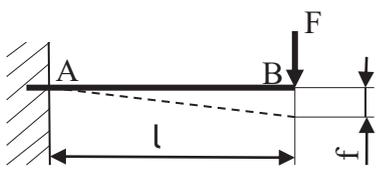
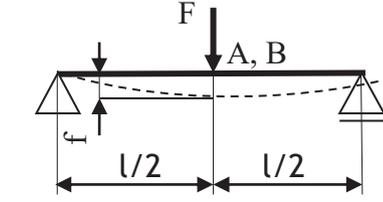
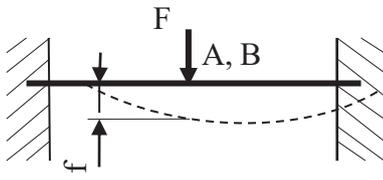
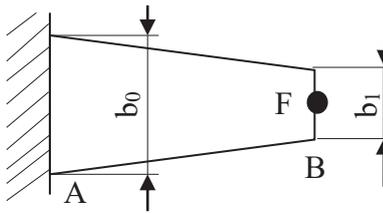


Fig. 19. View of the constructed test rig for testing the bolt efficiency

14. Tables and formulas used for calculations

Table 8 shows the methods of attaching springs, and formulas for calculating the maximum bending moment and deflections.

Table 8. Formulas for calculating rectangular flecion springs [33]

No.	Spring attachment method	Maximum bending moment (point A) M_{gmax}	Deflection (point B) f									
1		$F \cdot l$	$\frac{F \cdot l^3}{3 \cdot E \cdot J_x}$									
2		$\frac{F \cdot l}{4}$	$\frac{F \cdot l^3}{48 \cdot E \cdot J_x}$									
3		$\frac{F \cdot l}{8}$	$\frac{F \cdot l^3}{192 \cdot E \cdot J_x}$									
4		$F \cdot l$	$\frac{K \cdot F \cdot l^3}{3 \cdot E \cdot J_{xo}}$									
	K-factor value for trapezoidal springs											
	b_1/b_0	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0 triangle
	K	1	1,02	1,05	1,09	1,12	1,16	1,2	1,25	1,32	1,39	1,5
$J_{xo} = \frac{b_o \cdot h^3}{12}$						$W_{xo} = \frac{b_o \cdot h^2}{6}$						

where: F – force; l – length; E – modulus of longitudinal elasticity of the material (Young's modulus), a constant value for a given material [MPa]; K – coefficient; J_x – moment of inertia; W_x – bending strength index of the section; b_0 – width; h – height

The strength of flat springs with constant cross-section working under bending is calculated using the formula:

$$\sigma_g = \frac{M_{g \max}}{W_x} \leq k_g \quad (25)$$

The deflection depends on the method of attaching springs (as shown as examples in Table 8), the shape of the cross-section, value of the $M_{g \max}$ load and properties of the material from which they are made (Table 9).

Table 9. Values of the longitudinal modulus of elasticity of steel [9]

No.	Type of material	Young's modulus [E]	Units
1	Unalloyed steel	$2,1 \cdot 10^5$	<i>MPa</i>
2	Alloy steel	$(2,05 \div 2,3) \cdot 10^5$	<i>MPa</i>
3	Bronze	$1,25 \cdot 10^5$	<i>MPa</i>
4	Nickel brass	$1,35 \cdot 10^5$	<i>MPa</i>

Formulas used to calculate the efficiency of a bolt thread [5]

Formula for calculating the lead angle γ

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{P_h}{\pi d_g} \quad (26)$$

Formula for calculating the apparent angle of friction ρ'

$$\rho' = \operatorname{arctg} \left[\frac{-(1+B) + \sqrt{(1+B)^2 + 4 \cdot A^2 \cdot B}}{2AB} \right] \quad (27)$$

$$A = \frac{M}{Q d_g} \quad (28)$$

$$B = \operatorname{tg}^2 \gamma \quad (29)$$

Checking the self-locking condition of the thread

$$\gamma \leq \rho' \quad (30)$$

Calculation of thread efficiency

$$\eta = \frac{\operatorname{tg} \gamma}{\operatorname{tg}(\gamma + \rho')} \quad (31)$$

Calculation of the flank angle of friction α_{rn}

$$\operatorname{tg} \alpha_{rn} = \operatorname{tg} \alpha_r \cos \gamma \quad (32)$$

$$\alpha_{rn} \approx \alpha_r$$

Calculation of the friction coefficient between the turns of the bolt and nut μ'

$$\operatorname{tg} \rho' = \frac{\mu'}{\cos \alpha_{rn}} \rightarrow \mu' = \frac{\operatorname{tg} \rho' \cos \alpha_{rn}}{1} \quad (33)$$

At the thread efficiency test rig (Fig. 3.3) we tighten the nuts which brings an axial force Q which stretches the bolt through the nuts. By measuring the proximity of springs with a dial gauge and having the spring characteristic $Q = f(u)$, we can determine force Q.

After tightening the nuts, we activate the axial force Q and use a torque wrench to measure the torque required to turn the bolt, and then enter the result in the table (Table 10). We proceed in this way for M24, M30, Tr24x5, Tr30x6 bolts, and make ten measurements of force Q for different degrees of nut tightening.

Table 10. Example of a table with measurement and calculation results

Measurement number	Tested thread	Q [N]	M [Nm]	$A = \frac{M}{Qd_s}$	μ'	ρ'	η
1							
2							
3							
4							

From the spring characteristic (Fig. 20) we read the axial force Q and also enter its value into the results table.

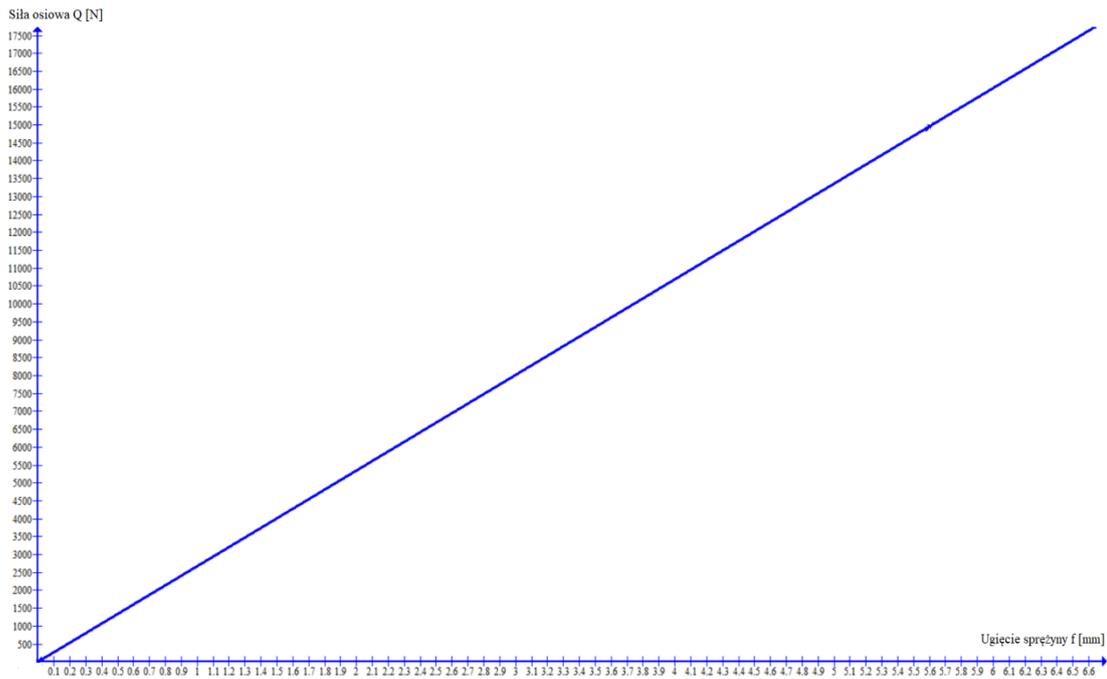


Fig. 20. Characteristics of a flat spring
 Q – axial force [N]; f – spring deflection [mm]

Once the torques required for bolt rotation and axial force Q have been determined, the standardized values for the thread pitch p_h , mean thread working diameter d_s , and thread flank working angle α_r are also needed to determine the efficiency, apparent friction angle, and apparent friction coefficient. In the table (Table 11) below given are some values of these parameters.

Table 11. Table with values of: thread pitch p_h , average working diameter of the thread d_s and working angle of the thread flank α_r [5]

Thread	M24	M30	Tr 24x5	Tr 30x6
P_h [mm]	3.0	3.5	5.0	6.0
d_s [mm]	22.051	27.727	21.5	27.0
α_r [°]	30		15	

15. Calculation of efficiency and determination of apparent friction angle and apparent friction coefficient for M24 thread and spring deflection $f = 1.4$ [mm]

From Table 11 we determine the following data:

- $P_h = 3,0$ [mm] = 0,003 [m];
- $d_s = 22,051$ [mm] = 0.022051 [m];
- $\alpha_r = 30^\circ$

Calculation of the lead angle γ :

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{P_h}{\pi d_s} = \frac{0,003}{\pi \cdot 0,022051} = 0,043 \rightarrow \gamma = 2,48^\circ$$

Measuring the torque M required to turn the bolt:

- we set the distance of springs - deflection 1,4 [mm]
- from the spring characteristics we read $Q = 3740$ [N]
- we check the torque M of the bolt with a torque wrench $M = 8$ [Nm]

Calculation of apparent friction angle ρ' :

$$\rho' = \arctg \left[\frac{-(1+B) + \sqrt{(1+B)^2 + 4 \cdot A^2 \cdot B}}{2AB} \right] A = \frac{M}{Qd_s} = \frac{8}{3740 \cdot 0,022051}$$

$$= 0,097B = \operatorname{tg}^2 \gamma = 0,00433^2 = 0,00187\rho'$$

$$= \arctg \left[\frac{-(1 + 0,00187) + \sqrt{(1 + 0,00187)^2 + 4 \cdot 0,097^2 \cdot 0,00187}}{2 \cdot 0,097 \cdot 0,00187} \right] \rho'$$

$$= \arctg 0,0968 \rightarrow \rho' = 5,52^\circ$$

Checking the self-locking condition of the thread:

$$\gamma \leq \rho' 2,48^\circ \leq 5,52^\circ$$

The thread is self-locking.

Calculation of thread efficiency:

$$\eta = \frac{\operatorname{tg} \gamma}{\operatorname{tg}(\gamma + \rho')} = \frac{\operatorname{tg} 2,48^\circ}{\operatorname{tg}(2,48^\circ + 5,52^\circ)} = 0,31 \cdot 100\% = 31\%$$

Calculation of the flank angle of friction α_{rn}

$$\operatorname{tg} \alpha_{rn} = \operatorname{tg} \alpha_{rn} \cos \gamma = \operatorname{tg} 30^\circ \cdot \cos 2,48^\circ \rightarrow \alpha_{rn} = 29,97^\circ \alpha_{rn} \approx \alpha_r$$

Calculation of the friction coefficient between the turns of the bolt and the nut μ' :

$$\operatorname{tg} \rho' = \frac{\mu'}{\cos \alpha_{rn}} \rightarrow \mu' = \frac{\operatorname{tg} \rho'}{\cos \alpha_{rn}} = \frac{\operatorname{tg} 5,52^\circ}{\cos 30^\circ} = 0,112$$

16. Calculation of efficiency and determination of apparent friction angle and apparent friction coefficient for M30 thread and spring deflection $f = 1,7$ [mm]

From Table 11 the following data are determined:

- $P_h = 3,5$ [mm] = 0,0035 [m];
- $d_s = 27,727$ [mm] = 0,027727 [m];
- $\alpha_r = 30^\circ$

Calculation of the lead angle γ :

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{P_h}{\pi d_s} = \frac{0,0035}{\pi \cdot 0,027727} = 0,0401 \rightarrow \gamma = 2,30^\circ$$

Measuring the torque M required to turn the bolt:

- we set the distance of springs - deflection 1,7 [mm]
- from the spring characteristics we read $Q = 4540$ [N]
- we check the torque M of the bolt with a torque wrench $M = 16$ [Nm]

Calculation of apparent friction angle ρ' :

$$\rho' = \operatorname{arctg} \left[\frac{-(1 + B) + \sqrt{(1 + B)^2 + 4 \cdot A^2 \cdot B}}{2AB} \right]$$

$$A = \frac{M}{Qd_s} = \frac{16}{4540 \cdot 0,027727} = 0,1271$$

$$B = \operatorname{tg}^2 \gamma = 0,0401^2 = 0,00161$$

$$\rho' = \operatorname{arctg} \left[\frac{-(1 + 0,00161) + \sqrt{(1 + 0,00161)^2 + 4 \cdot 0,1271^2 \cdot 0,00161}}{2 \cdot 0,1271 \cdot 0,00161} \right]$$

$$\rho' = \operatorname{arctg} 0,1268 \rightarrow \rho' = 7,22^\circ$$

Checking the self-locking condition of the thread:

$$\gamma \leq \rho'$$

$$2,30^\circ \leq 7,22^\circ$$

The thread is self-locking.

Calculation of thread efficiency:

$$\eta = \frac{\operatorname{tg} \gamma}{\operatorname{tg}(\gamma + \rho')} = \frac{\operatorname{tg} 2,30^\circ}{\operatorname{tg}(2,30^\circ + 7,22^\circ)} = 0,24 \cdot 100\% = 24\%$$

Calculation of the flank angle of friction α_{rn} :

$$\operatorname{tg} \alpha_{rn} = \operatorname{tg} \alpha_{rn} \cos \gamma = \operatorname{tg} 30^\circ \cdot \cos 2,30 \rightarrow \alpha_{rn} = 29,97^\circ$$

$$\alpha_{rn} \approx \alpha_r$$

Calculation of the friction coefficient between the turns of the bolt and the nut μ' :

$$\operatorname{tg} \rho' = \frac{\mu'}{\cos \alpha_{rn}} \rightarrow \mu' = \frac{\operatorname{tg} \rho'}{\cos \alpha_{rn}} = \frac{\operatorname{tg} 7,22^\circ}{\cos 30^\circ} = 0,146$$

17. Calculation of efficiency and determination of apparent friction angle and apparent friction coefficient for Tr24x5 thread and spring deflection $f = 1,4$ [mm]

From Table 11 the following data are determined:

- $P_h = 5$ [mm] = 0,005 [m];
- $d_s = 21,500$ [mm] = 0,021500 [m];
- $\alpha_r = 15^\circ$

Calculation of the lead angle γ :

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{P_h}{\pi d_s} = \frac{0,005}{\pi \cdot 0,021500} = 0,0740 \rightarrow \gamma = 4,23^\circ$$

Measuring the torque M required to turn the bolt:

- we set the distance of springs - deflection 1,4 [mm]
- from the spring characteristics we read $Q = 3740$ [N]
- we check the torque M of the bolt with a torque wrench $M = 6,5$ [Nm]

Calculation of apparent friction angle ρ' :

$$\rho' = \operatorname{arctg} \left[\frac{-(1 + B) + \sqrt{(1 + B)^2 + 4 \cdot A^2 \cdot B}}{2AB} \right]$$

$$A = \frac{M}{Qd_s} = \frac{6,5}{3740 \cdot 0,021500} = 0,08$$

$$B = \operatorname{tg}^2 \gamma = 0,0740^2 = 0,00548$$

$$\rho' = \operatorname{arctg} \left[\frac{-(1 + 0,00548) + \sqrt{(1 + 0,00548)^2 + 4 \cdot 0,08^2 \cdot 0,00548}}{2 \cdot 0,08 \cdot 0,00548} \right]$$

$$\rho' = \operatorname{arctg} 0,0796 \rightarrow \rho' = 4,55^\circ$$

Checking the self-locking condition of the thread:

$$\gamma \leq \rho'$$

$$4,23^\circ \leq 4,55^\circ$$

The thread is self-locking.

Calculation of thread efficiency:

$$\eta = \frac{\operatorname{tg} \gamma}{\operatorname{tg}(\gamma + \rho')} = \frac{\operatorname{tg} 4,23^\circ}{\operatorname{tg}(4,23^\circ + 4,55^\circ)} = 0,48 \cdot 100\% = 48\%$$

Calculation of the flank angle of friction α_{rn} :

$$\operatorname{tg} \alpha_{rn} = \operatorname{tg} \alpha_{rn} \cos \gamma = \operatorname{tg} 15^\circ \cdot \cos 4,23^\circ = 0,2672 \rightarrow \alpha_{rn} = 14,97^\circ$$

$$\alpha_{rn} \approx \alpha_r$$

Calculation of the friction coefficient between the turns of the bolt and the nut μ' :

$$\operatorname{tg} \rho' = \frac{\mu'}{\cos \alpha_{rn}} \rightarrow \mu' = \frac{\operatorname{tg} \rho'}{\cos \alpha_{rn}} = \frac{\operatorname{tg} 4,55^\circ}{\cos 15^\circ} = 0,082$$

18. Calculation of efficiency and determination of apparent friction angle and apparent friction coefficient for Tr30x6 thread and spring deflection $f = 1,7$ [mm]

From Table 11 the following data are determined:

- $P_h = 6$ [mm] = 0,006 [m];
- $d_s = 27,0$ [mm] = 0,027 [m];
- $\alpha_r = 15^\circ$

Calculation of the lead angle γ :

$$\operatorname{tg}\gamma = \frac{P_h}{\pi d_s} = \frac{0,006}{\pi \cdot 0,027} = 0,0707 \rightarrow \gamma = 4,04^\circ$$

Measuring the torque M required to turn the bolt:

- we set the distance of springs - deflection 1,7 [mm]
- from the spring characteristics we read $Q = 4540$ [N]
- we check the torque M of the bolt with a torque wrench $M = 16,5$ [Nm]

Calculation of apparent friction angle ρ' :

$$\rho' = \operatorname{arctg} \left[\frac{-(1 + B) + \sqrt{(1 + B)^2 + 4 \cdot A^2 \cdot B}}{2AB} \right]$$

$$A = \frac{M}{Qd_s} = \frac{16,5}{4540 \cdot 0,027} = 0,1346$$

$$B = \operatorname{tg}^2\gamma = 0,0707^2 = 0,005$$

$$\rho' = \operatorname{arctg} \left[\frac{-(1 + 0,005) + \sqrt{(1 + 0,005)^2 + 4 \cdot 0,1346^2 \cdot 0,005}}{2 \cdot 0,1346 \cdot 0,005} \right]$$

$$\rho' = \operatorname{arctg}0,133 \rightarrow \rho' = 7,57^\circ$$

Checking the self-locking condition of the thread:

$$\gamma \leq \rho'$$

$$4,04^\circ \leq 7,57^\circ$$

The thread is self-locking.

Calculation of thread efficiency:

$$\eta = \frac{\operatorname{tg} \gamma}{\operatorname{tg}(\gamma + \rho')} = \frac{\operatorname{tg} 4,04^\circ}{\operatorname{tg}(4,04^\circ + 7,57^\circ)} = 0,34 \cdot 100\% = 34\%$$

Calculation of the flank angle of friction α_{rn} :

$$\operatorname{tg} \alpha_{rn} = \operatorname{tg} \alpha_{rn} \cos \gamma = \operatorname{tg} 15^\circ \cdot \cos 4,04^\circ = 0,2672 \rightarrow \alpha_{rn} = 14,97^\circ$$

$$\alpha_{rn} \approx \alpha_r$$

Calculation of the friction coefficient between the turns of the bolt and the nut μ' :

$$\operatorname{tg} \rho' = \frac{\mu'}{\cos \alpha_{rn}} \rightarrow \mu' = \frac{\operatorname{tg} \rho'}{\cos \alpha_{rn}} = \frac{\operatorname{tg} 7,57^\circ}{\cos 15^\circ} = 0,137$$

Literature

- [1] Pietrzyk W.: Połączenia w konstrukcji maszyn. Poznań Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 1976
- [2] Bijak-Żochowski M., Marek Dietrich i inni: Podstawy konstrukcji maszyn, Warszawa Wydawnictwo Naukowo Techniczne, 1999
- [3] Korewa W., Zygmunt K.: Podstawy Konstrukcji Maszyn, t. 2. Warszawa 1965
- [4] Dziurski A., Kania L. i inni: Przykłady obliczeń z podstaw konstrukcji maszyn. Warszawa Wydawnictwo Naukowo – Techniczne, 2005
- [5] Praca zb. Ryś J., Trojnacki A.: Laboratorium podstaw konstrukcji maszyn. Skrypt Politechniki Krakowskiej, Kraków 1994.
- [6] Artobolewski I.I.: Teoria mechanizmów i maszyn. Izd. Nauka, Moskwa 1975.
- [7] Ryś J.: Urządzenia i konstrukcje mechaniczne. Wyd. Politechnika Krakowska, Kraków 1982.
- [8] Szewczyk K.: Połączenia gwintowe. PWN, Warszawa 1991.
- [9] Fischer U., Gomeringer R. i inni: Poradnik Mechanika, REA-SJ, Warszawa, 2015.
- [10] Guliński E.: Laboratorium podstaw konstrukcji maszyn. Skrypt Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce 1975.

- [11] Baranowski B.: Metalowe elementy sprężyste. PWN, Warszawa 1988.
- [12] Konosala R., Gwiazda A., Baier A., Gendarz P.: Podstawy konstrukcji maszyn. Przykłady obliczeń. Warszawa, WNT 2000
- [13] Kurmaz L. W., Kurmaz O. L.: Projektowanie węzłów i części maszyn. Kielce, Wyd. Polit. Świętokrzyskiej 2003.
- [14] Mazanek E., Kasprzycki A., Kania L.: Podstawy konstrukcji maszyn. Ćwiczenia laboratoryjne. Częstochowa, Wyd. Polit. Częst. 1995.
- [15] Moszyński W.: Wykład elementów maszyn. Cz. 1. Połączenia. Warszawa, PWN 1995
- [16] Szewczyk K.: Połączenia gwintowe. Warszawa, PWN 1991.
- [17] Skarbiński M., Skarbiński J.: Technologiczność konstrukcji maszyn. Warszawa, WNT 1982.
- [18] Timoszenko S., Goodier J. N.: Teoria sprężystości. Warszawa, Arkady 1962.
- [19] <https://strefainzyniera.pl/artukul/1225/rodzaje-gwintow/>
- [20] <https://artykulytechniczne.pl/blog/kalkulator-gwintow/>
- [21] <https://dromet.pl/dzial-techniczny/gwintowanie/gwint-trapezowy-symetryczny/>
- [22] <http://pkm.edu.pl/index.php/polocenia-obl/70-01010213>
- [23] <http://www.instsani.pl/641/polaczenia-gwintowe-skrecane>
- [24] https://media.bossard.com/pl/-/media/bossard_group/website/documents/technical-resources/pl/g_002_pl.pdf?la=pl
- [25] https://media.bossard.com/pl/-/media/bossard-group/website/documents/technical-resources/pl/f_002_pl.pdf
- [26] https://media.bossard.com/pl/-/media/bossard-group/website/documents/technical-resources/pl/f_004_pl.pdf
- [27] https://media.bossard.com/pl/-/media/bossard-group/website/documents/technical-resources/pl/f_009_pl.pdf
- [28] <https://docplayer.pl/18996224-Cw-2-wyznaczanie-wartosci-sredniego-wspolczynnika-tarcia-i-sprawnosci-srub-zlacznych-oraz-uzyskanego-przeznie-zacisku-dla-okreslonego-momentu.html>
- [29] <http://home.agh.edu.pl/~szczech/Instrukcja.pdf>
- [30] <http://bc.pollub.pl/Content/688/PDF/historia.pdf>
- [31] http://zkup.mchtr.pw.edu.pl/pom_dyd/PKUP%20Sem3/W3_Polaczenia.pdf
- [32] <https://docplayer.pl/68349771-Podstawy-konstrukcji-urzadzen-precyzyjnych.html>
- [33] <https://books.google.pl/books?id=GN18kZ2k2nwC&pg=PA145&lpg=PA145&dq=DOCPLAYER+ELEMENTY+PODATNE&source=bl&ots=4sV7p7IXFY&sig=ACfU3U1IvLdDBzfBVbbO4yDrpPaG1kz1IQ&hl=pl&sa=X&ved=2ahUKEwjxp9Ouh-DpAhVMxMQBHeVeAJkQ6AEwC3oECAkQAQ#v=onepage&q=DOCPLAYER%20ELEMENTY%20PODATNE&f=false>

3D printing in prototyping a car drive adapter

Eryk Grochowalski

Department of Mechanical Engineering

Stanisław Staszic State University of Applied Sciences in Pila, Poland

<https://orcid.org/0009-0003-4469-7559>

corresponding e-mail: eryk.grochowalski17@gmail.com

Abstract: The article presents the results of work on the design and manufacture of a drive adapter for a passenger car. The reason for its making was a change in the type of gearbox in the car, and thus a change in the dimensions of the interacting components. The work was carried out in two stages, i.e. first a prototype was made on a 3D printer and then, after it had been tested, a finished drive adapter was made. The use of 3D printing in prototyping new construction elements allows to avoid many errors that may occur during the design process.

Key words: 3D printing, prototyping, machining

1. Introduction

3D printing, also known as additive manufacturing or three-dimensional printing, is, as defined by ISO/ASTM 52900, a family of technologies used to construct objects (usually layer by layer) from a computer design file. It is an additive manufacturing (AM) technique, the essence of which is the production of three-dimensional solid objects based on computer-aided design (CAD) [10÷24].

The principle of operation of 3D printers depends on the technology of applying and curing the material. Currently, the most widespread additive technology is FDM (Fused Deposition Modeling). In this technology, the applied material (usually a thermoplastic) is pressed through a nozzle heated to the melting temperature and then distributed layer by layer according to the designed outline of the 3D model saved in a computer file [4, 6, 7, 10]. Popular materials used in this technology include:

- acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer (ABS);
- poly(lactic acid) (PLA);
- nylon.

Traditionally understood incremental techniques have been used for thousands of years, including in pottery (making clay elements, vessels, religious figurines), construction (building walls with layers of bricks and mortar), shipbuilding (building boats and ships), furniture making, baking, confectionery (baking *sękacz* cakes, decorating cakes with embossed creams, melted chocolate) and others. Modern machines for additive manufacturing techniques are numerically controlled devices, similarly to CNC milling machines or lathes [1, 3, 5, 7, 9, 26, 28]. The construction of a real object (printout) is possible after programming it in a special CAM system based on a virtual 3D model (usually in the form of a triangle mesh saved in an STL file) [26, 28, 29, 30]. This paper attempts to solve the problem of making a spare part for a car whose production has long been discontinued.

2. Construction of a drive adapter

In a passenger car, after the automatic gearbox type 5HP19 A5 S325 Z-TW (made by ZF) was damaged, a manual five-speed Getrag gearbox, model S5D250 G-TAJT, was installed in its place. Both these gearboxes differ in length and in the star-piece mounting the gearbox to the drive shaft. The main shaft coming from the manual gearbox has a cross with holes spaced 78 mm, and the automatic gearbox had holes spacing 95 mm (Fig. 1, Fig. 2).

A question arises here: what is the problem, if it is enough to buy a drive shaft of the appropriate length for a given model and the problem is solved. Unfortunately, in this case, the car is long outdated and it is difficult to obtain appropriate spare parts. Therefore, it was decided to produce a drive shaft adapter that would eliminate the dimensional differences between the two types of gearbox designs. This type of solution is often found on the American market. The adapter is an intermediate element between the gearbox output shaft and the car's drive shaft. Of course, a torsional vibration stabilizer is also installed on the drive shaft side of the car (Fig. 3).

The first step in designing the adapter was dimensioning of the flange connector from the manual gearbox with the flange connector on the car's drive shaft. After obtaining all necessary dimensions, the adapter was initially designed in *Inventor Professional* (Fig. 4) and then printed on an *Anycubic Kobra 2 Pro* 3D printer to check its suitability for assembly on a real object.

After making the adapter on a 3D printer (Fig. 5) and mounting it on a real object, it was found that both the holes and linear dimensions were selected correctly. Then, an identical drive adapter was made from C45 steel. The steel adapter (Fig. 6) was made in several stages:

- selecting a shaft of the appropriate diameter;
- cutting the shaft to the appropriate length on a conventional lathe type *TUJ 50M*;
- making possible outer and inner diameters of the designed adapter;
- machining of the remaining surfaces on the *AVIA VMC 650* CNC milling machine;
- securing the finished adapter with oxidation;
- powder coating of the finished product.

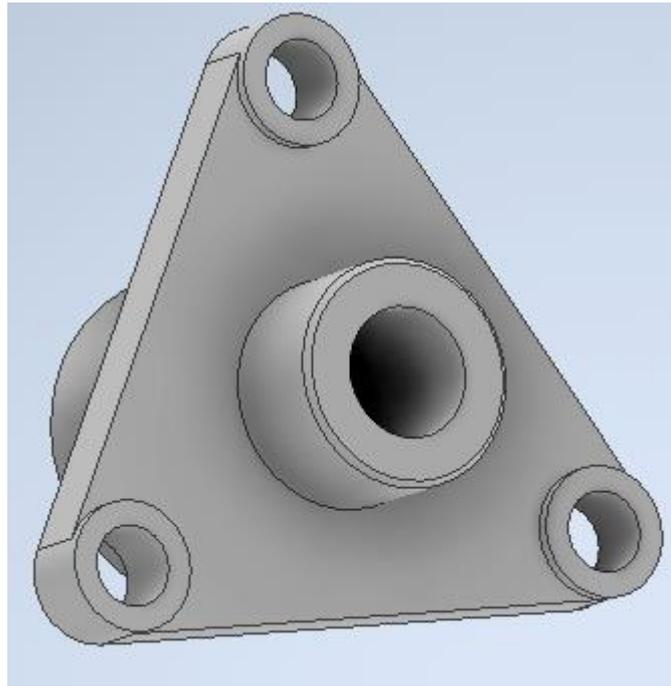


Fig. 1. View of the flanged joint of a car drive shaft generated in *Inventor Professional*

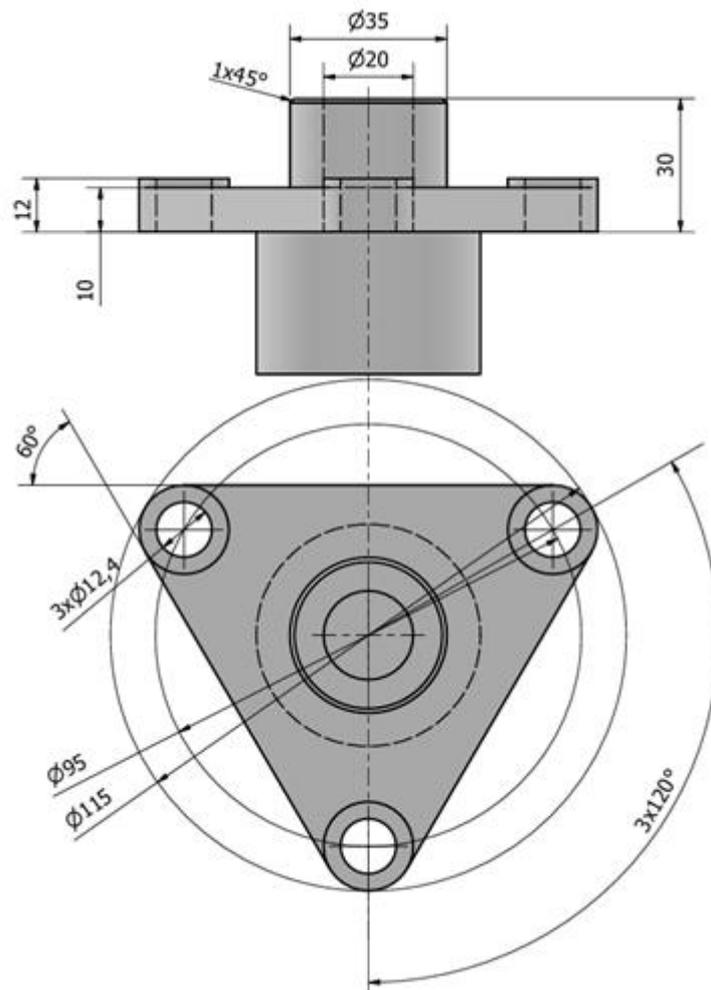


Fig. 2. Dimensions of the car drive shaft flanged joint



Fig. 3. Torsional vibration stabilizer for car drive shaft

The finished steel adapter was then mounted to the vehicle. Inside the adapter, a guide shaft was mounted between the drive shaft and the manual gearbox in order to stabilize the shaft in the gearbox axis and prevent excessive "angular tilt" to either side.

A view of the installed adapter together with the central guide shaft ensuring correct alignment of the mating parts, is shown in Fig. 7. Three bean-shaped millings on the surface of the adapter flange allow to mount the clamping screws.

Views of the installed adapter together with the torsional vibration stabilizer of the car drive shaft, both from the manual gearbox side and from the car drive shaft side, are shown in Fig. 8 and Fig. 9.

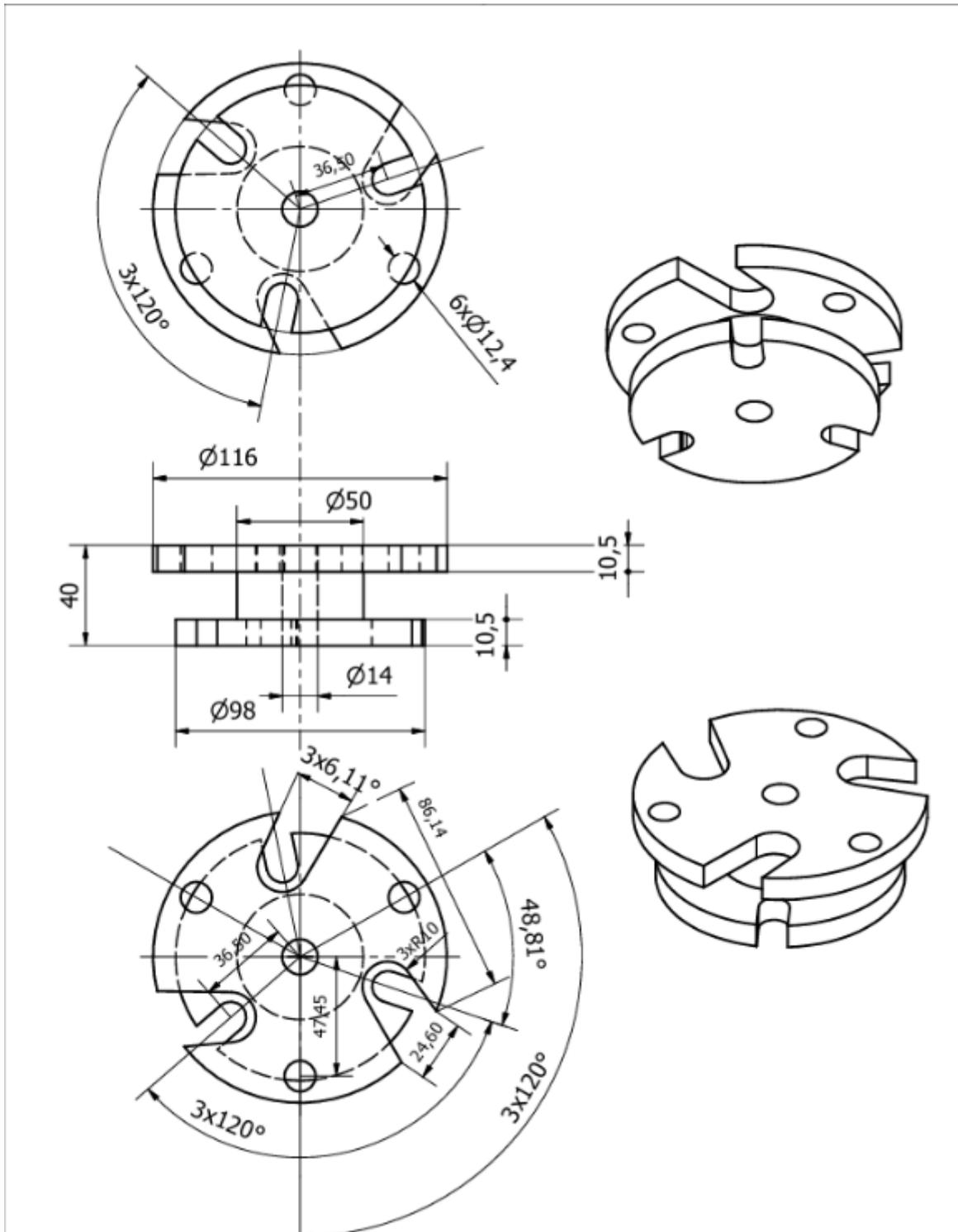


Fig. 4. Designed in *Inventor Professional*, the adapter between the gearbox and the car drive shaft



Fig. 5. View of the 3D-printed adapter with a torsional vibration stabilizer for the car drive shaft



Fig. 6. View of the finished adapter made of C45 steel before painting



Fig. 7. A view of the installed adapter together with the central guide shaft ensuring correct alignment of the mating parts



Fig. 8. View of the installed adapter from the gearbox side



Fig. 9. View of the mounted adapter from the car drive shaft side

3. Summary of the work carried out

The drive adapter was made in two stages. In the first stage, a design and 3D printing were made to check the correctness of its assembly. In the second stage, a finished product was made of C45 steel based on a previously completed design in *Inventor Professional*. The above-mentioned drive adapter was made last year, in 2024, and so far the car has driven approx. 18 thousand km, which proves that the drive adapter was properly designed and manufactured.

4. Literature

1. Budzik G., Płocica M.: Metodologia odnowy dziedzictwa kulturalnego z wykorzystaniem innowacyjnych technologii RE i RP. Wydawnictwo Centrum Naukowo-Technicznego, Rzeszów 2007.
2. Budzik G., Woźniak J., Przesłowski Ł.: Druk 3D jako element przemysłu przyszłości. Analiza rynku i tendencje rozwoju. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2022.

3. Chlebus E., Boratyński T., Dybała B., Frankiewicz M., Kolinka P.: Innowacyjne technologie Rapid Prototyping – Rapid Tooling w rozwoju produktu. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2003.
4. Chlebus E.: Techniki komputerowe CAx w inżynierii produkcji. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2000.
5. Czerwiński K., Czerwiński M.: Drukowanie w 3D. Wydawnictwo Info Adult, Warszawa 2013.
6. Dobrzyńska E., Szewczyńska M., Kowalska J., Kondej D.: Związki chemiczne i pyły – emisja i ograniczanie zagrożeń podczas drukowania przestrzennego 3D. Zalecenia profilaktyczne. Wydawnictwo Centralnego Instytutu Ochrony Pracy – Państwowego Instytutu Badawczego, Warszawa, 2022r.
7. Dodziuk H.: Druk 3D/SM. Zastosowania oraz skutki społeczne i gospodarcze. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2019.
8. France A. K.: Świat druku 3D. Przewodnik. Wydawnictwo Helion, Gliwice 2014r.
9. Noorani R.: Rapid prototyping principles and applications. John Wiley & Sons, Hoboken, USA 2006.
10. Norma ISO/ASTM 52911-2:2019. Wytwarzanie przyrostowe – Projektowanie – Część 2: Stاپianie proszków polimerów za pomocą lasera.
11. Norma ISO/ASTM 52902:2019. Wytwarzanie przyrostowe – Próbki wzorcowe – Ocena dokładności geometrycznej systemów wytwarzania przyrostowego.
12. Norma ISO/ASTM 52911-1: 2019. Wytwarzanie przyrostowe – Projektowanie – Część 1: Stاپianie proszków metali za pomocą lasera.
13. Norma ISO/ASTM 52941-20. Wytwarzanie przyrostowe – Wydajność i niezawodność systemu – Testy akceptacyjne maszyn operujących w technologii Laser Beam Powder Bed Fusion dla materiałów metalowych do zastosowań lotniczych.
14. Norma ISO/ASTM 52942-20. Wytwarzanie przyrostowe – Zasady kwalifikacji – Klasyfikowanie operatorów maszyn i urządzeń operujących w technologii Powder Bed Fusion dla metali i elementów wytwarzanych przyrostowo do zastosowań lotniczych.
15. Norma ISO/ASTM DIS 52900. Wytwarzanie przyrostowe – Zasady ogólne – Terminologia.
16. Norma ISO/ASTM TR 52912:2020. Wytwarzanie przyrostowe – Projektowanie – Wytwarzanie przyrostowe z podziałem na grupy funkcjonalne.
17. Norma PN/EN ISO 17296-2:2016-10. Wytwarzanie przyrostowe – Zasady ogólne – Część 2: Przegląd kategorii procesów i materiał wstępny.
18. Norma PN/EN ISO 17296-3:2016-10. Wytwarzanie przyrostowe – Zasady ogólne – Część 3.: Główne cechy i odpowiednie metody badań.
19. Norma PN/EN ISO 17296-4: 2016-10. Wytwarzanie przyrostowe – Zasady ogólne – Część 4.: Przegląd przetwarzania danych.
20. Norma PN/EN ISO/ASTM 52900: 2017-06. Wytwarzanie przyrostowe – Zasady ogólne – Terminologia.
21. Norma PN/EN ISO/ASTM 52901:2019-01. Wytwarzanie przyrostowe – Zasady ogólne – Wymagania dla kupowanych części wyprodukowanych w procesach wytwarzania przyrostowego AM.
22. Norma PN/EN ISO/ASTM 52902: 2021. Wytwarzanie przyrostowe – Próbki wzorcowe – Wytyczne do oceny dokładności geometrycznej systemów wytwarzania przyrostowego.
23. Norma PN/EN ISO 10360-1:2003. Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS) – Badania odbiorcze i okresowe współrzędnościowych maszyn pomiarowych (CMM) – Część 1: Terminologia.
24. Norma PN/EN ISO 9000:2015. Systemy zarządzania jakością – Podstawy i terminologia.

25. Przybylski W., Deja M.: Komputerowo wspomagane wytwarzanie maszyn. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2007.
26. Przybył B., Kabat M., Mikołajczyk J.: Wpływ prędkości drukowania 3D na dokładność zarysu kół zębatych. **Źródło:** Obróbka Metalu. **Szczegóły:** 2023, nr 4, s. 26-30, **p-ISSN:** 2081-7002;
https://obrobkametalu.tech/media/2023/08/2023-4_Nr54_ObrobkaMetalu.pdf
27. Przybył B., Mikołajczyk J.: Efektywność technik przyrostowych. **Źródło:** Obróbka Metalu. **Szczegóły:** 2024, nr 1, s. 22-25, **p-ISSN:** 2081-7002;
https://obrobkametalu.tech/media/2024/03/2024_1_nr55_ObrobkaMetalu-1.pdf
28. Przybył B., Mikołajczyk J.: The influence of 3D printing speed on profile accuracy. **W:** Szkoła Logistyki 2024 / redakcja naukowa Janusz Zawiła-Niedźwiecki, Adam Płaczek. Radom: Instytut Naukowo-Wydawniczy "Spatium", 2024, Poland. **Szczegóły:** s. 199-216, **p-ISBN:** 978-83-68026-07-8; **e-ISBN:** 978-83-68026-08-5.
29. Siemiński P., Budzik G.: Techniki przyrostowe. Druk, Drukarki 3D. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2015r.
30. Stryczek R., Wyrobek K.: Projektowanie operacji druku 3D metodą FFF. Wydawnictwo Naukowe Akademii Techniczno-Humanistycznej w Bielsku-Białej, Bielsko-Biała, 2022.

Laser cutting technology

Mikołaj Ławniczak

Department of Mechanical Engineering

Stanisław Staszic State University of Applied Sciences in Piła, Poland

<https://orcid.org/0009-0008-9870-7237>

corresponding e-mail: mikolaj.lawniczak1@gmail.com

Abstract: This paper presents the characteristics of the laser cutting process. Discussed are basic operating parameters of laser cutting devices and the advantages and disadvantages of this type of technology.

Key words: laser, metal cutting, laser cutters

1. Introduction

Quantum electronics arose from research on the interaction of matter and electromagnetic radiation. The work undertaken in this field led in the early 1950s to the creation and implementation of the idea of using quantum systems to amplify and generate electromagnetic waves, initially in the microwave range (masers), and a few years later also in the optical range (lasers). The basis of operation of both of these fundamental quantum electronics devices is the process of stimulated emission. The essence of this process was discovered by Einstein and discussed in his paper published in 1917 in which he analyzed the problems of absorption and emission in a system with quantized energy levels subjected to external irradiation with an electromagnetic wave.

In June 1960, T. H. Maiman succeeded in obtaining a laser effect in a synthetic ruby crystal and built the first working model of a laser. A necessary condition, in a nutshell, for the laser action to occur is the existence in the active medium of a quantitative predominance

of excited atoms over unexcited ones to such an extent that the acts of stimulated emission overcompensate the acts of absorption of photons (absorbed during collisions with unexcited atoms) and energy losses in a given device. Currently, the range of types of devices generating laser beams is very large and there is a large number of their applications in the world around us [1, 2, 4, 5, 10, 13, 25, 26], from military applications, through consumer electronics, the metal industry, metallurgy, to medicine (ophthalmology, oncology, surgery).

2. Laser cutting technology

Laser cutting, as one of the most modern tools in material processing, plays a key role in many industries [3, 4, 5, 7, 20, 21, 26] - from the automotive and aviation sectors to the medical and electronics sectors. This technology is distinguished by its precision, versatility of applications and high production efficiency. Laser cutting involves the use of a high-energy laser beam to precisely cut materials. This process involves generating a laser, focusing the beam on the surface of the processed (cut) material, and removing the melted or vaporized material using assist gas [13, 16, 19, 20, 21, 24, 25].

Currently, a very popular method of generating a laser beam is to use a gas mixture based on carbon dioxide (Fig. 1).

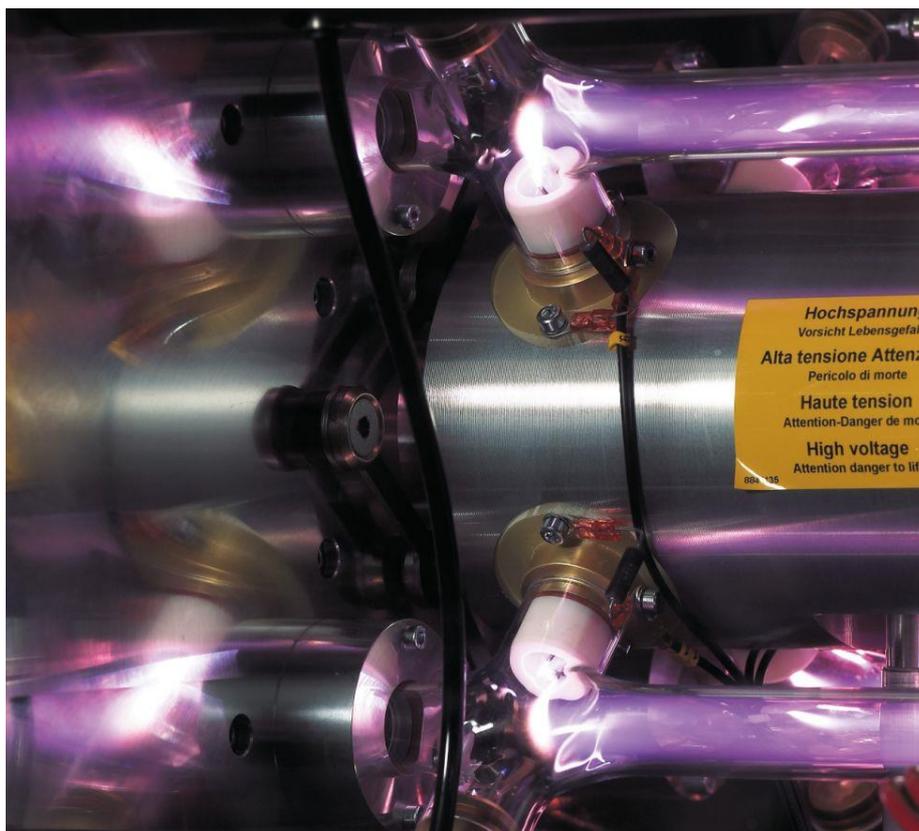


Fig. 1. Electrical excitation of a laser beam using carbon dioxide

For this purpose, the mixture is electrically excited. The laser beam is guided through a beam path with an optical system (Fig. 2). Another type of laser is the fiber semiconductor laser. In this case the active medium of the laser is a fiber, or glass or crystal disc. The beam is

generated in the active fiber and delivered to the cutting head of the machine by the transmission fiber.



Fig. 2. View of the CO2 laser cutting head

The wavelength of a fiber laser is $1\mu\text{m}$, and that of a carbon dioxide laser is $10\mu\text{m}$. A shorter laser wavelength has a beneficial effect on reducing the heating of the processed (cut) material.

The laser optical system, consisting of lenses or mirror systems, focuses the beam on a small surface with a diameter of the order of several dozen micrometers. The energy density in the focus can reach very high values, which is sufficient to induce intense thermal processes such as melting, evaporation or burning of the processed material. The key parameters of the laser beam focusing process are:

- focal length (a shorter focal length provides greater cutting precision but requires more accurate distance setting);
- beam quality M^2 (this parameter indicates how much the light beam deviates from the ideal Gaussian beam; the lower the M^2 value, the more uniform the energy in the focus);
- energy stability (changes in stability can lead to uneven cutting or overheating of the processed material).

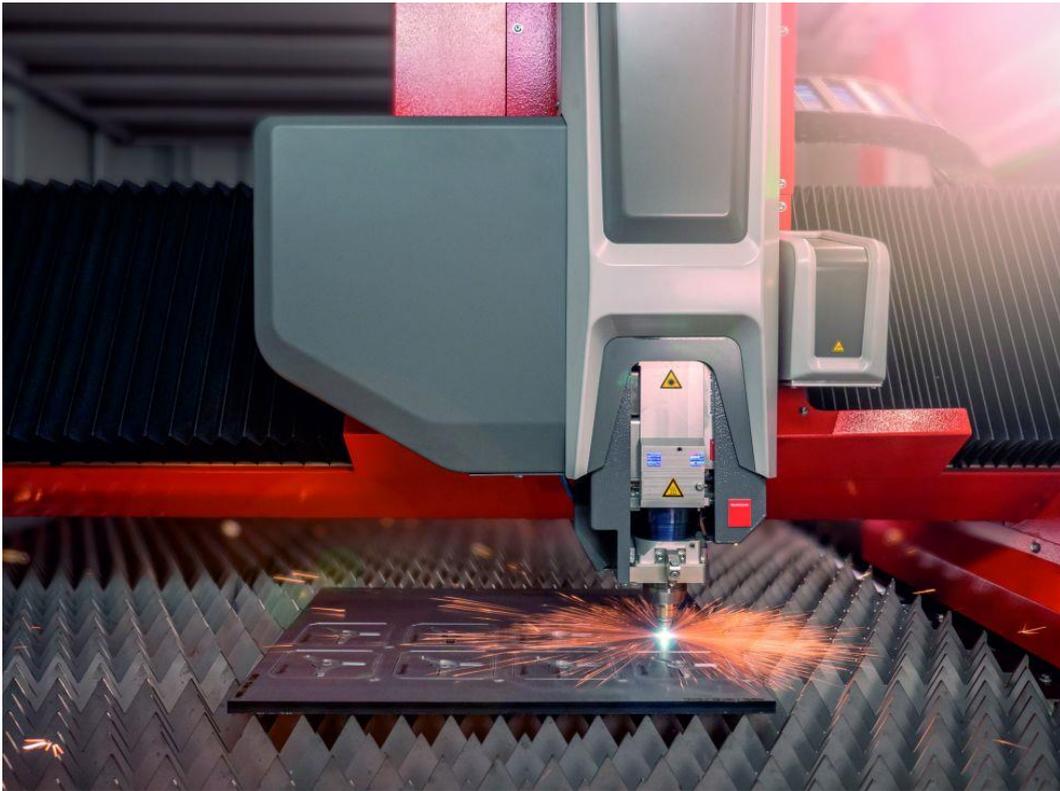


Fig. 3. View of the cutting head of a fiber laser

Techniques which optimize laser beam focus include:

- automatic focal length adjustment (advanced monitoring systems allowing dynamic, real-time focal length adjustment);
- correction of optical aberrations (high-quality optical systems that minimize distortions and ensure high accuracy).

The process of removing material from the cutting area is supported by the use of assist gases. Depending on the type of material and cutting technique, the following gas types are used:

- oxygen O_2 used for cutting carbon steel; it supports combustion reactions whereby increases the efficiency of the cutting process;
- nitrogen N_2 used in the processing of stainless steel and aluminum, prevents oxidation and improves the quality of the cut edge.

Assist gas speed and pressure are precisely regulated in order to:

- ensure effective removal of molten material;
- reduce heat affected zones (HAZ);
- Reduce the formation of splinters and contamination.

High energy density of the laser beam generates large amounts of heat in the cutting area. Effective management of this heat is crucial to maintaining the quality of processing. To minimize thermal deformations and side effects, the following are used:

- pulsing techniques that reduce the amount of energy delivered per unit of time;
- designing the cutting trajectory to avoid heating the same areas in a short time.

Advanced computer simulations enable precise prediction of heat distribution and deformation. Thanks to this:

- you can design optimal parameters of the cutting process;
- the risk of unforeseen defects is minimized.

Laser cutting technology involves potential hazards, therefore the following protective measures are of key importance:

- protective screens (prevent beam dispersion and protect operators);
- gas detection systems (monitor the concentration of toxic substances produced during processing).

Laser cutting is widely used in various sectors of the economy, including:

- automotive industry (precise cutting of steel and aluminum sheets for body production);
- aviation industry (machining of high-strength titanium and aluminum alloys);
- medicine (manufacture of surgical instruments and implants);
- electronics (manufacture of printed circuits and microcircuits).

Current laser cutting technology offers high precision and efficiency in processing different materials. This is crucial in many industrial sectors where it is required to have high precision and repeatability of cuts.

Factors influencing cutting precision include:

- laser quality (the stability and uniformity of the laser beam have a direct impact on cutting precision; high-quality lasers emit beams with precisely controlled power and focus, which allows accurate cuts);
- system stability (laser cutting precision also depends on the stability of the entire system, including the precision of the control system and vibration resistance; any vibrations can affect the cutting accuracy);
- cutting parameters (optimization of settings of parameters such as laser power, cutting speed, focal distance, properties of the supporting shielding gas can significantly affect the quality and precision of cutting);
- type and quality of the processed material (different materials react differently to laser cutting, which may affect the precision of the cut; unevenness of the material, its composition or thickness may affect the precision of the cut).

Laser cutting is characterized by high precision and flexibility. Unlike mechanical cutting methods (guillotines, sheet metal shears, band saws, frame saws, circular saws), laser cutting minimizes physical contact with the material, which reduces the risk of its deformation. Compared to plasma or water cutting, laser cutting offers a much thinner cutting line and the ability to produce more complex shapes with greater accuracy.

Laser cutting machines require significant amounts of electrical energy. Therefore, the development of laser technology aims at increasing the energy efficiency of this type of devices, inter alia, by using modern fiber optic lasers.

Fig. 4. presents a fragment of the operating parameters of the Star Fiber L803 laser while cutting a 25 mm thick sheet of steel of S235 grade, with the following values:

- tool radius: 0.22 mm;
- rate of feed: 750 mm;
- laser power: 15 000 W;
- focal position: 13 mm;
- nozzle gap: 0.8 mm;
- pressure for G-3: 8 bar;
- pulse frequency: 60 Hz;
- pulse width: 9000 μ s.

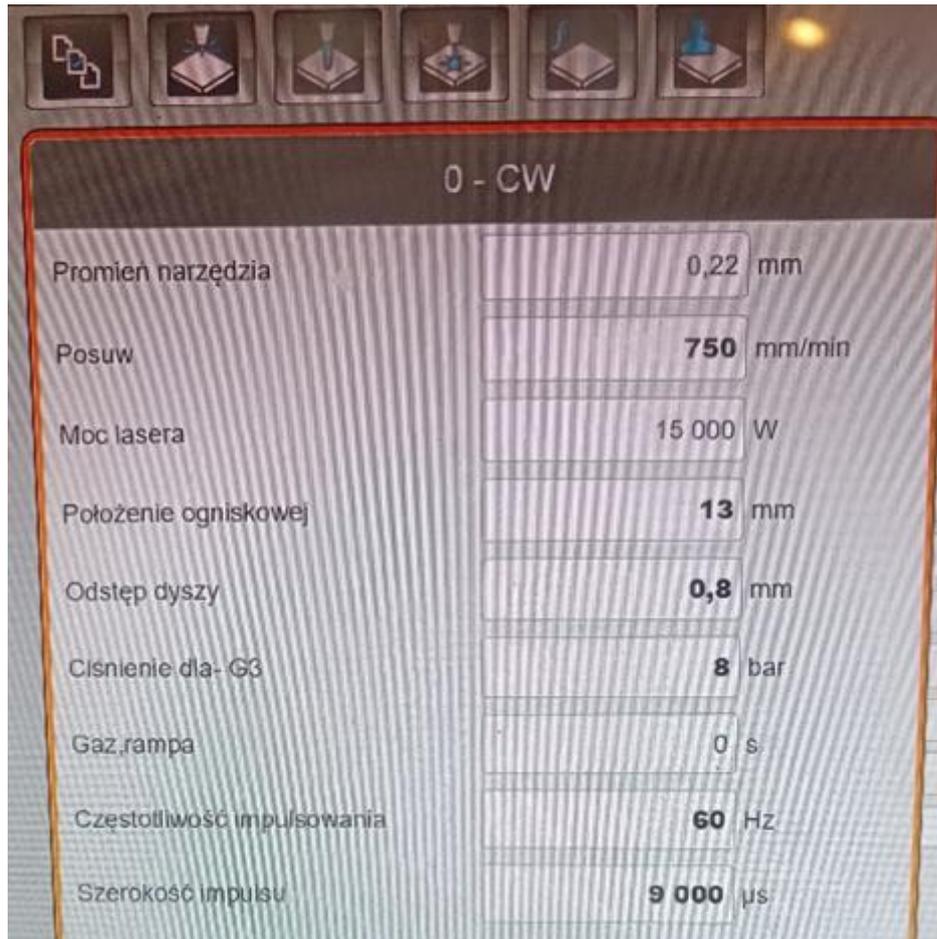


Fig. 4. Fragment of parameters of Star Fiber L803 laser while cutting a 25 mm thick sheet of steel, grade S235

3. Conclusion

The laser cutting process is a multi-stage process and requires advanced equipment and precise parameter control. From generating a laser beam, through focusing energy into a microscopic point, to effectively removing processing products – each phase requires optimization to achieve the highest quality and production efficiency. Understanding the operating principles of laser cutting machines allows us to better use the potential of this technology in practical industrial and scientific applications. With further technological development, laser cutting will remain one of the key processes in the industry of the future.

4. Literature

1. Chryssolouris G.: Laser Machinig: Theory and Practice. Wydawnictwo Springer Science & Business Media, 2006.
2. Duley W.W.: Laser Processing and Analysis of Materials. Wydawnictwo Springer, 1998.

3. Galon M., Mikołajczyk J.: The effect of laser cutting speed on the bearing surface of peaks and valleys of the cut surface. **W:** Logistyka w ratownictwie 2024 / pod redakcją Andrzeja Chudzikiewicza i Andrzeja Krzyszkowskiego. Radom: Instytut Naukowo-Wydawniczy Spatium, 2024, Poland. **Szczegóły:** s. 71-84, **p-ISBN:** 978-83-68026-24-5; **e-ISBN:** 978-83-68026-25-2.
4. Galon M., Mikołajczyk J.: The effect of laser cutting speed on the weight of the workpiece. **W:** Logistyka w ratownictwie 2024 / pod redakcją Andrzeja Chudzikiewicza i Andrzeja Krzyszkowskiego. Radom: Instytut Naukowo-Wydawniczy Spatium, 2024, Poland. **Szczegóły:** s. 85-96, **p-ISBN:** 978-83-68026-24-5; **e-ISBN:** 978-83-68026-25-2.
5. Galon M., Mikołajczyk J.: Wpływ wartości posuwu podczas cięcia laserem na chropowatość powierzchni przecięcia. **Źródło:** Obróbka Metalu. **Szczegóły:** 2024, nr 3, s. 48-53, **p-ISSN:** 2081-7002;
<https://obrobkametalu.tech/nasze-czasopismo/archiwum/>
6. Grabowska M., Mikołajczyk J.: Zastosowanie tomografii komputerowej CAT w inżynierii materiałowej. Application of CAT scanning for materials engineering. **Źródło:** Postępy w Inżynierii Mechanicznej [Developments in Mechanical Engineering]. 2017, nr 9 (5), s. 15-26, **p-ISSN:** 2300-3383; Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego w Bydgoszczy, Poland. <http://wu.utp.edu.pl/oferta,8,1>
7. Grabowska M., Mikołajczyk J.: Próba zastosowania tomografii komputerowej CAT do określania struktury grafitu naturalnego w zależności od rozmiaru ziarna. An attempt to apply cat scanning to determine the natural graphite structure depending on the grain size. **Źródło:** Postępy w Inżynierii Mechanicznej [Developments in Mechanical Engineering]. 2018, nr 12 (6), s. 5-14, **p-ISSN:** 2300-3383; Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego w Bydgoszczy, Poland.
<http://wu.utp.edu.pl/oferta,8,1>
8. Grabowska M., Mikołajczyk J., Basiak S.: Zastosowanie tomografii komputerowej CAT w nieniszczących badaniach teowych złączy spawanych. Application of cat scanning in non-destructive testing of welded t-joints. **Źródło:** Postępy w Inżynierii Mechanicznej [Developments in Mechanical Engineering]. **Szczegóły:** 2018, nr 11 (6), s. 31-44, **p-ISSN:** 2300-3383; Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego w Bydgoszczy, Poland.
<http://wu.utp.edu.pl/oferta,8,1>
9. Grabowska M., Piochacz A., Mikołajczyk J.: Attempt to use computed tomography CAT to analyze the anodized layer. **Źródło:** Postępy w Inżynierii Mechanicznej [Developments in Mechanical Engineering]. **Szczegóły:** 2020, nr 15 (8), s. 25-33, **p-ISSN:** 2300-3383; Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego im. J.J. Śniadeckich w Bydgoszczy, Poland.
[https://dme.utp.edu.pl/art/15\(8\)2020/25.pdf](https://dme.utp.edu.pl/art/15(8)2020/25.pdf)
DOI: 10.37660/dme.2020.15.8.3
10. Kaczmarek F.: Wstęp do fizyki laserów. Państwowe Wydawnictwa Naukowe, Warszawa 1978.
11. Kęćik T.: Wybrane problemy selektywnej koagulacji laserowej w okulistyce. Polski Związek Wydawnictw Lekarskich, Warszawa 1975.
12. Klejman H.: Lasery. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1979.
13. Klejman H.: Masery i lasery – nowe zdobycze elektroniki. Wydawnictwo Ministerstwa Obrony Narodowej, Warszawa 1965.
14. Klejman H., Dzięciołowski K., Rzewuski M.: Lasery w telekomunikacji, Wydawnictwa Naukowo Techniczne, Warszawa 1970.

15. Klejman H., Możejko J.: Elektronika i telekomunikacja , t. 3: Historia elektryki polskiej. Wydawnictwo Stowarzyszenia Elektryków Polskich –Wydawnictwa Naukowo Techniczne, Warszawa 1974.
16. Klimontowicz J. L.: Lasery i optyka nieliniowa. Państwowe Wydawnictwa Naukowe, Warszawa 1969.
17. Lengyel B. A.: Lasery. Państwowe Wydawnictwa Naukowe, Warszawa 1965.
18. Martin J.: Przyszłość telekomunikacji. Państwowe Wydawnictwa Naukowe, Warszawa 1975.
19. Mroziewicz B.: Lasery półprzewodnikowe. Wydawnictwa Naukowe Techniczne, Warszawa 1967.
20. Mikołajczyk J., Galon M.: Mathematical model of straight regression determining the effect of laser cutting speed on the mass of the workpiece. **W:** MIK-21 : Międzynarodowa Innowacyjność i Konkurencyjność w XXI wieku : Aspekty innowacyjne / redakcja naukowa Radosław Luft. Lublin: Wydawnictwo Naukowe FNCE, 2024, Poland. **Szczegóły:** s. 71-92, **p-ISBN:** 978-83-68074-82-6; **e-ISBN:** 978-83-68319-03-3.
21. Nowicki M.: Lasery w technologii elektronicznej i obróbce materiałów. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1978.
22. Piekara A.: Nowe oblicze optyki. Państwowe Wydawnictwa Naukowe, Warszawa 1976.
23. Powell J.: CO₂ Laser Cutting. Wydawnictwo Springer-Verlag, 1993.
24. Sadowski A., Krechlik R.: Laser w obróbce materiałów i metrologii. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1973.
25. Steen W. M., Mazumder J.: Laser Material Processing. Wydawnictwo Springer, 2010.
26. Wyłębski W. F.: Lasery – właściwości, budowa, zastosowanie specjalne. Wydawnictwo Ministerstwa Obrony Narodowej, Warszawa 1975.

Determining the correlation between the number of construction disasters and the number of people injured

dr inż. Jarosław Mikołajczyk

Department of Mechanical Engineering

Stanisław Staszic State University of Applied Sciences in Piła, Poland

<https://orcid.org/0000-0001-9196-0039>

corresponding e-mail: jmikolajczyk@ans.pila.pl

Abstract:

The paper presents the results of mathematical analysis between the number of construction disasters and the number of casualties (injured and killed) in these disasters. Observation was made concluding that there is a significant relationship between the number of people killed and the number of people injured, and this relationship is functional, thus its formula was made. Statistically, the more people are injured, the more people are killed as a result of these construction disasters, which has also been proven.

Key words: construction disaster, correlation, construction industry

1. Introduction

In Poland, pursuant to art. 73 of the Construction Law Act [2]: Construction disaster – an unintentional, violent destruction of a building or its parts, as well as structural elements of scaffolding, formwork elements, sheet pile walls and steening.

Annual reports on construction disasters are available on the website of the General Office of Building Supervision. The register has been kept since 1995, and electronically since 2008.

When thinking about building structures in the new millennium it is important not to forget those structures that already exist. Solving the problem of durability of building structures exposed to the influence of various factors should be considered an important scientific and technical problem. Durability is a function of the performance properties of materials, the quality of design and workmanship, and the various impacts on structures as well as their manner of use and adopted levels of maintenance [27].

The finite element method FEM is currently the most commonly used method in engineering calculations. With its development, the search for analytical solutions was

abandoned. However, attempts to obtain such solutions are justified because they allow to get a direct and quick qualitative analysis of the calculation results. In the case of FEM, each change of the adopted parameters entails the need to construct and solve systems of algebraic equations, which in the case of qualitative and parametric analyses is associated with the need to conduct time-consuming numerical experiments.

An interesting method of difference equations in the analysis of one-dimensional systems with disturbances of discretization regularity was presented in [8, 11, 16, 18].

If we consider a building disaster as an atypical state, a certain disturbance of geometrical and physical parameters and a certain disturbance of mass discretization in the case of dynamics, then, for example, by means of transform modification, we can derive appropriate formulas that allow us to find a solution in the case of a disturbance in an arbitrarily located element.

Construction disasters do not occur randomly. There is always some cause, either external or internal (weakening of the structure of the object, its material, etc.). In today's very dynamic world, vibrations can have a large impact on the number of construction disasters. What is very relevant today is the topic of active reduction of vibrations in building structures based on the theory used in automation. There are many examples of construction disasters of historic buildings that survived the ancient times, the Middle Ages, the Renaissance, and were destroyed today due to, for example, excessive traffic, because someone did not foresee that such a close communication route could destroy the historic building.

It is also generally known that the durability of an object is primarily influenced by corrosion of the materials from which it is made. The causes of corrosion of concrete, and also of reinforced concrete, may be different. Most often, it occurs under the influence of external factors. This is also how it is described in the standard for concrete [21÷26]. However, it is necessary to remember about certain risks associated with the use of cements with various additives in the context of the introduction by concrete producers of fillers and additives as for unmodified cements, and often also limestone or recycled aggregates. Ultimately, this may lead to the destruction of the concrete structure due to undesirable reactions between the given components of the concrete mix [21÷26]. Unfortunately, the corrosion processes that occur after periods of slowdown or even temporary inhibition may intensify again if appropriate, favourable conditions occur. And then it is only one step away from a construction disaster. Therefore, dynamic impacts and maintenance of the facility are very important for its durability.

This paper is a continuation of the author's earlier work in this field [19, 20]. The mathematical analysis of the data was based on the work [4, 5, 6, 7, 9, 10, 12, 13, 14, 15, 17, 28].

2. Statistical analysis

Based on data found in the General Office of Building Supervision in Poland and the Central Statistical Office of Poland, the number of construction disasters was compared with the number of injured people and fatalities in Poland at a given time. Then, correlations between the above-mentioned variables were calculated in the R program. Data and calculation results are included in Table 1. The number of construction disasters in Poland in particular years is presented graphically in Fig. 1. It is clear that in different years this number had different values.

Table 1. Comparison of the number of construction disasters in Poland with the number of people injured

Year	Number of fatalities	Number of persons injured	Total number of casualties	Number of construction disasters
2004	19	46	65	187
2005	16	54	70	132
2006	88	173	261	338
2007	26	90	116	520
2008	14	76	90	1113
2009	38	76	114	264
2010	12	71	83	731
2011	25	67	92	648
2012	17	63	80	426
2013	22	65	87	258
2014	14	62	76	209
2015	18	77	95	307
2016	14	40	54	367
2017	30	109	139	627
2018	24	81	105	249
2019	28	63	91	251
2020	18	71	89	272
2021	26	60	86	469
2022	24	53	77	663

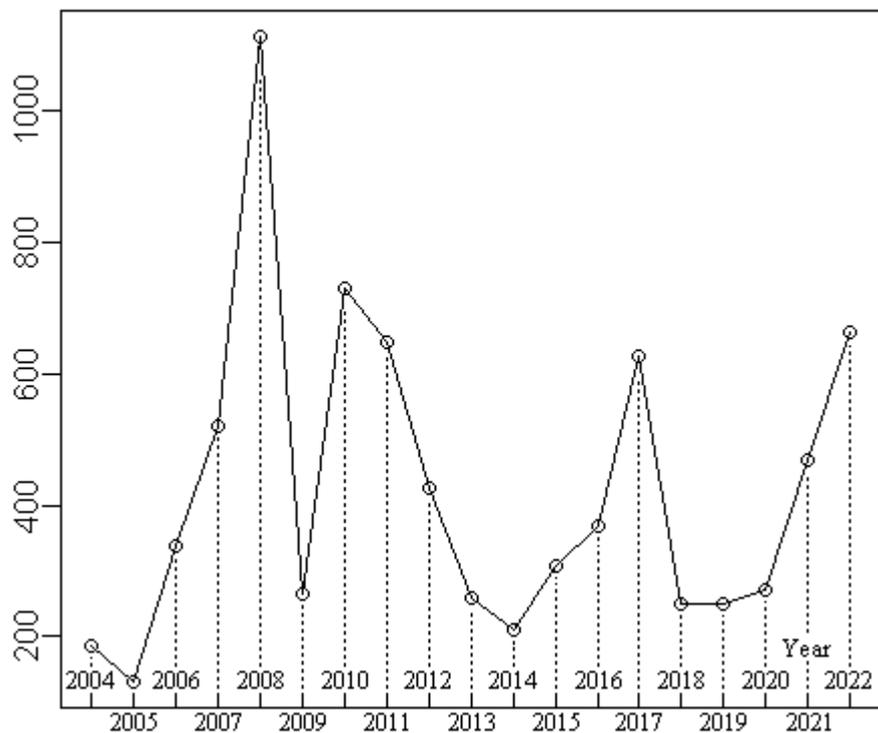


Fig. 1. Number of disasters in Poland in given years

If we look at the data contained in Table 1 together with the number of casualties (injured + fatalities) with the number of construction disasters sorted in ascending order, we will obtain the data contained in Table 2 for which the correlation was calculated using the Pearson's method and the Spearman's method. There is a visible lack of any relationship between the number of construction disasters and the number of people injured in them, as evidenced by the low values of the calculated correlations between the above-mentioned variables. Indeed, when looking at the graphical representation of the number of construction disasters with the number of casualties (fatalities and injured) in these disasters, it is difficult to see any correlation (Fig. 2).

Table 2. Comparison of the number of construction disasters in ascending order with the number of casualties (injured + fatalities) and the correlations calculated for them using the Pearson's and Spearman's methods

Number of construction disasters in ascending order	Casualties (injured + fatalities)	Year	Pearson's correlation	Spearman's correlation
132	70	2005	0.01652465	0.2175439
187	65	2004		
209	76	2014		
249	105	2018		
251	91	2019		
258	87	2013		
264	114	2009		
272	89	2020		
307	95	2015		
338	261	2006		
367	54	2016		
426	80	2012		
469	86	2021		
520	116	2007		
627	139	2017		
648	92	2011		
663	77	2022		
731	83	2010		
1113	90	2008		

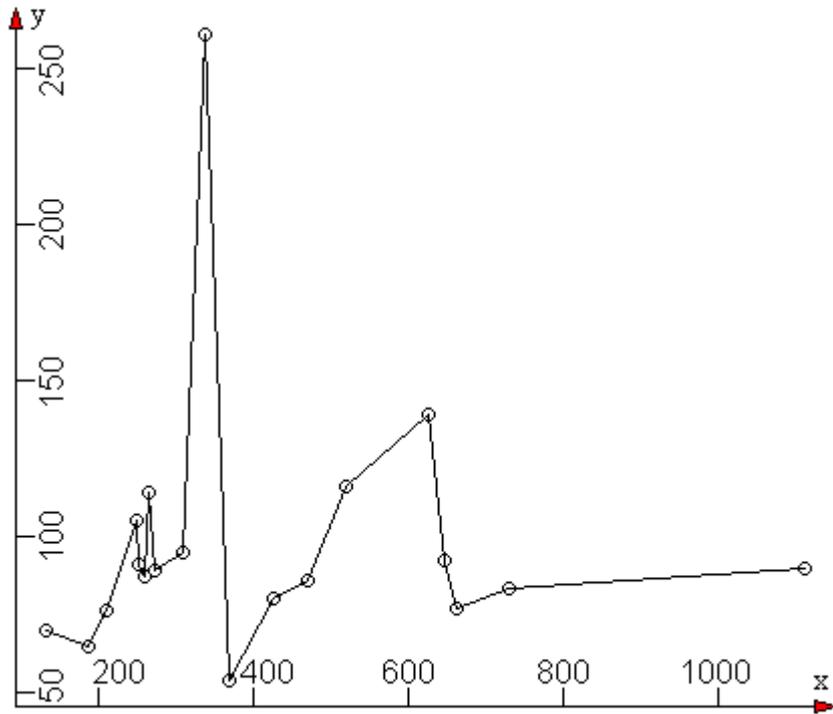


Fig. 2. Graphical representation of the number of construction disasters (x-axis) with the number of casualties (killed and injured) (y-axis)

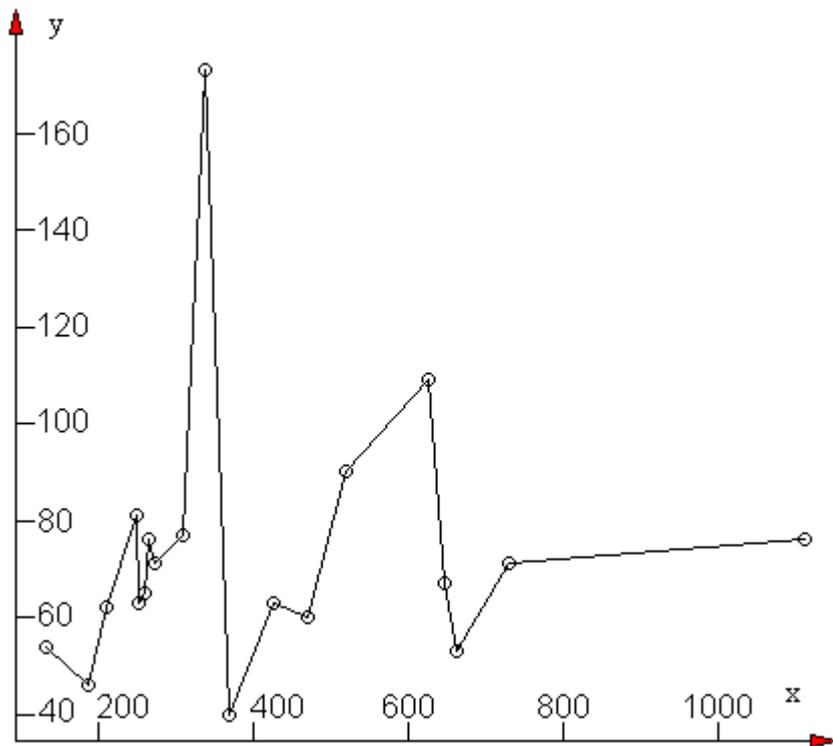


Fig. 3. Graphical representation of the number of construction disasters (x-axis) with the number of casualties (persons injured) (y-axis)

Fig. 3 graphically presents the number of construction disasters (x-axis) with the number of casualties in these disasters (persons injured) – y-axis. It is clear that the increasing number of construction disasters does not necessarily correspond to the increasing number of people injured in these construction disasters. Indeed, the calculated correlation value between the above-mentioned variables indicates there is no relation between them (Table 3).

Table 3. List of the number of construction disasters in ascending order with the number of casualties (persons injured) and the correlations calculated for them using the Pearson's and Spearman's methods

Number of construction disasters in ascending order	Casualties (persons injured)	Year	Pearson's correlation	Spearman's correlation
132	54	2005	0.09709692	0.2485729
187	46	2004		
209	62	2014		
249	81	2018		
251	63	2019		
258	65	2013		
264	76	2009		
272	71	2020		
307	77	2015		
338	173	2006		
367	40	2016		
426	63	2012		
469	60	2021		
520	90	2007		
627	109	2017		
648	67	2011		
663	53	2022		
731	71	2010		
1113	76	2008		

A similar procedure was followed when comparing the number of construction disasters with the number of people killed as a result of these disasters, as shown in Fig. 4. It is clear that the increasing number of construction disasters does not necessarily correspond to the increasing number of people killed in these disasters. Indeed, the calculated correlation value between the above-mentioned variables indicates there is no relation between them (Table 4).

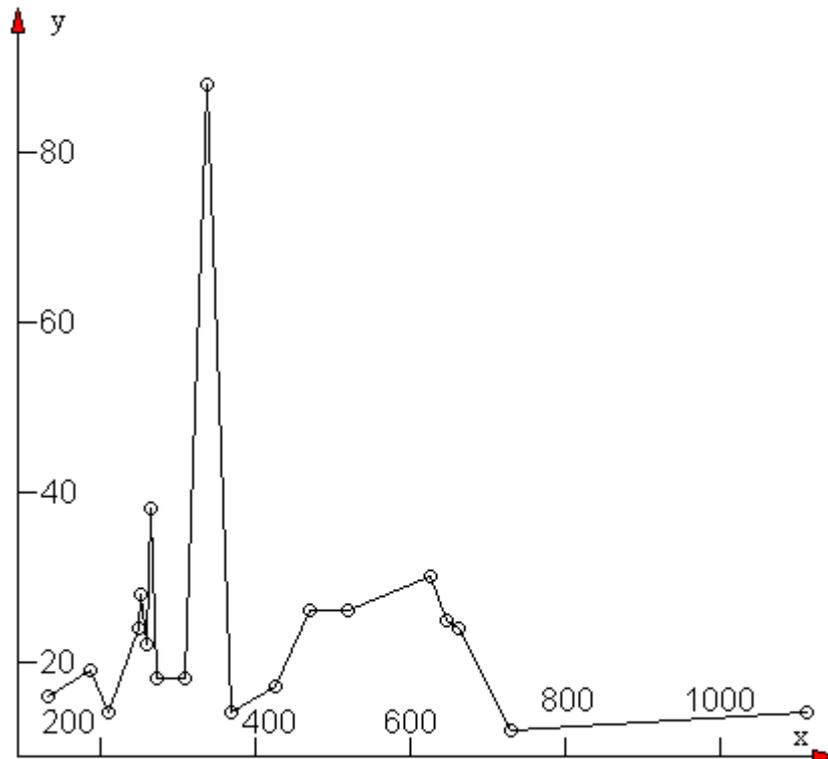


Fig. 4. Graphical representation of the number of construction disasters (x-axis) with the number of casualties (fatalities) (y-axis)

Table 4. List of the number of construction disasters in ascending order with the number of casualties (fatalities) and the correlations calculated for them using the Pearson's and Spearman's methods

Number of construction disasters in ascending order	Victims (fatalities)	Year	Pearson's correlation	Spearman's correlation
132	16	2005	-0.1239038	-0.01495828
187	19	2004		
209	14	2014		
249	24	2018		
251	28	2019		
258	22	2013		
264	38	2009		
272	18	2020		
307	18	2015		
338	88	2006		
367	14	2016		
426	17	2012		
469	26	2021		
520	26	2007		
627	30	2017		
648	25	2011		
663	24	2022		
731	12	2010		
1113	14	2008		

The last stage of comparison of the data presented in Table 1 is checking whether there is any relationship between the number of people injured in construction disasters and the number of fatalities, which is presented graphically in Figure 5. The resulting graph is very interesting. One can observe a certain relationship which can be seen visually between the number of people killed and the number of people injured, and it seems to be a strong relationship. The trend in Figure 5 is that the increasing number of fatalities corresponds to the increasing number of injured. So statistically, if the number of people injured in construction disasters increases, then unfortunately the number of people killed as a result of these disasters also increases. If we compare the number of fatalities (arranged in ascending order) with the corresponding number of people injured, we get the data contained in Table 5 along with the calculated correlation values. A question arises here: what are the proportions of the number of people killed to the number of people injured and possibly what is the mathematical relationship between them. Of course, at first glance it is clear that the number of injured people is greater than the number of people killed.

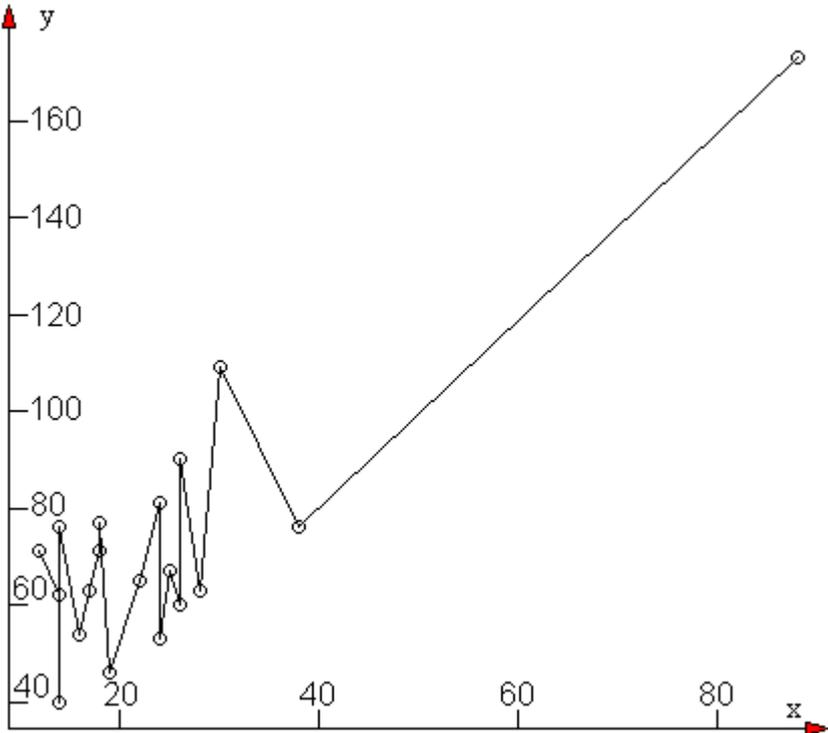


Fig. 5. Graphical representation of the number of people killed in construction disasters (x-axis) with the number of people injured in these disasters (y-axis)

Table 5. Comparison of the number of people killed in construction disasters with the number of people injured in these disasters in ascending order and the correlations calculated for them using the Pearson's and Spearman's methods

Number of people killed in ascending order	Number of people injured	Year	Pearson's correlation	Spearman's correlation
12	71	2010	0.8597105	0.4268729
14	62	2014		
14	40	2016		
14	76	2008		
16	54	2005		
17	63	2012		
18	71	2020		
18	77	2015		
19	46	2004		
22	65	2013		
24	81	2018		
24	53	2022		
25	67	2011		
26	60	2021		
26	90	2007		
28	63	2019		
30	109	2017		
38	76	2009		
88	173	2006		

The simple regression model defined in R for the data contained in Table 5 concerning the relationship between the actual number of people killed in construction disasters and the actual number of people injured (hurt) is:

$$y = 1,482 \cdot x + 36,621$$

where: x – number of fatalities; y – number of the injured

Based on a simple regression model defined by a mathematical formula, calculated was the theoretical number of injured people for the actual number of people killed. The theoretical number of injured people calculated according to the simple regression model was not rounded to integers. It was left as obtained from calculations. It is obvious that in the real situation we only have integers (a binary system), i.e. either someone was killed as a result of the construction disaster, or is alive. The results of the theoretical number of injured people calculated on the basis of simple regression should rather be interpreted in such a way that, for example, if we have 92.937 people injured, then there is a very high probability that 93 people are injured, not 92.

Table 6. presents a comparison, in ascending order, of the number of people killed as a result of construction disasters with the number of people injured in these disasters and the number of people injured calculated according to a mathematical model, which is presented graphically in Fig. 6.

Table 6. Comparison, in ascending order, of the number of people killed as a result of construction disasters with the number of people injured in these disasters and the number of people injured calculated according to a mathematical model

Number of people killed in ascending order (actual values)	Number of people injured (actual values)	Year	Number of injured people according to the mathematical model of simple first-order regression
12	71	2010	54.405
14	62	2014	57.369
14	40	2016	57.369
14	76	2008	57.369
16	54	2005	60.333
17	63	2012	61.815
18	71	2020	63.297
18	77	2015	63.297
19	46	2004	64.779
22	65	2013	69.225
24	81	2018	72.189
24	53	2022	72.189
25	67	2011	73.671
26	60	2021	75.153
26	90	2007	75.153
28	63	2019	78.117
30	109	2017	81.081
38	76	2009	92.937
88	173	2006	167.037

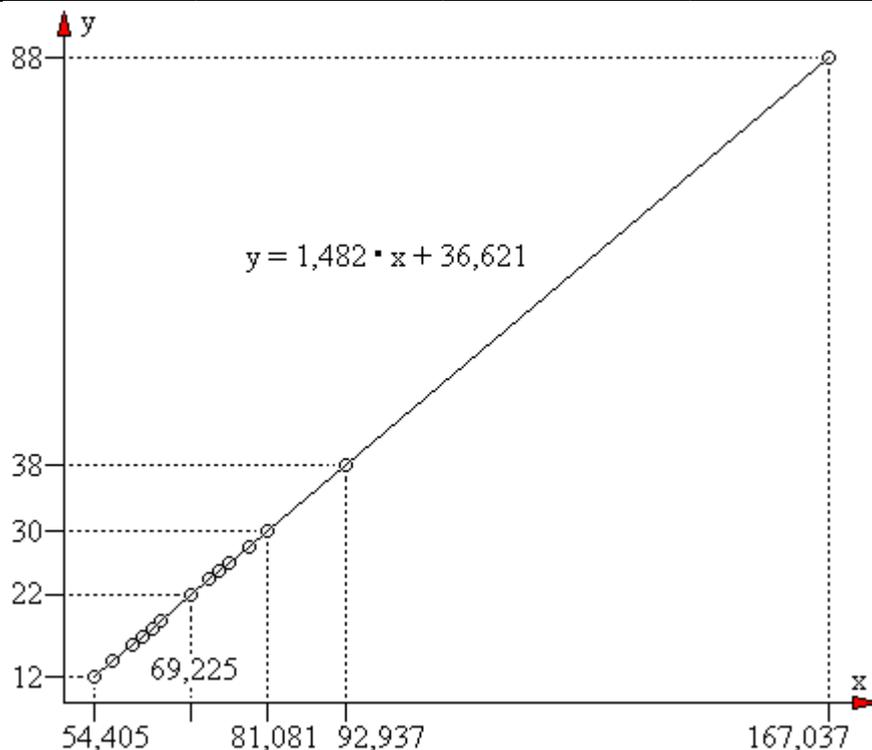


Fig. 6. Graphical representation of the number of people injured, according to the mathematical model

x – number of injured according to the simple regression model; y – actual number of killed

If we divide the actual number of people injured by the actual number of people killed in construction disasters in a given year, we will obtain a multiplication table in accordance with the data contained in Table 7. One can observe that the maximum number of injured people is almost six people per one killed (exactly 5.916), and the minimum is almost two people per one person killed (exactly 1.965) as a result of construction disasters. Of course, among these data there may be extreme cases, for example, ten people are injured and zero are killed. And the second extreme case is when there are zero people injured and ten killed, i.e. everyone dies. These are very sporadic cases, but they do occur. We are only operating on numbers here, it is generally known that there is no such thing as 5.9 deaths. Only whole numbers are given.

Unfortunately, the statistical data do not include medical information on the degree of injury of people injured in construction disasters. Unfortunately, this group of people includes (based on press, radio, television and internet reports) people who have had amputations of upper or lower limbs, with vision or hearing damage, and with serious head injuries resulting in permanent disability. It is, therefore, difficult to compare the effects of sustained injuries in any way. Lucky are those who escaped the construction disaster untouched.

Table 7. Comparison of the number of people injured in relation to the number of people killed as a result of construction disasters for a given year

Number of people killed in ascending order	Number of people injured	Multiplicity (number of people injured divided by number of people killed) for a given year	Year
12	71	5.916	2010
14	62	4.428	2014
14	40	2.857	2016
14	76	5.428	2008
16	54	3.375	2005
17	63	3.705	2012
18	71	3.944	2020
18	77	4.277	2015
19	46	2.421	2004
22	65	2.954	2013
24	81	3.375	2018
24	53	2.208	2022
25	67	2.680	2011
26	60	2.307	2021
26	90	3.462	2007
28	63	2.250	2019
30	109	3.633	2017
38	76	2.000	2009
88	173	1.965	2006

Table 8. Summary of selected statistical parameters for the multiplicity parameter (the number of injured people divided by the number of people killed as a result of construction disasters)

Min.	1st Qu.	Median	3rd Qu.	Max.	IQR	R	s	d ₁	Mean
1.965	2.364	3.375	3.825	5.916	1.4605	3.951	1.119021	0.8723934	3.326

- Min – minimum value;
- 1st Qu. – lower (first) sample quartile (Q₁);
- Median – median (‘median value’ Q₂);
- Mean – arithmetic mean;
- 3rd Qu. – upper (third) sample quartile (Q₃);
- Max. – maximum value;
- IQR – interquartile range;
- R – sample range;
- s – standard deviation;
- d₁ – average deviation from the mean value.

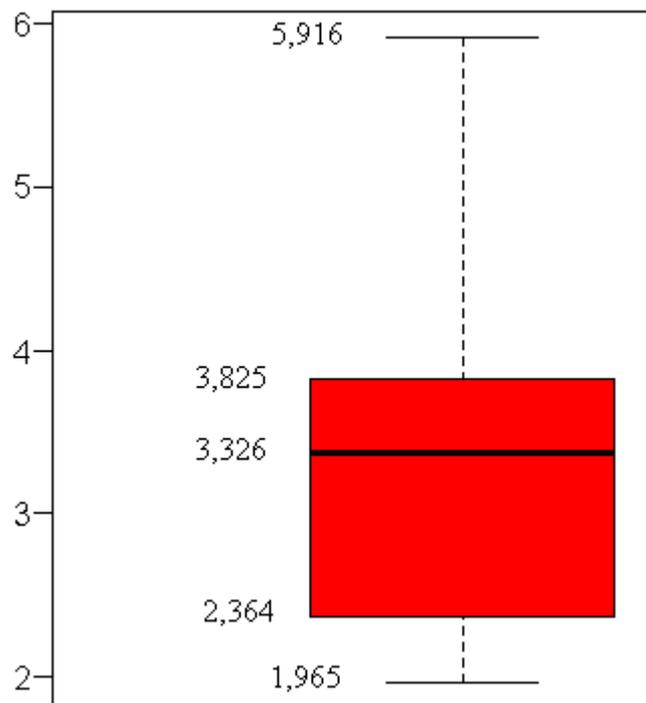


Fig. 7. Box plot of the multiplicity parameter (the number of people injured divided by the number of people killed in construction disasters)

Of course (Fig. 7) the minimum value of the multiplicity was recorded for the year 2006 – 1.965 people injured per one person killed (the lower “whisker of the graph”), the maximum value of the multiplicity was recorded for the year 2010 – 5.916 people injured per one person killed (the upper “whisker of the graph”). Sample range (R) – this is the difference between the maximum value of the multiplicity and the minimum value of the multiplicity which is 3.951 (the difference between the upper and lower “whiskers” of the graph). The standard deviation value is $s=1.119021$. The first quartile (lower part of the box) has the value $1^{st}Qu.=2.364$. And the third quartile (upper part of the box) has the value $3^{rd}Qu.=3.825$. The

median value is Median=3.375 construction disasters. The sample range R is very large. The mean value is unevenly distributed in the box plot. Whiskers are very distant from the box plot. There are no outliers. Interquartile range IQR = 1.4605 (Table 8).

3. Conclusion

Based on the mathematical analysis of statistical data regarding the number of construction disasters, one can conclude, inter alia, that:

- the correlation values calculated - using the Pearson's and Spearman's methods - between the number of construction disasters and the number of casualties (injured + killed) are 0.01652465 and 0.2175439, respectively, thus there is no relationship between the above variables; the variables analyzed are therefore independent variables;
- the correlation values calculated - using the Pearson's and Spearman's methods - between the number of construction disasters and the number of casualties (only injured persons) are 0.09709692 and 0.2485729, respectively, thus there is no relationship between the above variables; the variables analyzed are therefore independent variables;
- the correlation values calculated - using the Pearson's and Spearman's methods - between the number of construction disasters and the number of casualties (only fatalities) are 0.1239038 and -0.01495828, respectively, thus there is no relationship between the above variables; the variables analyzed are therefore independent variables;
- the correlation values, calculated using the Pearson's and Spearman's methods, between the number of people killed and the number of people injured are 0.8597105 and 0.4268729, respectively, therefore there is a significant relationship between the above-mentioned variables and it is a functional relationship.

The multiplicity parameter, i.e. the number of people injured divided by the number of people killed in construction disasters, ranges from 1.965 to 5.916. The average value of this parameter is 3.326 (Mean). The multiplicity parameter has no outliers, and the Median parameter value is not evenly distributed in the box plot.

BIBLIOGRAPHY:

- [1] Art. 3 Ustawy Prawo Budowlane (stan na maj 2024 r.)
- [2] Art. 73 Ustawy Prawo Budowlane (stan na maj 2024 r.)
- [3] Główny Urząd Nadzoru Budowlanego - Katastrofy budowlane w latach 2004÷2022, Warszawa, 2005-2023 (stan na maj 2024 r.)
- [4] Biecek P.: Przewodnik po pakiecie R. Oficyna Wydawnicza GIS, Wrocław 2017.
- [5] Biecek P.: Analiza danych z programem R. Modele liniowe z efektami stałymi, losowymi i mieszanymi. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2013.
- [6] Crawley M.: The R Book. Willey-Blackwell, 2012.
- [7] Everitt B., Hothorn T.: A Handbook of Statistical Analyses Using R. Chapman&Hall/CRC Computer Science & Data Analyses, 2010.
- [8] Frąckiewicz H.: Mechanika ośrodków siatkowych. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa, 1970 r.
- [9] Gągolewski M.: Programowanie w języku R. Analiza danych, obliczenia, symulacje. Wydawnictwo Naukowe PWN SA. Warszawa 2016.

- [10] Gillespie C., Lovelace R.: Wydajne programowanie w R. Praktyczny przewodnik po lepszym programowaniu. APN Promise. Warszawa, 2018.
- [11] Gutkowski W.: Regularne konstrukcje prętowe. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa, 1973 r.
- [12] Kaczorek T.: Teoria sterowania, t. II, Państwowe Wydawnictwa Naukowe, Warszawa, 1981 r.
- [13] Koronacki J., Mielniczuk J.: Statystyka dla studentów kierunków technicznych i przyrodniczych. Wydawnictwo WNT, Warszawa, 2018.
- [14] Krzysztofiak M., Urbanek D.: Metody statystyczne. Państwowe Wydawnictwo Naukowe. Warszawa, 1977.
- [15] Krzyśko M.: Statystyka matematyczna. Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu Adama Mickiewicza w Poznaniu. Poznań, 1996.
- [16] Levy H., Lessman F.: Równania różnicowe skończone. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa, 1966 r.
- [17] Luszniwicz A.: Statystyka ogólna. Państwowe Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa, 1987.
- [18] Łasecka-Plura M., Rakowski J.: Metoda równań różnicowych w analizie układów jednowymiarowych z zaburzeniami dyskretyzacji. [W] Trwałość budynków i budowli. Praca zbiorowa pod redakcją Tomasza Błaszczyńskiego. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław 2012 r.
- [19] Mikołajczyk J.: The relationship between the type of structure and the number of construction disasters. Czasopismo MEBUTRA 3/2025, s. 30÷43, ISSN 3071-9216.
- [20] Mikołajczyk J.: The correlation between the population and number of construction disasters. Czasopismo MEBUTRA 3/2025, s. 44÷55, ISSN 3071-9216.
- [21] Norma PN-EN 206-1: 2003. Beton. Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność.
- [22] Norma PN-EN 196-2: 1996. Metody badania cementu. Analiza chemiczna cementu.
- [23] Norma PN-EN 196-21: 1997. Metody badania cementu. Oznaczenie zawartości chlorków, dwutlenku węgla i alkaliów w cemencie.
- [24] Norma PN-EN 196-21/Ak.: 1997. Metody badania cementu. Oznaczenie zawartości chlorków, dwutlenku węgla i alkaliów w cemencie.
- [25] Norma PN-EN 197-1: 2002. Cement. Część 1. Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku.
- [26] Norma PN-EN 1744-1. Badania chemicznych właściwości kruszyw. Analiza chemiczna.
- [27] Ściślewski Z.: Ochrona konstrukcji żelbetowych. Wydawnictwo Arkady, Warszawa, 1999.
- [28] Żakowski W., Kołodziej W.: Matematyka cz. II. Analiza matematyczna. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2003.

Hard-facing as a method of regenerating railway or tram turnouts

mgr inż. Mariusz Rusin

Bydgoszcz University of Science and Technology

Faculty of Mechanical Engineering

<https://orcid.org/0009-0006-4358-3375>

corresponding e-mail: rusin-mariusz@wp.pl

dr inż. Jarosław Mikołajczyk

State University of Applied Sciences in Piła

Department of Mechanical Engineering

ul. Podchorążych 10, Piła, Poland

<https://orcid.org/0000-0001-9196-0039>

corresponding e-mail: jmikolajczyk@ans.pila.pl

Abstract: The paper presents problems connected with the repair and assessment of the condition of a railway track. As a repair method discussed is the process of hard-facing of railway turnouts. The paper states that both the rolling stock and railway infrastructure constitute one whole thing for the proper operation of the railway communication system and should not be discussed separately. Both interact with each other, i.e., fast trains will not run fast if there is no appropriate infrastructure for them and vice versa.

Key words: rolling stock, railway infrastructure, railway tracks, metal application, metal melting, metal surfacing

1. Introduction

Some components of installations have layers of molten metal put on them that have different chemical and mechanical properties than the base metal. Other components worn out by abrasion are replaced with the same metal from which the component is made.

The application process is divided into fusing and hard-facing. Fusing is a process in which layers applied are from a metal other than the metal from which the installation or unit assembly is made. For example, acid tanks are often made from low-carbon steel and then beads of molten lead wire are laid side by side on the inside using an oxy-acetylene torch. In this way, the lead-coated inner walls form a single unit that is resistant to corrosion by acids, and these tanks can work in negative pressure chemical installations.

Cast iron parts damaged by corrosion or abrasion are filled with brass by fusing, e.g. water turbine blades, pump pistons.

And hard-facing is the process of applying onto parts the material that is the same or similar to the native material. The applied layer is fused in the base material. The thickness of the padding weld and its properties depend on the chemical composition of the padding weld and thermal treatments applied during and after the hard-facing. The elements welded by hard facing may be made of steel, cast iron, non-ferrous metals or plastics. Hard-facing is used when making new parts and regenerating worn ones.

You can weld using a gas flame. This method is used to pad, inter alia, tools designed for crushing stones and coal and those working in the ground, such as excavator teeth, using an acetylene-oxygen flame as the heat source.

Tungsten carbides are characterized by very high hardness and high melting temperature. These carbides are used to pad geological drilling teeth, and they are contained in the steel matrix because they do not melt in a gas flame.

Nowadays, widely used is hard-facing with coated electrodes. To remove material losses caused by corrosion or wear due to friction used are electrodes whose filler metal is similar to that of the native material, these are low-alloy or high-alloy electrodes.

At present there are various types of electrodes produced for hard-facing of cold-work tools, hot-work tools and cutting tool.

During manual hard-facing an appropriate technique for laying individual beads must be used to avoid excessive thermal deformations. Padding of shafts and journals should be carried out so that the internal stresses are equalized. For this purpose, the individual beads should be put on particular points around the shaft circumference, as shown in Fig. 1.

Hard-facing of surfaces damaged by corrosion is performed with the same filler metal as the native material. Before hard-facing, the surface should be cleaned with a steel metal brush or a hand grinder. The surfacing by welding should be carried out slowly to avoid bulging of the padded surface.

The padded surface should have an ellipse or circle shape, as shown in Fig. 2.

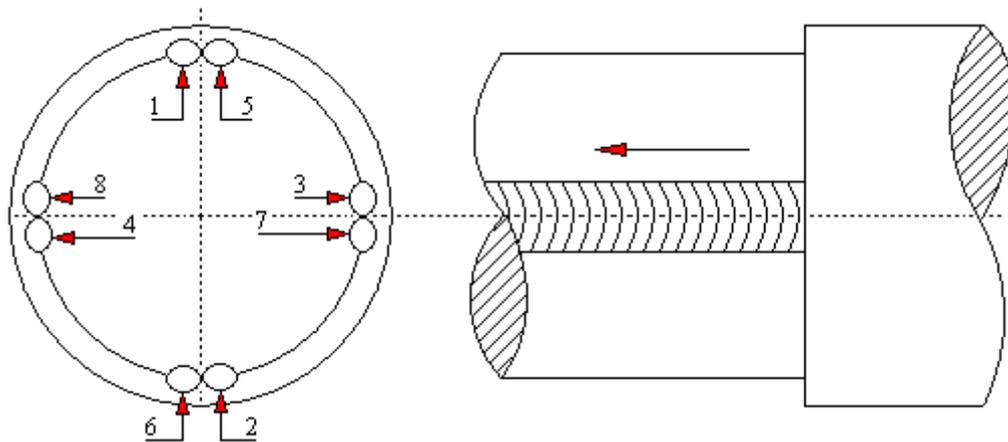


Fig. 1. The sequence of putting beads when hard-facing shaft journals

Surfaces padded in the shape of a square or rectangle are during hard-facing the cause of concentration of large internal stresses in the native material, which may result in dimensional deformations or, in special cases, even cracks.

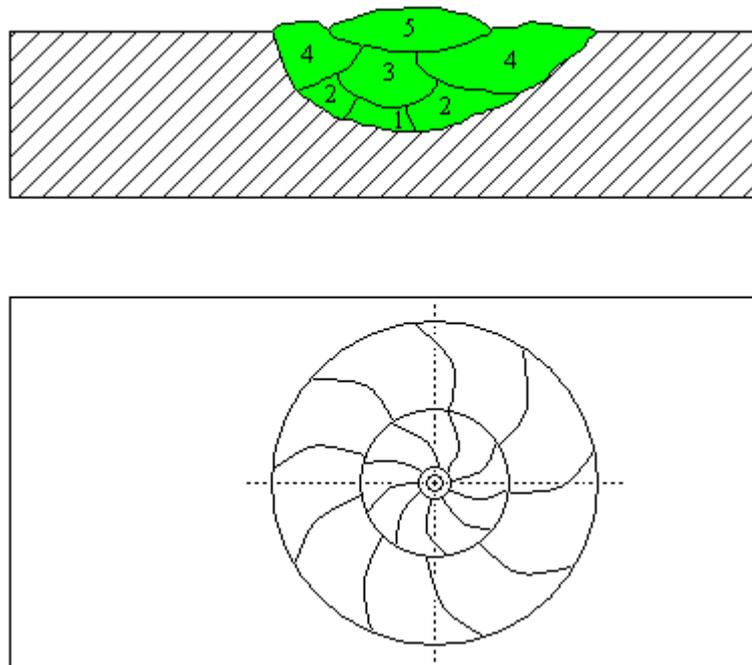


Fig. 2. Hard-facing of deep surface damage

Hard-facing of large surfaces, for example in boilers or corroded tanks, is carried out as shown in Fig. 3. On the cleaned surface, a chessboard is marked with chalk and the individual fields are filled in in the order shown in the drawing. In this way one avoids stress concentrations that could result in dimensional distortions and deformation. After hard-facing, sharp transitions between the edges of the padding weld and the native material should be ground down.

Hard-facing with critical arc is used for larger cylindrical or flat surfaces (Fig. 3). This method is used for hard-facing of steel hot rolling mills, railway wheels of wagons and overhead cranes. Acid-resistant steel wire is used for hard-facing with critical arc of the inner surfaces of the boiler drums intended for acids. The hard-facing is performed in the horizontal position using automatic welding machines for critical arc welding [20, 21, 22, 23, 24, 55, 181, 182, 183, 184, 185, 188, 189].

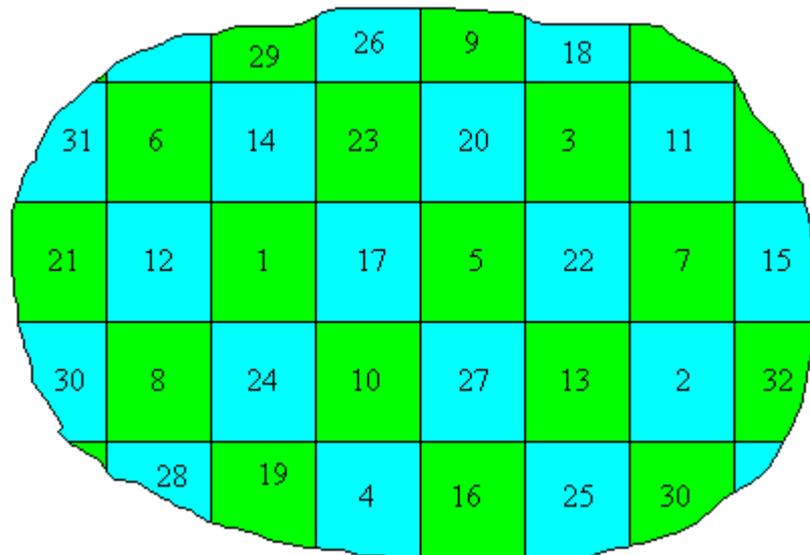


Fig. 3. Sequence of hard-facing large surfaces

2. Hard-facing of rail turnouts

The railway surface should constitute a stable track enabling the use of the technical and operational parameters of the line while maintaining the smooth running criteria and using the permissible geometric parameters specified in the relevant standards and specifications on railway interoperability, taking into account the permitted defects in the conditions of changing operational parameters [1, 2, 3, 4, 5, 9, 12, 18].

The components of a railway track include, inter alia:

- rails;
- sleepers;
- turnout sleepers;
- connectors;
- turnouts;
- equalization devices;
- bumper blocks;
- ballast.

A properly constructed and properly maintained railway line should last between 20 and 30 years.

Rail damage can occur through many factors including rolling mill wheels in steel mills, passing vehicles with deformed wheels (flat spots), or contamination on the rail surfaces. Sand is dangerous to railway tracks because it is hard. Sand can enter rail tracks in a number of ways including through contaminated rail breakstone and from the system of sanders in locomotives. Sand can also get onto the tracks during loading, transporting and unloading of sand and gravel, when it constitutes the transported goods. Sand can also be blown by the wind, especially when the line runs along sandy sea shores. The moisture contained in the air has a certain viscosity that allows sand particles to stay on the surface of the rails. Fig. 4 shows crushed breakstone contaminated with sand from unloaded self-unloading wagons.



Fig. 4. Sand-contaminated rail track

When a rail vehicle passes over a dirty rail, sand at the contact point between the wheel and its surface destroys the structure of the rail like sandpaper. Places particularly susceptible to such damage include railway platforms and sections in front of semaphores where locomotives use sand to start moving and prevent the wheels from slipping. Fig. 5 shows damage to the rail caused by sand contamination and passage of rail vehicles.

In the initial stages of damage, rail can be rebuilt by grinding with the use of a rail grinder, which then evens out any unevenness and minimizes further wear of the rail. This process involves removing minor surface defects that could lead to more serious damage.



Fig. 5. Consequences of track sand-contamination

If the fault is not repaired in time, it will become worse during rainfall. Water is forced into tiny cracks under high pressure by the rolling stock wheels, which leads to the formation of micro-cracks. When the damage to the rail head is too extensive, it is necessary to cut out the damaged section and install a new rail. Replacing the rail generates high costs and makes it impossible to have rail traffic during the repair.

Another typical damage to the railway surface caused by rail vehicles is damage of turnouts. What is most often damaged in a turnout is the switch point and actual frog point. The switch point cannot be repaired, it must be replaced with a new element. The actual frog point must have specific dimensions for lowering the height of the frog point relative to the

wing rails. Correct repair involves hard-facing of the material to the surface using welding wire. Fig. 6 shows the surfacing zones. These zones are used to prevent overheating and changes in the structure of material in the repairable steel element.



Fig. 6. Railway turnout frog with visible surfacing zones
S1, S2, S3, S4 – individual surfacing zones

The next stage of repair is rough grinding of the pad-welded material using railway grinders designed for turnouts. The ground material is subjected to PT penetration testing. A sample of the dye penetrant is applied to the cleaned element. The penetrant penetrates the structure of the metal into its crevices. After a specified time, we apply a developer to the tested surface. The color change to red indicates places where there is a discontinuity in the metal structure on the surface (Fig. 7). If such red spots appear on the surface they should be sanded down again and repair work should be repeated [56÷180].

This type of repair is performed directly on the railway or tram track. This means that during repair work the track must be closed to train and tram traffic. The time it takes to complete a repair depends mainly on the scale of the repair. Most often this time takes up to three hours, depending on the availability of track closures and the complexity of the damage.

After the entire repair cycle, a detailed quality inspection is carried out to verify the correctness of the work performed. It usually includes the measurement of geometric parameters of repaired elements, assessment of the quality of welding and checking compliance with applicable regulations in this area.



Fig. 7. Railway turnout frog – PT penetrant testing
S1 – surface showing discontinuity of the surface structure

To assess the technical condition of the repaired railway turnout frog point, used is a card with the reference dimensions of the frog point lowering. Measurements are taken at characteristic points using a steel ruler, feeler gauge, millimeter wedge, and caliper. Fig. 8 shows examples of inspection and measurement locations of the railway turnout frog point. The required measurement accuracy is 0.1 mm. Of course, one must have appropriate license to carry out the acceptance of repair work.

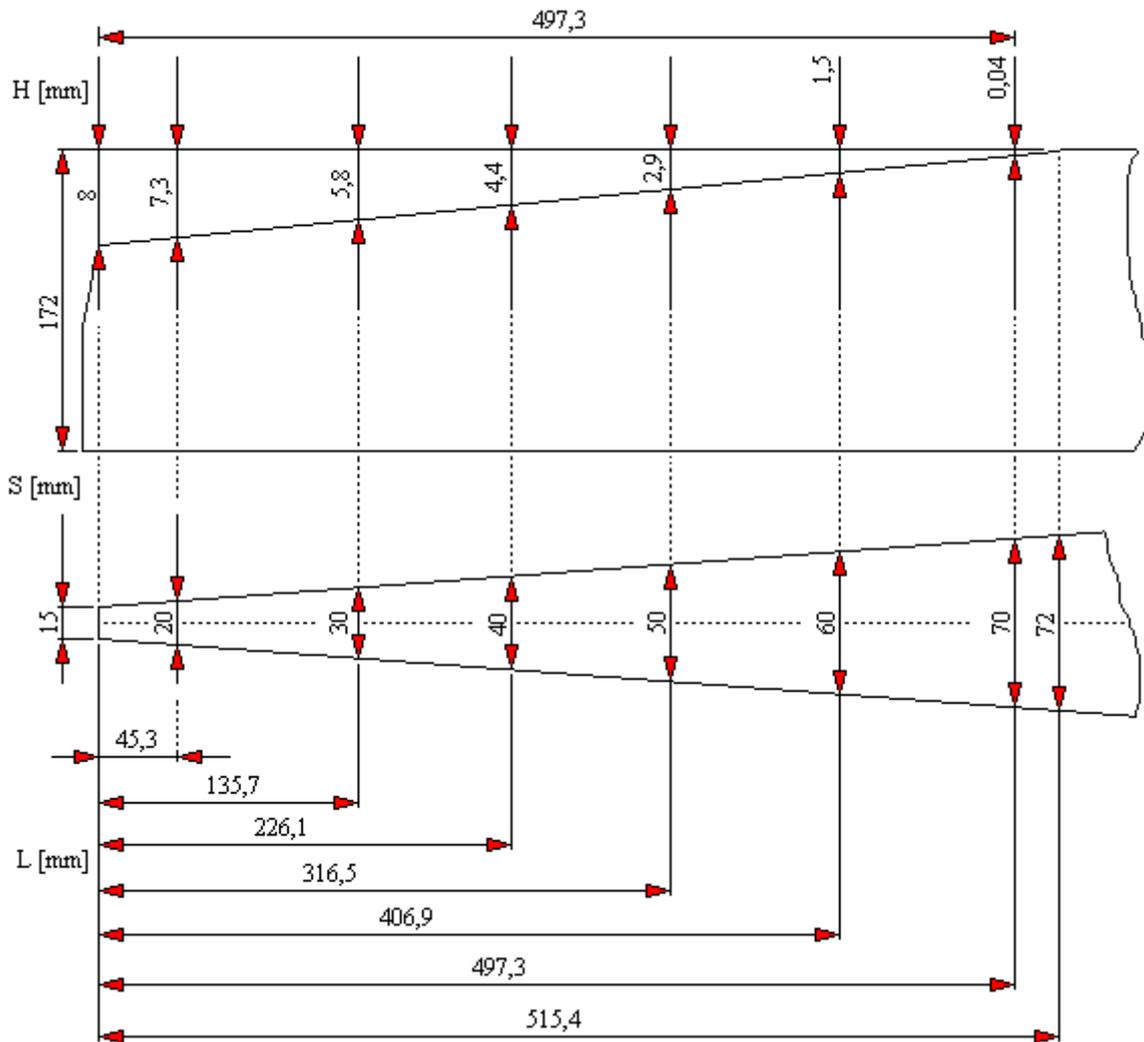


Fig. 8. Examples of reference dimensions for lowering the height of the railway turnout frog point

H – level of the railway turnout frog point; S – width of the railway turnout frog point; L – distance of characteristic points from the edge of the railway turnout frog point

3. Conclusion

Railway and tram infrastructure, i.e. the track and related elements, requires special supervision. Railway rails which are exposed to enormous mechanical and dynamic loads, temperature changes and atmospheric factors, must be regularly inspected and repaired. The entire process of repairing railway and tram infrastructure is complicated, and maintenance works are performed by specialized teams. Due to long service life of railway infrastructure, each repair is treated as an important element ensuring further safety and efficient use, and this involves rigorous requirements regarding the quality of the work performed [15, 16, 29, 186].

4. Literature

1. Bałuch H.: Odkształcenia trwałe rozjazdów w profilu na tle odkształceń torów. *Przegląd Kolejowy Drogowy*, 1970, Nr 8.
2. Bałuch H.: Zróżnicowanie odkształceń sprężystych nawierzchni S-60. *Przegląd Kolejowy Drogowy*, 1973, Nr 20.
3. Bałuch H.: Diagnostyka nawierzchni kolejowej. Wydawnictwa Komunikacyjne i Łączności, Warszawa, 1978.
4. Bałuch H.: Rozkłady naprężeń mierzonych w stopkach szyn i ich wpływ na obliczenia naprężeń maksymalnych. *Drogi Kolejowe*, 1979, Nr 10.
5. Bałuch H.: Doskonalenie napraw nawierzchni i zasad utrzymania dróg kolejowych w świetle ostatnich badań naukowych. *Drogi Kolejowe*, 1987, Nr 6.
6. Bałuch H. i inni: Metoda oceny stanu toru i planowania napraw powierzchni na podstawie wyników pomiarów drezyny EM-120. *Prace CNTK*, Nr 32, 14/12, Warszawa 1988.
7. Basiewicz T.: O strukturze tzw. współczynnika dynamicznego szybkości nawierzchni kolejowej. *Przegląd Drogowy*, 1967.
8. Basiewicz T.: Nawierzchnia kolejowa z podkładami betonowymi. Wydawnictwa Komunikacyjne i Łączności, Warszawa, 1969.
9. Basiewicz T., Bałuch H. i inni: Przystosowanie kolei do zwiększonych szybkości i dużych przewozów. Wydawnictwa Komunikacyjne i Łączności, Warszawa, 1969.
10. Bogdaniuk B.: Badania nierówności powierzchni tocznej szyn. *Drogi Kolejowe*, 1981r., Nr 5-6.
11. Bednarek W.: Analiza wpływu współczynników sprężystego podłoża dwuparametrowego na ugięcie podkładu kolejowego. *Zeszyty Naukowo-Techniczne STTK RP*, Oddział w Krakowie, Nr 2 (101), Kraków, 2013.
12. Bukowski M., Gradkowski K.: Dodatkowe obciążenia podtorza od mikrogeometrycznych nierówności podłużnych toru. *Drogi Kolejowe*, 1987, Nr 4-5.
13. Ciesielski R.: Ocena szkodliwości wpływów dynamicznych w budownictwie. Wydawnictwo Arkady, Warszawa, 1973.
14. Czyczuła W.: Możliwości przeprowadzenia przyspieszonej stabilizacji podsypki. *Drogi Kolejowe*, 1989, Nr 9.
15. Czyczuła W., Sromicki K., Ptak T.: Ocena możliwości wykorzystania pomiarów wskaźnika spokojności biegu pociągów do badania stanu toru. *Drogi Kolejowe*, 1988, Nr 3.
16. Czyczuła W.: Eksploatacyjna stabilność drogi kolejowej. Monografia 126. Zakład Graficzny Politechniki Krakowskiej im. Tadeusza Kościuszki, Kraków, 1992.
17. Dobrowolski Z.: Podręcznik spawalnictwa. Wydawnictwo WNT, Warszawa 1978.
18. Friszman M. A.: Tor kolejowy i jego współpraca z pojazdami. Wydawnictwa Komunikacyjne i Łączności, Warszawa, 1983.
19. Gryczmański M., Kłosek K., Sękowski J.: Efektywne metody wzmocnienia podtorza kolejowego na terenach górniczych. *Drogi Kolejowe*, 1987, Nr 12.
20. Hillar J., Jarmoszuk S.: Technologia. Spawalnictwo. Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne, Warszawa 1987.
21. Hillar J.: Spawanie gazowe. Wiadomości specjalistyczne. Wydawnictwo ZZDZ, nr M-120.
22. Jarmoszuk S.: Spawanie elektryczne. Wiadomości specjalistyczne. Wydawnictwo ZZDZ, nr M-121.
23. Jarmoszuk S.: Spawanie w osłonie argonu elektrodą wolframową. Wydawnictwo ZZDZ, nr M-158.

24. Jarmoszuk S.: Spawanie w osłonie dwutlenku węgla. Wydawnictwo ZZDZ, nr M-157.
25. Jędrzejczyk D., Mikołajczyk J.: Defining the correlation between the cutting speed and roughness parameter Rz. **W:** MIK-21 : Międzynarodowa Innowacyjność i Konkurencyjność w XXI wieku : aspekty innowacyjne / redakcja naukowa Radosław Luft. Lublin : Fundacja Innowacji i Nowoczesnych Technologii INOTECH, 2022. Radom : nakładem Instytutu Naukowo-Wydawniczego "Spatium", 2022. **Szczegóły:** s. 39-46, **p-ISBN:** 978-83-67033-43-5; **e-ISBN:** 978-83-67033-44-2; <http://inw-spatium.pl/wp-content/uploads/2022/09/MIK-21-2022-Aspekty-innowacyjne-2.pdf>
26. Jeske T., Prздеcki T., Rosiński B.: Mechanika gruntów. Państwowe Wydawnictwa Naukowe, Warszawa, 1966.
27. Kanis J., Urda J.: Socio-Economic Benefits of the Project Diagnostic Vehicle for Rail Defectoscopy in the Slovak Republic. ISSN 2352-1465, Year 2024.
28. Kisiel F., Dmitruk S., Lysik B.: Zarys reologii gruntów. Wydawnictwo Arkady, Warszawa, 1969.
29. Kisilowski J. i inni: Modelowanie i analiza dynamiki układu mechanicznego tor-pojazd. Państwowe Wydawnictwa Naukowe, Warszawa, 1982.
30. Latoś H., Mikołajczyk J.: Effect of partial wear of the tool point on the selected indicator of the machining process. **W:** Logistyka w ratownictwie 2023 / pod redakcją Andrzeja Chudzikiewicza i Anny Stelmach. Radom: Instytut Naukowo-Wydawniczy "Spatium", 2023, Poland. **Szczegóły:** s. 195-210, **p-ISBN:** 978-83-67033-95-4; **e-ISBN:** 978-83-67033-96-1.
31. Latoś H., Mikołajczyk J.: Thickness of the machined layer at milling with single-edge straight blades with an angle of $\lambda_s \neq 0^\circ$. **W:** MIK-21 : Międzynarodowa Innowacyjność i Konkurencyjność w XXI wieku : Aspekty innowacyjne / redakcja naukowa dr Łukasz Wojtowicz. Lublin: Fundacja Innowacji i Nowoczesnych Technologii INOTECH : nakładem Instytutu Naukowo-Wydawniczego "Spatium", 2023, Poland. **Szczegóły:** s. 23-27, **p-ISBN:** 978-83-67033-89-3; **e-ISBN:** 978-83-67033-90-9.
32. Latoś H., Mikołajczyk J., Konarski J., Mikołajczyk T.: Turning using self-induced vibration. **W:** MIK-21 : Międzynarodowa Innowacyjność i Konkurencyjność w XXI wieku : aspekty innowacyjne / redakcja naukowa dr Łukasz Wojtowicz, 2023, Poland. **Szczegóły:** s. 187-200, **p-ISBN:** 978-83-67033-89-3; **e-ISBN:** 978-83-67033-90-9
33. Latoś H., Mikołajczyk J.: Vibration in machining. **W:** Logistyka w ratownictwie 2023 / pod redakcją Andrzeja Chudzikiewicza i Anny Stelmach. Radom: Instytut Naukowo-Wydawniczy "Spatium", 2023, Poland. **Szczegóły:** s. 187-194, **p-ISBN:** 978-83-67033-95-4; **e-ISBN:** 978-83-67033-96-1
34. Latoś H., Mikołajczyk J.: The effect of feed rate on the roughness of machined surface. **W:** Szkoła Logistyki 2024 / redakcja naukowa Janusz Zawiła-Niedźwiecki, Adam Płaczek. Radom: Instytut Naukowo-Wydawniczy "Spatium", 2024, Poland. **Szczegóły:** s. 217-226, **p-ISBN:** 978-83-68026-07-8; **e-ISBN:** 978-83-68026-08-5.
35. Makowski J.: Wzmocnienie torowiska linii kolejowych przeznaczonych do jazdy z dużą szybkością. Problemy Kolejnictwa, 1977, Wydawnictwo Komunikacyjne i Łączności, Warszawa.
36. Megna G., Bracciali A., Mandal N.: Design, wheel-rail interaction and testing of an innovative reinforced smooth transition insulated rail joint. ISSN 0043-1648, Year 2023.
37. Michalski R.: Zgrzewanie oporowe. Poradnik. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne. Warszawa 1970.
38. Mikołajczyk J.: Wpływ dodatków smarowych na transformację warstwy wierzchniej. Piła : Wydawnictwo Państwowej Wyższej Szkoły Zawodowej im. Stanisława Staszica, 2017r., Poland. 215, [1] s., **p-ISBN:** 978-83-62617-76-0; www.ans.pila.pl

39. Mikołajczyk J.: Analiza statystyczna zmiany poboru mocy podczas procesu zużywania. Statistical analysis of the power variation of tribotester as a result of the wear process. **Źródło:** Autobusy. Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe. **Szczegóły:** 2019, nr 10-11, s. 83-88, **p-ISSN:** 1509-5878; **e-ISSN:** 2450-7725;
<http://yadda.icm.edu.pl/yadda/element/bwmeta1.element.baztech-21189602-884a-4d1a-bb60-9edaeae4af8d>
40. Mikołajczyk J.: Influence of consumables on the amount of power consumption of kinematic vapor of conformal contact. Wpływ PE na pobór mocy pary kinematycznej o styku konforemnym. **Źródło:** Postępy w Inżynierii Mechanicznej [Developments in Mechanical Engineering]. **Szczegóły:** 2019, nr 13 (7), s. 39-50, **p-ISSN:** 2300-3383; Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu technologiczno-Przyrodniczego im. J. J. Śniadeckich w Bydgoszczy, Poland.
<http://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-2faf200b-3010-4192-9fd0-062f53b49d38>
41. Mikołajczyk J.: Statistical analysis of the mass variation of samples as a result of the wear process. Analiza statystyczna zmiany masy próbek w wyniku procesu zużywania. **Źródło:** Postępy w Inżynierii Mechanicznej [Developments in Mechanical Engineering]. **Szczegóły:** 2019, nr 13 (7), s. 51-61, **p-ISSN:** 2300-3383; Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego im. J.J. Śniadeckich w Bydgoszczy, Poland.
<http://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-2faf200b-3010-4192-9fd0-062f53b49d38>
42. Mikołajczyk J.: Tribotestery : budowa i przeznaczenie. Piła: Wydawnictwo Państwowej Wyższej Szkoły Zawodowej im. Stanisława Staszica, 2019, Poland. **Szczegóły:** 160 s., **e-ISBN:** 978-83-62617-90-6;
<https://wydawnictwo.pwsz.pila.pl/files/Tribotestery.pdf>
43. Mikołajczyk J.: Determining the energy validity of the Kostetsky's hypothesis on the basis of models for relative motion velocity $v = 0.08$ m/sec. **Źródło:** Developments in Mechanical Engineering. **Szczegóły:** 2020, nr 16 (8), s. 17-29, **p-ISSN:** 2720-0639; Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego im. J.J. Śniadeckich w Bydgoszczy, Poland.
DOI: [10.37660/dme.2020.16.8.2](https://doi.org/10.37660/dme.2020.16.8.2)
44. Mikołajczyk J.: Finding the correlation between wear of samples kinematic pair of conformal contact and electric power consumption. **Źródło:** Postępy w Inżynierii Mechanicznej [Developments in Mechanical Engineering]. **Szczegóły:** 2020, nr 15 (8), s. 59-68, **p-ISSN:** 2300-3383; Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego im. J.J. Śniadeckich w Bydgoszczy, Poland.
[https://dme.utp.edu.pl/art/15\(8\)2020/59.pdf](https://dme.utp.edu.pl/art/15(8)2020/59.pdf)
DOI: [10.37660/dme.2020.15.8.6](https://doi.org/10.37660/dme.2020.15.8.6)
45. Mikołajczyk J.: The effect of temperature lag on the value of power-temperature correlation for frictional pair of conformal contact. **Źródło:** Postępy w Inżynierii Mechanicznej [Developments in Mechanical Engineering]. **Szczegóły:** 2020, nr 15 (8), s. 79-86, **p-ISSN:** 2300-3383; Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego im. J.J. Śniadeckich w Bydgoszczy, Poland.
[https://dme.utp.edu.pl/art/15\(8\)2020/79.pdf](https://dme.utp.edu.pl/art/15(8)2020/79.pdf)
DOI: [10.37660/dme.2020.15.8.8](https://doi.org/10.37660/dme.2020.15.8.8)
46. Mikołajczyk J.: Określenie na podstawie modeli zmiany masy próbek w wyniku procesu zużywania. **W:** Szkoła Logistyki 2021 / redakcja naukowa Janusz Zawila-Niedźwiecki, Piotr Korneta. **Adres wydawniczy:** Radom : Instytut Naukowo-Wydawniczy "Spatium", 2021. **Szczegóły:** s. 167-174, Poland; **p-ISBN:** 978-83-66550-75-9; **e-ISBN:** 978-83-66550-89-6.

47. Mikołajczyk J.: A method of determining mathematical models of a seizure test of friction pairs. **W:** MIK-21 : Międzynarodowa Innowacyjność i Konkurencyjność w XXI wieku : aspekty innowacyjne / redakcja naukowa Radosław Luft. Lublin : Fundacja Innowacji i Nowoczesnych Technologii INOTECH, 2022. Radom : nakładem Instytutu Naukowo-Wydawniczego "Spatium", 2022. **Szczegóły:** s. 7-24, **p-ISBN:** 978-83-67033-43-5; **e-ISBN:** 978-83-67033-44-2.

<http://inw-spatium.pl/wp-content/uploads/2022/09/MIK-21-2022-Aspekty-innowacyjne-2.pdf>

48. Mikołajczyk J.: Friction machines. Piła: Wydawnictwo Akademii Nauk Stosowanych im. Stanisława Staszica, 2022, Poland. **Szczegóły:** 488 s., **e-ISBN:** 978-83-62617-96-8.

https://wydawnictwo.ans.pila.pl/files/FRICTION_MACHINES.pdf

49. Mikołajczyk J., Jędrzejczyk D.: Określenie korelacji między prędkością skrawania a parametrem chropowatości Ra. **Źródło:** Obróbka Metalu. **Szczegóły:** 2022, nr 3, s. 11-15, **p-ISSN:** 2081-7002; <https://obrobkametalu.tech/>

50. Mikołajczyk J.: Determination of the modified coefficient of variation from the number of samples. **W:** MIK-21 : Międzynarodowa Innowacyjność i Konkurencyjność w XXI wieku : Aspekty innowacyjne / redakcja naukowa dr Łukasz Wojtowicz. Lublin: Fundacja Innowacji i Nowoczesnych Technologii INOTECH : nakładem Instytutu Naukowo-Wydawniczego "Spatium", 2023, Poland. **Szczegóły:** s. 111-122, **p-ISBN:** 978-83-67033-89-3; **e-ISBN:** 978-83-67033-90-9.

51. Mikołajczyk J.: Effect of cutting speed on the shape of the machined surface profile. **Źródło:** Mebutra. **Szczegóły:** 2023, nr 1, s. 47-63, Wydawnictwo Akademii Nauk Stosowanych im. S. Staszica w Pile, Piła 2023, Poland.

<https://online.fliphtml5.com/vliuj/yunw/p=48>

52. Mikołajczyk J.: Friction Machines II. Piła: Wydawnictwo Akademii Nauk Stosowanych im. Stanisława Staszica w Pile, 2023, Poland. **Szczegóły:** 598 s., **p-ISBN:** 978-83-67684-00-2; https://wydawnictwo.ans.pila.pl/files/FRICTION_MACHINES_V_ANS_PILA.pdf

53. Mikołajczyk J.: Temperature as a parameter for assessing the work of a friction pair. **W:** Szkoła Logistyki 2023 / redakcja naukowa Janusz Zawila-Niedźwiecki, Katarzyna Białczak. Radom: Instytut Naukowo-Wydawniczy "Spatium", 2023, Poland. **Szczegóły:** s. 101-107, **p-ISBN:** 978-83-67033-75-6; **e-ISBN:** 978-83-67033-58-9.

54. Mikołajczyk J.: A method of determining mathematical models of a seizure test of friction pairs. **W:** MIK-21 : Międzynarodowa Innowacyjność i Konkurencyjność w XXI wieku : aspekty innowacyjne / redakcja naukowa Radosław Luft. Lublin : Fundacja Innowacji i Nowoczesnych Technologii INOTECH, 2022. Radom : nakładem Instytutu Naukowo-Wydawniczego "Spatium", 2022. **Szczegóły:** s. 7-24, **p-ISBN:** 978-83-67033-43-5; **e-ISBN:** 978-83-67033-44-2.

<http://inw-spatium.pl/wp-content/uploads/2022/09/MIK-21-2022-Aspekty-innowacyjne-2.pdf>

55. Mistur L.: Spawanie gazowe i elektryczne. Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne. Warszawa 1983.

56. Norma PN-86/H-84018. Stal niskostopowa o podwyższonej wytrzymałości. Gatunki.

57. Norma PN-75/H-84019. Stal węglowa konstrukcyjne wyższej jakości ogólnego przeznaczenia. Gatunki.

58. Norma PN-72/H-84020. Stal węglowa konstrukcyjna zwykłej jakości ogólnego przeznaczenia. Gatunki.

59. Norma PN-75/H-84024. Stal do pracy przy podwyższonych temperaturach. Gatunki.

60. Norma PN-71/H-86020. Stal odporna na korozję (nierdzewna i kwasoodporna). Gatunki.

61. Norma PN-71/H-86022. Stal żaroodporna. Gatunki.

62. Norma PN-75/M-69703. Spawalnictwo. Wady złączy spawanych. Nazwy i określenia (zmiana 1, Biul. PKNiM nr 9/76, poz. 85).
63. Norma PN-78/M-69760. Spawalnictwo. Badania skłonności do tworzenia zimnych pęknięć w złączach spawanych łukowo.
64. Norma PN-79/M-69761. Spawalnictwo. Metody badań skłonności do tworzenia pęknięć krystalizacyjnych w spoinach stalowych złączy spawanych łukowo.
65. Norma PN-72/M—69770. Radiografia przemysłowa. Radiogramy spoin czołowych w złączach doczołowych ze stali. Wymagania jakościowe i wytyczne wykonania.
66. Norma PN-74/M-69771. Spawanie. Wady złączy doczołowych wykrywane badaniami radiograficznymi. Nazwy i określenia (zmiana 1, Biul. PKNiM nr 9/76, poz. 85).
67. Norma PN-87/M-69772. Spawalnictwo. Klasyfikacja wadliwości złączy spawanych na podstawie radiogramów.
68. Norma PN-85/M-69775. Spawalnictwo. Wadliwość złączy spawanych. Oznaczenia klasy wadliwości na podstawie oględzin zewnętrznych.
69. Norma PN-77/M-70001. Przemysłowe badania radiograficzne. Wskaźniki jakości obrazu. Wymagania.
70. Norma PN-75/M-70020. Badania nie niszczące. Metody radiologiczne. Nazwy i określenia.
71. Norma PN-76/M-70050. Badania nie niszczące. Metody ultradźwiękowe. Nazwy i określenia.
72. Norma PN-75/M-70051. Badania nie niszczące metodami ultradźwiękowymi. Wzorzec kontrolny W1.
73. Norma PN-74/M-70052. Badania nie niszczące. Metody penetracyjne. Nazwy i określenia.
74. Norma PN-75/M-70054. Badania nie niszczące metodami ultradźwiękowymi. Wzorzec kontrolny W2.
75. Norma PN-77/M-70055. Badania nie niszczące. Metody ultradźwiękowe. Badanie spoin w złączach doczołowych.
76. Norma PN-75/M-70056. Badania nie niszczące metodami ultradźwiękowymi. Wzorce mikrosekundowe.
77. Norma PN-86/M-69707. Spawalnictwo. Zasady wykonywania próbnych złączy spawanych lub zgrzewanych.
78. Norma PN-78/M-69710. Spawalnictwo. Próba statyczna rozciągania doczołowych złączy spawanych lub zgrzewanych.
79. Norma PN-80/M-69714. Spawalnictwo. Próba statyczna rozciągania złączy ze spoinami pachwinowymi.
80. Norma PN-57/M-69715. Spawanie. Próba statyczna rozciągania złącza nakładkowego z pachwinowymi spoinami poprzecznymi.
81. Norma PN-57/M-69716. Spawanie. Próba statyczna rozciągania złącza nakładkowego z pachwinowymi spoinami podłużnymi.
82. Norma PN-78/M-69720. Spawalnictwo. Próby zginania doczołowych złączy spawanych lub zgrzewanych.
83. Norma PN-70/M-69733. Spawalnictwo. Próba udarowości złączy spawanych lub zgrzewanych doczołowo.
84. Norma PN-69/M-69734. Próba starzenia stalowych płaskich złączy spawanych doczołowo.
85. Norma PN-58/M-69740. Spawanie. Próba łamania płaskiego złącza doczołowego o grubości powyżej 4 mm.
86. Norma PN-58/M-69741. Spawanie. Próba łamania złącza kąтового ze spoiną pachwinową.

87. Norma PN-58/M-69742. Spawanie. Próba łamania złącza nakładkowego ze spoiną pachwinową.
88. Norma PN-64/M-69751. Próba twardości złączy spawanych i zgrzewanych.
89. Norma PN-76/M-69783. Spawalnictwo. Próby statyczne ścinania i rozciągania zgrzein liniowych.
90. Norma PN-67/M-69790. Próby statyczne rozciągania i ścinania złączy lutowanych.
91. Norma PN-65/M-69013. Spawanie gazowe stali niskowęglowych i niskostopowych. Rowki do spawania.
92. Norma PN-75/M-69014. Spawanie łukowe elektrodami otulonymi stali węglowych i niskostopowych. Przygotowanie brzegów do spawania.
93. Norma PN-73/M-69015. Spawanie łukiem krytym stali węglowych i niskostopowych. Przygotowanie brzegów do spawania.
94. Norma PN-74/M-69016. Spawanie w osłonie dwutlenku węgla stali węglowych i niskostopowych. Przygotowanie brzegów do spawania.
95. Norma PN-65/M-69017. Spawanie argonowe elektroda nietopliwą stali stopowych. Rowki do spawania.
96. Norma PN-67/M-69018. Spawanie żuźłowe stali węglowych i niskostopowych. Rowki do spawania.
97. Norma PN-69/M-69019. Spawanie doczołowe rur stalowych. Rowki do spawania.
98. Norma PN-70/M-69023. Spawanie łukowe stali platerowanych stalą odporną na korozję. Wytyczne projektowania i wykonywania złączy spawanych.
99. Norma PN-70/M-69024. Spawanie łukowe aluminium i jego stopów elektrodą wolframową w osłonie argonu. Przygotowanie brzegów do spawania.
100. Norma PN-70/M-69025. Spawanie gazowe miedzi. Przygotowanie brzegów do spawania.
101. Norma PN-72/M-69026. Spawanie łukowe miedzi w osłonie argonu elektrodą wolframową. Przygotowanie brzegów do spawania.
102. Norma PN-73/M-69027. Spawanie łukowe aluminium i jego stopów elektrodą topliwą w osłonie argonu. Przygotowanie brzegów do spawania.
103. Norma PN-78/M-69028. Spawalnictwo. Spawanie łukowe miedzi w osłonie argonu elektrodą topliwą. Przygotowanie brzegów do spawania.
104. Norma PN-76/M-69070. Spawalnictwo. Urządzenia do mechanizacji spawania. Nazwy i określenia.
105. Norma PN-61/M-69100. Spawalnictwo. Źródła prądu do ręcznego spawania łukowego. Klasyfikacja.
106. Norma PN-75/M-69101. Spawalnictwo. Szpule elektrodowe do automatów i półautomatów spawalniczych. Główne wymiary.
107. Norma PN-75/M-69104. Automaty i półautomaty do spawania łukiem krytym i w osłonie gazów ochronnych elektrodą topliwą. Nazwy i określenia.
108. Norma PN-75/M-69105. Spawalnictwo. Półautomaty spawalnicze do spawania łukowego w osłonie gazu ochronnego elektrodą topliwą. Ogólne wymagania i badania.
109. Norma PN-79/M-69106. Spawalnictwo. Automaty spawalnicze. Ogólne wymagania i badania.
110. Norma PN-83/M-69108. Spawalnictwo. Źródło energii elektrycznej do spawania łukowego. Nazwy i określenia.
111. Norma PN-69/M-69124. Elektrody wolframowe do celów spawalniczych.
112. Norma PN-76/M-69160. Spawalnictwo. Osłony twarzy przed promieniowaniem łuku spawalniczego. Tarcze spawalnicze.
113. Norma PN-80/M-69161. Spawalnictwo. Uchwyty elektrodowe do spawania ręcznego izolowane.

114. Norma PN-79/M-69010. Wyroby z węgla uszlachetnionych. Elektrody spawalnicze.
115. Norma PN-85/E-81106. Spawalnictwo. Jednostanowiskowe transformatory spawalnicze. Wymagania i badania.
116. Norma PN-74/M-69102. Spawalnictwo. Przecinarki do cięcia termicznego. Dokładność odwzorowania.
117. Norma PN-74/M-69103. Spawalnictwo. Przecinarki półautomatyczne do cięcia tlenem stali. Wymagania i badania.
118. Norma PN-80/M-69107. Spawalnictwo. Przecinarki do cięcia termicznego. Nazwy i określenia.
119. Norma PN-80/M-69180. Spawalnictwo. Palniki, oznaczenia i cechowanie.
120. Norma PN-81/M-69181. Spawalnictwo. Dysze palników gazowych. Określenia, podział i oznaczenia.
121. Norma PN-76/M-69182. Spawalnictwo. Palniki do spawania gazowego i cięcia tlenem. Wymagania i badania.
122. Norma PN-75/M-69200. Spawalnictwo. Wytwornice acetylenowe. Podział.
123. Norma PN-76/M-69202. Spawalnictwo. Zawory bezpieczeństwa.
124. Norma PN-75/M-69210. Zbiorniki transportowe do gazów. Barwy rozpoznawcze i oznakowanie.
125. Norma PN-79/M-69221. Butle do gazów. Butle stalowe do gazów.
126. Norma PN-76/M-69222. Butle do gazów. Butle stalowe bez szwu.
127. Norma PN-82/M-69223. Butle do gazów. Gwinty stożkowe. Wymiary i tolerancje.
128. Norma PN-60/M-69224. Butle do gazów. Gwinty Whitwortha o średnicach 21,8 i 24,3 mm.
129. Norma PN-80/M-69225. Butle do gazów. Gwint Whitwortha o średnicy 80 mm.
130. Norma PN-63/M-69226. Butle do gazów. Gwint stożkowy metryczny.
131. Norma PN-67/M-69227. Zawory butlowe do acetylenu VA1.
132. Norma PN-81/M-69228. Butle do gazów. Zawory do butli. Wymagania i badania.
133. Norma PN-81/M-69229. Butle do gazów. Złącza zaworów butlowych.
134. Norma PN-74/M-69240. Reduktory spawalnicze. Główne wskaźniki.
135. Norma PN-80/M-69242. Spawalnictwo. Reduktory do tlenu.
136. Norma PN-77/M-69243. Spawalnictwo. Reduktory butlowe do gazów płynnych.
137. Norma PN-78/M-69244. Spawalnictwo. Reduktory do acetylenu.
138. Norma PN-72/M-69260. Spawalnictwo. Króćce do przyłączenia węży gumowych. Główne wymiary.
139. Norma PN-71/M-69261. Spawalnictwo. Przyłączki i złączki do węży gumowych.
140. Norma PN-76/M-69774. Spawalnictwo. Cięcie gazowe stali węglowych o grubości 5÷100 mm. Jakość powierzchni cięcia.
141. Norma PN-63/M-74905. Opaski zaciskowe przewodów giętkich.
142. Norma PN-77/C-94250.47. Węże gumowe. Węże tłoczne gumowe ze wzmocnieniem tekstylnym do tlenu.
143. Norma PN-77/C-94250.48. Węże gumowe. Węże tłoczne ze wzmocnieniem tekstylnym do acetylenu.
144. Norma BN-68/4122-02. Zawory butlowe do tlenu technicznego VT1.
145. Norma PN-67/M-69350. Topniki spawalnicze. Klasyfikacja.
146. Norma PN-81/M-69354. Spawalnictwo. Topniki do gazowego spawania miedzi, mosiądźów, brązów, aluminium i stopów aluminium.
147. Norma PN-73/M-69355. Topniki do spawania i napawania łukiem krytym.
148. Norma PN-67/M-69356. Topniki do spawania żuźłowego.
149. Norma PN-76/M-69400. Spoiwa cynowo-ołowiowe do lutowania miękkiego. Gatunki.
150. Norma PN-80/M-69411. Spawalnictwo. Spoiwa srebrne do lutowania.

151. Norma PN-73/M-69412. Spawalnictwo. Druty do gazowego i łukowego metalizowania natryskowego.
152. Norma PN-70/M-69413. Spoiwa miedziane, mosiężne, brązowe i niklowe do spawania i lutowania.
153. Norma PN-75/M-69414. Spawalnictwo. Spoiwa do spawania aluminium i stopów aluminium.
154. Norma PN-77/M-69420. Spawalnictwo. Spoiwa stalowe do spawania i napawania.
155. Norma PN-74/M-69430. Spawalnictwo. Elektrody stalowe otulone do spawania i napawania. Ogólne wymagania i badania.
156. Norma PN-77/M-69433. Spawalnictwo. Elektrody stalowe otulone do spawania stali węglowych i niskostopowych.
157. Norma PN-74/M-69434. Elektrody otulone do spawania stali niskostopowych przeznaczonych do pracy w podwyższonych temperaturach.
158. Norma PN-79/M-69435. Spawalnictwo. Elektrody stalowe do spawania stali wysokostopowych.
159. Norma PN-74/M-69436. Elektrody stalowe do napawania.
160. Norma PN-57/M-69451. Spawanie. Spoiwa. Pręty żeliwne.
161. Norma PN-64/M-69708. Spawalnictwo. Próby mechaniczne stopiwa.
162. Norma PN-57/M-69712. Spawanie. Próba statyczna rozciągania materiału spoiny.
163. norma PN-58/M-69717. Spawanie gazowe. Próba statyczna rozciągania stopiwa.
164. Norma PN-58/M-69730. Spawanie gazowe. Próba udarności stopiwa.
165. Norma PN-82/C-23050. Karbid.
166. Norma PN-77/M-69000. Spawalnictwo. Spawanie metali. Nazwy i określenia.
167. Norma PN-84/M-69001. Spawalnictwo. Spajanie metali i procesy pokrewne. Podział.
168. Norma PN-75/M-69002. Spawalnictwo. Pozycje spawania. Klasyfikacja i oznaczenia.
169. Norma PN-87/M-69008. Spawalnictwo. Klasyfikacja konstrukcji spawanych.
170. Norma PN-87/M-6990/01. Spawalnictwo. Egzamin spawaczy i zgrzewaczy. Postanowienia ogólne.
171. Norma PN-87/M-6990/02. Spawalnictwo. Podstawowy egzamin spawacza.
172. Norma PN-87/M-6990/03. Spawalnictwo. Ponadpodstawowy egzamin spawacza.
173. Norma PN-87/M-6990/04. Spawalnictwo. Egzamin spawacza-operatora.
174. Norma PN-87/M-6990/05. Spawalnictwo. Egzamin zgrzewacza.
175. Norma PN-87/M-6990/06. Spawalnictwo. Egzamin rozszerzający oraz sprawdzający spawacza i zgrzewacza.
176. Norma PN-79/M- 01134. Rysunek techniczny maszynowy. Uproszczenia rysunkowe. Zasady oznaczania spoin.
177. Norma PN-64/M-01138. Rysunek techniczny maszynowy. Połączenia spawane i powierzchnie napawane (zmiana Biul. PKN nr 6/67, poz. 67).
178. Norma PN-64/B-01043. Rysunek konstrukcyjny budowlany. Konstrukcje stalowe.
179. Norma PN-81/M-Z-53201. Sprzęt ochrony osobistej oczu. Optyczne filtry i szybki ochronne. Ogólne wymagania i badania.
180. Norma PN-73/Z-53205. Sprzęt ochrony osobistej oczu. Szybki ochronne przeciwodpryskowe.
181. Pałasz J.: Poradnik spawacza gazowego. Wydawnictwa naukowo-Techniczne. Warszawa 1986.
182. Piwowar S.: Spawanie i zgrzewanie elektryczne. Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne. Warszawa 1981.
183. Piwowar S.: Kontrola procesów spawalniczych. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1979.

184. Piątek P.: Spawanie (materiały dydaktyczne). Wydawnictwo SANNORT, Sandomierz, 2014.
185. Praca zbiorowa: Poradnik inżyniera spawalnictwa. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne. Warszawa 1983.
186. Recko J.: Wpływ zmian parametrów geometryczno-konstrukcyjnych toru na wielkość oddziaływań pojazdu szynowego. *Drogi Kolejowe*, 1987, Nr 3.
187. Ruta P.: Drgania belki na inercyjnym podłożu sprężystym obciążonej siłą ruchomą. *Rozprawy inżynierskie*, 1987, t. 35, z. 1.
188. Syrek S., Mikołajczyk J.: Analiza matematyczna podstawowych wymiarów złącza spawanego. **W:** Logistyka w ratownictwie 2022 / pod redakcją Andrzeja Chudzikiewicza i Andrzeja Krzyszkowskiego. Radom : Instytut Naukowo-Wydawniczy "Spatium", 2022. **Szczegóły:** s. 169-190, **p-ISBN:** 978-83-67033-57-2; **e-ISBN:** 978-83-67033-70-1.
189. Syrek S., Mikołajczyk J.: Modele liniowe wpływu częstotliwości prądu spawania na grubość spoiny. **W:** MIK-21 : Międzynarodowa Innowacyjność i Konkurencyjność w XXI wieku : aspekty innowacyjne / redakcja naukowa Radosław Luft. Lublin: Fundacja Innowacji i Nowoczesnych Technologii INOTECH, 2022. Radom : nakładem Instytutu Naukowo-Wydawniczego "Spatium", 2022. **Szczegóły:** s. 153-170, **p-ISBN:** 978-83-67033-43-5; **e-ISBN:** 978-83-67033-44-2;
<http://inw-spatium.pl/wp-content/uploads/2022/09/MIK-21-2022-Aspekty-innowacyjne-2.pdf>
190. Syrek S., Mikołajczyk J.: Modele liniowe wpływu częstotliwości prądu spawania na szerokość spoiny. **Źródło:** Obróbka Metalu. **Szczegóły:** 2022, nr 4, s. 24-31, **p-ISSN:** 2081-7002; <https://obrobkametalu.tech/>
191. Szustakowski J.: Poradnik spawacza elektrycznego. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1977.
192. Semrau A.: Syntetyczna ocena utrzymania torów dla potrzeb planowania napraw nawierzchni. *Problemy Kolejnictwa*, z. 75, Wydawnictwo Komunikacyjne i Łączności, Warszawa, 1977.
193. Siewczyński L.: Zagadnienia współpracy nawierzchni kolejowej z podtorzem gruntowym. Politechnika Poznańska, Seria Rozprawy, Nr 66, Poznań, 1974.
194. Sokolov S. I. i inni: Badania dynamiki i wytrzymałości wagonów pasażerskich. Wydawnictwa Komunikacyjne i Łączności, Warszawa, 1983.
195. Szczepański W.: Stany graniczne i kinematyka ośrodków sypkich. Państwowe Wydawnictwa Naukowe, Warszawa, 1974.
196. Sysak J.: Podtorze a modernizacja dróg żelaznych. Wydawnictwo Poznańskiego Towarzystwa Przyjaciół Nauk, Wydział V – Nauk Technicznych, Poznań 1969, Tom I, Zeszyt 5.
197. Towpik K.: Badania zmienności charakterystyk nawierzchni kolejowej ze szczególnym uwzględnieniem wpływu działania maszyn torowych. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Seria Rozprawy, Nr 137, Poznań, 1982.
198. Zandecki R., Kmita C., Mikołajczyk J.: Mathematical models of the surface layer microhardness for a selected grade of ion nitrided steel. **W:** Szkoła Logistyki 2022. Radom : Instytut Naukowo-Wydawniczy "Spatium", 2022, Poland. **Szczegóły:** s. 203-216, Materiały z IX Konferencji Naukowej "Szkoła Logistyki 2022". **p-ISBN:** 978-83-67033-33-6; **e-ISBN:** 978-83-67033-34-3.

Hydrogen cars as the future of transport

mgr Anna Szaflik

Zespół Szkół Inżynierii Środowiska

im. gen. Ignacego Prądzyńskiego w Toruniu, Poland

<https://orcid.org/0009-0005-0165-5337>

corresponding e-mail: annaszaflik@o2.pl

dr inż. Jarosław Mikołajczyk

Department of Mechanical Engineering

Stanisław Staszic State University of Applied Sciences in Piła, Poland

<https://orcid.org/0000-0001-9196-0039>

corresponding e-mail: jmikolajczyk@ans.pila.pl

Abstract: The paper presents the principle of operation of hydrogen-powered vehicles and methods of obtaining hydrogen as fuel. Discussed are advantages and disadvantages of this type of construction and its development prospects.

Keywords: fuel cells, hydrogen, electrochemical processes

1. Introduction

In recent years the global focus on eco-friendliness, zero-emissions, global warming phenomenon and sustainable development has led to significant progress in the field of alternative energy sources for vehicles. Hydrogen-powered cars, often referred to as fuel cell electric vehicles (FCEVs), have become a promising solution for reducing carbon dioxide emissions and independence from fossil fuels such as oil, natural gas, and coal. Currently, consideration is being given to introducing aircraft using hydrogen batteries into service. There is a ship that runs entirely on hydrogen. In addition, hydrogen vehicles are being mass-produced for the US market, and many car manufacturers are building their own prototypes of such designs. For educational and advertising purposes many manufacturers offer such vehicles as educational aids for self-assembly (Fig. 1), most often with single-rear-wheel drive. Such designs can also be printed using 3D printers (except for fuel cells).



Fig. 1. Educational hydrogen water-powered vehicle from the "Kosmos&Thames" company for self-assembly

Hydrogen vehicles use hydrogen gas (hydrogen) as fuel to generate electricity in a fuel cell. The fuel cell (based on the Volta cell) combines hydrogen with oxygen from the air, producing electricity, heat Q , and water as byproducts.

Fig. 2 shows a diagram of a fuel cell with hydrogen gas H_2 flowing in from one side and oxygen O_2 flowing in from the other side. The fuel cell structure separating these two areas has a multi-layer structure. The outer layers of the fuel cell have a porous structure in order to "trap" both oxygen gas O_2 and hydrogen gas H_2 in order to come into contact with the appropriate catalyst.

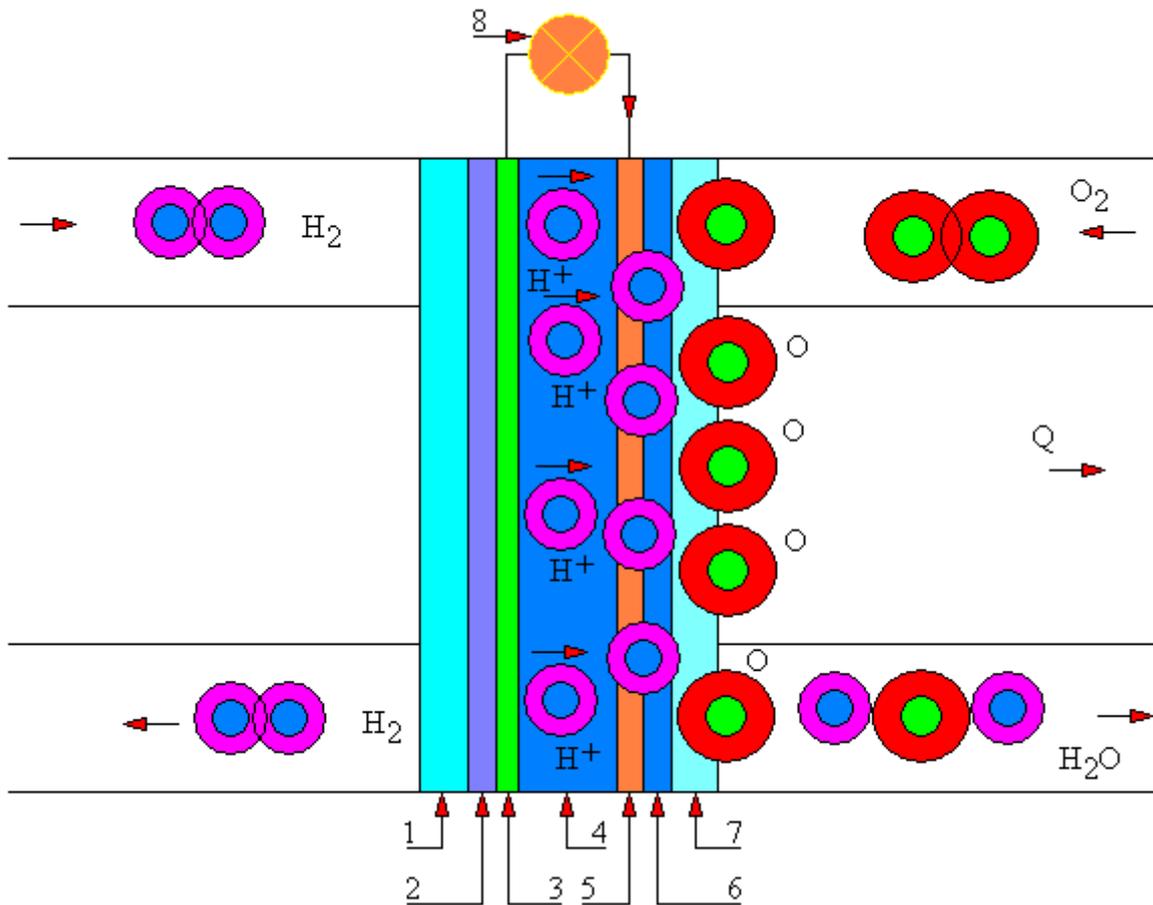


Fig. 2. Fuel cell diagram

1 – porous layer; 2 – catalyst (nano-Pt); 3 – anode (Pt); 4 – polymer membrane (nafion); 5 – cathode (Ni); 6 – catalyst (WO_3); 7 – porous layer; 8 – bulb; O – oxygen; H- hydrogen; Q – generated heat

Unlike combustion engines that burn fuel to produce energy, fuel cells rely on a chemical reaction, making them more efficient and environmentally friendly. The produced electricity powers an electric motor that powers the car, providing a smooth, quiet ride.

Hydrogen can be produced, for example, by electrolysis of water. It is stored, for example, in high-pressure tanks inside the vehicle, thus providing a fuel supply for long journeys. Oxygen is of course supplied from the air. Fuel cell technology has been and is being improved over many years, becoming more compact and efficient, which allows better integration with modern vehicles.

Hydrogen cars use hydrogen as fuel to generate electricity in fuel cells. In this process, hydrogen reacts with oxygen, which leads to the production of electricity, water and heat. The key element of this design is the fuel cell, in which an electrochemical reaction takes place. The electricity produced in the cell powers the electric motor that drives the vehicle. Of course, the electric motor can also drive any power receiver, e.g. a production machine. The only by-product, in relation to this chemical reaction, of course, is water. The fuel cell is based on the principle of reverse electrolysis of water. In electrolysis, we supply electricity, and oxygen and hydrogen accumulate on the appropriate electrodes. A water car works the other way around: we supply gaseous oxygen to the fuel cell on one side, and gaseous hydrogen on the other, which combine to produce electricity, water and heat. In electrolysis,

the presence of H^+ and O^- ions in water is used, which, under the influence of the electric field of the electrodes, move in the appropriate directions, attaching to the second H or O atom, and thus producing hydrogen and molecular oxygen. In a fuel cell, the recombination of hydrogen and oxygen takes place in a special membrane moving ions in the appropriate directions. The presence of colloidal platinum forces the dissociation reactions of gaseous hydrogen and oxygen into ions, which is a complicated and expensive process. A simplified diagram of a hydrogen fuel cell is shown in Fig. 3.

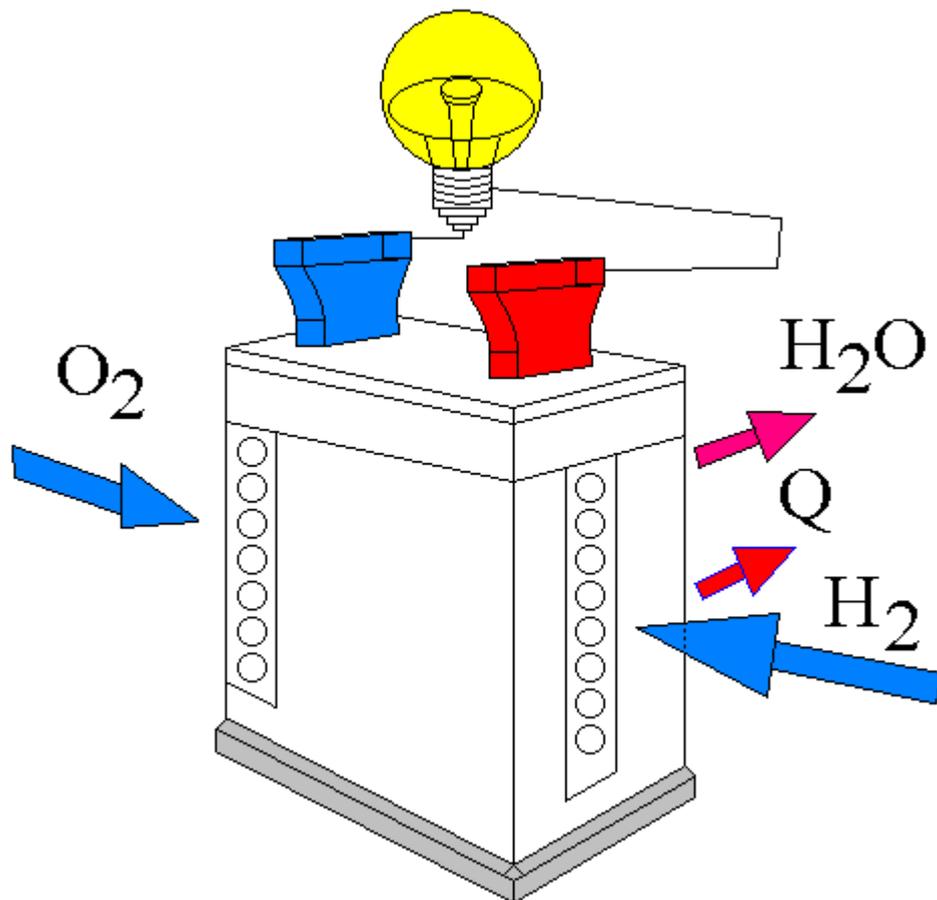


Fig. 3. Simplified diagram of a hydrogen fuel cell O_2 – oxygen (air) supply; H_2 – hydrogen supply; H_2O – water discharge; Q – heat discharge

Fig. 4 shows the chemical processes taking place in a hydrogen car. Gaseous hydrogen is refueled at stations located throughout a given area. Hydrogen is most often refueled into a high-pressure tank, from where it is supplied to the fuel cell. Oxygen from the air is most often sucked in from the front of the vehicle using blowers and compressors and also supplied to the fuel cell. Fuel cells can be connected to each other for better work control over them or their replacement in the event of a failure. Water, as a by-product, can be removed or collected from the vehicle. By accelerating or decelerating, we turn on a larger or smaller number of fuel cells. Unfortunately, the heat emission Q also increases with the acceleration of the vehicle, the value of which must be monitored and managed.

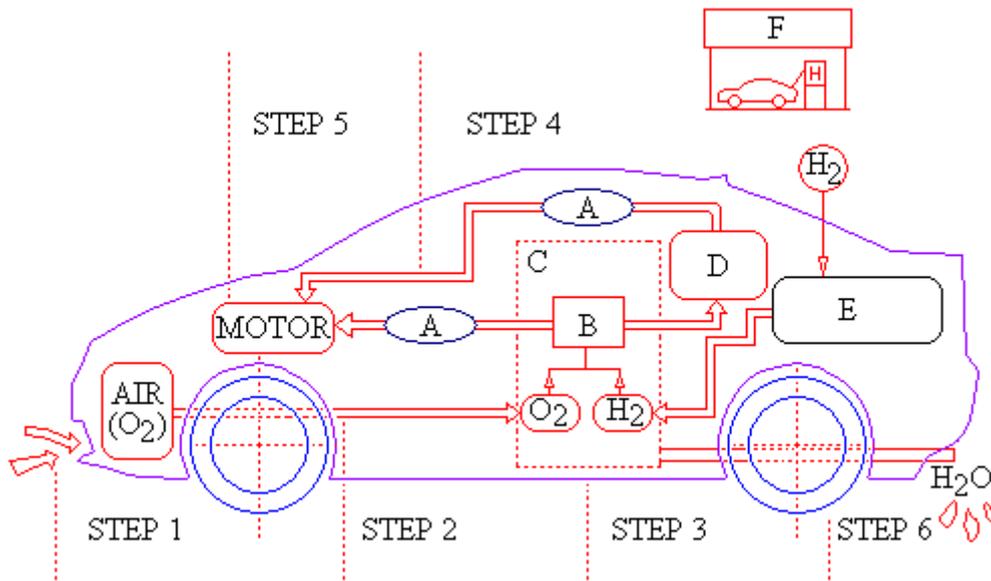


Fig. 4. Chemical changes occurring in a hydrogen car

STEP 1 – air (oxygen) intake; STEP 2 – oxygen and hydrogen are supplied to the fuel cell; STEP 3 – heat, electricity and water are produced as a result of the chemical reaction; STEP 4 – electricity is supplied to the engine; STEP 5 – the engine starts working, the vehicle moves; STEP 6 – water is removed outside the vehicle; A – electric current; B – electricity generation; C – fuel cell set; D – electric batteries; E – high-pressure hydrogen tank; F – hydrogen refueling station

Hydrogen cars can be equipped with high-pressure hydrogen tanks in gaseous form or as liquid hydrogen tanks, depending on the technology. Hydrogen can also be stored in a way other than conventional, i.e. using metal hydrides or using nanotubes, aerogels, nanofibers (technologies currently being developed).

Fuel cells are electrochemical devices that convert the chemical energy of a reaction into electrical energy [53, 54]. The byproducts are usually water and heat. Such devices can have high efficiency of around 80%. A fuel cell uses hydrogen (or a hydrogen-rich fuel) and oxygen (usually in the form of air) to produce electricity in an electrochemical process. A single cell contains an electrolyte and two catalyst-coated porous electrodes: an anode and a cathode. The operating principle of a fuel cell is as follows:

- hydrogen is introduced into the anode zone, where a catalyst separates electrons from positively charged protons;
- at the cathode, oxygen combines with electrons and in some cases protons or water, resulting in water or hydroxyl ions;
- in the case of fuel cells with an electrolyte in the form of a polymer membrane, protons move through the electrolyte to the cathode, where they combine with oxygen and electrons, producing water and heat;
- in the case of fuel cells with an alkaline electrolyte, with molten carbonates or solid oxides, negative ions move through the electrolyte to the anode, where they combine with hydrogen to produce water and electrons;
- electrons from the anode zone of the cell cannot pass through the electrolyte to the positively charged cathode; they must move through an external electrical circuit to reach the other side of the cell; the movement of electrons is an electric current capable of doing a certain amount of work.

There are many ways to regulate the temperature generated in the fuel cell stack. Fig. 5 and Fig. 6 show two examples of methods for removing heat Q generated during the operation of the fuel cell stack.

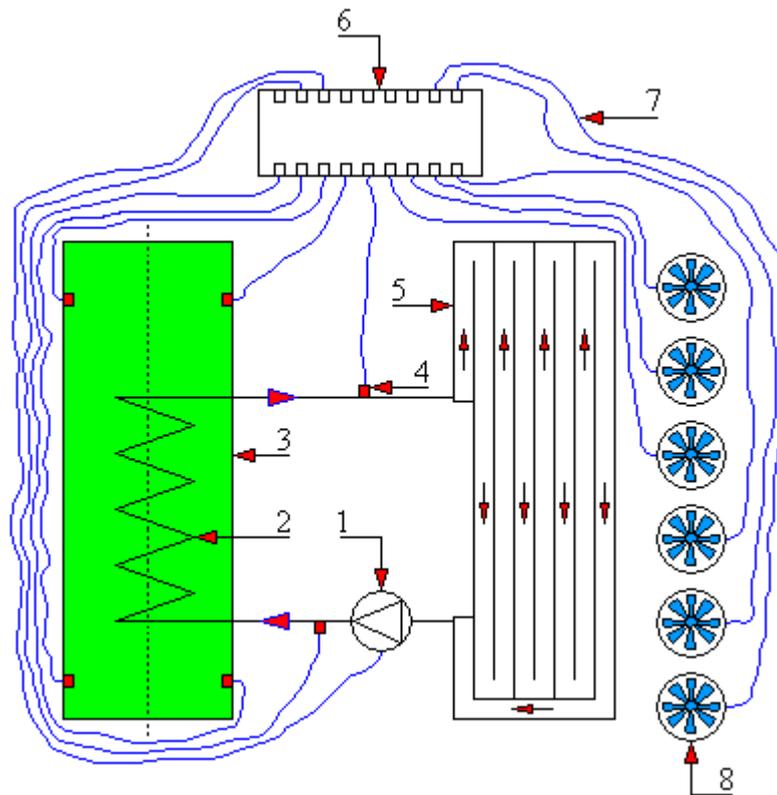


Fig. 5. Method of cooling a fuel cell stack using a cooler coil located in the fuel cell stack
 1 – coolant circulation pump; 2 – cooler coil; 3 – fuel cell stack; 4 – temperature sensor (thermocouple); 5 – cooler; 6 – microprocessor with communication ports; 7 – communication cables; 8 - fans

Fuel cells are assembled into stacks or packs. Each pack or stack can contain hundreds of fuel cells. Some types of fuel cells must have some type of filter to protect them from contamination from the fuel before it is introduced into the cell. Fuel cells can be powered by hydrogen, methanol, gasoline, diesel oil, coal gas, depending on the technology [4, 5, 6, 55].

Hydrogen is a specific element. Its Latin name is hydrogenium – water-forming. Indeed, in chemical compounds, hydrogen is a fairly common element on Earth, e.g. in water. However, in the Earth's atmosphere, its content is about 0.1 ppm, which is almost nothing. Almost nothing, because it cannot be in the atmosphere [57, 56]. Hydrogen in its free form is able to exceed the second cosmic velocity and leave the Earth forever, because the force of gravity, and therefore the mass of the Earth, is too small to stop hydrogen. Therefore, if hydrogen is created in a free state for some reason, it will "escape" from the Earth (Fig. 7). If for some reason we produce hydrogen from water on a mass scale, e.g. for economic reasons, and it will get into the atmosphere, e.g. due to incomplete combustion or leaks in installations, then we may have a situation (of course in a rather distant perspective) where we have oxygen but no water because the second component will be missing. Oxygen is not able to "escape" from the Earth on its own unless as rocket fuel (oxidizer) on board a rocket.

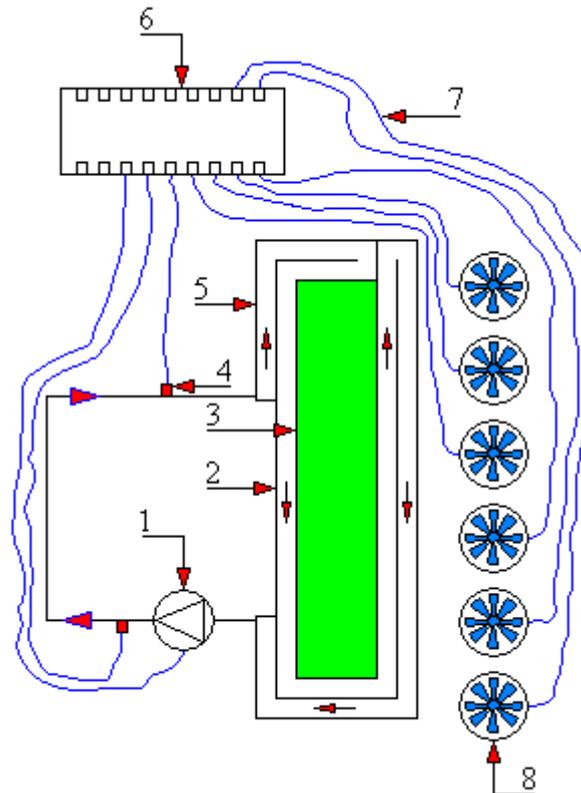


Fig. 6. Method of cooling a stack of fuel cells placed inside a cooler
 1 – coolant circulation pump; 2 – cooler; 3 – fuel cell stack; 4 – temperature sensor (thermocouple); 5 – cooler; 6 – microprocessor with communication ports; 7 – communication cables; 8 - fans

2. Hydrogen characteristics

Hydrogen is the lightest chemical element with an atomic number of 1 and has three isotopes: hydrogen (H), deuterium (D) and tritium (T). Hydrogen is a product of gasoline reforming, olefin pyrolysis, catalytic cracking, coal coking, coking and gasification of refinery residues. It can also be produced using industrial and municipal waste, sewage sludge, biomass and other renewable energy carriers. It is currently assumed that hydrogen is the first among the future energy carriers.



Fig. 7. Symbolic representation of the escape of a hydrogen molecule H_2 from Earth into space

Hydrogen gas occurs in diatomic molecules as H_2 . Hydrogen can be stored in pressurized tanks or as a cryogenic liquid. Unfortunately, hydrogen has a wide flammability range and a wide explosive range, with the flammability range increasing with temperature.

An important element of fuel quality assessment is the fuel energy density which indicates the packing density of hydrogen atoms in a given type of fuel. Comparing the energy density of hydrogen, whether in a gaseous or liquid state, with petrol or diesel oil, it is about 4-6 times lower (depending on the pressure for the gaseous state and whether we are dealing with a cryogenic liquid).

Hydrogen currently produced on a mass scale comes from natural energy resources such as:

- natural gas approx. 48%;
- crude oil approx. 30%;
- coal approx. 18%;
- water electrolysis approx. 4%

The above proportions will of course change gradually due to the introduction of new hydrogen production technologies. Technologies used to produce hydrogen include:

- steam reforming of methane or other low-molecular-weight hydrocarbons;
- partial oxidation of refinery residues;
- hydrogen recovery from gaseous products of oil and coal processing;
- electrolytic water decomposition;
- coal gasification.

Comparing the efficiency of different types of hydrogen production, water electrolysis as a method of hydrogen production is very inefficient compared to methods of obtaining hydrogen from natural gas, crude oil or coal. However, ultimately, at least theoretically, the aim is for water and biomass to be the source of hydrogen with the support of renewable energy sources (solar energy and its derivatives, i.e. wind energy, water energy). Biomass can be used to produce hydrogen through the stage of pyrolysis, gasification or/and biological

decomposition [2, 7, 8, 56, 57]. Biological methods of obtaining hydrogen include fermentation methods regarding the disposal of various organic wastes such as:

- municipal and industrial;
- animal excrement;
- sewage sludge;
- from agricultural production;
- water and sewage from food production plants (sugar factories, fruit and vegetable processing plants, food concentrate plants).

An interesting source of hydrogen production are deposits of methane hydrates found in sedimentary deposits of Arctic permafrost.

Some publications claim that water resources on the Earth are inexhaustible. Indeed, water resources in the world are large, but they are finite and exhaustible – the only issue is the scale of their processing.

The diagram of the changes occurring in a hydrogen car shown in Fig. 4 actually concerns a hybrid of a hydrogen and electric car. The electric batteries installed in it can usually be recharged from the electrical grid. This type of hybrid design is unfortunately necessary because a hydrogen car in its pure form is not able to compete with the driving dynamics of combustion or electric cars. Therefore, it must have aid. It is impossible to obtain such high power from hydrogen fuel cells in such a short time during acceleration, and thus to receive the heat extracted from them during operation. Fig. 8 shows the diagram of the chemical changes occurring in a pure hydrogen car (the accumulator batteries have been removed from it). The mass of such a vehicle is then much smaller.

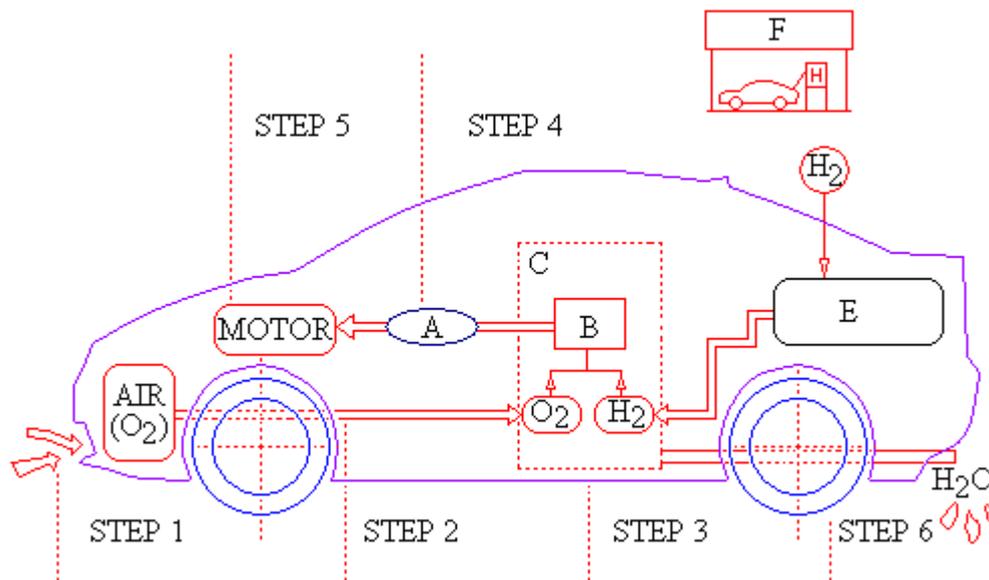


Fig. 8. Chemical changes occurring in a "clean" hydrogen car

STEP 1 – air (oxygen) intake; STEP 2 – oxygen and hydrogen are supplied to the fuel cell; STEP 3 – as a result of the chemical reaction, heat, electricity and water are produced; STEP 4 – electricity is supplied to the engine; STEP 5 – the engine starts working, the vehicle moves; STEP 6 – water is removed outside the vehicle; A – electricity; B – electricity generation; C – fuel cell set; E – high-pressure hydrogen tank; F – hydrogen refueling station

3. Conclusions

Hydrogen cars will develop quite dynamically. However, certain conditions must be met for them to work optimally. The pressure of the gas supplied to the membranes should be (depending on the technology) about 10 atmospheres, while the temperature should be about + 25°C. In the latitude belt of the Earth between the tropics, the conditions for the operation of this type of structures are correct. However, the closer to the poles, the use of hydrogen cars may be seasonal (only for example in the spring, summer and autumn seasons) or negligible (in circumpolar areas).

In Europe, central-northern Asia, northern North America (Northern Canada, Alaska), southern Chile and Argentina, and of course Antarctica (currently inhabited by several thousand people), especially in winter, there may be problems with operating this type of vehicle. There are many manufacturers of hydrogen cars, this technology is developing dynamically, which bodes well for it. However, in some residential buildings, a ban has been introduced on parking cars powered by any type of gas (for safety reasons).

The oxygen content in the air is about 20%. The oxygen content supplied to the fuel cell membranes can be increased, of course, from oxygen cylinders. However, it should be remembered that oxygen in contact with lubricants from friction nodes in the car (if they had contact with it) burns explosively [1, 9÷43].

Water extracted from the engine could accumulate on the road in winter, which would pose a significant threat to other road users.

Finally, it is worth mentioning that hydrogen fuel cells are also used as energy sources for laptops, mobile phones or electric skateboards [44, 54]. Hydrogen - against all appearances - is a difficult material to manage.

4. Literature

1. Domański A., Mikołajczyk J.: Dimensional analysis of the selected type of rolling bearing depending on the manufacturer. **W:** Szkoła Logistyki 2023 / redakcja naukowa Janusz Zawila-Niedźwiecki, Katarzyna Białczak. Radom: Instytut Naukowo-Wydawniczy "Spatium", 2023, Poland. **Szczegóły:** s. 79-89, **p-ISBN:** 978-83-67033-75-6; **e-ISBN:** 978-83-67033-58-9.
2. Grzywa E., Molenda J.: Technologia podstawowych syntez organicznych. T. 1. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2008.
3. Hołubowska A., Szałański B., Mikołajczyk J.: Laboratorium termodynamiki. Piła: Wydawnictwo Państwowej Uczelni im. Stanisława Staszica, 2020, Poland. **Szczegóły:** 164 s., **e-ISBN:** 978-83-62617-93-7; https://wydawnictwo.puss.pila.pl/files/Laboratorium_termodynamiki_POL_version.pdf
4. Kijewski J.: Dlaczego wodór? *Przemysł Chemiczny*, 2005, **84**, 799.
5. Kotowski W., Lücke B.: Zastosowanie ogniw paliwowych do produkcji energii elektrycznej i ciepła. *Karbo*, 2001, **46**, 227.
6. Kotowski W., Lücke B., Budner Z.: Katalityczne przetwarzanie metanolu w wodór. *Przemysł Chemiczny*, 1997, **76**, 387.
7. Kurzepa K., Grabowska A., Prokop J., Lipkowski A.W.: Perspektywy zastosowania biologicznych metod produkcji wodoru. *Przemysł Chemiczny* **84** (11), 833, 2005.
8. Lewandowski W. M.: Proekologiczne odnawialne źródła energii. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2007.
9. Matuszewski M., Mikołajczyk J., Styp-Rekowski M.: Modyfikacja cech środka smarującego za pomocą standardowych dodatków smarowych. Modification of lubricants features by means of standard additives. *Źródło: Postępy w Inżynierii Mechanicznej*

[Developments in Mechanical Engineering]. 2013, nr 1 (1), s. 57-65, Wydawnictwo Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego w Bydgoszczy; p-ISSN: 2300-3383; http://wu.utp.edu.pl/uploads/oferta/Postepy_1_1_2013.pdf

10. Matuszewski M., Mikołajczyk J., Mikołajczyk T., Styp-Rekowski M.: The influence of cooling and lubrication liquid quantity on the isotropy of a machine component surface during machining = Wpływ warunków chłodzenia i smarowania podczas obróbki elementów maszyn na stopień izotropowości ich powierzchni. **Źródło:** Tribologia. 2016, vol. 265, No. 1, s. 57-65, p-ISSN: 0208-7774; e-ISSN: 1732-422X;

<https://t.tribologia.eu/resources/html/article/details?id=158175>

11. Mikiewicz J., Cieślowski J.T.: Niekonwencjonalne urządzenia i systemy konwersji energii. Wydawnictwo Ossolineum, Wrocław 1999.

12. Mikołajczyk J., Styp-Rekowski M., Świerk K.: Modyfikowanie cech środka smarującego za pomocą dodatków i komputerowe wspomaganie ich doboru. W: CAX'2009 : komputerowe wspomaganie nauki i techniki : VI warsztaty naukowe, Bydgoszcz - Duszniki Zdrój 2009 : praca zbiorowa pod redakcją Tadeusza Mikołajczyka. p-ISBN: 978-83-61314-65-3. Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego w Bydgoszczy, Bydgoszcz 2009.

13. Mikołajczyk J.: Zestawienie porównawcze dodatków depresujących do olejów. W: Zaawansowana tribologia : XXX Ogólnopolska Konferencja Tribologiczna, Nałęczów, 21-24 września 2009 r. Ogólnopolska Konferencja Naukowa XXX Szkoły Tribologicznej "Zaawansowana Tribologia" : Wydział Materiałoznawstwa, Technologii i Wzornictwa Politechniki Radomskiej, Instytut Technologii Eksploatacji - PIB Radom oraz Komitet Budowy Maszyn, Sekcja Podstaw Eksploatacji Maszyn PAN. Wydawnictwo Naukowe Instytutu Technologii Eksploatacji - PIB, Radom, 2009.

14. Mikołajczyk J.: Zestawienie porównawcze własności fizykochemicznych dodatków smarnych w oleju podstawowym SAE-30. W: Terotechnologia 2009 : materiały konferencji na ekspozycji Metal i Control-Tech : Targi - Kielce (29.09-01.10.2009). VI Konferencja Naukowo-Techniczna "Terotechnologia 2009" : Politechnika Świętokrzyska, Centrum Laserowych Technologii Metali, Katedra Inżynierii Eksploatacji, Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn, Polskie Towarzystwo Naukowo-Techniczne, Towarzystwo Eksploatacyjne, Kielce: Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, 2009. Seria: Zeszyty Naukowe - Politechnika Świętokrzyska, nr 13.

15. Mikołajczyk J.: Badanie wpływu preparatu eksploatacyjnego Mind M na zmianę własności smarnych oleju bazowego SN-150. **Źródło:** Inżynieria i aparatura chemiczna [Chemical Engineering and Equipment]. 2012, nr 5, s. 235-236, p-ISSN: 0368-0827. <http://inzynieria-aparatura-chemiczna.pl/rok-2012-nr-5/>

16. Mikołajczyk J., Styp-Rekowski M., Matuszewski M., Musiał J.: Einfluß der kompositionen von schmierzusätzen auf die exploitations-eigenschaften der mischung mit Basisöl SN-150. W: Tribologie und mobilität : beiträge der tribotechnik zur optimierung von fertigungsprozessen, wartung, schmierung (reibungskonditionierung) und betriebssicherheit von verkehrsmitteln und verkehrswegen. Wien, 15 November 2012. Symposium 2012 "Tribologie und mobilität" : Österreichische Tribologische Gesellschaft. Österreichische Tribologische Gesellschaft, Wien, 2012.

17. Mikołajczyk J.: Einfluß der ausgewählten schmierzstoffzusätze auf betriebseigenschaften der mischung mit Basisöl SN-150. **W:** Reibung, schmierung und verschleiß : forschung und praktische anwendungen. Band 1. Tribologische systeme maschinenelemente und antriebstechnik fahrzeugtechnik prüfen, messen, kontrollieren. Göttingen, 22-24 September 2014. 55. Tribologie Fachtagung "Reibung, Schmierung und Verschleiß" : Gesellschaft für Tribologie e.V. Stolberg-Venwegen : Gesellschaft für Tribologie e.V., 2014. Germany.

18. Mikołajczyk J.: Einfluss der ausgewählten zusatzschmierstoffe auf die intensivität des

- verschleißprozesses (Ra, Rq, Δm) mit Basisöl SN-150. **W:** Tribologie in industrie und forschung : werkstoffe, konstruktion und technologie. Leoben, 26 November 2014. ÖTG Symposium 2014 "Tribologie in industrie und forschung" : Österreichische Tribologische Gesellschaft. Wien : Österreichische Tribologische Gesellschaft, 2014. Austria.
19. Mikołajczyk J., Matuszewski M.: Einfluss der ausgewählten schmierzstoffzusätze auf ΔT und ΔP mit Basisöl SN-150. **W:** Tribologie in industrie und forschung : werkstoffe, schmierzstoffe und technologie. Wiener Neustadt, 25 November 2015, Austria. ÖTG Symposium 2015 "Tribologie in industrie und forschung" : Österreichische Tribologische Gesellschaft. Wiener Neustadt : Österreichische Tribologische Gesellschaft, 2015, s. 145-152.
20. Mikołajczyk J.: Vergleich charakteristischer parameter des abbott-firestone-diagramms für ein kinematisches paar mit konformem kontakt. **W:** Tribologie in industrie und forschung : verschleißschutz, instandhaltung und anlagenzuverlässigkeit. Linz, 22-23 November 2016, Austria. ÖTG Symposium 2016 "Tribologie in industrie und forschung" : Österreichische Tribologische Gesellschaft. Wiener Neustadt : Österreichische Tribologische Gesellschaft, 2016; s. 105-110.
21. Mikołajczyk J.: Wpływ dodatków smarowych na transformację warstwy wierzchniej. Piła : Wydawnictwo Państwowej Wyższej Szkoły Zawodowej im. Stanisława Staszica, 2017r., Poland. 215, [1] s., **p-ISBN:** 978-83-62617-76-0; www.ans.pila.pl
22. Mikołajczyk J.: Influence of consumables on the amount of power consumption of kinematic vapor of conformal contact. Wpływ PE na pobór mocy pary kinematycznej o styku konforemnym. **Źródło:** Postępy w Inżynierii Mechanicznej [Developments in Mechanical Engineering]. **Szczegóły:** 2019, nr 13 (7), s. 39-50, **p-ISSN:** 2300-3383; Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu technologiczno-Przyrodniczego im. J. J. Śniadeckich w Bydgoszczy, Poland.
<http://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-2faf200b-3010-4192-9fd0-062f53b49d38>
23. Mikołajczyk J.: Statistical analysis of the mass variation of samples as a result of the wear process. Analiza statystyczna zmiany masy próbek w wyniku procesu zużywania. **Źródło:** Postępy w Inżynierii Mechanicznej [Developments in Mechanical Engineering]. **Szczegóły:** 2019, nr 13 (7), s. 51-61, **p-ISSN:** 2300-3383; Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego im. J.J. Śniadeckich w Bydgoszczy, Poland.
<http://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-2faf200b-3010-4192-9fd0-062f53b49d38>
24. Mikołajczyk J.: Tribotestery : budowa i przeznaczenie. Piła: Wydawnictwo Państwowej Wyższej Szkoły Zawodowej im. Stanisława Staszica, 2019, Poland. **Szczegóły:** 160 s., **e-ISBN:** 978-83-62617-90-6;
<https://wydawnictwo.pwsz.pila.pl/files/Tribotestery.pdf>
25. Mikołajczyk J.: Determining the energy validity of the Kostetsky's hypothesis on the basis of models for relative motion velocity $v = 0.08$ m/sec. **Źródło:** Developments in Mechanical Engineering. **Szczegóły:** 2020, nr 16 (8), s. 17-29, **p-ISSN:** 2720-0639; Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego im. J.J. Śniadeckich w Bydgoszczy, Poland.
DOI: [10.37660/dme.2020.16.8.2](https://doi.org/10.37660/dme.2020.16.8.2)
26. Mikołajczyk J.: Finding the correlation between wear of samples kinematic pair of conformal contact and electric power consumption. **Źródło:** Postępy w Inżynierii Mechanicznej [Developments in Mechanical Engineering]. **Szczegóły:** 2020, nr 15 (8), s. 59-68, **p-ISSN:** 2300-3383; Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego im. J.J. Śniadeckich w Bydgoszczy, Poland.
[https://dme.utp.edu.pl/art/15\(8\)2020/59.pdf](https://dme.utp.edu.pl/art/15(8)2020/59.pdf)
DOI: [10.37660/dme.2020.15.8.6](https://doi.org/10.37660/dme.2020.15.8.6)

27. Mikołajczyk J.: The effect of temperature lag on the value of power-temperature correlation for frictional pair of conformal contact. **Źródło:** Postępy w Inżynierii Mechanicznej [Developments in Mechanical Engineering]. **Szczegóły:** 2020, nr 15 (8), s. 79-86, **p-ISSN:** 2300-3383; Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego im. J.J. Śniadeckich w Bydgoszczy, Poland.
[https://dme.utp.edu.pl/art/15\(8\)2020/79.pdf](https://dme.utp.edu.pl/art/15(8)2020/79.pdf)
DOI: 10.37660/dme.2020.15.8.8
28. Mikołajczyk J.: A method of determining mathematical models of a seizure test of friction pairs. **W:** MIK-21 : Międzynarodowa Innowacyjność i Konkurencyjność w XXI wieku : aspekty innowacyjne / redakcja naukowa Radosław Luft. Lublin : Fundacja Innowacji i Nowoczesnych Technologii INOTECH, 2022. Radom : nakładem Instytutu Naukowo-Wydawniczego "Spatium", 2022. **Szczegóły:** s. 7-24, **p-ISBN:** 978-83-67033-43-5; **e-ISBN:** 978-83-67033-44-2.
<http://inw-spatium.pl/wp-content/uploads/2022/09/MIK-21-2022-Aspekty-innowacyjne-2.pdf>
29. Mikołajczyk J.: Friction machines. Piła: Wydawnictwo Akademii Nauk Stosowanych im. Stanisława Staszica, 2022, Poland. **Szczegóły:** 488 s., **e-ISBN:** 978-83-62617-96-8.
https://wydawnictwo.ans.pila.pl/files/FRICTION_MACHINES.pdf
30. Mikołajczyk J.: Rolling bearing heating charakter. **W:** Szkoła Logistyki 2022. Radom: Instytut Naukowo-Wydawniczy "Spatium", 2022, Poland. **Szczegóły:** s. 231-239, Materiały z IX Konferencji Naukowej "Szkoła Logistyki 2022"; **p-ISBN:** 978-83-67033-33-6; **e-ISBN:** 978-83-67033-34-3
31. Mikołajczyk J.: Determination of the modified coefficient of variation from the number of samples. **W:** MIK-21 : Międzynarodowa Innowacyjność i Konkurencyjność w XXI wieku : Aspekty innowacyjne / redakcja naukowa dr Łukasz Wojtowiec. Lublin: Fundacja Innowacji i Nowoczesnych Technologii INOTECH : nakładem Instytutu Naukowo-Wydawniczego "Spatium", 2023, Poland. **Szczegóły:** s. 111-122, **p-ISBN:** 978-83-67033-89-3; **e-ISBN:** 978-83-67033-90-9.
32. Mikołajczyk J.: Friction Machines II. Piła: Wydawnictwo Akademii Nauk Stosowanych im. Stanisława Staszica w Pile, 2023, Poland. **Szczegóły:** 598 s., **p-ISBN:** 978-83-67684-00-2; https://wydawnictwo.ans.pila.pl/files/FRICTION_MACHINES_V_ANS_PILA.pdf
33. Mikołajczyk J.: Oil can talk. **W:** Szkoła Logistyki 2023 / redakcja naukowa Janusz Zawila-Niedźwiecki, Katarzyna Białczak. Radom: Instytut Naukowo-Wydawniczy "Spatium", 2023, Poland. **Szczegóły:** s. 109-115, **p-ISBN:** 978-83-67033-75-6; **e-ISBN:** 978-83-67033-58-9.
34. Mikołajczyk J.: Pobór mocy elektrycznej przez parę kinematyczną jako parametr oceny jakości oleju. **W:** Logistyka w ratownictwie 2023 / pod redakcją Andrzeja Chudzikiewicza i Anny Stelmach. Radom: Instytut Naukowo-Wydawniczy "Spatium", 2023, Poland. **Szczegóły:** s. 223-230, **p-ISBN:** 978-83-67033-95-4; **e-ISBN:** 978-83-67033-96-1.
35. Mikołajczyk J.: Rola dodatków smarowych w olejach. **W:** Logistyka w ratownictwie 2023 / pod redakcją Andrzeja Chudzikiewicza i Anny Stelmach. Radom: Instytut Naukowo-Wydawniczy "Spatium", 2023, Poland. **Szczegóły:** s. 231-237, **p-ISBN:** 978-83-67033-95-4; **e-ISBN:** 978-83-67033-96-1
36. Mikołajczyk J.: Temperature as a parameter for assessing the work of a friction pair. **W:** Szkoła Logistyki 2023 / redakcja naukowa Janusz Zawila-Niedźwiecki, Katarzyna Białczak. Radom: Instytut Naukowo-Wydawniczy "Spatium", 2023, Poland. **Szczegóły:** s. 101-107, **p-ISBN:** 978-83-67033-75-6; **e-ISBN:** 978-83-67033-58-9.
37. Mikołajczyk J.: Tire as a selected element of a car subject to diagnostics. **W:** Szkoła Logistyki 2023 / redakcja naukowa Janusz Zawila-Niedźwiecki, Katarzyna Białczak. Radom:

- Instytut Naukowo-Wydawniczy "Spatium", 2023, Poland. **Szczegóły:** s. 117-131, **p-ISBN:** 978-83-67033-75-6; **e-ISBN:** 978-83-67033-58-9.
38. Mikołajczyk J.: Wpływ dodatku modyfikującego cechy płynu obróbkowego na zmianę temperatury w strefie kontaktu współpracujących powierzchni. **Źródło:** Obróbka Metalu. **Szczegóły:** 2023, nr 2, s. 43-46, **p-ISSN:** 2081-7002;
https://obrobkametalu.tech/media/2023/05/2023_2_52_ObrobkaMetalu.pdf
39. Mikołajczyk J.: Zmiana geometrycznych cech współpracujących powierzchni miarą intensywności procesu zużywania ostrzy skrawających. **Źródło:** Obróbka Metalu. **Szczegóły:** 2023, nr 1, s. 50-54, **p-ISSN:** 2081-7002;
<https://yadda.icm.edu.pl/yadda/element/bwmeta1.element.baztech-9e73eb05-2a91-4df5-853b-22abf7a6ee77>
40. Mikołajczyk J., Góra F., Jędrzejczyk D.: Analysis of selected surface roughness parameters for wear processes. Analiza wybranych parametrów chropowatości powierzchni pod kątem procesów zużywania. **W:** MIK-21 : Międzynarodowa Innowacyjność i Konkurencyjność w XXI wieku : Aspekty innowacyjne / redakcja naukowa Radosław Luft. Lublin: Wydawnictwo Naukowe FNCE, 2024. **Szczegóły:** s. 93-117, **p-ISBN:** 978-83-68074-82-6; **e-ISBN:** 978-83-68319-03-3.
41. Norma PN-EN 590. Paliwa do pojazdów samochodowych. Oleje napędowe. Wymagania i metody badań. PKN, Warszawa, 2005.
42. Olechnowicz J., Mikołajczyk J.: Truck scales : the key to safe transport and road protection. **Źródło:** Mebutra. **Szczegóły:** 2024, nr 2, s. 03-08, Wydawnictwo Akademii Nauk Stosowanych im. S. Staszica w Pile, Poland.
<https://wydawnictwo.ans.pila.pl/files/MEBUTRA2024.pdf>
43. Pikulik J., Pikulik K.W., Mikołajczyk J.: The relationship between the clearance of the coupling mechanism used in uniaxial light car trailers and the date of their production. **W:** MIK-21 : Międzynarodowa Innowacyjność i Konkurencyjność w XXI wieku : aspekty innowacyjne / redakcja naukowa Radosław Luft. Lublin : Fundacja Innowacji i Nowoczesnych Technologii INOTECH, 2022, Poland. Radom : nakładem Instytutu Naukowo-Wydawniczego "Spatium", 2022. **Szczegóły:** s. 221-233, **p-ISBN:** 978-83-67033-43-5; **e-ISBN:** 978-83-67033-44-2;
<http://inw-spatium.pl/wp-content/uploads/2022/09/MIK-21-2022-Aspekty-innowacyjne-2.pdf>
44. Piotrowski Ł., Góra F., Mikołajczyk J.: Construction of an electric longboard with one-wheel driver. **Źródło:** Mebutra. **Szczegóły:** 2024, nr 2, s. 16-27, Wydawnictwo Akademii Nauk Stosowanych im. S. Staszica w Pile, Poland.
<https://wydawnictwo.ans.pila.pl/files/MEBUTRA2024.pdf>
45. Piotrowski Ł., Góra F., Mikołajczyk J.: Design and construction of an electric longboard. **W:** Logistyka w ratownictwie 2024 / pod redakcją Andrzeja Chudzikiewicza i Andrzeja Krzyszkowskiego. Radom: Instytut Naukowo-Wydawniczy Spatium, 2024, Poland. **Szczegóły:** s. 167-178, **p-ISBN:** 978-83-68026-24-5; **e-ISBN:** 978-83-68026-25-2.
46. Rutkowski M.: Polskie silniki i pojazdy wodorowe. *Przemysł Chemiczny*, 2005, **84**, 873.
47. Rybak W.: Spalanie i współspalanie paliw stałych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2006.
48. Styp-Rekowski M., Mikołajczyk J.: The influence of Mind M preparation on the lubricant properties of base oil SN-150. **W:** Reinigung, Schmierung und Verschleiß : forschung und praktische anwendungen : Band 1 : tribologische systeme schmierstoffe und schmierungstechnik zerspanungs : und umformtechnik prüfen, messen, kontrollieren / 53. Tribologie-Fachtagung. 24.bis 26. Septembet 2012 in Göttingen. Aachen : Gesellschaft für Tribologie e.V., 2012. **p-ISBN:** 978-3-00-039201-6

49. Styp-Rekowski M., Mikołajczyk J.: Wpływ dodatku na własności smarowe oleju bazowego SN-150. Źródło: Tribologia. 2012, vol. 244, No. 4, s. 227-232, p-ISSN: 0208-7774; e-ISSN: 1732-422X; <https://t.tribologia.eu/resources/html/article/details?id=167726>
50. Styp-Rekowski M., Mikołajczyk J.: Wpływ preparatu eksploatacyjnego stanowiący kompleks węglowodorowy na zmianę własności smarnych oleju bazowego SN-150. W: Tribologia bliżej praktyki : XXXII Ogólnopolska Konferencja "Jesienna Szkoła Tribologiczna 2012". XXXII Ogólnopolska Konferencja "Jesienna Szkoła Tribologiczna 2012", Kudowa Zdrój, 18-21 września 2012r. Politechnika Wrocławska Wydział Mechaniczny, Instytut Konstrukcji Eksploatacji Maszyn, Polskie Towarzystwo Tribologiczne, Sekcja Podstaw Eksploatacji KBM PAN. Wrocław : Polskie Towarzystwo Tribologiczne, 2012
51. Styp-Rekowski M., Mikołajczyk J.: Zmiana temperatury na drodze tarcia dla kompozycji olej bazowy SN-150 - preparat eksploatacyjny Mind M. Temperature variability during friction for composition base oil SN-150 - exploitational preparation Mind M. W: III krajowa konferencja nano- i mikromechaniki / Komitet Mechaniki Polskiej Akademii Nauk, Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza, Instytut Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk. Warszawa, 4-6 lipca 2012 r. III Krajowa Konferencja Nano- i Mikromechaniki pod Patronatem Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego Prof. Barbary Kudryckiej : Komitet Mechaniki Polskiej Akademii Nauk, Politechnika Rzeszowska, Instytut Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk, Warszawa, 2012.
52. Styp-Rekowski M., Mikołajczyk J., Matuszewski M.: Wybrane zagadnienia stosowania płynów obróbkowych w obróbce skrawaniem. W: Obróbka Metalu, 2014, nr 3, s. 10-14, p-ISSN: 2081-7002; <http://www.e-obrobkametalu.pl/>
53. Surygała J., Śliwka E.: Emisje komunikacyjne w świetle unormowań prawnych. *Nafta-Gaz*, 2001, **57**, 282.
54. Surygała J.: Wodór jako paliwo. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2008.
55. Tendaj B.: Ogniwa paliwowe zasilane bezpośrednio metanolem. *Przemysł Chemiczny*, 2000, **79**, 222.
56. Urbaniec K., Grabarczyk R.: Kierunki badań nad wykorzystaniem biomasy do otrzymywania wodoru. *Przemysł Chemiczny*, 2005, **84** (11), 836.
57. Waligórski M., Łaniecki M.: Biomasa źródłem wodoru. *Przemysł Chemiczny* 2005, **84** (5), 333.



ISSN 3071-9216