

KRZYSZTOF KRAUZE
ŁUKASZ BOŁOZ
TOMASZ WYDRO
KAMIL MUCHA

Durability testing of tangential-rotary picks made of different materials

This paper presents information on the current most-widely-used cutting heads; i.e., tangential-rotary picks. It describes their applications, design, methods for improving their durability, as well as problems related to their performance. The main body of the paper deals with the results of the durability testing of tangential-rotary picks made of different materials and hardfaced or machined in ways that lead to an increase in their durability. The picks selected for the tests were standard, commercially-available, and prototypical ones. The paper also presents a state-of-the-art laboratory test stand to research the cutting process or rotation drilling with the use of a single cutting tool or cutting drum (the property of the Department of Mining, Dressing, and Transport Machines of the AGH UST in Krakow).

Key words: *mechanical mining, hard rocks, tangential – rotary pick, durability, tools wear, test stand*

1. INTRODUCTION

Tunneling excavation and longwall extraction are most frequently performed by means of mechanical mining methods, which involve the direct impact of a cutting tool or an assembly of cutting tools on rock. The most-widely-applied methods in mining operations are milling with longwall shearer loaders and plowing with coal plows, which are performed with the use of cutting tools (shearer picks and plow cutters) [1–3].

Currently, roadheaders, longwall shearer loaders and even vertical shaft mining machines are most commonly using tangential - rotary picks. Due to their increased durability, these picks have almost completely replaced the formerly used solutions; i.e., tangent picks and radial picks. They have had a significant influence on reducing the time necessary for their replacement as well as decreasing wear on the tool holders and cutting heads [3–5].

Tangential-rotary picks (which are fitted in cutting drums of longwall shearer loaders – Fig. 1a) are characterized by their significant body length ($L_n \geq 80$ mm)

and slenderness. The pick edges of such picks are equipped with sintered carbide inserts with a cone angle of $2\beta_u \geq 93^\circ$. Also, the shaft inserted into the tool holder is longer and can be graded. The pick is protected against slipping out of the tool holder by means of different types of pins, rings, and bushings. The picks of roadheaders (Fig. 1b) are mounted in tool holders welded to the cutting head accommodated on the arm of this machine. Compared to the picks used in shearer loaders, they are shorter and less slender, and the carbide inserts used to manufacture their edges have larger cone angles [4–7].

The cutting process performed with tangential-rotary picks requires a tool to have a shape and dimensions enabling the edge that penetrates the rock to a depth of g_s to achieve proper astatic angles of cutting. What is particularly important is that the pick edge retains a positive angle of application α_r [1, 8].

A pick mounted in a tool holder is part of the cutting head (Fig. 2); therefore, astatic angles of cutting α_r and γ_r depend not only on the design parameters of the pick but also on cutting speed v_s and advance speed v_p . It can, therefore, be concluded that, for

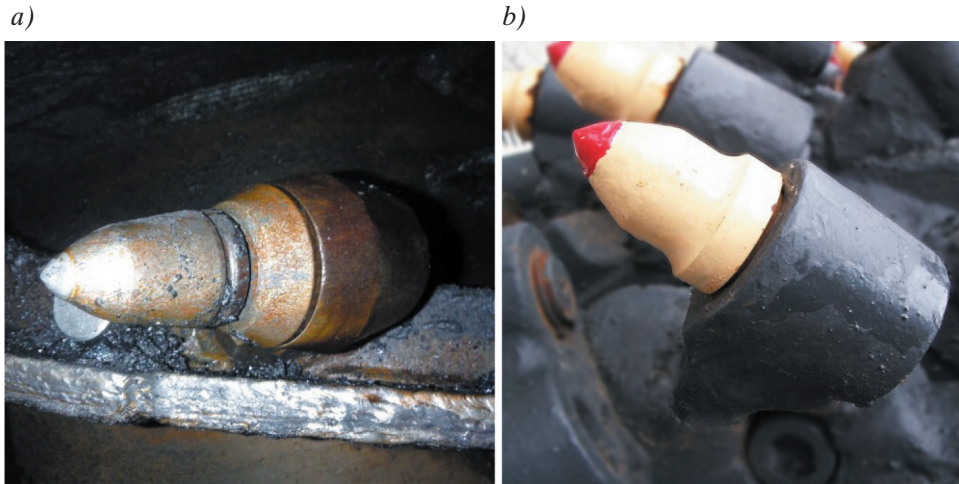


Fig. 1. Tangential-rotary pick mounted on cutting head of: a) shearer loader; b) roadheader

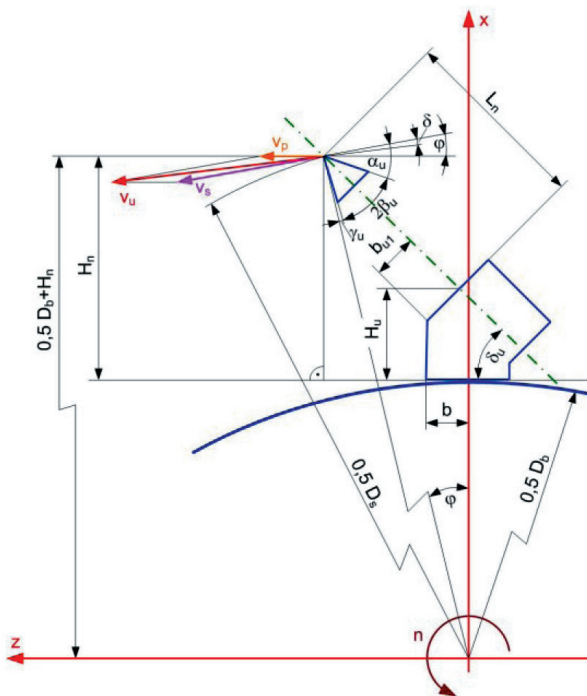


Fig. 2. Parameters of tool holder setup and tangential-rotary pick adjustment on cutting head [6]

a cutting head having diameter D_s , cutting speed v_s , advance speed v_p , height of the tool holder H_u , and angle δ_u , it is necessary to select a tangential-rotary pick of length L_n and pick edge angle $2\beta_u$. Then, the remaining design parameters will have to assume such values as to guarantee the most-favorable conditions of cutting. [8–10]. Thus, it is essential to choose such a design and kinematic parameters of the pick that the lowest-possible cutting resistances and maximum-possible durability of the pick are obtained as a result [1, 4, 10].

A cutting tool is an element that is in direct contact with the mined rock during extraction works. As a result of the mining process, the tool is subjected to excessive wear in the zone that is the interface between this tool and the extracted material. This leads to changes in the geometrical shape of the tool as well as a loss in its weight. Especially, a change in shape and loss in weight are factors that cause the carbide insert to fall out, which means a loss of cutting capacity. Mechanical damage to a tool resulting from incorrect operation or manufacturing flaws is another problem [3, 4, 10].

The proper choice of design and kinematic parameters along with the pick's manufacture technology and the type of materials used are those factors that condition the proper performance of picks. Thus, to improve the durability of rotary picks, intensive research aimed at the development of optimal materials for both the cutting edges and pick bodies is being carried out.

Currently, the cutting edges are most-commonly made of cemented carbide with cobalt content. However, the edges are made of other materials; e.g., cermet, ceramic sinters, or polycrystalline diamond [5, 7]. A cermet is a cemented carbide with titanium-based hard particles. The name “cermet” combines the words ceramic and metal. Originally, cermets were composites of TiC and nickel. Modern cermets are nickel-free and have a designed structure of titanium carbonitride Ti (C, N) core particles, a second hard phase of (Ti, Nb, W) (C, N) and a W-rich cobalt binder. In the group of ceramic sinters, we can name oxide ceramics are aluminum-oxide-based (Al_2O_3) and nitride ceramics primarily containing silicon nitride (Si_3N_4). In addition, a polycrystalline diamond

(PCD) is a composite of diamond particles sintered together with a metallic binder. Diamond is the hardest and, therefore, the most-abrasion-resistant of all materials. As a cutting tool, it has good wear resistance, but it lacks chemical stability at high temperatures and dissolves easily in iron [5, 7, 11].

Then, a pick of high durability is obtained, assuming that the operational part of the pick protects the carbide insert against falling out at the same time. Therefore, numerous methods for reducing the wear rate of the pick body (and the resulting possibility of losing carbide inserts) are applied [3, 9].

Pick bodies are made of high-impact, high-wear-resistant, and high-abrasive-resistant steels that can additionally undergo carburizing and thermal processing [7, 12]. In order to reduce wear, the conical surface of the pick is also protected by means of plating it with an abrasion-resistant layer performed by welding. Another method involves incorporating an additional cemented carbide ring on the heavy-duty section of the pick body (Fig. 3) [5, 10]. The above-mentioned measures result in an increase in pick durability; however, this fact still needs to be confirmed by laboratory or performance tests.

The measurement of the wear rate of tangential-rotary picks is aimed at determining their durability. The measurements have to be made under identical conditions to make sure that the results are reliable, reproducible, and probabilistic. This will allow for the evaluation of the durability of the pick as well as the comparison of different picks. In industrial conditions, the durability of cutting picks is usually defined as a ratio of the number of replaced picks to the volume of extracted material. Most frequently, it is the number of worn picks necessary to obtain 1000 Mg

or 1000 m³ of extracted material. However, under laboratory conditions, the wear rate (durability) of the pick (or picks) is most-effectively determined on the basis of the loss in its (their) weight in relation to the volume of rock specimen extracted with this pick (these picks) [8–10].

This paper presents the results of research which aim was the above-mentioned measurement of the tangential-rotary picks wear, made of different materials. Standard, commercially available, and prototypical picks were compared. The tests were carried out at a special state-of-the-art laboratory stand for investigating the mining process performed by means of cutting or rotary drilling with single cutting tools and mining machinery units belonging to the Chair of Mining, Dressing and Transport Machines of the AGH UST in Krakow.

2. SUBJECT OF RESEARCH

The tests were conducted for eight types of tangential-rotary picks made of different materials, all of which had been hardfaced or machined in order to improve their durability. Apart from the standard picks, all of these picks were prototypical ones (Fig. 4). The length of the operational part of all picks was 90 mm, and the edge angle was $2\beta_u = 90^\circ$. Seven of these different types were equipped with sintered carbide, while one type was reinforced with a ceramic insert. The tests were performed on the following picks:

- Standard picks, commercially available, with a sintered carbide insert $\phi 22 - 4$ picks – marked as Commercial 22.

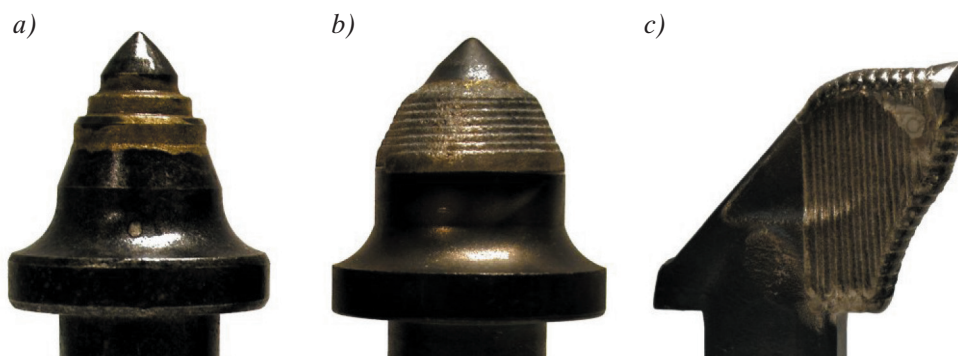


Fig. 3. Methods for increasing durability of pick body: a) tangential-rotary pick with additional ring made of cemented carbide accommodated on attacking part; b) tangential-rotary pick with hard-faced layer welded on; c) radial pick with hard-faced layer welded on [3, 8]

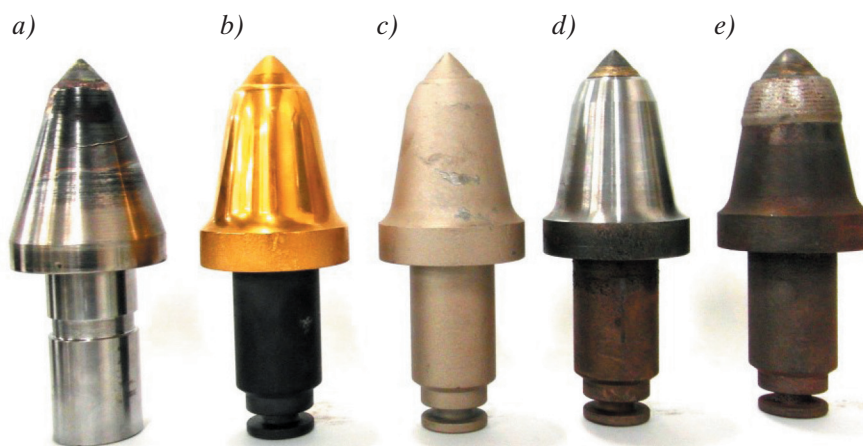


Fig. 4. Selected picks intended for testing: a) Casted 22; b) Gold 25; c) Commercial 22; d) Silver 22; e) Hardfaced 25

- Standard picks, commercially available, with a cemented carbide insert $\phi 25$ – 4 picks – marked as Commercial 25 (Fig. 4c).
- Laser hardfaced picks with a sintered carbide insert $\phi 22$ (the Commercial 22 picks were used for laser hardfacing) – 4 picks – marked as Hardfaced 22.
- Laser hardfaced picks with a sintered carbide insert $\phi 25$ (the Commercial 25 picks were used for laser hardfacing) – 4 picks – marked as Hardfaced 25 (Fig. 4e).
- Titanium-nitride-coated picks with a sintered carbide insert $\phi 25$ (the Commercial 25 picks were used for hardfacing) – 4 picks – marked as Gold 25 (Fig. 4b).
- Picks with the hardened body with a sintered carbide insert $\phi 25$ (the Commercial 22 picks were used for hardfacing) – 4 picks – marked as Silver 22 (Fig. 4d).
- Casted picks with a sintered carbide insert $\phi 22$ (casted picks, no information on the material used) – 4 picks – marked as Casted 22 (Fig. 4a).
- Casted picks equipped with a ceramic insert instead of cemented carbide (no information on the material used) – 4 picks – marked as Ceramic.

3. RESEARCH PLAN AND METHODOLOGY

To assess the durability of the picks provided for the tests, the wear rate defined as the total loss in weight of the picks in relation to the volume of the extracted material during the cutting test of an artificial rock sample [8, 9]. The assumed definition of the parameter that defines the durability of picks and the

requirements pertaining to testing their wear rate resulted in the approval of the following research plan:

- preparation of a cement-sand sample (cement, sand, aggregates, water) of the specified uniaxial compressive strength (empirically determined),
- preparation of a test disc with proper holders,
- preparation and marking of the picks intended for research and measuring their weight,
- mounting four tangential-rotary picks on the test disc,
- cutting by milling under laboratory conditions at constant advance and cutting speeds,
- dismantling the picks,
- measuring the weight of the picks after the cutting process,
- measuring the volume of the extracted material obtained due to the operation of the tested picks,
- calculating the C2 factor; i.e., the coefficient defining the wear rate of the picks.

The execution of the approved research plan and methodology necessitated defining (or assuming) the following important parameters related to the cutting process performed with the picks in question:

- cutting a cement-sand sample composed of cement, sand, and basaltic aggregate of a uniaxial compressive strength $R_c = 22.65$ MPa and invariant mass $\gamma_w = 2.18$ Mg/m³,
- advance speed: $v_{pu} = 0.01$ m/min,
- number of revolutions of the test disc: $n = 42$ rpm,
- length of the cut: 120 mm,
- web cut: 152 mm,
- outside diameter of the test disc: $\phi 186.3$ mm.

Following the measurement of the weight of the picks and the volume of the cut material extracted

with these picks, it is possible to determine the factor characterizing the wear rate of the tested picks. The wear rate of the picks (durability) shall be determined by formula (1):

$$C2 = \frac{\Delta m}{m} \cdot \frac{V_w}{V_u} \quad [-] \quad (1)$$

where:

- $C2$ – wear rate on the basis of weight,
- Δm – loss in weight during testing (in the body together with the pick edge) [g],
- m – weight of the pick prior to testing [g],
- V_w – standard volume of the sample [m³],
- V_u – volume of the cut material obtained from the sample during testing [m³].

The standard volume of sample V_w is assumed arbitrarily. The volume of the sample obtained from cutting during test V_u is a calculated value and is determined on the basis of the measured web cut, diameter of the cutting head, and length of the cut [8].

The tests of all types of picks are performed in accordance with the approved methodology and research plan. The following should be noted: the lower the value of the $C2$ parameter, the lower the wear rate of the pick. In this case, it is especially recommended to carry out laboratory tests. Such tests have to be conducted on a specially prepared test stand meeting the requirements of the approved methodology [8].

4. EXECUTION OF RESEARCH

Prior to testing, all of the picks were checked (in order to note any potential flaws), photographed, and weighed. Next, each set of picks underwent testing on the test stand.

4.1. Test stand

Tests were performed on a laboratory test stand for investigating the rock-breaking process by cutting or drilling with single cutting tools or mining machinery units. This is used to perform comprehensive laboratory tests related to the widely-understood rock-cutting process. This particular test stand allows us to perform the cutting process with a particular cutting head on an artificial or natural rock sample under laboratory conditions. The test stand consists of three main subassemblies (Fig. 5):

- drive assembly of the cutting head,
- sample mounting and driving assembly,
- measuring and control system.

The drive assembly of the cutting head is placed on a foundation; it is composed of a 250 kW AC induction motor (supply voltage 3×400 V; rated speed 1487 rpm) that is DTC controlled and powered by an intermediate frequency inverter. The crankshaft torque is transmitted to the shaft of the cutting tool by means of a mechanical gearbox with a ratio of $i = 28$. Additionally, a torque-measuring shaft was mounted on the crankshaft. The configuration of the assembly enables the operation of the drive in two ranges: the-so called constant torque control (up to 50 rpm) and constant power control (up to 120 rpm). The drive assembly is equipped with a spline at the end on which the cutting tool is mounted.

A rock sample moves longitudinally and transversely in relation to the cutting tool. The longitudinal and transverse motion of the rock sample is forced by hydraulic cylinders, which allow for achieving a feed speed from 0 to 9.9 m/min, feed force up to 150 kN, longitudinal stroke up to 2.5 m, and transverse stroke up to 1.3 m. The length of the rock sample is 2.5 m, its width is 1.3 m, and its height is 2.5 m.

The test stand makes it possible to investigate cutting heads with a maximum diameter of 2.2 m and a maximum web cut of 1.0 m. The output obtained during the cutting process falls into a hopper moving on guides together with the specimen that is being cut. This solution allows for the uninterrupted disposal of the extracted material (during tests).

The control system and the system of controlling and registering particular values connected with the rock-breaking process are housed in a cab that restricts noise level and pollution. The control system was prepared on the basis of programmable logic controllers (PLCs). Haptic panels and a remote control are used for process visualization and control. The operator is able to change each of the process parameters and preview all of the current values of the registered (measured) quantities. The measuring assembly consists of sensors that allow us to determine the runs of the following:

- longitudinal feed speed,
- transverse feed advance,
- rated speed of the cutting head,
- torque of the cutting resistance,
- longitudinal forces,
- transverse forces.

Additionally, the test stand allows us to measure dust levels during testing and to perform grain-size distribution analyses of the extracted material.



Fig. 5. Laboratory test stand to research cutting process or rotation drilling with use of single cutting tool or cutting head: a) operator ca; b) cement sample with its mounting and drive assembly and cutting head used for testing; c) drive assembly of cutting head

4.2. Test procedure

The tests were conducted for eight sets of picks in accordance with the detailed research plan and approved methodology. Picks on the test disc formed a pick arrangement as shown in Figure 6. The picks were arranged around the perimeter and spaced at 90° intervals. Each set of picks was mounted in tool holders numbered from 1 to 4, which were incorporated on the disc. Figure 7 shows the picks mounted in the tool holders prepared for testing in particular test runs.

In Figure 8, selected picks after the cutting process are presented. Next, the picks were prepared for weight measurements; on the basis of the obtained values, the parameters defining the wear rate of particular types of picks were calculated in accordance with the assumed research plan and methodology.

4.3. Analysis of the test results

The test results were analyzed on the basis of the measured values and given formulae. Then, they were compared in the so-called measurement record sheets. The table (an example of which is shown below – Table 1) is the principal part of the measurement record sheet. The measurement record sheet for each type of pick consists of two pages. The first page contains information pertaining to the researchers, research execution (date, parameters of the sample), tested picks (marking, weight prior to and following the measurements), volume of the cut sample, C2 parameter for each pick, and mean value. On the other page of the measurement record sheet, there are photographs of each pick taken after testing. Three photographs of each pick are taken, each time rotated by 120° in relation to the pick axis (Fig. 9).

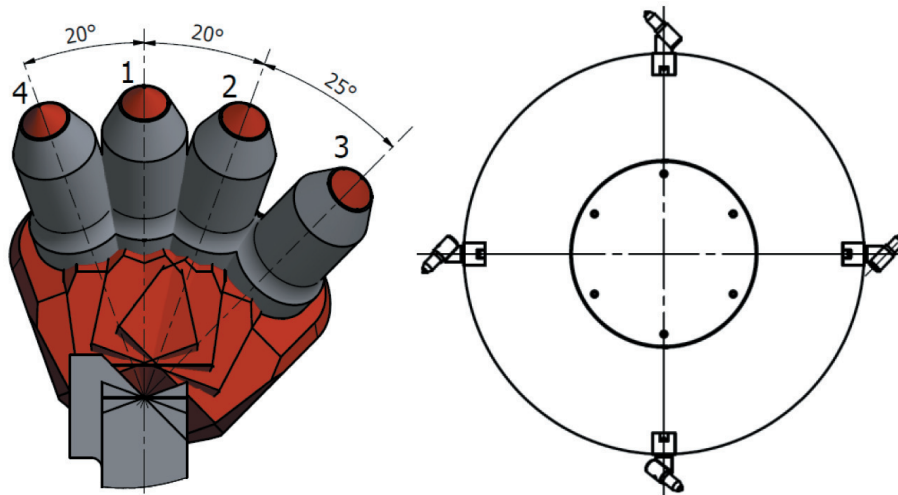


Fig. 6. Scheme of applied pick arrangement with picks marked [8]



Fig. 7. Examples of tangential-rotary picks prepared for testing

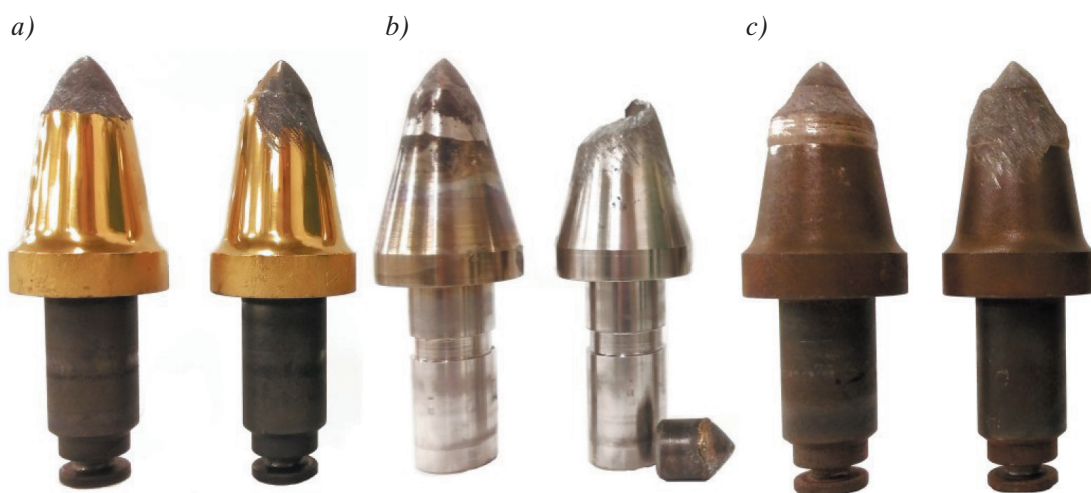


Fig. 8. Selected picks after testing: a) Gold 25; b) Casted 22; c) Hardfaced 25

Table 1

Comparison of test results and calculated parameters for picks marked as Commercial 22

| Pick Commercial 22 | | | Before test | | After test, $V_w = 5 \text{ m}^3$ | | | | | |
|-------------------------------------|-----------------|------------------|---------------------|-----------------------|---|-------------|------|-------|-------------------------|--------|
| No. | Marking of pick | Producer marking | Pick weight m [g] | Pick weight m_p [g] | Decline of pick weight $\Delta m = m - m_p$ [g] | Photographs | | | V_u [m ³] | C2 [-] |
| | | | | | | 0° | 120° | 240° | | |
| 1 | 1 | – | 1830.14 | 1809.69 | 20.45 | 1-I | 1-II | 1-III | 0.0539 | 1.036 |
| 2 | 2 | – | 1828.49 | 1795.85 | 32.64 | 2-I | 2-II | 2-III | 0.0539 | 1.655 |
| 3 | 3 | – | 1828.80 | 1792.85 | 35.95 | 3-I | 3-II | 3-III | 0.0539 | 1.822 |
| 4 | 4 | – | 1828.40 | 1793.48 | 34.92 | 4-I | 4-II | 4-III | 0.0539 | 1.771 |
| The mean value of the parameter C2: | | | | | | | | | C2 : 1.571 | |



Fig. 9. Photographs of pick marked as Commercial 22 after test made-up each time rotated by 120° in relation to pick axis

5. DURABILITY ASSESSMENT OF THE TESTED PICKS

Eight cutting tests of the picks were carried out within the framework of wear rate (durability) tests of tangential-rotary picks. As a result of the conducted tests and on the basis of the respective calculations, an analysis of the obtained results was performed. Based on the analysis of the research findings, it can be concluded that the picks marked as Gold 25, Commercial 22, and Commercial 25 exhibited the lowest wear rates.

Below, the observations referring to the particular types of picks are presented:

- Commercial 22 and 25 (factory-manufactured picks) – achieved a very good performance result,
- Hardfaced 22 and 25 – despite the application of laser hardfacing, they exhibited a result which was slightly inferior to that of the factory-manufactured picks that had been used to produce them,
- Gold 25 – achieved the best result, still the titanium nitride coating only slightly increased their abrasion resistance,
- Silver 22 – despite the application of a special treatment to the body (the details of this process have not been disclosed), this achieved a result which was slightly inferior to that of the factory-manufactured picks that had been used to produce them,
- Casted 22 – casted pick, rolled after molding to meet the desired dimensions; the pick's bodies broke after fitting them with the sintered carbide inserts, and the picks at Stands 2 and 3 were broken off during testing,
- Ceramic – casted pick, rolled after molding to meet the desired dimensions, wore down extremely quickly despite the four-times smaller volume of the cut sample; the pick at Stand 2 chipped off, and the pick at Stand 3 broke at the holding part.

6. CONCLUSION

As can be seen from this paper, there are numerous ways to improve the durability and decrease the wear rate of tangential-rotary picks. Currently, the most-

-commonly-used method that provides the best results is the hardfacing of the operational part with an abrasion-resistant layer. Nevertheless, as the conducted research indicates, it is not always the best solution. Moreover, it can be concluded that even the best protective coating will not serve its function if the pick or its cutting edge is manufactured with low-quality material.

Undoubtedly, further research aimed at improving the durability of picks should be recommended, as it has a significant influence on lowering operating costs and, consequently, prices of the mined raw materials.

References

- [1] Krauze K.: *Urabianie skał kombajnami ścianowymi*, Wydawnictwo Naukowe Śląsk, Katowice 2002.
- [2] Krauze K., Klempka R., Mucha K.: *Computer – aided design of cutting heads*, "Mining – Informatics, Automation and Electrical Engineering" 2015, 4: 22–32.
- [3] Krauze K., Mucha K.: *Zwiększenie odporności na zużycie ściernie noży kombajnowych*, "Przegląd Górniczy" 2016, 1: 63–67.
- [4] Jonak J.: *Urabianie skał głowicami wielonarzędziowymi*, Wydawnictwo Naukowe Śląsk, Katowice 2002.
- [5] Kotwica K.: *Effect of selected working conditions of cutting picks on their wear during the mining of hard rocks*, "Quarterly Mechanics and Control" 2010, 29, 3: 110–119.
- [6] Bołoz Ł.: *Ocena obciążenia jednoorganowego kombajnu ścianowego na podstawie badań analitycznych* [doctoral thesis], Kraków 2012.
- [7] Kotwica K., Gospodarczyk P.: *Hard Rock Mining with use of New Cutting Tools*, "Journal of Mining Sciences" 2003, 39, 4: 387–393.
- [8] Krauze K., Bołoz Ł., Wydro T.: *Parametric factors for the tangential – rotary picks quality assessment*, "Archives of Mining Sciences" 2015, 60, 1: 265–281.
- [9] Krauze K., Bołoz Ł., Wydro T.: *Ocena jakości noży styczo-obrotowych na podstawie badań laboratoryjnych*, "Mechanizacja, Automatyzacja i Robotyzacja w Górnictwie: monografia 2012", Łędziny 2012.
- [10] Krauze K., Skowronek T., Mucha K.: *Influence of the hard – faced layer welded on tangential – rotary pick operational part on to its wear rate*, "Archives of Mining Sciences" 2016, 61, 4: 779–792.
- [11] Sandvik Coromant: <http://www.sandvik.coromant.com> (access: 24.04.2017)
- [12] Kotwica K.: *The influence of water assistance on the character and degree of wear of cutting tools applied in roadheaders*, "Archives of Mining Sciences" 2011, 56, 3: 353–374.

KRZYSZTOF KRAUZE, Prof.
 ŁUKASZ BOŁOZ, Ph.D., Eng.
 TOMASZ WYDRO, Ph.D., Eng.
 KAMIL MUCHA, M.Sc., Eng.

*Faculty of Mechanical Engineering and Robotics
 AGH University of Science and Technology
 al. Mickiewicza 30, 30-059 Krakow, Poland
 {krauze, boloz, wydro, kmucha}@agh.edu.pl*

KRZYSZTOF KRAUZE
ŁUKASZ BOŁOZ
TOMASZ WYDRO
KAMIL MUCHA

Badania trwałości noży styczno-obrotowych wykonanych z różnych materiałów

W artykule zamieszczono informacje dotyczące noży styczno-obrotowych, które obecnie są najpowszechniej stosowanymi narzędziami urabiającymi. Opisano ich zastosowanie, budowę, sposoby zwiększania ich trwałości oraz problemy występujące podczas ich eksploatacji. Główną częścią artykułu są wyniki badań trwałości noży styczno-obrotowych wykonanych z różnych materiałów bądź napawanych lub obrobionych w sposób zwiększający ich trwałość. Do badań wybrano noże wzorcowe, handlowe oraz noże prototypowe. Przedstawiono również specjalne nowoczesne stanowisko laboratoryjne do badania procesu urabiania przez frezowanie lub wiercenie obrotowe pojedynczymi narzędziami skrawającymi lub organami, należące do Katedry Maszyn Górniczych, Przeróbczych i Transportowych AGH w Krakowie, na którym przedmiotowe badania zostały wykonywane.

Słowa kluczowe: mechaniczne urabianie skał, noże styczno-obrotowe, trwałość, zużycie, stanowisko laboratoryjne

1. WPROWADZENIE

Drażenie wyrobisk chodnikowych i eksploatacja wyrobisk ścianowych odbywa się najczęściej za pomocą urabiania mechanicznego, które polega na bezpośrednim oddziaływaniu narzędziem lub zespołem narzędzi skrawających na caliznę skalną. Najbardziej powszechne jest urabianie skał przez frezowanie kombajnami oraz struganie strugami przy użyciu narzędzi skrawających (noże kombajnowe, strugowe) [1–3].

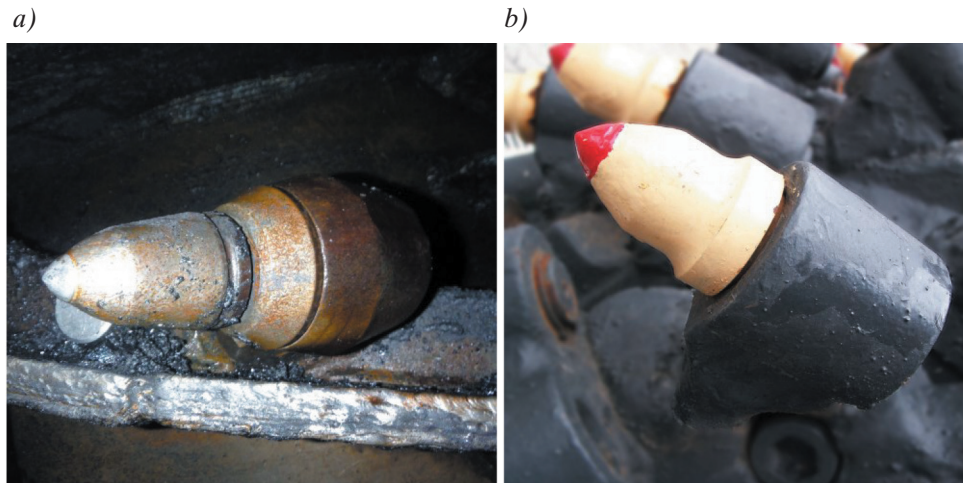
Obecnie zarówno w kombajnach chodnikowych, ścianowych, a nawet szybowych, najczęściej stosowane są noże styczno-obrotowe. Dzięki większej trwałości noże te prawie całkowicie wyparły starsze rozwiązania, czyli noże styczne płaskie oraz promieniowe. Ma to szczególne znaczenie dla zmniejszenia czasu wymaganego na ich wymianę oraz zużycie uchwytów i organów [3–5].

Noże styczno-obrotowe stosowane w organach kombajnów ścianowych (rys. 1a) charakteryzują się

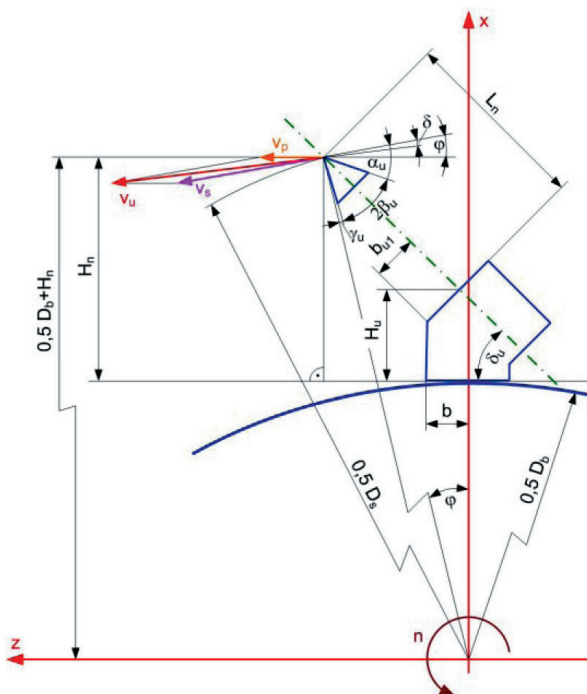
znaczną długością korpusu ($L_n \geq 80$ mm) i smukłością. Ostrza tych noży zbrojone są węglnikami o kącie zbieżności stożka $2\beta_u \geq 93^\circ$. Również część chwytowa wprowadzana w uchwyt nożowy jest dłuższa i może być stopniowana. Nóż przed wypadnięciem z uchwytu zabezpieczony jest różnego typu zawleczkami, pierścieniami lub tulejkami. Noże kombajnów chodnikowych (rys. 1b) mocowane są w uchwytach przyspawanych do głowicy urabiającej zabudowanej na ramieniu maszyny. Są one w przeciwieństwie do noży kombajnów ścianowych krótsze i mniej smukłe, a węgliki stosowane na ostrza tych noży mają większe kąty zbieżności stożka [4–7].

Proces frezowania nożami styczno-obrotowymi wymaga od narzędzia takiego kształtu i wymiarów, aby jego ostrze zagłębiające się podczas pracy w caliznę na głębokość g_s uzyskiwało właściwe ruchowe kąty skrawania. Szczególnie należy zwrócić uwagę na to, aby ostrze noża w procesie skrawania miało zawsze dodatni ruchowy kąt przyłożenia α_r [1, 8].

Nóż zamocowany w uchwycie jest częścią organu (rys. 2), dlatego ruchowe kąty skrawania α_r i γ_r zależą



Rys. 1. Nóż styczo-obrotowy zamocowany na organie: a) kombajnu ścianowego; b) kombajnu chodnikowego



Rys. 2. Parametry ustawienia uchwytu i noża styczo-obrotowego na organie [6]

nie tylko od parametrów konstrukcyjnych noża, ale również uchwytu i organu, jak też od prędkości skrawania v_s i posuwu v_p . Wynika stąd, że dla organu o średnicy D_s , prędkości skrawania v_s i posuwu v_p , wysokości uchwytu H_u i kącie δ_u , należy dobrać nóż styczo-obrotowy o wymaganej długości L_n i kącie ostrza $2\beta_u$. Wtedy pozostałe parametry konstrukcyjne noża muszą mieć takie wartości, aby zapewnić najkorzystniejsze warunki urabiania [8–10]. Stąd też bardzo ważne jest zapewnienie takich parametrów konstrukcyjnych i kinematycznych noża, by uzyskać jak najmniejsze opory urabiania i jak najwyższą jego trwałość [1, 4, 10].

Narzędzie skrawające podczas eksploatacji jest elementem będącym bezpośrednio w kontakcie z urabianą calizną. W wyniku procesu urabiania w strefie styku narzędzia ze skrawanym materiałem dochodzi do jego zużycia. Powoduje to zmiany zarówno kształtu geometrycznego noża, jak i ubytek jego masy. Szczególnie zmiana kształtu i ubytek masy części roboczej skutkuje wypadnięciem węgla, a tym samym utratą zdolności skrawających. Innym zagadnieniem jest uszkodzenie mechaniczne noża wynikające z niewłaściwej eksploatacji lub jego wykonania [3, 4, 10].

O prawidłowej pracy noży decyduje nie tylko odpowiedni dobór parametrów konstrukcyjnych i kinematycznych noży, ale również technologia ich wykonania i rodzaj zastosowanych materiałów. Dlatego w celu zwiększenia trwałości noży obrotowych prowadzi się szereg badań nad opracowaniem nowych materiałów zarówno na ostrza, jak i korpusy tych narzędzi.

Ostrza aktualnie najczęściej wykonuje się z węglików spiekanych na osnowie kobaltu. Jednakże stosuje się również inne materiały na ostrze, np. cermetale, spieki ceramiczne czy diament polikrystaliczny [5, 7]. Cermetale (nazwa powstała z połączenia słów ceramika i metal) jest węglikiem spiekającym z twardymi cząstkami opartymi na tytanie. Początkowo cermetale były kompozytami TiC oraz niklu. Nowoczesne cermetale nie zawierają niklu i posiadają zaprojektowaną strukturę cząsteczek rdzenia z węgla tytanu Ti (C, N), drugiej twardej fazy z (Ti, Nb, W) (C, N) oraz bogatego w wolfram spoiwa kobaltowego. W grupie spieków ceramicznych możemy wyróżnić ceramikę tlenkową zawierającą głównie tlenek glinu

(Al_2O_3) oraz spieki ceramiczne azotkowe, zawierające głównie azotek krzemu (Si_3N_4). Natomiast diament polikrystaliczny (PCD) jest kompozytem cząstek diamentu zapieczonych razem z metalicznym spoiwem. Diament jest najtwardszym i najbardziej odpornym na ścieranie materiałem. Jako narzędzie skrawające charakteryzuje się wysoką odpornością na zużycie, ale niską stabilnością chemiczną w wysokich temperaturach i łatwo rozpuszcza się w żelazie [5, 7, 11].

Uzyskuje się wtedy nóż, którego ostrze wykazuje dużą trwałość, jeżeli równoległe części robocza noża zabezpiecza węgiel przed wypadnięciem. Stąd stosuje się wiele metod ograniczających szybkość zużycia się korpusu noża, a tym samym i wykruszanie węglików [3, 9].

Na korpusy noży styczo-obrotowych stosuje się stale o dużej udarności, wytrzymałości i odporności na ścieranie, które dodatkowo mogą być poddane procesowi nawęglania i obrabiane cieplnie [7, 12]. W celu ograniczenia zużycia wykonuje się również zabezpieczenie zewnętrznej powierzchni stożkowej noża warstwą odporną na ścieranie, wykonywaną metodą napawania (rys. 3b, c). Innym sposobem jest wykonanie na części atakującej korpusu noża dodatkowego pierścienia z węgliku spiekanego (rys. 3a) [5, 10]. Sposoby te zwiększają trwałość noży, lecz wymagane jest jej potwierdzenie na podstawie badań eksploatacyjnych lub laboratoryjnych.

Pomiar szybkości zużycia noży styczo-obrotowych ma na celu określenie ich trwałości. Pomiaru trzeba dokonywać zawsze w tych samych warunkach, tak by wyniki były wiarygodne, powtarzalne i probabilistyczne. Pozwoli to ocenić trwałość noża, ale również porównać w tym aspekcie różne noże. W warunkach przemysłowych trwałość noży skrawających określa się zazwyczaj jako stosunek liczby noży

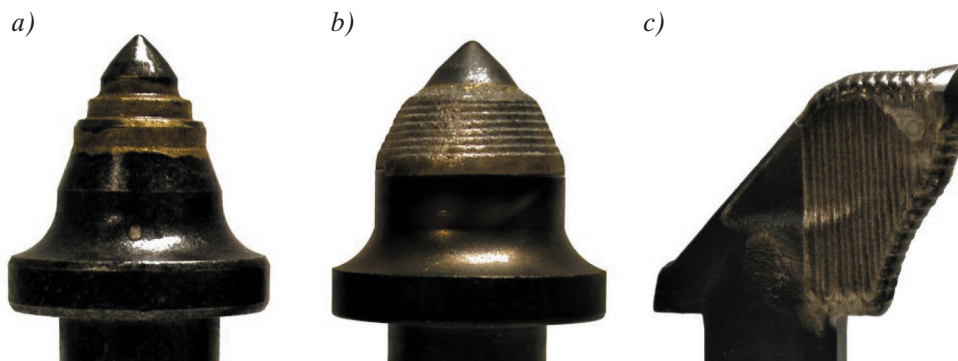
wymienionych do objętości urobionego minerału. Najczęściej jest to liczba noży zużytych na pozyskanie 1000 Mg lub 1000 m³ urobku. Natomiast w warunkach laboratoryjnych szybkość zużycia noża czy noży (trwałość) najefektywniej można wyznaczyć poprzez ubytek masy w stosunku do urobionej przez nóż czy noże objętości próbki skalnej [8–10].

W niniejszym artykule przedstawiono wyniki badań, których celem był wcześniej wspomniany pomiar szybkości zużycia noży styczo-obrotowych, wykonanych z różnych materiałów. Porównano noże wzorcowe, handlowe oraz prototypowe. Badania przeprowadzono na specjalnym nowoczesnym stanowisku laboratoryjnym do badania procesu urabiania poprzez frezowanie lub wiercenie obrotowe pojedynczymi narzędziami skrawającymi lub organami, należącym do Katedry Maszyn Górniczych, Przeróbczych i Transportowych AGH Kraków.

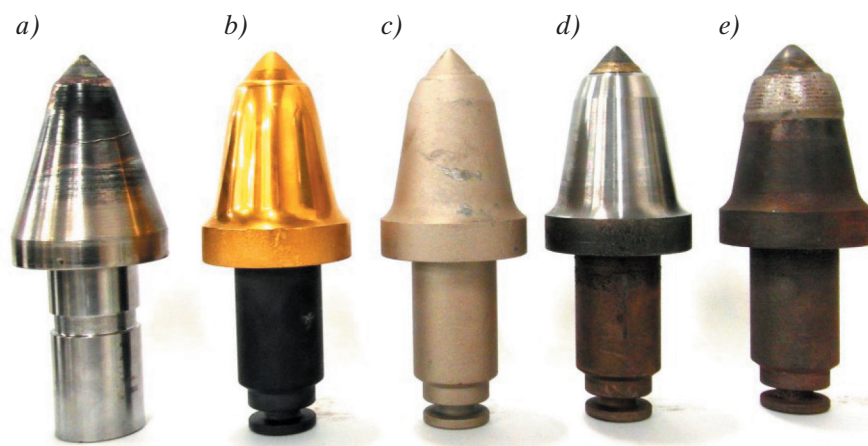
2. PRZEDMIOT BADAŃ

Badaniami objęto osiem typów noży styczo-obrotowych wykonanych z różnych materiałów bądź napawanych lub obrobionych w sposób zwiększający ich trwałość. Wszystkie noże, oprócz wzorcowych, były nożami prototypowymi (rys. 4), o części roboczej długości 90 mm i kącie ostrza $2\beta_u = 90^\circ$. Siedem typów zbrojonych było węglkami spiekany, natomiast jeden typ wkładką ceramiczną. Do badań przeznaczono następujące noże:

- noże wzorcowe, handlowe z węglkiem $\phi 22$ – 4 sztuki – oznaczone jako „handlowy 22”,
- noże wzorcowe, handlowe z węglkiem $\phi 25$ – 4 sztuki – oznaczone jako „handlowy 25” (rys. 4c),



Rys. 3. Sposoby zwiększania trwałości korpusów noży: a) nóż styczo-obrotowy z dodatkowymi pierścieniami z węgliku spiekanego na części atakującej; b) nóż styczo-obrotowy z warstwą napawaną; c) nóż promieniowy z warstwą napawaną [3, 8]



Rys. 4. Wybrane noże przeznaczone do badań: a) „odlewany 22”; b) „złoty 25”; c) „handlowy 22”; d) „srebrny 22”; e) „napawany 25”

- noże napawane laserowo z węglikiem $\phi 22$ (do napawania wykorzystano noże „handlowy 22”) – 4 sztuki – oznaczone jako „napawany 22”,
- noże napawane laserowo z węglikiem $\phi 25$ (do napawania wykorzystano noże „handlowy 25”) – 4 sztuki – oznaczone jako „napawany 25” (rys. 4e),
- noże z powłoką azotku tytanu z węglikiem $\phi 25$ (do napawania wykorzystano noże „handlowy 25”) – 4 sztuki – oznaczone jako „złoty 25” (rys. 4b),
- noże z utwardzonym korpusem z węglikiem $\phi 25$ (do napawania wykorzystano noże „handlowy 22”) – 4 sztuki, oznaczone jako „srebrny 22” (rys. 4d),
- noże wykonane przez odlewanie z węglikiem $\phi 22$ (noże odlewane, brak informacji o materiale) – 4 sztuki, oznaczone jako „odlewany 22” (rys. 4a),
- noże wykonane przez odlewanie z wkładką ceramiczną zamiast węgla spiekane (brak informacji o materiale) – 4 sztuki – oznaczone jako „ceramiczny”.

3. PLAN I METODYKA BADAŃ

W ocenie trwałości noży dostarczonych do badań przyjęto szybkość ich zużycia definiowaną jako łączny ubytek masy noży do objętości urobku uzyskanego podczas próby skrawania sztucznego bloku skalnego [8, 9]. Przyjęta definicja parametru określającego trwałość noży oraz wymagania dotyczące badania szybkości ich zużycia skutkują koniecznością sformułowania następującego planu badań:

- przygotowanie próbki cementowo-piaskowej (cement, piasek, kruszywa, woda) o zadanej wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie (wyznaczona empirycznie),
 - przygotowanie tarczy badawczej z odpowiednimi uchwytami,
 - przygotowanie i oznaczenie noży do badań oraz pomiar ich masy,
 - zamocowanie czterech noży styczno-obrotowych na tarczy badawczej,
 - urabianie przez frezowanie w warunkach laboratoryjnych przy stałej wartości prędkości posuwu i skrawania,
 - demontaż noży,
 - pomiar masy noży po procesie urabiania,
 - pomiar objętości urobku uzyskanego w czasie pracy badanych noży,
 - obliczenie współczynnika C_2 określającego szybkość zużycia noży.
- Realizacja założonego planu i metodyki wymagała wyznaczenia lub przyjęcia następujących istotnych parametrów związanych z procesem urabiania przedmiotowymi nożami:
- urabianie próbki cementowo-piaskowej składającej się z cementu, piasku i kruszywa bazaltowego o wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie $R_c = 22,65$ MPa i masie właściwej $\gamma_w = 2,18$ Mg/m³,
 - prędkość posuwu $v_{pu} = 0,01$ m/min,
 - liczba obrotów tarczy badawczej $n = 42$ obr/min,
 - długość skrawu: 120 mm,
 - zabiór skrawu: 152 mm,
 - średnica tarczy badawczej po ostrzach: $\phi 1863$ mm.
- Po wyznaczeniu masy noży przed badaniami i po nich oraz określeniu urobionej przez nie objętości urobku możliwe jest wyznaczenie wskaźnika charakteryzującego szybkość zużycia badanych noży.

Szybkość zużycia noży (trwałość) określić należy za pomocą wzoru:

$$C2 = \frac{\Delta m}{m} \cdot \frac{V_w}{V_u} [-] \quad (1)$$

gdzie:

- $C2$ – szybkość zużycia noży na podstawie masy,
- Δm – ubytek masy noża podczas badań (korpus wraz z ostrzem) [g],
- m – masa noża przed badaniami [g],
- V_w – objętość wzorcowa próbki [m³],
- V_u – objętość próbki urobiona podczas badań [m³].

Objętość wzorcowa V_w jest przyjmowana arbitralnie. Objętość próbki urobiona podczas badań V_u jest wartością obliczeniową i wyznaczaną na podstawie zmierzonego zabioru, średnicy organu oraz długości wykonanego skrawu [8].

Badania wszystkich typów noży przeprowadza się zgodnie z podaną metodyką i planem badań. Należy zaznaczyć, że im mniejsza wartość parametru $C2$, tym zużycie noża jest mniejsze. Realizacja badań laboratoryjnych jest w tym przypadku szczególnie polecana, lecz wymaga przeprowadzenia ich na specjalnym stanowisku spełniającym wymagania przyjętej metodyki badań [8].

4. REALIZACJA BADAŃ

Przed przystąpieniem do badań wszystkie noże zostały sprawdzone w celu zapisania ewentualnych niedoskonałości, sfotografowane oraz zważone. Następnie każdy zestaw noży został poddany badaniom na poniżej opisanym stanowisku.

4.1. Stanowisko badawcze

Badania zostały zrealizowane na stanowisku laboratoryjnym do badania procesu urabiania w wyniku frezowania lub wiercenia obrotowego pojedynczymi narzędziami skrawającymi lub organami. Służy ono do realizacji kompleksowych badań laboratoryjnych związanych z szeroko pojętym procesem skrawania skał. Przedmiotowe stanowisko badawcze umożliwia realizację procesu frezowania określonym organem urabiającym sztucznej lub naturalnej próbki skalnej, w warunkach laboratoryjnych. Stanowisko badawcze składa się z trzech głównych podzespołów (rys. 5):

- zespołu napędu organu,
- zespołu mocowania i prowadzenia próbki,
- układu pomiarowego i sterowania.

Zespół napędowy organu urabiającego posadowiony jest na fundamencie i składa się z silnika indukcyjnego prądu zmiennego zasilanego z pośredniego przetwornika częstotliwości sterowanego według zasady DTC o mocy 250 kW (napięcie zasilania – 3×400 V; liczba obrotów –1487 obr/min). Moment obrotowy z wału silnika przenoszony jest na wał organu urabiającego poprzez przekładnię mechaniczną o przełożeniu $i = 28$. Dodatkowo na wale silnika zamontowany został momentomierz. Konfiguracja układu pozwala na pracę napędu w dwóch zakresach, tzw. regulacja na stały moment (do 50 obr/min) i regulacja na stałą moc (do 120 obr/min). Zespół napędowy zakończony jest wielowypustem, na którym mocowany jest organ urabiający.

Próbka skalna przemieszcza się podłużnie oraz poprzecznie względem organu urabiającego. Ruch zarówno podłużny, jak i poprzeczny próbki skalnej wymuszony jest za pomocą siłowników hydraulicznych, które umożliwiają uzyskanie prędkości posuwu od 0 do 9,9 m/min, siłę posuwu do 150 kN, skok podłużny do 2,5 m, a poprzeczny do 1,3 m. Długość próbki skalnej wynosi 2,5 m, szerokość 1,3 m, wysokość 2,5 m.

Na stanowisku można badać organy urabiające o maksymalnej średnicy wynoszącej 2,2 m i maksymalnym zabiorze równym 1,0 m. Urobek powstały w czasie urabiania trafia do pojemnika poruszającego się na prowadnicach wraz z urabianą próbką. Rozwiązanie takie umożliwia odbiór urobku w sposób ciągły (w ramach próby pomiarowej).

Układ sterowania, kontroli i rejestracji poszczególnych wielkości związanych z procesem urabiania, umieszczony jest w kabinie ograniczającej poziom hałasu i zanieczyszczenia. Układ sterowania został wykonany z wykorzystaniem sterowników programowalnych PLC. Do wizualizacji i sterowania procesem wykorzystuje się panel dotykowy oraz pilot zdalnego sterowania. Operator ma możliwość zmiany wszystkich parametrów procesu oraz podgląd aktualnych wartości wielkości rejestrowanych (mierzonych). Układ pomiarowy składa się z czujników umożliwiających wyznaczenie przebiegów, takich jak:

- prędkość posuwu podłużnego,
- prędkość posuwu poprzecznego,
- prędkość obrotowa organu,
- moment oporu skrawania,
- siły w kierunku podłużnym,
- siły w kierunku poprzecznym.

Dodatkowo na stanowisku jest możliwość prowadzenia pomiaru zapylenia podczas badań oraz wykonania analizy uziarnienia otrzymanego urobku.



Rys. 5. Stanowisko laboratoryjne do badania procesu urabiania poprzez frezowanie lub wiercenie obrotowe pojedynczymi narzędziami skrawającymi lub organami: a) kabina operatora; b) betonowa próbka wraz z zespołem jej mocowania i posuwu oraz testowy organ urabiający; c) zespół napędowy organu urabiającego

4.2. Przebieg badań

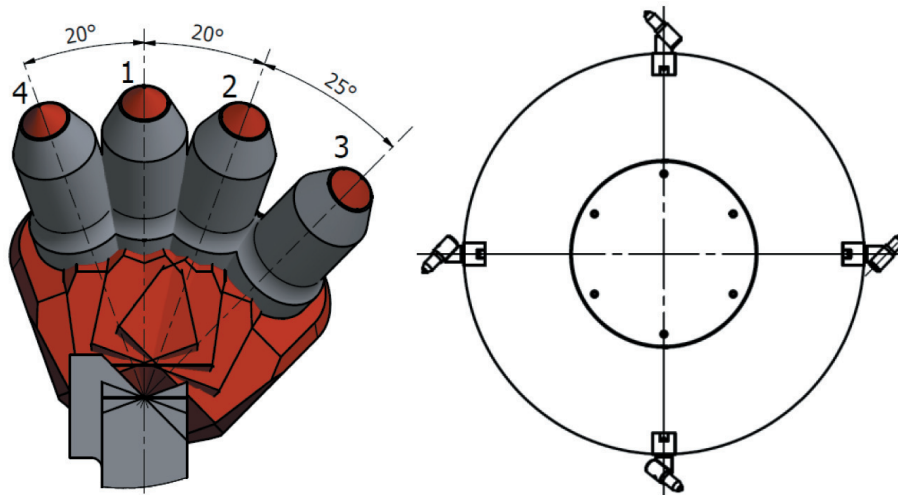
Badania przeprowadzono dla ośmiu kompletów noży zgodnie z opisanym planem i metodyką. Noże na tarczy badawczej tworzyły układ nożowy, którego schemat zamieszczono na rysunku 6. Noże rozmieszczone były na obwodzie co 90° . Każdy komplet noży mocowany był w ponumerowanych od 1 do 4 uchwytach zabudowanych na tarczy. Na rysunku 7 przedstawiono noże zamocowane w uchwytach, przygotowane do badań w poszczególnych próbach.

Na rysunku 8 przedstawiono wybrane noże po przeprowadzeniu procesu urabiania. Następnie noże zostały przygotowane do pomiaru ich masy, a na podstawie uzyskanych wartości obliczono, zgodnie z założonym planem i metodyką badań, parametry określające szybkość zużycia poszczególnych typów noży.

4.3. Opracowanie wyników badań

Na podstawie zmierzonych wartości oraz podanych wzorów opracowano wyniki badań, które zestawiono w tak zwanych kartach pomiarów. Główną częścią karty jest tabela, której przykład przedstawiono poniżej (tab. 1). Karta pomiarów składa się z dwóch stron. Strona pierwsza zawiera informacje dotyczące wykonawców, realizacji badań (data, parametry próbki), badanych noży (oznaczenie, waga przed i po pomiarach), objętość urobionej próbki, parametr C2 dla każdego noża i wartość średnią.

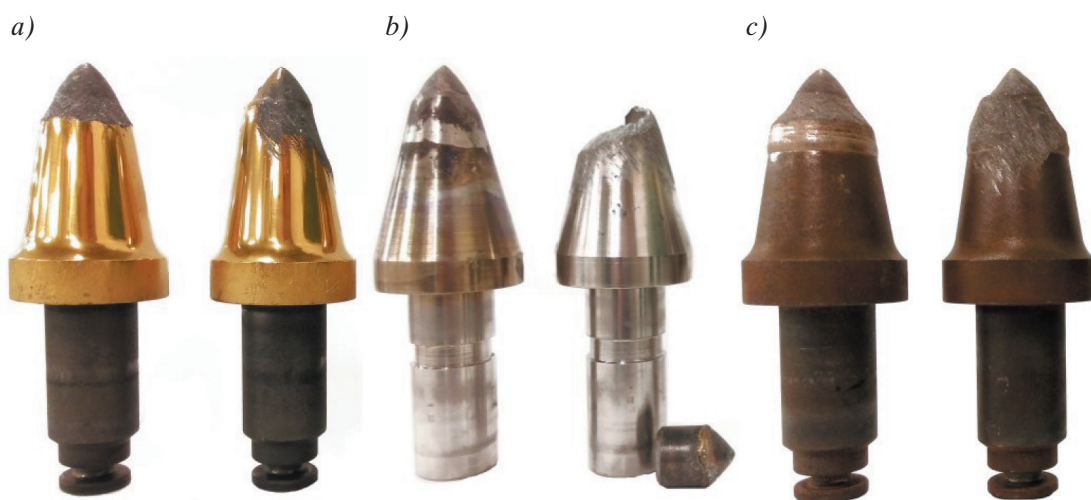
Na drugiej stronie karty pomiarów zamieszcza się zdjęcia każdego noża wykonane po badaniach (robi się trzy zdjęcia każdego noża co 120° względem jego osi) (rys. 9).



Rys. 6. Schemat zastosowanego układu nożowego z oznaczeniem numerów noży [8]



Rys. 7. Przykładowe noże styczno-obrotowe przygotowane do badań



Rys. 8. Wybrane noże po badaniach: a) „złoty 25”; b) „odlewany 22”; c) „napawany 25”

Tabela 1

Zestawienie wyników badań oraz wyznaczonych parametrów dla noży „handlowy 22”

| Nóż „handlowy 22” | | | Przed badaniem | Po badaniu, $V_w = 5 \text{ m}^3$ | | | | | | |
|---|-----------------|-----------------------|-------------------|-----------------------------------|---|---------|------|-------|-------------------------|--------|
| Lp. | Oznaczenie noża | Oznaczenie producenta | Masa noża m [g] | Masa noża m_p [g] | Ubytek masy noża $\Delta m = m - m_p$ [g] | Zdjęcia | | | V_u [m ³] | C2 [-] |
| | | | | | | 0° | 120° | 240° | | |
| 1 | 1 | – | 1830,14 | 1809,69 | 20,45 | 1-I | 1-II | 1-III | 0,0539 | 1,036 |
| 2 | 2 | – | 1828,49 | 1795,85 | 32,64 | 2-I | 2-II | 2-III | 0,0539 | 1,655 |
| 3 | 3 | – | 1828,80 | 1792,85 | 35,95 | 3-I | 3-II | 3-III | 0,0539 | 1,822 |
| 4 | 4 | – | 1828,40 | 1793,48 | 34,92 | 4-I | 4-II | 4-III | 0,0539 | 1,771 |
| Średnia parametru względnego ubytku masy noża C2: | | | | | | | | | C2: 1,571 | |



Rys. 9. Zdjęcia noży „handlowy 22” po badaniach wykonane co 120° względem osi noża

5. OCENA TRWAŁOŚCI BADANYCH NOŻY

W ramach realizacji badań szybkości zużycia (trwałości) noży styczno-obrotowych przeprowadzono osiem prób skrawania nożami. W wyniku przeprowadzonych badań oraz stosownych obliczeń opracowano wyniki. Na podstawie ich analizy można stwierdzić, że noże oznaczone jako „złoty 25” oraz „handlowy 22” i „handlowy 25” charakteryzowały się najmniejszą szybkością zużycia.

Poniżej przedstawiono uwagi dotyczące poszczególnych noży:

- „handlowy 22” i „handlowy 25” (noże fabryczne) – uzyskały bardzo dobry rezultat,
- „napawany 22” i „napawany 25” – pomimo zastosowania napawania laserowego uzyskały rezultat nieznacznie gorszy od noża handlowego, który wykorzystano do ich wykonania,
- „złoty 25” – uzyskały najlepszy rezultat, jednak zastosowanie powłoki z azotku tytanu zwiększyło jedynie nieznacznie ich wytrzymałość na zużycie ścierne,
- „srebrny 22” – pomimo zastosowania specjalnej obróbki korpusu (nie ujawniono, na czym polegał przeprowadzony proces) uzyskały rezultat nieznacznie gorszy od noża handlowego, który wykorzystano do ich wykonania,
- „odlewany 22” – nóż odlewany, toczony po odlaniu do wymaganych wymiarów, korpusy noży pękły po umieszczeniu węgla spiekane, noże na pozycji 2 i 3 zostały wyłamane podczas badań,
- „ceramiczny” – nóż odlewany, toczony po odlaniu do wymaganych wymiarów, zużyły się wyjątkowo szybko pomimo czterokrotnie mniejszej objętości urobionej próbki, nóż na pozycji 2 wykruszył się, a nóż na pozycji 3 złamał się w części chwytowej.

6. ZAKOŃCZENIE

Jak przedstawiono w niniejszym artykule, sposobów zwiększania trwałości i zmniejszania szybkości zużycia noży styczno-obrotowych jest wiele. Obecnie najbardziej popularne i przynoszące najlepsze efekty jest napawanie części roboczej warstwą odporną na

ścieranie. Jednakże, jak wynika z przeprowadzonych badań, nie zawsze jest to najlepsze rozwiązanie. Dodatkowo można stwierdzić, że nawet najlepsza powłoka ochronna nie spełni swojej funkcji, jeśli nóż lub jego ostrze będzie wykonany ze słabej jakości materiału.

Na pewno celowe jest dalsze prowadzenie prób dla zwiększenia trwałości noży, gdyż ma ona bardzo duży wpływ na obniżenie kosztów eksploatacji, a tym samym cen wydobywanych surowców.

Literatura

- [1] Krauze K.: *Urabianie skał kombajnami ścianowymi*, Wydawnictwo Naukowe Śląsk, Katowice 2002.
- [2] Krauze K., Klempka R., Mucha K.: *Computer – aided design of cutting heads*, „Mining – Informatics, Automation and Electrical Engineering” 2015, 4: 22–32.
- [3] Krauze K., Mucha K.: *Zwiększenie odporności na zużycie ścierne noży kombajnowych*, „Przegląd Górniczy” 2016, 1: 63–67.
- [4] Jonak J.: *Urabianie skał głowicami wielonarzędziowymi*, Wydawnictwo Naukowe Śląsk, Katowice 2002.
- [5] Kotwica K.: *Effect of selected working conditions of cutting picks on their wear during the mining of hard rocks*, „Quarterly Mechanics and Control” 2010, 29, 3: 110–119.
- [6] Bołoz Ł.: *Ocena obciążenia jednoorganowego kombajnu ścianowego na podstawie badań analitycznych* [praca doktorska], Kraków 2012.
- [7] Kotwica K., Gospodarczyk P.: *Hard Rock Mining with use of New Cutting Tools*, „Journal of Mining Sciences” 2003, 39, 4: 387–393.
- [8] Krauze K., Bołoz Ł., Wydro T.: *Parametric factors for the tangential – rotary picks quality assessment*, „Archives of Mining Sciences” 2015, 60, 1: 265–281.
- [9] Krauze K., Bołoz Ł., Wydro T.: *Ocena jakości noży styczno-obrotowych na podstawie badań laboratoryjnych*, „Mechanizacja, Automatyzacja i Robotyzacja w Górnictwie: monografia 2012”, Łędziny 2012.
- [10] Krauze K., Skowronek T., Mucha K.: *Influence of the hard – faced layer welded on tangential – rotary pick operational part on its wear rate*, „Archives of Mining Sciences” 2016, 61, 4: 779–792.
- [11] Sandvik Coromant: <http://www.sandvik.coromant.com> [dostęp: 24.04.2017].
- [12] Kotwica K.: *The influence of water assistance on the character and degree of wear of cutting tools applied in roadheaders*, „Archives of Mining Sciences” 2011, 56, 3: 353–374.

prof. dr hab. inż. KRZYSZTOF KRAUZE

dr inż. ŁUKASZ BOŁOZ

dr inż. TOMASZ WYDRO

mgr inż. KAMIL MUCHA

Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki
AGH Akademia Górniczo-Hutnicza
im. Stanisława Staszica w Krakowie
al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków
{krauze, boloz, wydro, kmucha}@agh.edu.pl