Nauka i Technika

Piotr WITTBRODT

Trwałość i zużycie monolitycznych frezów węglikowych
Life and wear of monolithic carbide mills 3

Jan BANASZEK, Józef JONAK, Hubert DĘBSKI

O pewnym mechaniźmie oddziaływania oleju na prędkość pękania w stali
On some mechanism of oil influence on the crack velocity of steel 13

Jerzy BIENIEK

Separacja ziarna pszenicy na sicie daszkowym
Wheat grain separation on a canopy sieve 20

Miron CZERNIEC, Cyprian KOMORZYCKI

Szczególne przypadki styku wewnętrznego elementów cylindrycznych o porównywalnych średnich
Particular cases of inner contact cylinders having comparable diameters 24

Mariusz WAŻNY, Zdzisław IDZIASZEK

Model symulacyjny ruchu pocisku po jego wylocie z przewodu lufy
Symulative model of a projectile movement after leaving of the barrel 30

Dariusz MAZURKIEWICZ

Monitorowanie stanu połączeń klejonych taśm przenośnikowych w warunkach rzeczywistych
Monitoring the condition of adhesive-sealed belt conveyors in operation 41

Boleslav KADLEČEK, Ladislav PEJŠA, Miroslav RŮŽIČKA

The comparison of power, economy and ecological parameters of spark-ignition engine of lawn mowers 50

Věra VOŠTOVÁ, Terezie VONDRÁČKOVÁ, Miroslav RŮŽIČKA

Future Trends in Design of Construction and Agricultural Machines 55

WITTBRODT P.: **Trwałość i zużycie monolitycznych frezów węglikowych**; EiN nr 3/2005, s. 3-12.

W artykule przedstawiono wyniki badań zużycia frezów monolitycznych węglikowych metodą wskaźników. Wykazano nieadekwatność tej metody do zastosowań przemysłowych oraz zaproponowano zastosowanie układu monitorującego stan narzędzia wykorzystującego systemy samouczące.

BANASZEK J., JONAK J., DĘBSKI H.: **O pewnym mechaniźmie oddziaływania oleju na prędkość pękania w stali**; EiN nr 3/2005, s. 13-19.

W artykule przedstawiono opracowanie wyników badania prędkości pękania stali 45 w otoczeniu powietrza i oleju parafinowego. Podano równania opisujące prędkość pękania. Przeprowadzono analizę przyczyn zmniejszenia prędkości pękania przez środowisko oleju. Opisano mechanizm oddziaływania oleju na prędkość wzrostu pęknięcia.

BIENIEK J.: **Separacja ziarna pszenicy na sicie daszkowym**; EiN nr 3/2005, s. 20-23.

Praca przedstawia działanie nowego sita żaluzjowego typu „daszkowego" przystosowanego do pracy w kombajnach zbożowych. Głównym celem badań było znalezienie takiego rozwiązania konstrukcyjnego zespołu czyszczącego, który pracowałby prawidłowo na terenach nachylonych i równocześnie nie wymagałby poziomowania całego kombajnu. Badania dowiodły, że sito daszkowe spełnia te wymagania.

CZERNIEC M., KOMORZYCKI C.: **Szczególne przypadki styku wewnętrznego elementów cylindrycznych o porównywalnych średnich**; EiN nr 3/2005, s. 24-29.

W artykule podjęto problem styku wewnętrznego elementów cylindrycznych o porównywalnych średnicach z małymi odchyłkami od kształtu kołowego. Przedstawiono wyniki przybliżonego rozwiązania równania podstawowego opisującego styk dwuobszarowy, oraz rozważano współpracę elementów z błędami owalności oraz graniastości potrójnej i poczwórnej. Rozwiązania numeryczne przedstawione zostały w postaci wykresów.
Wszystkie znane badania dotyczące współpracy elementów cylindrycznych nie uwzględniają w swoich rozwiązaniach wpływu małych odchyłek od kształtu kołowego takich np. jak eliptyczność, owalność i graniastość. Odchyłki te mają istotny wpływ na wielkość i rozkład nacisków stykowych. Ich ocena ilościowa ma duże znaczenie praktyczne.

WAŻNY M., IDZIASZEK Z.: **Model symulacyjny ruchu pocisku po jego wylocie z przewodu lufy**; EiN nr 3/2005, s. 30-40.

W artykule przedstawiono jeden ze sposobów rozwiązania problemu głównego balistyki zewnętrznej. Zwrócono szczególną uwagę na istotę tego zagadnienia w aspekcie skuteczności zastosowania działka lotniczego. Jako narzędzie do rozwiązania przedstawionego zagadnienia wykorzystano specjalistyczne oprogramowanie CFD-FASTRAN. Obiektem badań był pocisk artyleryjski wystrzelony z działka lotniczego.

MAZURKIEWICZ D: **Monitorowanie stanu połączeń klejonych taśm przenośnikowych w warunkach rzeczywistych**; EiN nr 3/2005, s. 41-49.

Typowe układy transportu wewnątrzzakładowego, do jakich zaliczamy przenośniki taśmowe – charakteryzują się znaczną awaryjnością wynikającą w większości przypadków z nieprzewidywalności wystąpienia czynników powodujących np. zerwanie taśm. Nie istnieją systemy monitorujące pracę tego typu urządzeń, ani też systemy zapobiegające pojawieniu się stanów krytycznych. Ponadto układy takie, jako potencjalne obiekty sterowania charakteryzują się wielowymiarowością. Oznacza to skomplikowany charakter zależności pomiędzy poszczególnymi parametrami pracy przy obecności wielu sprzężeń. Analiza opracowań o charakterze teoretycznym pozwala wnioskować, że rozwiązanie tego problemu można znaleźć stosując do monitorowania parametrów pracy systemy inteligentne, w tym oparte na sztucznych sieciach neuronowych. System taki powinien zapewnić właściwe monitorowanie pracy układów transportowych oraz inteligentne sterowanie opierające się na analizie parametrów charakterystycznych dla danego obiektu.

WITTBRODT P.: **Life and wear of monolithic carbide mills**; EiN nr 3/2005, s. 3-12.

This paper presents the results of investigation of wear mills of monolithic carbide using the indexes method. The article also shows inadequacy of this method to industrial uses and proposes use of equipment monitoring the condition of a tool using the self-learning systems.

BANASZEK J., JONAK J., DĘBSKI H.: **On some mechanism of oil influence on the crack velocity of steel**; EiN nr 3/2005, s. 13-19.

In this article an elaboration of results of carbon steel 45 crack velocity research in air and paraffin oil environment were presented. Crack velocity equations were given. An analysis of crack velocity decrease reasons by oil environment was conducted. A mechanism of oil influence on crack extension velocity was described.

BIENIEK J.: **Wheat grain separation on a canopy sieve**; EiN nr 3/2005, s. 20-23.

The paper deals with the operation of a new adjustable canopy sieve fitted for combine-harvesters. The general aim of the study was to find such a construction solution for a cleaning unit that the unit could be able to work properly on the slopes and there would be no need to level a whole harvester. A canopy sieve meets the requirements, a study concluded.

CZERNIEC M., KOMORZYCKI C.: **Particular cases of inner contact cylinders having comparable diameters**; EiN nr 3/2005, s. 24-29.

The paper presented inner contact of cylinders having comparable in case of small out-of-roundness. There are presented results of asymptotic solutions, by collocation method the basic equation describing contact problem. The particular cases contact problem and deviations from circular shape, like bi-ared contact and joints with lobing elements were carried out. Numerical calculation were presented in graphical way.
All well-known solutions of cylindrical joints do not take into account small deviations from circular shape, like elipticity, lobing, ovality and so forth. The deviation of element conteurs has an effect on magnitude and distribution of the contact pressures. Therefore quantitive estimation of the effect is very important for practical reasons.

WAŻNY M., IDZIASZEK Z.: **Symulative model of a projectile movement after leaving of the barrel**; EiN nr 3/2005, s. 30-40.

In the article was presented the way to solve the main issue of external ballistics. There paid the attention to the essence of the matter of effectiveness of the use air aviation cannons. The problem was solved by using the specialist software CFD-FASTRAN. The research object was the artillery shell launched from aircraft gun.

MAZURKIEWICZ D: **Monitoring the condition of adhesive-sealed belt conveyors in operation**; EiN nr 3/2005, s. 41-49.

Standard intra-factory transportation systems, where belt conveyors are used, have high failure rate, which in most cases results from the unpredictability of factors e.g. the breaking-up belts. At the present, there are no existing systems, which can monitor the operation of these devices; neither are there systems for preventing occurrence at a critical stage through appropriate every day use. Moreover, such systems as potential objects of control are characterised with multi dimensions. This shows the complicated nature of dependences between individual operation parameters, with the presence of many couplings. An analysis of theoretical works, allow for the conclusion that the problem can be solved with the use of intelligent systems, including those based on artificial neuron networks. Such a system should ensure appropriate monitoring of the transportation systems and intelligent controlling based on the analysis of the parameter characteristic for the given plant that can influence the incident at critical stages.

KADLEČEK B., PEJŠA L., RŮŽIČKA M.: **The Comparison of Power, Economy and Ecological Parameters of Spark-ignition Engine of Lawn Mowers**; EiN nr 3/2005, s. 50-54.

The subject of this report is a description of measuring results and mutual comparison of power, economy and ecological parameters of spark-ignition engines. Four engines equipped with a vertical crank-shaft with power from 3 to 5 kW were compared. These engines were mounted as a drive unit on lawn mowers.

VOŠTOVÁ V., VONDRÁČKOVÁ T., RŮŽIČKA M.: **Future Trends in Design of Construction and Agricultural Machines**; EiN nr 3/2005, s. 55-57.

New trends in design of construction and agricultural machines are apparent mainly in aims that they should achieve e.g. economic transport, more efficient work technologies, environmental protection etc. The controlling process of building or agricultural technologies is often very similar. This operational control includes e.g. laser methods that operate construction and agricultural machines by means of total station; Global Position System (GPS) with a mobile map utilization that controls construction and agricultural machines etc. The mutual combination of these systems can be seen as well. Stability analysis of the system implementation is to be done in Czech Republic. The main reason for the analyses is eventual wearing out of firm's machinery. The paper describes the mathematical model of laser control and dozer's work technology with the utilization of GPS and laser.

Piotr WITTBRODT

TRWAŁOŚĆ I ZUŻYCIE MONOLITYCZNYCH FREZÓW WĘGLIKOWYCH

LIFE AND WEAR OF MONOLITHIC CARBIDE MILLS

W artykule przedstawiono wyniki badań zużycia frezów monolitycznych węglikowych metodą wskaźników. Wykazano nieadekwatność tej metody do zastosowań przemysłowych oraz zaproponowano zastosowanie układu monitorującego stan narzędzia wykorzystującego systemy samouczące.

***Słowa kluczowe**: trwałość i zużycie frezów, wskaźniki zużycia*

This paper presents the results of investigation of wear mills of monolithic carbide using the indexes method. The article also shows inadequacy of this method to industrial uses and proposes use of equipment monitoring the condition of a tool using the self-learning systems.

***Keywords**: durability and wear of mills, index wear*

1. Wprowadzenie

Obróbka skrawaniem jest najbardziej rozpowszechnioną metodą kształtowania przedmiotów spośród wszystkich stosowanych technik mechanicznego wytwarzania i stanowi około 60 ÷ 70%. [1]. Pochłania ona duże nakłady finansowe, dlatego dąży się do doboru najbardziej racjonalnych warunków obróbki.

Duży wpływ na ogólne koszty wytwarzania wyrobów mają koszty narzędziowe [2]. Wiąże się to z zakupem narzędzi skrawających, ich eksploatacją, ostrzeniem itd. Szczególnie newralgicznym punktem jest eksploatacja narzędzi. Okres ich użytkowania jest silnie uzależniony od parametrów skrawania. Zastosowanie bardzo dużych prędkości skrawania, dużych wartości posuwów, ograniczenie bądź całkowite wyeliminowanie cieczy obróbkowych powoduje, że żywotność narzędzi może być mała. Stanowi to barierę w podnoszeniu efektywności procesu obróbkowego.

Wydłużenie okresu trwałości użytkowania narzędzia jest podstawową do zmniejszenia kosztów produkcji. Istnieje jednak problem w ocenie zużycia narzędzia. Szczególnie dotyczy to frezów kulistych. Trudność ta polega na opisie zużycia powierzchni kulistej, która może pracować krawędzią skrawającą

1. Introduction

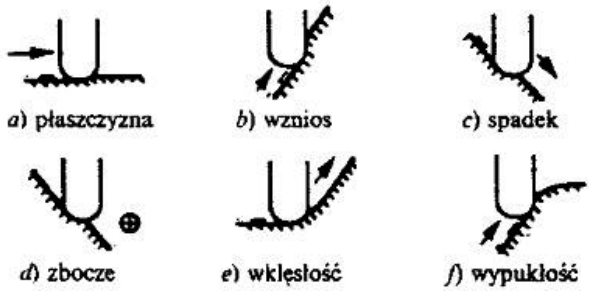
Machining is the commonest method of forming objects from among all applied techniques of mechanical manufacturing and constitutes ca. 60 ÷ 70%. [1]. It consumes large financial outlays, that is why we aim at selecting the most rational machining conditions.

Tool costs influence general costs of product manufacturing to a large extent [2]. This is mainly related to purchasing, operating and sharpening machining tools. A pivotal point is operating tools. The period of their use is highly dependent on machining parameters. Applying very high machining velocities, large feed values, as well as limitation or complete elimination of working liquids may cause the life of tools to be small. This constitutes a barrier to increasing the effectiveness of machining process.

Prolonging the life of a tool is a basis for the decrease of production costs. However, there is a problem in the evaluation of the tool's wear. This especially refers to ball milling cutters. The difficulty lies in describing the wear of ball surface, which can work with a part of machining edge or on the whole length of the arch (fig. 1).

częściowo lub na całej długości łuku (rys. 1).

Praktyka potwierdza, że w przedsiębiorstwach produkcji małoseryjnej czy masowej, narzędzie jest używane do obróbki różnych części przy użyciu całkowicie różnych parametrów obróbki skrawaniem. W takim środowisku ocena przydatności narzędzia do dalszej obróbki, czy narzędzie jest ostre czy nie, jest trudne.



Rys. 1. Rodzaje lokalnych kształtów obrabianych przez frez o zakończeniu kulistym [7]

Fig. 1. Kinds of local shapes machined by a ball-ended cutting mill [7]

Należy zwrócić uwagę na ten problem ze względu na liczne wykorzystanie frezów. Przyjmuje się, że około kilkanaście procent wszystkich operacji przypada na frezowanie. Z roku na rok udział ten wzrasta.

Oczywiście, istnieje wiele opublikowanych prac na temat trwałości i zużycia narzędzi skrawających, lecz opisują one jedynie narzędzia typu tokarskiego (wymienne płytki wieloostrzowe). [np.: 3, 4, 5, 6].

2. Formy zużycie ostrza

Głównymi elementami układu obróbkowego są przedmiot, narzędzie i obrabiarka, które razem połączone procesem skrawania stanowią dynamiczny układ obróbki. Składniki te, a szczególnie współoddziaływanie między nimi mają istotny wpływ na kształtowanie struktury geometrycznej powierzchni przedmiotu oraz stan narzędzia skrawającego.

Zużyciem ostrza narzędzia nazywamy postępującą w czasie utratę właściwości skrawnych. Mechanizm zużycia jest bardzo złożony, uwarunkowany działaniem cieplnym, zjawiskami adhezji, dyfuzji i utleniania. Każdy z czynników wpływa mniej lub bardziej na zużycie ostrza. Na rysunku 2 przedstawiono klasyfikację zużycia ostrza narzędzia skrawającego.

It is confirmed by practice that in small lot or mass production enterprises a tool is used for machining various parts with the use of absolutely different machining parameters. In such an environment the evaluation of the tool's suitability for further machining, or determining whether the tool is sharp, are quite difficult.

This problem needs paying attention to because of numerous uses of cutting mills. It is assumed that several percent of all operations are milling operations. This participation increases year by year.

Obviously, many works hale published on the life and wear of machining tools, but they only describe turning-type tools (replaceable multi-blade plates). [e.g.: 3, 4, 5, 6].

2. Forms of blade wear

The main elements of machining system are the object, the tool and the machine, which, together, connected by the machining process, constitute a dynamic machining system. These components, and especially their mutual influence, have a significant effect on forming the geometrical structure of the object's surface and on the state of machining tool.

The wear of the tool's blade is the loss of its cutting properties progressing in time. The wear mechanism is very complex, conditioned by heat action, the phenomena of adhesion, diffusion and oxidation. Each of these factors more or less influences the blade wear. Figure 2 presents the classification of a machining tool's blade wear.

Rys. 2. Klasyfikacja zużycia ostrza

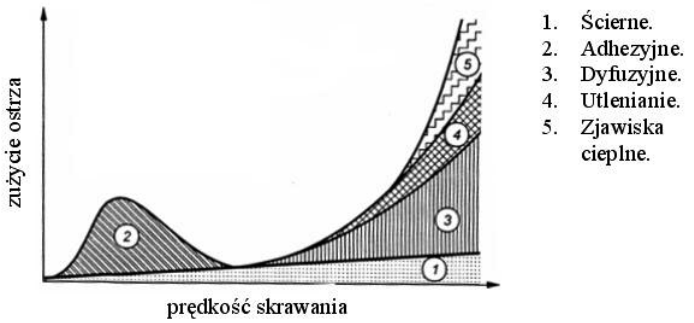
Fig. 2. Blade wear classification

1. Zużycie mechaniczne – polega na ściernym usuwaniu cząstek materiału ostrza przez wiór trący o powierzchnię przyłożenia i materiał obrabiany lub na przekroczeniu wytrzymałości doraźnej i zmęczeniowej skutkiem, czego jest złamanie krawędzi ostrza.
2. Zużycie adhezyjne – polega na przywieraniu cząstek materiału do ostrza pod wpływem sił przyciągania międzycząsteczkowego. Zjawisko adhezji występuje przy małych posuwach i prędkościach skrawania – granica $V_c \leq 1{,}6$ *m/s*. Powyżej tej wartości zjawisko adhezji nie występuje.
3. Chemiczne (dyfuzja) – polega na przemieszczaniu się cząstek i atomów z materiału ostrza do materiału obrabianego (i odwrotnie), na skutek bezwładnego ruchu cieplnego atomów. Zmiana własności warstwy wierzchniej ostrza pogarsza właściwości skrawne. Dyfuzja pojawia się przy wysokich temperaturach skrawania.
4. Zużycie cieplne – polega na zmianie właściwości materiału wywołanej przekroczeniem dopuszczalnych temperatur skrawania.

Wpływ prędkości skrawania na zużycie przedstawia rys. 3.

1. Mechanical wear – involves abrasive removal of blade material parts by the chip cutting the tool flank and the machined material, or exceeding immediate and fatigue strength, the result of which is breaking the blade edge.
2. Adhesion wear – involves adherence of parts of material to the blade under the influence of intermolecular attraction forces. The phenomenon of adhesion occurs at small feeds and machining velocities – limit $V_c \leq 1{,}6$ m/s. Above this value the phenomenon of adhesion does not occur.
3. Chemical wear (diffusion) – involves relocation of particles and atoms from the blade material to the machined material (and the other way round), as a result of inertial thermal motion of atoms. Change of the properties of blade surface layer makes the cutting properties worse. Diffusion occurs at high cutting temperatures.
4. Thermal wear – involves change in the properties of the material caused by exceeding admissible cutting temperatures.

The influence of machining velocity on wear is shown in fig. 3.



1. Ścierne.
2. Adhezyjne.
3. Dyfuzyjne.
4. Utlenianie.
5. Zjawiska cieplne.

Rys. 3. Wpływ prędkości skrawania na zużycie (t_{skr} = const.) [5]
Fig. 3. Influence of machining velocity on wear (t_{mach} = const.) [5]

Do oceny zużycia ostrza służą wskaźniki zużycia. Wskaźniki te można podzielić na trzy grupy [1]:

- geometryczne – charakteryzują się zmianą cech stereometrycznych ostrza,
- technologiczne – charakteryzują się zmianą cech dokładnościowo – wymiarowo – kształtowych,
- energetyczne – charakteryzują się zmianą sił skrawania, poborem mocy, ilością wydzielanego ciepła, itd.

Wskaźniki geometryczne i technologiczne należą do wskaźników zużycia bezpośrednich, natomiast energetyczne do pośrednich.

Wskaźniki zużycia ostrza są znormalizowane. Dla wskaźników zużycia narzędzi frezarskich jest to norma PN – ISO 8688 – 1: 1996 oraz PN – ISO 8688 – 2: 1996.

Wear indicators serve to evaluate the blade wear. They can be divided into three groups [1]:

- geometrical – are characterized by change in stereometric features of the blade,
- technological – are characterized by change of accuracy–dimension-shape features,
- energetic – are characterized by change in cutting force, power consumption, amount of emitted heat, etc.

Geometrical and technological indicators are direct wear indicators, whereas energetic indicators belong to indirect indicators of wear.

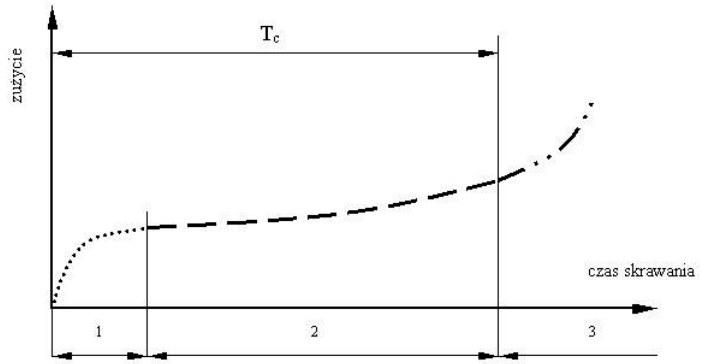
Blade wear indicators are standardized. For machining tool wear indicators these are: standard PN – ISO 8688 – 1: 1996 and PN – ISO 8688 – 2: 1996.

Duża liczba czynników wpływająca na zużycie powoduje, że nadal brakuje spójnej teorii przedstawiającej ogół zjawisk zachodzących w strefie kontaktu ostrza z materiałem obrabianym. Dlatego, opis zależności pomiędzy geometrycznymi i fizykalnymi wskaźnikami zużycia jest rzeczą ważną.

Przyjmuje się, że typowa krzywa zużycia ma kształt przedstawiony na rys. 4.

A large number of factors influencing wear causes lack of a coherent theory presenting the whole body of phenomena occurring in the zone of contact between the blade and the machined material. That is why it is important to describe the relationships between the geometrical and physical wear indicators.

It is assumed that a typical wear curve is of the shape presented in fig. 4.



Rys. 4. Typowa krzywa zużycia
Fig. 4. A typical wear curve

Wyróżnia się trzy okresy użytkowania ostrza:

- pierwszy okres – oznaczony linią punktową, jest to okres docierania ostrza. W tym okresie zostają starte nierówności powierzchni powstałe podczas wykonania ostrza.
- drugi okres – oznaczony linią kreskowaną, okres normalnego zużycia ostrza. Charakteryzuje się proporcjonalnym ścieraniem ostrza w czasie skrawania.
- trzeci okres – oznaczony linią kreskowo – kropkową, jest to okres gwałtownego zużycia ostrza. W tym okresie następuje nagłe pogorszenie własności skrawnych ostrza.

Okres trwałości ostrza (w) jest to czas skrawania liczony od chwili rozpoczęcia pracy przez ostrze, aż do chwili, gdy wybrany wskaźnik zużycia osiągnie dopuszczalną wartość.

$$w = w_o + C_w \cdot t^u \tag{1}$$

gdzie: w – całkowita wartość zużycia, w_o – wartość dotarcia, C_w – stała, t – czas skrawania, u – wykładnik potęgowy.

Zużycie ostrza, a zatem także okres trwałości zależy od prędkości skrawania. Zależność między nimi przedstawia wzór Taylora:

$$V_c \cdot T^{-1/k} = C_v \tag{2}$$

gdzie: V_c – prędkość skrawania, T – okres trwałości, C_v – stała, k – wykładnik potęgowy uwzględniający rodzaj materiału obrabianego.

Równanie (2) wykorzystywane jest w dwu postaciach użytkowych:

Three periods of using the blade can be distinguished:

- first period – marked by a dotted line, is the blade lapping period. In this period the irregularities of surface that were formed during manufacturing of the blade are abraded.
- second period – marked by a dashed line, is the period of normal wear of the blade. It is characterized by proportional abrading of the blade during cutting.
- third period – marked by a dot-and-dash line, is the period of sudden wear of the blade. In this period a sudden deterioration of the blade's cutting properties occurs.

The blade life period (w) is the cutting time counted from the moment of the start of the blade's work, until the moment when a selected wear indicator reaches the admissible value.

$$w = w_o + C_w \cdot t^u \tag{1}$$

where: w – total wear value, w_o – grinding value, C_w – constant, t – cutting time, u – exponent.

Wear of the blade, and also its life, depend on cutting velocity. The relationship between them is presented in Taylor's formula:

$$V_c \cdot T^{-1/k} = C_v \tag{2}$$

where: V_c – cutting velocity, T – life, C_v – constant, k – exponent, considering the kind of machined material.

Equation (2) is used in two functional forms:

$$T = \left(\frac{V_c}{C_v} \right)^k \tag{3}$$

lub

$$V_c = C_v \cdot T^{1/k} \tag{4}$$

Zużycie ostrza nie zależy jedynie od jednego czynnika, lecz także takich jak posuw czy głębokość. Równanie (3) można rozszerzyć do postaci:

$$T = \left(\frac{V_c}{C_v} \right)^k \cdot f^{y_T} \cdot a_p^{x_T} \tag{5}$$

gdzie: f – posuw, a – głębokość skrawania, y_T, x_T – wykładniki potęgowe uwzględniające wpływ posuwu i głębokości skrawania.

Praktyczne zastosowanie ma zależność (6), przy pomocy której, można wyliczyć prędkość skrawania pozwalającą na uzyskanie żądanego okresu trwałości ostrza. Zależność ta przedstawia się następująco:

$$V_{cT} = C_{v_T} \cdot f^{y_v} \cdot a_p^{x_v} \tag{6}$$

Indeks „*T*" oznacza trwałość minutową narzędzia.

Trudniejszym zagadnieniem jest przewidywanie zużycia ostrza pracującego z przemiennie zmiennymi parametrami skrawania. Ostrze wykorzystywane jest wtedy przez czas Δt_1 z określonymi parametrami, natomiast w okresie Δt_2 z innymi. Zależność ta przedstawiona jest na rys. 6.

Ogólny wzór opisujący wartość zużycia ostrza po skrawaniu z *n* zmiennymi parametrami ma postać:

$$w = w_0 + \left(w_k - w_0 \right) \cdot \left(\sum_{i=1}^{n} \Delta T_i \right)^u \tag{7}$$

gdzie: w_k – wskaźnik stępienia.

Obliczone w ten sposób zużycie ostrza narzędzia skrawającego jest większe od rzeczywistego [7].

$$T = \left(\frac{V_c}{C_v} \right)^k \tag{3}$$

or

$$V_c = C_v \cdot T^{1/k} \tag{4}$$

Wear of the blade does not depend only on one factor, but also on such factors as feed, or depth. Equation (3) can be extended to the following form:

$$T = \left(\frac{V_c}{C_v} \right)^k \cdot f^{y_T} \cdot a_p^{x_T} \tag{5}$$

where: f – feed, a – cutting depth, y_T, x_T – exponents, considering the influence of feed and cutting depth.

The relationship (6) can be applied in practice, as it can be used to calculate cutting velocity that allows to achieve the desired blade life. This is how this relationship is presented:

$$V_{cT} = C_{v_T} \cdot f^{y_v} \cdot a_p^{x_v} \tag{6}$$

Index „*T*" means the tool's minute life.

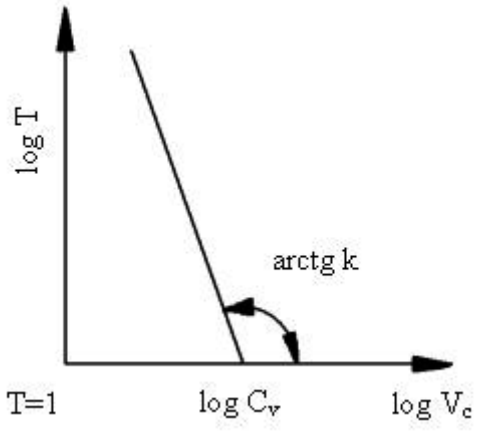
A more difficult issue is to predict the wear of the blade that works with commutative-variable cutting parameters. Then the blade is used during the time Δt_1 with specified parameters, and in the period Δt_2 - with other parameters. This relationship is presented in fig. 6.

The general formula describing the blade wear value after cutting with n variable parameters is in the following form:

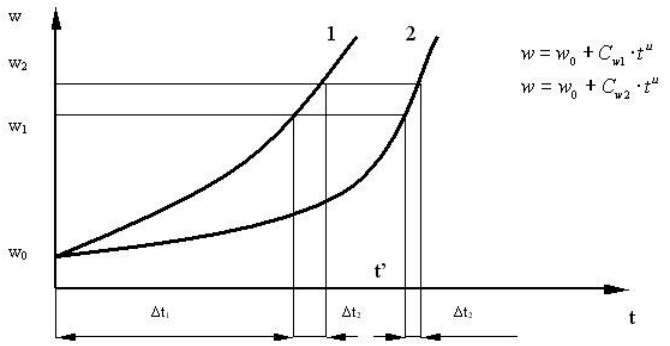
$$w = w_0 + \left(w_k - w_0 \right) \cdot \left(\sum_{i=1}^{n} \Delta T_i \right)^u \tag{7}$$

where: w_k – blunt index.

The wear of the cutting tool blade, calculated in this way is larger than the actual wear [7].



Rys. 5. Zależność Taylora
Fig. 5. Taylor's relationship



Rys. 6. Krzywe zużycia przy zmiennych parametrach skrawania
Fig. 6. Wear curves at variable cutting parameters

3. Badanie trwałości i zużycia frezów monolitycznych węglikowych

Głównym celem przeprowadzonych badań było wykazanie nieadekwatności oszacowania zużycia frezów metodą wskaźników zużycia i zaproponowanie alternatywnych rozwiązań. Obróbka była wykonywana na trzyosiowej frezarce sterowanej numerycznie. Program sterowania obrabiarką był generowany za pomocą programu CAM.

Dokładność wykonania frezów monolitycznych pełnowęglikowych zależy od ich średnicy. Dla badanych frezów dokładność wykonania części roboczej przedstawia się następująco:

- frez kulisty Ø6h0;
- frez palcowy walcowo – czołowy Ø10h10.

Frezy były używane do obróbki kilkunastu różnych części (mniej lub bardziej złożonych) z różnymi parametrami technologicznymi oraz geometrycznymi (zróżnicowanie parametrów uwarunkowane było kształtem oraz materiałem obrabianym). Jako materiały obrabiane stosowane były stale ŁH 15, HGS 13, WNL w stanie ulepszanym cieplnie do twardości 42 ± 2 HRc.

W tabeli 1 przedstawione są zakresy wartości parametrów technologicznych oraz geometrycznych.

Pomiary wykonywane były bezstykowo na mikroskopie warsztatowym uzbrojonym w głowicę mikrometryczną o dokładności 0.001 mm. Zasada pomiaru średnicy freza przedstawiona jest na rys. 7.

Na podstawie zespołu symptomów generowanych przez proces skrawania takich jak poziom drgań, charakterystyka dźwięku, barwa wióra oszacowano w sposób subiektywny, że zdolności skrawne testowanych frezów zostały utracone: frezem walcowo – czołowym po 4 godzinach i 27 minutach, natomiast frezem kulistym po 6 godzinach i 42 minutach.

3. Examining the life and wear of monolithic carbide mills

The main purpose of the conducted studies was to reveal the inadequacy of the mill wear estimation by means of wear indicators and to suggest alternative solutions. Machining was performed on a three-axis, numerically controlled machine. The machine controlling program was generated with the use of CAM program.

The accuracy of making monolithic full carbide mills depends on their diameter. For the examined mills the accuracy of making the working part is as follows:

- ball mill Ø6h10;
- end half-side mill Ø10h10.

The mills were used to machine several various (more or less complex) parts with various technological and geometrical parameters (the differentiation of parameters was conditioned by the shape and the machined material). As the machined materials the constants ŁH 15, HGS 13, WNL were used in thermally improved state to the hardness of 42 ± 2 HRc.

In table 1 the ranges of technological and geometrical parameters are presented.

Measurements were taken without contact, on a toolmaker's microscope armed with a micrometer head with the accuracy of 0.001 mm. The principle of mill diameter measurement is presented in fig. 7

On the basis of a system of symptoms generated by the machining process, such as vibration level, sound characteristics, and chip color, it was subjectively estimated that the cutting skills of tested mills had been lost by half-side mill after 4 hours and 27 minutes, and by the ball mill after 6 hours and 42 minutes.

Tab 1. Wartości parametrów technologicznych i geometrycznych.
Tab 1. Technological and geometrical parameter values.

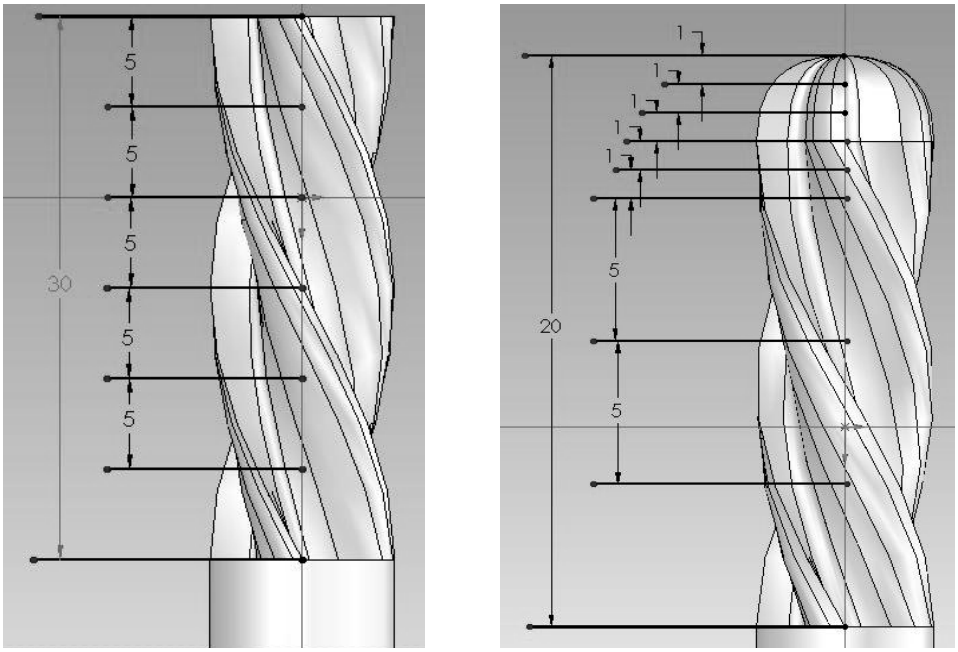
Gatunek stali	Parametry technologiczne		Parametry geometryczne	
	Prędkość skrawania [m/min]	Posuw [mm/min]	Głębokość skrawania [mm]	Szerokość skrawania [mm
ŁH 15	30÷70	200÷600	0,15÷10	0,15÷5
HGS 13	30÷80	300÷700	0,20÷8	0,20÷4
WNL	25÷60	200÷500	0,15÷8	0,15÷6

4. Wyniki badań

W wyniku przeprowadzonych pomiarów średnicy frezów można stwierdzić, że w przypadku freza kulistego zużycie występuje na całej części kulistej freza w sposób prawie równomierny; w przypadku freza walcowo – czołowego na długości około 10 mm licząc od czoła narzędzia. Wyniki pomiarów przedstawiają tabele 2 i 3.

4. Study results

Having performed the measurements of mill diameters, we can find that in the case of a ball mill the wear occurs on the whole spherical part of the mill, in an almost uniform way, whereas in the case of a half-side mill – at the length of ca. 10 mm, counting from the tool's front. The measurement results are shown in tables 2 and 3.



Rys. 7. Zasada pomiaru średnicy freza
Fig. 7. The principle of mill diameter measurement

Odchylenie wartości trzeciego ostrza freza walcowo – czołowego w odległości 15 mm zostało spowodowane prawdopodobnie odkształceniem cieplnym.

Wartości maksymalne wskaźników zużycia poszczególnych ostrzy frezów przedstawione są w tabeli 4 i 5.

The deviation of values in the third blade of the end mill in the distance of 15 mm was probably caused by thermal deformation.

The maximum values of wear indicators of the particular mill blades are presented in tables 4 and 5.

Tab. 2. Wyniki pomiarów zużycia freza kulistego Ø6.
Tab. 2. Results of wear measurements of a ball mill Ø6.

	Numer ostrza freza				
Przekroje wymiarowe według rys. 7.		1	2	3	4
	1	-0,049	-0,019	-0,035	-0,031
	2	-0,064	-0,093	-0,038	-0,013
	3	-0,096	-0,077	-0,085	-0,098
	4	-0,086	-0,074	-0,071	-0,079
	5	-0,069	-0,071	-0,065	-0,067
	10	-0,020	-0,026	-0,023	-0,027
	15	-0,012	-0,014	-0,009	-0,012
	20	-0,007	-0,008	-0,006	-0,006

Tab. 3. Wyniki pomiarów zużycia freza Ø10.
Tab. 3. Results of wear measurements of a mill Ø10.

	Numer ostrza freza				
Przekroje wymiarowe według rys. 7.		1	2	3	4
	0	-0,110	-0,077	-0,117	-0,157
	5	-0,067	-0,060	-0,042	-0,061
	10	-0,041	-0,030	-0,032	-0,031
	15	-0,037	-0,050	0,015	-0,042
	20	-0,026	-0,027	-0,026	-0,025
	25	-0,014	-0,014	-0,014	-0,013
	30	-0,015	-0,012	-0,011	-0,011

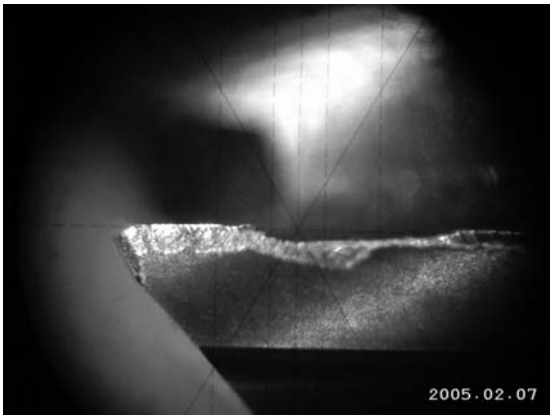
Tab. 4. Wartości wskaźników zużycia freza kulistego Ø6.
Tab. 4. Wear indicator values of the ball mill Ø6.

	Numer ostrza freza				
Wskaźniki zużycia		1	2	3	4
	VB	0,684	0,542	0,758	0,824
	KT	0,231	0,267	0,173	0,361
	KF	0,964	0,395	0,617	0,548
	KB	1,151	0,967	0,936	1,010

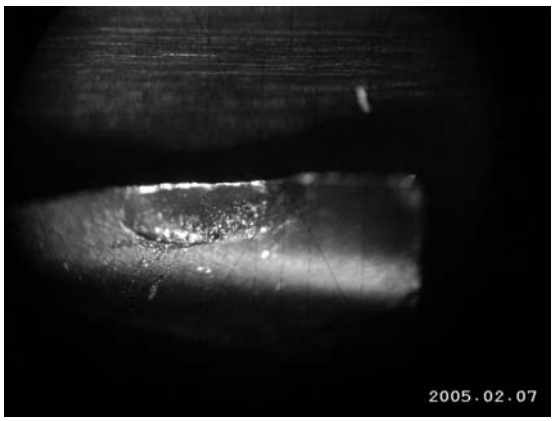
Tab. 5. Wartości wskaźników zużycia freza walcowo – czołowego Ø10.
Tab. 5. Wear indicator values of the end mill Ø 10.

	Numer ostrza freza				
Wskaźniki zużycia		1	2	3	4
	VB	0,736	0,518	0,692	0,720
	KT	0,274	0,445	0,352	0,655
	KF	0	1,945	1,958	1,241
	KB	0,923	3,307	2,425	3,371

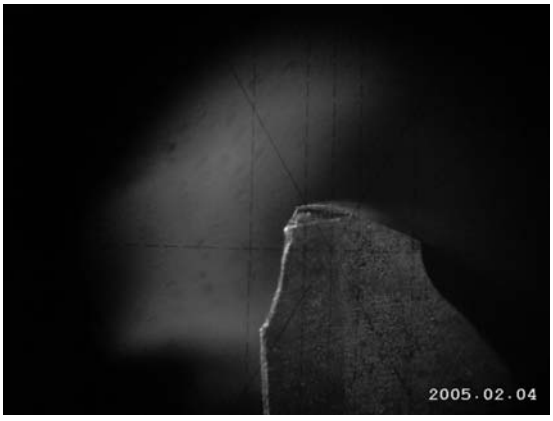
a)



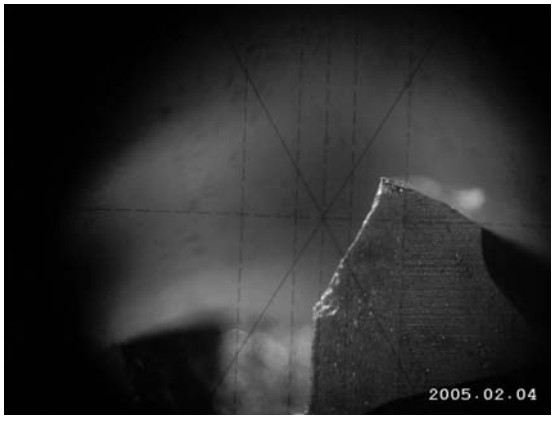
b)



c)



d)

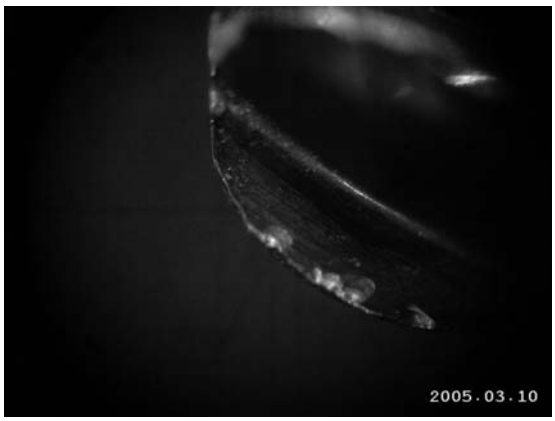


Rys. 8. Wyniki badań zużycia freza palcowego walcowo – czołowego a, b) na powierzchni przyłożenia i narożu, c, d) na powierzchni natarcia i narożu
Fig.8. Results of studies on the wear of half-side end mill a, b) on the tool flank and on the corner, c, d) on the attack surface and on the corner

a)

b)

c)



Rys. 9. Wyniki badań zużycia freza kulistego na powierzchni przyłożenia i powierzchni natarcia
Fig. 9. Results of studies on the ball mill wear on the tool flank and on the attack surface

W przedstawionych wartościach można zauważyć wartość zerową (wskaźnik KF dla ostrza pierwszego freza walcowo – czołowego). Spowodowane jest to wykruszeniem naroża.

Pomiary wskaźników zużycia zostały przeprowadzone zgodnie z normą. Poniżej przedstawione są rezultaty badań zużycia freza palcowego walcowo – czołowego oraz kulistego. Symptomy związane z procesem skrawania pozwoliły na oszacowanie w sposób subiektywny stopień zużycia narzędzia. Niejednorodność stosowanych parametrów głębokości skrawania przyczynia się do tego, że metoda oszacowanie zużycia za pomocą wskaźników nie jest racjonalna do organizacji procesu produkcyjnego.

5. Podsumowanie

Zaprezentowane powyżej, wybrane wyniki badań, wykazują jak trudna i czasochłonna jest ocena zużycia narzędzia typu frez na obrabiarce w warunkach przemysłowych. Szczególnie tam, gdzie produkcja ma charakter elastyczny, w której jest duża zmienność operacji frezarskich, każdorazowe przerwanie obróbki

In the presented values the zero value can be noticed (KF indicator for the blade of the first end mill). It is caused by corner chipping.

The measurements of wear indicators were performed in accordance with the standard. Below there are results of studies on the wear of half-side end mill and ball mill. The symptoms related to machining process allowed for subjective estimation of the extent of tool wear. Heterogeneity of the applied parameters of cutting depth contributes to the fact that the method of estimating wear by means of indicators is not rational enough for the organization of the production process.

5. Conclusion

The selected study results, presented above, show how difficult and time-consuming is the evaluation of the mill-type tool wear on a machine tool in industrial conditions. Especially in the plants where production is flexible, where machining operations are quite varied, each break of the machining and the evaluation of

i ocena zużycia narzędzia metodą wskaźników wg normy, powoduje zmniejszenie wydajności.

Rozwiązaniem przedstawionego problemu oszacowania zużycia frezów przy zmiennych warunkach skrawania jest zastosowanie systemu monitorującego wykorzystującego sygnały wibroakustyczne. Potwierdzeniem takiej tezy może być zgodność oceny zużycia frezów w przeprowadzonym eksperymencie, na podstawie subiektywnych obserwacji operatora obrabiarki, z danymi opartymi o zmierzone wskaźniki.

Dalsze badania ukierunkowane będą na analizę sygnałów z procesu skrawania w celu budowy układu rozpoznającego stan narzędzia, wykorzystującego systemy samouczące.

tool wear by means of indicator method, according to a standard, causes the decrease of production rate.

The solution to the presented problem of mill wear estimation in changeable cutting conditions is applying a monitoring system, using vibration-acoustic signals. What confirms this thesis can be conformity of the mill wear evaluation in the conducted experiment, on the basis of subjective observations of a machine tool operator with the data based on measured indicators.

Further studies will be directed to the analysis of signals from the cutting process in order to build a system that could recognize the state of a tool, with the use of self-teaching systems.

6. References

[1] Gawlik J., Karbowski K.: *Matematyczne modelowanie procesu zużycia narzędzi skrawających*. Nadzorowanie stanu narzędzia. Seria Mechanika, Monografia 231, Politechnika Krakowska, Kraków 1998.

[2] Lardner E., in: R.S. Irani, E.A. Almond, R.A. Kirk Eds.: *Proceedings of the International Conference on Improved Performance of Cutting Tool Materials*, The Metals Society, London, 1981, p. 99.

[3] Dmochowski J., Uzarowicz A.: *Obróbka skrawaniem i obrabiarki*. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1980.

[4] Bartosiewicz J.: *Obróbka skrawaniem oraz elementy obrabiarek*. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 1997.

[5] Jemielniak K.: *Obróbka skrawaniem*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1998.

[6] Jemielniak K.: *Automatyczna diagnostyka stanu narzędzia i procesu skrawaniem*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2002.

[7] Chu C. N., Kim S. Y., Lee J. M., Kim B. H.: *Feed – Rate Optimization of Ball End Milling Considering Local Shape Features,* Annals of the CIPR, 46/1, 1997.

[8] Adamczyk Z., Małek H.: *Monitorowanie stanu narzędzia w operacjach wiercenia wiertłami krętymi*. Mechanik nr 7/1995.

[9] Jemielniak K., Szafarczyk M., Zawistowski J.: *Difficulties in Tool Life Predicting when Turning with Variable Cutting Parameters*. Annals of the CIRP 37(1985)1, 113-116.

Mgr inż. Piotr Wittbrodt

PRZEDSIĘBIORSTWO PRODUKCYJNO – WDROŻENIOWE NABOR
G. i W. Naborczyk
23 – 210 Kraśnik, ul. Fabryczna 8
Tel. 0 692 627 853
e – mail: piwitt@wp.pl

Jan BANASZEK
Józef JONAK
Hubert DĘBSKI

O PEWNYM MECHANIŹMIE ODDZIAŁYWANIA OLEJU NA PRĘDKOŚĆ PĘKANIA W STALI

ON SOME MECHANISM OF OIL INFLUENCE ON THE CRACK VELOCITY OF STEEL

W artykule przedstawiono opracowanie wyników badania prędkości pękania stali 45 w otoczeniu powietrza i oleju parafinowego. Podano równania opisujące prędkość pękania. Przeprowadzono analizę przyczyn zmniejszenia prędkości pękania przez środowisko oleju. Opisano mechanizm oddziaływania oleju na prędkość wzrostu pęknięcia.

***Słowa kluczowe**: prędkość pękania, mechanika pękania, otoczenie*

In this article an elaboration of results of carbon steel 45 crack velocity research in air and paraffin oil environment were presented. Crack velocity equations were given. An analysis of crack velocity decrease reasons by oil environment was conducted. A mechanism of oil influence on crack extension velocity was described.

***Keywords**: crack velocity, fracture mechanics, environment*

1. Wstęp

Zarówno wyniki eksperymentów, jak i obserwacje powierzchni przełomów elementów konstrukcji i mechanizmów, które uległy zniszczeniu wskazują, że ich awarie nie występowały w sposób nagły. Uszkodzenie o dominującej długości początkowej a_0 znajdujące się w takim elemencie, pod wpływem zewnętrznych obciążeń zmiennych powiększało swój wymiar do wielkości a_C zwanej krytyczną i dopiero wówczas następowała dekohezja. Wzrost długości pęknięcia jest efektem oddziaływania wielu czynników między innymi: naprężenia σ, własności materiału C, asymetrii cyklu $R=\sigma_{min}/\sigma_{max}$ i warunków środowiskowych. Zależy on w znacznym stopniu od amplitudy naprężeń $2\sigma_a=\sigma_{max}-\sigma_{min}=\Delta\sigma$ działających na konstrukcję. Bowiem o propagacji pęknięcia decyduje lokalność zmian na jego czole. Ta związana jest z polem naprężeń w strefie pęknięcia o intensywności wyrażonej współczynnikiem K.

Wzory opisujące prędkość wzrostu zmęczeniowego pęknięcia powstały w wyniku prowadzonych eksperymentów. Istniejące w literaturze równania wzrostu pęknięcia, zostały opracowane głównie dla obciążeń cyklicznych o stałej amplitudzie i wiążą prędkość wzrostu pęknięcia da na cykl dN z długością pęknięcia a oraz przyłożonym naprężeniem σ i parametrami materiału.

Spośród zależności tego typu najczęściej używa się równania zaproponowanego przez Parisa i Erdogana:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \qquad (1.1)$$

1. Introduction

Both the experimental results and observations of fracture surfaces of structure elements and mechanisms that were destroyed indicate that the breakdowns did not occur suddenly. Damage of the largest initial length a_0 in such an increased its size to a_C, called the critical length, due to external variable loads, and only then decohesion occurred. Increase of fracture length is the result of influence of many factors, including: stressσ, material properties C, cycle asymmetry $R=\sigma_{min}/\sigma_{max}$ and environmental conditions. It largely depends on amplitude of stress $2\sigma_a=\sigma_{max}-\sigma_{min}=\Delta\sigma$ influencing the construction. Because the locality of changes on the fracture face surface decide upon its propagation. And this is connected to stress field in the fracture area with the intensity described by coefficient K.

The formulas describing the increase of fatigue fracture velocity were developed as a result of the conducted experiments. The fracture increase equations found in the existing literature were developed mainly for cyclical loads with a fixed amplitude and connect the fracture increase velocity da per cycle dN with the fracture length a and applied stress σ and material parameters.

Amongst dependences of this type the one used most often is the equation proposed by Paris and Erdogan:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \qquad (1.1)$$

gdzie: $\Delta K = K_{max} - K_{min} = \sigma_{max}\sqrt{\pi a} - \sigma_{min}\sqrt{\pi a} = \Delta\sigma\sqrt{\pi a}$ dla $R \geq 0$ (w przypadku $R<0$ czyli $\sigma_{min}<0$, $K_{min}=0$ [7]), K_{max}, K_{min} – maksymalna i minimalna wartość współczynnika intensywności naprężeń odpowiadająca maksymalnemu σ_{max} i minimalnemu σ_{min} naprężeniu cyklu, C,m – stałe.

Istotny wpływ na prędkość pękania wywiera asymetria cyklu wyrażona współczynnikiem $R=\sigma_{min}/\sigma_{max}$. W praktyce spośród wielu równań uwzględniających wpływ asymetrii cyklu, najczęściej posługujemy się równaniem Formana, które jest rozszerzonym zapisem wzoru (1.1).

Znajomość prędkości pękania pozwala na uzyskanie informacji o liczbie cykli zmian obciążenia (czasie) do osiągnięcia przez pęknięcie wartości krytycznej a_C lub określonej wymogami kontrolnymi.

2. Wpływ czynników środowiskowych na wzrost pęknięcia zmęczeniowego

Przebieg procesu zmęczeniowego zależy w istotny sposób od czynników środowiskowych. Środowiska różne od otoczenia laboratoryjnego wpływają istotnie na prędkość pękania stosownie do ich własności, a zwłaszcza wrażliwości materiału na działanie środowiska. Omawiany wpływ wyraźnie maleje w zakresie wysokich ΔK. Nakładanie się zjawiska adsorpcji, dyfuzji i korozji na zjawiska zmęczeniowe powoduje, że przebieg zmęczenia staje się bardzo złożony. Stąd podejmowano próby wyznaczenia prędkości pękania w aktywnych środowiskach za pomocą wyrażeń dwuczłonowych lub wieloczłonowych [5], w których do prędkości pękania w zwykłych warunkach dodawano człon lub człony ujmujące wpływ tych środowisk. Prędkość pękania w otoczeniu innym niż środowisko laboratoryjne jest najczęściej jednak opisywana równaniem (1.1) bez dodatkowych uzupełnień.

Wzrost pęknięcia w elemencie konstrukcyjnym poddanym obrotowemu zginaniu, w otoczeniu cieczy obojętnej – niewywołującej efektów korozji np. oleju parafinowego, postępuje w czasie fazy działania naprężeń rozciągających. Wówczas czoło pęknięcia przesuwa się powoli naprzód, w wyniku działania mechanizmu podobnego do mechanizmu plastycznego niszczenia przy obciążeniu stałym. W tym czasie przestrzeń jego zapełnia się olejem. Wzrost pęknięcia zatrzymuje się wskutek plastycznego odkształcenia, a naprężenie wywołane przez spiętrzenie dyslokacji przed frontem pęknięcia przeszkadza w jego rozprzestrzenianiu. Podczas półcyklu ściskania ostrze pęknięcia dąży do zamknięcia. Spiętrzenia dyslokacji zanikają, jednak powierzchnie pęknięcia nie zbliżą się do siebie w takim stopniu, jak to ma miejsce bez obecności oleju. Przeszkodą jest warstewka oleju.

where : $\Delta K = K_{max} - K_{min} = \sigma_{max}\sqrt{\pi a} - \sigma_{min}\sqrt{\pi a} = \Delta\sigma\sqrt{\pi a}$ for $R \geq 0$ (in case $R<0$ i.e. $\sigma_{min}<0$, $K_{min}=0$ [7]), K_{max}, K_{min} – maximum and minimum stress intensity coefficient value corresponding to maximum σ_{max} and minimum σ_{min} cycle stress, C,m – fixed.

Cycle asymmetry expressed with the $R=\sigma_{min}/\sigma_{max}$ coefficient has a significant influence on crack velocity. From many equations taking the cycle asymmetry into consideration the one used most in practice is the Forman equation, which is an extended for of formula (1.1).

Knowing the crack velocity allows obtaining information concerning the number of cycles of load changes (time) until the fracture reached the critical value a_C or value specified by control requirements.

2. Influence of environmental factors on fatigue fracture increase

The course of fatigue process significantly depends on environmental factors. Environments different than a laboratory environment significantly influence the crack velocity adequately to their properties, especially the sensitivity of material to environmental factors. The discussed influence noticeably decreases in the range of high ΔK. The adsorption, diffusion and corrosion effects together with fatigue effects make the fatigue course very complex. This is why attempts were made to determine the crack velocity in active environments using dyadic or polyadic expressions [5], in which term or terms describing the influence of these environments were added to the crack velocity. Crack velocity in environment other that laboratory environment is most often described with equation (1.1) without additional supplements.

Fracture increase in the construction element subject to rotational bending in a neutral fluid environment – not causing corrosion, paraffin oil for example, progresses in the phase of tensile stress effects. At that time the fracture face slowly moves forward, which results in a mechanism similar to the mechanism of plastic destruction under constant load. During this time the fracture space fills with fluid. The fracture increase stops due to plastic deformation and the stress caused by dislocation concentration in front of the fracture obstructs its spreading. During compression half-cycle the fracture edge tends to close. Dislocation concentrations decay, however the fracture surfaces do not move close as to each other as in case of oil-free environment. The oil layer is an obstacle.

Problem of the influence of lubricant environments on fatigue crack velocity propagation in steel was examined by many researchers. Endo and colleagues [6] researching the influence of paraffin oil and silicone

Problem oddziaływania środowisk smarnych na prędkość propagacji pęknięć zmęczeniowych w stali podejmowało wielu badaczy. Endo i współpracownicy [6] badając wpływ oleju parafinowego i silikonowego na prędkość wzrostu pęknięć zmęczeniowych w próbkach stalowych gładkich i z karbem, stwierdzili zmniejszenie prędkości. Podobnie Schäffer [9] badając prędkość zmęczeniowego pękania w stali C15 w środowisku oleju parafinowego i silikonowego stwierdza, że oleje wpłynęły na zmniejszenie prędkości pękania.

W literaturze krajowej początkowo twierdzono, że środowiska powierzchniowo aktywne (do których należy zaliczyć oleje) wywołują zwiększenie prędkości pękania. Następnie pogląd ten jednak zmieniono [8] podając, że w środowisku oleju silikonowego nie zaobserwowano żadnego wpływu na prędkość pękania w stali o zawartości 0,036 %C. W badaniach [1] uzyskano znaczne zmniejszenie prędkości pękania w stali 45 w otoczeniu oleju parafinowego. Nieznaczne zmniejszenie prędkości propagacji pęknięć zmęczeniowych w stali 45 pod wpływem środowiska oleju Hipol stwierdzono w pracy [4]. W pracach tych nie przedstawiono, lecz podano tylko w sposób ogólny mechanizm oddziaływania oleju na prędkość propagacji pęknięcia. Mała liczba przeprowadzonych eksperymentów nad zbadaniem i wyjaśnieniem mechanizmu oddziaływania oleju na prędkość propagacji pęknięcia zmęczeniowego w stalach, oraz znaczna rola środowisk olejów smarnych w maszynach i urządzeniach, wydaje się przesądzać o randze problemu i skłania do zajęcia się nim.

3. Wyniki badań własnych i ich opracowanie

Obiektem badań była stal 45 (R_e= *581 MN/m²,* R_m=*773,8 MN/m²*) – tworzywo konstrukcyjne powszechnie stosowane na wały. Bezpośrednie pomiary prędkości pękania prowadzono przy zginaniu obrotowym (*50 Hz*) na próbkach wspornikowych, metodą zabarwienia powierzchni pęknięcia po określonej liczbie cykli zmęczeniowych. Następnie po pęknięciu próbki wielkość ta mierzona była na mikroskopie stereoskopowym. Próbki badano w otoczeniu powietrza i oleju parafinowego o lepkości kinematycznej v i gęstości ρ podanych w tabeli 1.

Badania prowadzono przy amplitudzie naprężenia σ_a = *323,73 MN/m²*. Stanowi to około 56% granicy plastyczności. W czasie eksperymentu kontrolowano zmiany temperatury oleju w którym znajdowała się próbka.

oil on fatigue fracture increase velocity in smooth and notched steel samples stated a decrease of this velocity. Similarly, Sch ffer [9] researching the velocity of fatigue crack in C 15 steel in paraffin oil and silicone oil environment states that the oils influenced the decrease of crack velocity.

In Polish literature it was initially stated that surface active environments (which include oils) result in increased crack velocity. However, this opinion was changed [8] stating that in paraffin oil environment no influence on the crack velocity of steel with 0.036 % C content. The tests [1] showed a significant decrease of crack velocity of steel 45 in paraffin oil environment. A small decrease of fatigue fracture propagation velocity in steel 45 under the influence of Hipol oil environment was stated in paper [4]. These works did not describe the specifics of the mechanism of influence of oil on fracture propagation velocity only present it in a general way. The small number of conducted experiments researching the mechanism of oil influence on the fatigue fracture propagation velocity in steels, and significant role of the lubricant oil environments in machines and equipment seems to decide on the problem magnitude and inclines toward paying closer attention to it.

3. Results of own tests and their elaboration

The subject of the tests was steel 45 (R_e= 581 MN/m², R_m= 773,8 MN/m²) – construction material often used for shafts. Direct measurements of the crack velocity were conducted at rotational bending (50 Hz) on bracket samples, using the method of coloring fracture surface after a given number of cycles. Then, after the cracking of the sample this value was measured using stereoscope microscope. Samples were tested in environments of air and paraffin oil with kinetic viscosity v and density ρ specified in table 1.

The tests were conducted at stress amplitude of σ_a = *323,73 MN/m²*. This constitutes approximately 56% of the yield point. During the experiment the temperature of oil in which the sample was placed was controlled. An approximately constant increase of temperature of samples tested in oil and in air.

Tabela 1

Olej parafinowy Paraffin oil	v (20° C) m^2/s	v (50° C) m^2/s	ρ kg/m^3
	$245{,}7 \times 10^{-6}$	$42{,}3 \times 10^{-6}$	881

Utrzymywano jednakowy w przybliżeniu przyrost temperatury próbek badanych w oleju i powietrzu.

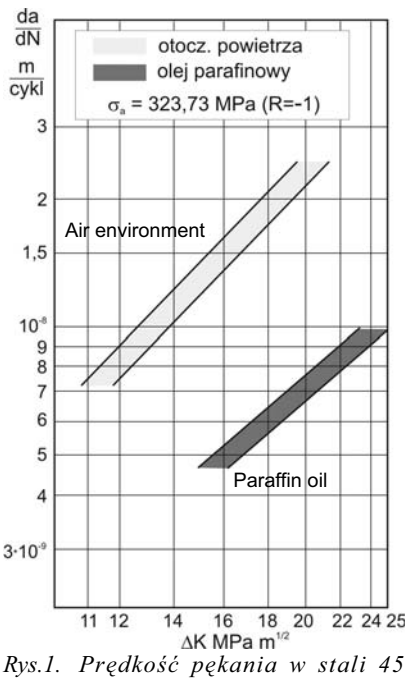
Wyniki serii pomiarów przedstawiono w formie wykresu *a=f(N)*, który wraz z dokładnym opisem eksperymentu zamieszczono w pracy [1]. Na wykresie tym nachylenie linii *a=f(N)* w środowisku oleju parafinowego jest znacznie mniejsze, w porównaniu z linią reprezentującą wyniki badań prędkości pękania w otoczeniu powietrza. Oznacza to, że prędkość wzrostu pęknięcia w otoczeniu oleju jest mniejsza jak w powietrzu.

Dane z wykresu *a=f(N)* posłużyły do budowy wykresu prędkości pękania *da/dN=f(ΔK)*, który przedstawiono na rys.1. Zależności *da/dN=f(ΔK)* odnośnie wyników badań w otoczeniu powietrza i oleju wykazują na wykresie pewien rozrzut. Mając na uwadze zwiększoną pewność w szacowaniu trwałości zmęczeniowej, która zależy od prędkości pękania [2], do dalszego opracowania wyników przyjęto większe wartości prędkości. Zgodnie z powyższym do obliczenia wartości parametrów *C* i *m*, przyjęto prędkości leżące na górnych liniach ograniczających wyniki pomiarów prędkości pękania.

Graficznym obrazem równania Parisa w układzie podwójnie logarytmicznym jest linia prosta. Po logarytmowaniu wzoru (1.1) otrzymamy wyrażenie postaci

$$\log da/dN = \log C + m \log \Delta K,$$

któremu odpowiada równanie linii prostej $y=b+ax$, gdzie: $y= \log da/dN$, $b= \log C$, $a=m$, $x=\log \Delta K$.



Rys.1. Prędkość pękania w stali 45 zginanej obrotowo w otoczeniu powietrza i oleju parafinowego

Rys.1. The crack velocity of steel 45 bent rotationally in air and paraffin oil environment

Przyjmując z wykresu (rys.1) współrzędne dwóch wyników propagacji pęknięcia w otoczeniu powietrza: $da/dN=1x10^{-8}$ *m/cykl*, $\Delta K=12,83$ *MPa*$\cdot m^{1/2}$ oraz $da/dN= =1,66x10^{-8}$ *m/cykl*, $\Delta K=16,23$ *MPa* $m^{1/2}$, otrzymano równanie opisujące prędkość wzrostu pęknięcia w stali 45 w otoczeniu powietrza

$$da/dN=4,04 \cdot 10^{-11} \Delta K^{2,16} \text{ m/cykl} \qquad (3.1)$$

W celu opisania prędkości pękania stali w otoczeniu oleju przyjęto z wykresu *da/dN=f(ΔK)* dwie prędkości: $da/dN=5,90x10^{-9}$ *m/cykl* i $da/dN= =9,23x10^{-9}$ *m/cykl*, których *ΔK* (druga współrzędna) wynosi odpowiednio: $\Delta K=17,21$ *MPa* $m^{1/2}$ oraz $\Delta K=22,22$ *MPa* $m^{1/2}$. Na tej podstawie obliczono stałe równania:

$$C = 4,06 \cdot 10^{-11} \frac{metr}{(MPa \cdot metr^{1/2})^m \, cykl} \text{ oraz } m=1,75.$$

The results of the series of measurements are presented in the form of a graph *a=f(N)*, which was placed in work [1] together with detailed description of the experiment. On this graph the inclination of line *a=f(N)* in paraffin oil environment is significantly lesser compared to the line representing the fracture increase in air environment. This means that the fracture increase velocity in oil environment is smaller than in air environment.

The data from graph *a=f(N)* were used to build the crack velocity graph *da/dN=f(ΔK)*, shown on figure1. The *da/dN=f(ΔK)* dependencies related to results of tests in air and oil environments show a certain dispersion on the graph. Bearing in mind the increased reliability in estimating fatigue life, which depends on crack velocity [2], higher velocity values were assumed for the following tests. According to the above velocity located on the upper limits of crack velocity measurement results were taken for calculating *C* and *m* parameters.

A straight line is a graphic presentation of Paris equation in a double logarithmic system. After finding the logarithm of formula (1.1) we receive an expression in the form of $\log da/dN=\log C+m \log \Delta K$, which corresponds to the straight line equation $y=b+ax$, where: $y= \log da/dN$, $b= \log C$, $a=m$, $x=\log \Delta K$.

Taking the coordinates of two results of fracture propagation in air environment from (figure 1): $da/dN=1x10^{-8}$ *m/cycle*, $\Delta K=12,83$ *MPa*$\cdot m^{1/2}$ and $da/dN=1,66x10^{-8}$ *m/cycle*, $\Delta K=16,23$ *MPa* $m^{1/2}$, we obtained the equation describing the velocity of steel 45 fracture increase in air environment

$$da/dN=4,04 \cdot 10^{-11} \Delta K^{2,16} \text{ m/cycle} \qquad (3.1)$$

In order to describe the steel crack velocity in oil environment two velocities: $da/dN=5,90x10^{-9}$ *m/cycle* and $da/dN=9,23x10^{-9}$ *m/cycle*, the *ΔK* (second coordinate) of which equals: $\Delta K=17.21$ *MPa* $m^{1/2}$ and $\Delta K=22,22$ *MPa* $m^{1/2}$ correspondingly were taken from graph *da/dN=fΔK*. Using this as a basis the constants of equation:

$$C = 4,06 \cdot 10^{-11} \frac{metr}{(MPa \cdot metr^{1/2})^m \, cykl} \text{ oraz } m=1,75$$

were calculated.

Równanie opisujące prędkość wzrostu pęknięcia w stali 45 w otoczeniu oleju parafinowego ma postać

$$da/dN = 4{,}06 \cdot 10^{-11}\Delta K^{1{,}75}\ m/cykl \qquad (3.2)$$

Porównując prędkość pękania stali 45 badanej w otoczeniu oleju parafinowego oraz powietrza (rys.1) dla tych samych wartości zakresu współczynnika intensywności naprężeń np. $\Delta K=18{,}14\ MPa\ m^{1/2}$, obserwuje się, że prędkość pękania w środowisku oleju ($6{,}47x10^{-9}\ m/cykl$) stanowi około $^1/_3$ prędkości pękania w otoczeniu powietrza ($2{,}11x10^{-8}\ m/cykl$). Poszukując przyczyn tego zjawiska, należy odnieść się do wielkości mających istotny wpływ na propagację pęknięcia zmęczeniowego. Jak wynika ze wzoru (1.1) pozostaje ona w ścisłym związku z polem naprężeń w pobliżu wierzchołka pęknięcia, którego intensywność, stosując metody liniowej mechaniki pękania, można wyrazić współczynnikiem K, a ściślej jego zakresem ΔK. Należy sądzić, że przyczyną mniejszych wartości prędkości pękania jest wielkość współczynnika intensywności naprężeń. Z porównania wartości prędkości pękania w obu środowiskach wynika, że wzrost pęknięcia w stali w otoczeniu oleju parafinowego następuje podobnie jak w otoczeniu powietrza, lecz przy mniejszej wartości ΔK. Korzystając z równania (3.1) opisującego prędkość pękania w otoczeniu powietrza, obliczono wartości ΔK, przy których zachodzą odczytane wielkości da/dN w otoczeniu oleju:

$$\Delta K = 2{,}16\sqrt{\frac{(da/dN)_{(i)w\ oleju}}{4{,}04\cdot 10^{-11}}} \qquad (3.3)$$

Tak wyznaczone wartości ΔK (np. $10{,}49\ MP\cdot m^{1/2}$) są znacząco mniejsze od wartości obliczonych dla cyklu wahadłowego ($18{,}14\ MPa\ m^{1/2}$). Stanowią one około 58% tych ostatnich.

Wzrost długości pęknięcia związany jest (przez ΔK) z wielkością amplitudy naprężeń $\Delta\sigma=\sigma_{max}-\sigma_{min}=2\sigma_a$. Wartość $\Delta\sigma$, dla rozpatrywanych prędkości (da/dN) w oleju wyznaczono na podstawie obliczonych wielkości ΔK oraz znanych z wykresu $a=f(N)$ długości pęknięcia a. Zakres wartości różnicy naprężeń ($\sigma_{max}-\sigma_{min}$) dla przyjętego przedziału ($5{,}67\ x\ 10^{-9}\div 9{,}23x10^{-9}$)$m/cykl$ prędkości pękania w otoczeniu oleju zmienia się od $189{,}69\ MPa$ przy długości pęknięcia $a=8{,}6x10^{-4}\ m$ do wielkości $180{,}05\ MPa$, kiedy długość pęknięcia osiągnęła wymiar $a=15\ x\ 10^{-4}m$. Średnia wartość zakresu zmian naprężeń wynosi $\Delta\sigma=186{,}08\ MPa$. Jest to wartość znacznie mniejsza w porównaniu z wielkością $\Delta\sigma=\sigma_{max}=23{,}73\ MPa$, która jest właściwą dla cyklu wahadłowego.

The equation describing the velocity of fracture increase in steel 45 in paraffin oil environment has the following form:

$$da/dN = 4{,}06 \cdot 10^{-11}\Delta K^{1{,}75}\ m/cycle \qquad (3.2)$$

Comparing the crack velocity of steel 45 tested in paraffin oil and air environments (figure 1) fro the same values of stress intensity coefficient range, for example $\Delta K=18{,}14\ MPa\ m^{1/}$, one can observe that the crack velocity in oil environment ($6.47x10^{-9}\ m/cycle$) constitutes approximately $^1/_3$ of the crack velocity in air environment ($2.11x10^{-8}\ m/cycle$). When looking for the root cause of this effect one must bear in mined the values that have significant influence of fatigue fracture propagation. As it results from formula (1.1) its stays in close relation with stress field near the fracture top, the intensity of which, using linear fracture mechanics methods, can be expressed with coefficient K or more strictly speaking – its range ΔK. One could suppose that the root cause of lower values of crack velocities is the magnitude of stress intensity coefficient. By comparing the values of crack velocities in both environments we can see that the fracture increase in steel in paraffin oil environment progresses similarly like in the case of air environment, but at a lower ΔK value. Using equation (3.1) describing the crack velocity in air environment the values of ΔK, at which the recorded da/dN values occur in oil environment were calculated:

$$\Delta K = 2{,}16\sqrt{\frac{(da/dN)_{(i)\ in\ oil}}{4{,}04\cdot 10^{-11}}} \qquad (3.3)$$

The ΔK determined in such a way (for example $10{,}49\ MP\cdot m^{1/2}$) are significantly lower than values calculated for the oscillating cycle ($18.14\ MPa\ m^{1/2}$). They constitute approximately 58% o the latter.

The increase of fracture length is related (through ΔK) with the value of stress amplitude $\Delta\sigma=\sigma_{max}-\sigma_{min}=2\sigma_a$. The $\Delta\sigma$ value for the examined velocities (da/dN) in oil were determined on the basis of calculated ΔK values and fracture lengths a known from graph $a=f(N)$. Range of values of stress differences ($\sigma_{max}-\sigma_{min}$) for the taken interval ($5.67\ x\ 10^{-9}\div 9{,}23x10^{-9}$)$m/cycle$ of crack velocities in oil environment changes from $189.69\ MPa$ at fracture length of $a=8.6x10^{-4}\ m$ to $180.05\ MPa$, when the fracture length reaches $a=15\ x\ 10^{-4}m$. Average value of stress changes range is $\Delta\sigma = 186.08\ MPa$. This is a value significantly lower in comparison with $\Delta\sigma=\sigma_{max}=323.73\ MPa$, which is the value for the oscillating cycle.

4. Prawdopodobny mechanizm oddziaływania oleju na prędkość propagacji pęknięcia

Znaczna różnica w prędkości propagacji pęknięcia w stali 45 występująca w otoczeniu powietrza laboratoryjnego i oleju parafinowego, spowodowana jest zakresem zmian naprężeń zewnętrznych $\Delta\sigma$, jakie oddziaływują na badany element w wymienionych środowiskach. W przypadku eksperymentu prowadzonego w otoczeniu powietrza ($R=-1$) $\Delta\sigma=\sigma_{max}=323{,}73$ *MPa* zaś $\sigma_{min}=0$, w środowisku oleju $\Delta\sigma=186{,}08$ *MPa*. Naprężenie maksymalne nie ulega zmianie. Dowodzi to, że w otoczeniu oleju następuje zmiana naprężenia minimalnego σ_{min}, które wzrasta od wartości $\sigma_{min}=0$ do wartości $\sigma_{min}=\sigma_{max}-\Delta\sigma=323{,}73-186{,}08=137{,}65$ *MPa*. Można, więc przyjąć, że element zawierający pęknięcie powierzchniowe poddany w otoczeniu oleju zewnętrznemu obciążeniu o przebiegu obustronnym symetrycznym ($R=-1$), w wyniku oddziaływania oleju wnikającego do przestrzeni pęknięcia, podlega obciążeniu w cyklu, którego naprężenie minimalne $\sigma_{min}>0$.

Wzrost minimalnej wartości obciążenia σ_{min} a tym samym i K_{min}, spowodowany jest oddziaływaniem oleju. W fazie działania na element naprężeń rozciągających, kiedy następuje wzrost pęknięcia, powierzchnie utworzone przez nie rozwierają się. W tym czasie olej jest zasysany do przestrzeni utworzonej przez rozchylające się powierzchnie. W półcyklu ściskania olej znajdujący się w pęknięciu jest ściskany. Następuje wyciskanie oleju. Wzrost ciśnienia wywołuje zwiększenie lepkości oleju, co wpływa na spowolnienie jego wypływu. Przyjmuje się, że siły bezwładności są pomijalnie małe, ze względu na wymiary warstewki oleju i nie mają udziału w jego wypływie [3]. Zbliżeniu się powierzchni pęknięcia przeszkadza część oleju, która nie została wyciśnięta. Olej ściskany przez zbliżające się do siebie powierzchnie penetruje ten obszar, prowadząc do zmniejszenia amplitudy naprężeń zewnętrznych $2\sigma_a=\sigma_{max}-\sigma_{min}=\Delta\sigma$, wywołującej lokalne zmiany na czole pęknięcia, będące przyczyną jego wzrostu. Następuje zmniejszenie składowych:

$$\sigma_{ij}=\frac{K_I}{\sqrt{2\pi\, r}}\, f_{ij}(\Theta) \qquad (4.1)$$

pola naprężeń w pobliżu wierzchołka pęknięcia. Wynikiem tego jest spadek wartości naprężeń w strefie pęknięcia, w porównaniu do odpowiadających im wartości w otoczeniu powietrza. Znalazło to potwierdzenie we wstępnych obliczeniach numerycznych z użyciem metody elementów skończonych.

Efektem takiego działania oleju jest wytworzenie dodatnich naprężeń minimalnych cyklu $\sigma_{min}>0$, powodujących wzrost wartości minimalnej współczynnika intensywności naprężeń z $K_{min}=0$, dla $R=-1$, do wartości $K_{min}=\sigma_{min}\sqrt{\pi a}>0$. Powoduje to zmniejszenie wartości ΔK dla $\Delta K=K_{max}-K_{min}$. Wartość zakresu współczynnika intensywności naprężeń ΔK powstała w ten sposób jest mniejsza niż $\Delta K=K_{max}$, co jest charakterystyczne dla obciążenia oscylacyjnego elementu pracującego w powietrzu.

4. Probable mechanism of influence of oil on fracture propagation velocity

The significant difference in propagation velocity of fracture in steel 45 occurring in laboratory air environment and paraffin oil results from changes of external stress $\Delta\sigma$, that effect the given element in the specified environments. In case of the experiment conducted in air environment ($R=-1$) $\Delta\sigma=\sigma_{max}=323.73$ *MPa* and $\sigma_{min}=0$, in oil environment $\Delta\sigma=186.08$ *MPa*. Maximum stress is not changed. This proves that in oil environment the minimum stress σ_{min} changes and increases from $\sigma_{min}=0$ to $\sigma_{min}=\sigma_{max}-\Delta\sigma=323.73-186.08=137.65$ *MPa*. So one can assume that an element with a surface fracture subject to external load of bilateral symmetric course ($R=-1$) in oil environment, as a result of the influence of oil penetrating into the fracture space, is subject to a load in a cycle, the minimum stress of which is $\sigma_{min}>0$.

The increase of minimum load value σ_{min} and thus also K_{min}, is caused by oil influence. During the phase of tensile stress affecting the element, when the fracture increase takes place, the surfaces created by the fracture open up. In this time oil is sucked into the space created by the two opening surfaces. During the compression half-cycle the oil in the fracture is compressed. The oil is being squeezed out of the fracture. Pressure increase causes the oil viscosity to increase, which results os slowing down its outflow. It is assumed that forces of inertia are negligible small due to the dimensions of oil film and do not participate in the outflow [3]. The remaining oil, which was not squeezed out of the fracture, stops the fracture surfaces from contacting. The oil, compressed by surfaces drawing closer to each other, penetrates this area and reduces the amplitude of external stress $2\sigma_a=\sigma_{max}-\sigma_{min}=\Delta\sigma$, resulting in local changes on the fracture face, which are the results of its increase. The components of stress field near the fracture tip:

$$\sigma_{ij}=\frac{K_I}{\sqrt{2\pi\, r}}\, f_{ij}(\Theta) \qquad (4.1)$$

are reduced. This results in a decrease of values of stress in the fracture area, compared to corresponding values in air environment. This was confirmed by initial numeric calculations using the finite elements method.

The result of such influence of oil is the creation of positive minimum cycle stress $\sigma_{min}>0$, resulting in the increase of minimum value of stress intensity coefficient from $K_{min}=0$, for $R=-1$, to $K_{min}=\sigma_{min}\sqrt{\pi a}>0$. This reduces the value of ΔK for $\Delta K=K_{max}-K_{min}$. The value of range of stress intensity coefficient ΔK created this way is smaller than $\Delta K=K_{max}$, which is specific for oscillating load of the element working in air environment.

tości $K_{min} = \sigma_{min}\sqrt{\pi a} > 0$. Wpływa to na zmniejszenie wartości ΔK do wielkości $\Delta K = K_{max} - K_{min}$. Tak powstała wartość zakresu współczynnika intensywności naprężeń ΔK jest mniejsza od $\Delta K = K_{max}$, która jest właściwa obciążeniu wahadłowemu elementu pracującemu w otoczeniu powietrza.

Rezultatem zmniejszenia ΔK jest, zgodnie z wzorem Parisa (1.1), mniejsza prędkość propagacji pęknięcia.

5. Podsumowanie

Część oleju, która nie została wyciśnięta z przestrzeni utworzonej przez powierzchnie pęknięcia, w czasie ich zwierania przez naprężenia ściskające cyklu, penetruje ją, wywołując zmniejszenie amplitudy naprężeń zewnętrznych $2\sigma_a = \Delta\sigma$. Powoduje to zwiększenie naprężeń minimalnych σ_{min} cyklu, które działają na element zawierający pęknięcie. Następuje wzrost wartości minimalnej współczynnika intensywności naprężeń K_{min}. W rezultacie zmniejsza się wielkość zakresu ΔK a tym samym maleje prędkość wzrostu pęknięcia.

Trwałość stalowych elementów maszyn i mechanizmów pracujących w środowiskach olejów smarnych, może być zwiększona przez dobór odpowiedniego oleju opóźniającego prędkość zmęczeniowego pękania. Obok wymagań wynikających z funkcji smarnych olejów, należy przy ich doborze uwzględniać wpływ wywierany na trwałość, a tym samym i niezawodność elementów konstrukcji i mechanizmów.

The result of decreased ΔK is, according to Paris formula (1.1), the reduced speed of fracture propagation.

5. Summary

The part of oil, which was not squeezed out of the space created by fracture surfaces, during its closing due to cycle compressive stress, penetrates the fracture resulting in decreased amplitude of external stress $2\sigma_a = \Delta\sigma$. This results in increased minimum stress σ_{min} of the cycle, which effect the element with the fracture. The minimum value of stress intensity coefficient K_{min} increases. This results in decreased value of ΔK range and thus the fracture increase speed is reduced.

The durability of steel components of machines and mechanisms operating in lubricating oils environments can be increased by selecting appropriate oil, which reduces the fatigue cracking. Apart of requirements resulting from lubricating properties of greases, when selecting them, always consider their effect on durability and thus the reliability of elements of constructions and mechanisms.

6. References

[1] Banaszek J.: *Wpływ oleju nieaktywnego na prędkość propagacji pęknięcia zmęczeniowego w stali 45*, Folia Societaris Scientiarum Lublinensis, vol.23,177, Mat.-Fiz.-Chem.2,177,1981.
[2] Banaszek J.: *Wpływ środowiska olejowego na własności zmęczeniowe stali*, Przegląd Mechaniczny 1,15,1980.
[3] Barwell F.T.: *Łożyskowanie*, WNT Warszawa, 144,1984.
[4] Bogdański S., Szymaniak M.: *Warunki penetracji płynu do wnętrza pęknięcia*, XXI Sympozjum Podstaw Konstrukcji Maszyn, Ustroń, Bielsko-Biała 2003,t.1, WNT 161,2003.
[5] Crocker T.W., Leis B.N.: *Corrosion Fatigue: Mechanics, Metallurgy*, Electrochemistry and Engineering, STP-801, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1983.
[6] Endo K., Komai K., Okada T., Kiyota M.: *Bull*. ISME 15,89,1316,1972.
[7]. Kocańda S., Szala J.: *Podstawy obliczeń zmęczeniowych*. PWN Warszawa, 66,1997.
[8]. Kocańda S.: *Zmęczeniowe pękanie metali*, WNT Warszawa, 359,1985.
[9]. Schäffer A.: *The Effects of Noncorosive Liquids of the Fatigue Behaviour of Steel*, Proc 5 th conf. on Dimension and Strength Calculat, and 6 th Congr. Mater. tesing. Budapest. Akad. Kiado, vol.2,1974.

Dr inż. Jan BANASZEK
Prof. dr hab. inż. Józef JONAK
Dr inż. Hubert DĘBSKI
Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn, Politechnika Lubelska
ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin
e-mail: j.banaszek@pollub.pl, j.jonak@pollub.pl, h.debski@pollub.pl

Jerzy BIENIEK

SEPARACJA ZIARNA PSZENICY NA SICIE DASZKOWYM

WHEAT GRAIN SEPARATION ON A CANOPY SIEVE

Praca przedstawia działanie nowego sita żaluzjowego typu „daszkowego" przystosowanego do pracy w kombajnach zbożowych. Głównym celem badań było znalezienie takiego rozwiązania konstrukcyjnego zespołu czyszczącego, który pracowałby prawidłowo na terenach nachylonych i równocześnie nie wymagałby poziomowania całego kombajnu. Badania dowiodły, że sito daszkowe spełnia te wymagania.

***Słowa kluczowe**: sito żaluzjowe, geometria sita, kombajn zbożowy, przesiewanie, nachylone podłoże*

The paper deals with the operation of a new adjustable canopy sieve fitted for combine-harvesters. The general aim of the study was to find such a construction solution for a cleaning unit that the unit could be able to work properly on the slopes and there would be no need to level a whole harvester. A canopy sieve meets the requirements, a study concluded.

***Keywords**: adjustable sieve, sieve geometry, combine harvester, screening, slope*

1. Wstęp i cel badań

Obecnie produkowane kombajny zbożowe to maszyny uniwersalne z wymiennymi adapterami, przeznaczone do zbioru różnych gatunków roślin w różnych technologiach i warunkach [1].

Podczas pracy kombajnu na pochyłościach, przy jeździe wzdłuż warstwic następuje zsuwanie się masy omłotowej wydzielonej ze słomy (ziarno, drobne frakcje słomiaste, plewy) na położoną niżej część zespołu czyszczącego. Dlatego firmy przodujące w produkcji kombajnów zbożowych (New Holland, Claas, John Deere, Deutz-Fahr i inne) stosują rozwiązania zmierzające do poprawienia parametrów pracy kombajnu na pochyłościach [4].

Kombajny specjalne, produkowane w renomowanych zagranicznych firmach jako tzw. „kombajny górskie", są dużo droższe od kombajnów o tradycyjnej konstrukcji, a zatem zakup ich przez polskiego rolnika z powodów ekonomicznych nie jest uzasadniony [3]. Dlatego należy poszukiwać rozwiązań tańszych, a równocześnie skutecznych.

Celem badań było przystosowanie zespołu czyszczącego kombajnu w wersji standardowej do pracy w warunkach ograniczonego nachylenia terenu do 15^0.

2. Metodyka badań

W badaniach założono, że sito będzie sitem żaluzjowym o sekcyjnej budowie. Z kolei podział sekcji na połowę oraz możliwość nachylenia tych powierzchni w stosunku do siebie, tworzy powierzchnię sita, którą nazwano „sitem daszkowym". Taki układ powierzchni sita umożliwił zmianę wartości składowych siły ciężkości G_{xy} działających na ziarno czyszczonego

1. Introduction and aim of the studies

The combine-harvesters that are currently being manufactured seem to be universal machines fitted with replaceable adapters. They are used to harvest various plant species under various technologies and conditions [1].

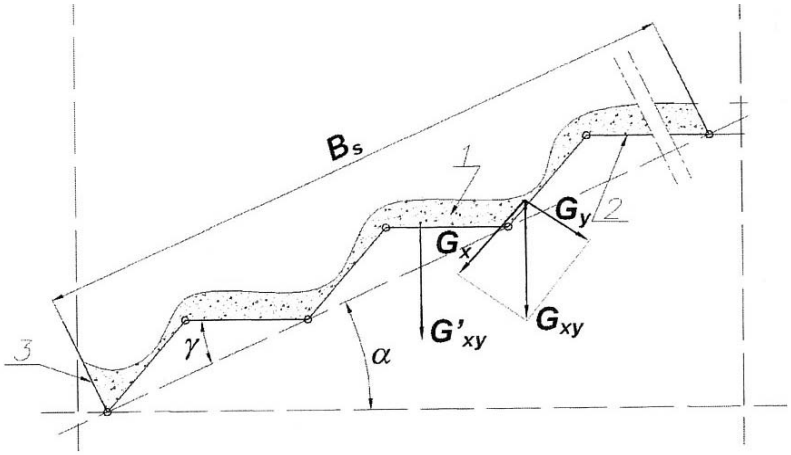
While a harvester is operating on a slope and driving along the contour lines, the threshing mass (grain, fine straw fractions, chaffs) can slide down onto the lower part of a cleaning unit. That is why the leaders in developing harvesters such as New Holland, Claas, John Deere, Deutz-Fahr and others tend to apply the solutions aimed at improving the parameters of machine work on the slopes [4].

There are some special, so-called "mountain" harvesters produced by the renowned companies in other countries. However, they are much more expensive than the "traditional" ones and Polish farmers cannot usually afford to purchase this kind of equipment 3]. Therefore it seems necessary to search for some cheaper and effective solutions.

The aim of the studies was to adapt a cleaning unit in a standard harvester to operate on the slopes up to 15^0.

2. Methods

It has been assumed that an adjustable section sieve will be tested in the studies. A section divided into two parts and the planes inclined one to another form a surface, which has been called a "canopy sieve". Such an arrangement makes it possible to change component values of the gravity force G_{xy} that act on the grain to be cleaned in a plane crosswise to



Rys. 1. Rozkład czyszczonej masy na sicie daszkowym pracującym przy nachyleniu α; 1- czyszczona masa ziarnista, 2- element sekcji sita daszkowego, 3- rama kosza sitowego, B_s- szerokość sita [m], α- kąt bocznego nachylenia kosza sitowego (≈ pochylenie skłonu) [^{0}], γ- kąt nachylenia elementu sita daszkowego [^{0}], G_{xy}, G_{xy}' – siła ciężkości, G_x, G_y – składowe siły G_{xy}

Fig. 1. Distribution of the mass on a canopy sieve operating on a slope α; 1- grain mass to be cleaned, 2- element of a canopy sieve section, 3- sieve basket frame, B_s- sieve width [m], α- angle of a sieve basket side inclination (≈ slope) [^{0}], γ- inclination angle of a canopy sieve element [^{0}], G_{xy}, G_{xy}` – gravity force, G_x, G_y – tangent and normal components of the G_{xy} force

materiału w płaszczyźnie poprzecznej do kierunku ruchu tego materiału. Przedstawia to rysunek 1. Możliwość „sterowania" składowymi siły ciężkości na powierzchniach sekcji ma przeciwdziałać skutkom zsuwania się materiału czyszczonego podczas poprzecznego nachylenia kombajnu zbożowego.

Badania przeprowadzono na stanowisku wykonanym w Instytucie Inżynierii Rolniczej AR we Wrocławiu, które spełniało następujące wymagania:

- umożliwia pochylenie kosza sitowego w dwóch płaszczyznach (badania wykonano dla bocznego pochylenia kosza 10^0),
- umożliwia regulację ustawienia sita (badania wykonano dla nachylenia daszków sita 0^0, 5^0, 10^0 i 15^0).

Schemat kinematyczny omawianego stanowiska zamieszczono w rozprawie habilitacyjnej autora [2]. Wymiary kosza sitowego i powierzchnia ogólna sita są zgodne z zastosowanymi w kombajnie. Zachowane zostały również parametry kinematyczne poprzez wykorzystanie stosowanych w kombajnie elementów napędu kosza sitowego.

3. Omówienie wyników badań

Na proces przesiewania i czyszczenia ziarna wpływa wiele czynników związanych zarówno z parametrami konstrukcyjnymi i kinematycznymi sita, jak też ze składem rozdzielanej mieszaniny ziarnistej. W literaturze występuje także istotna rozbieżność w wyznaczonych wielkościach granicznych parametrów skuteczności tego procesu. Celowym jest więc odnieść się do prezentowanych parametrów.

the material flow. It is presented in Fig. 1. There is a potentiality for „controlling" the components of the gravity force on the section surfaces. It is meant to prevent the material from sliding down during cross inclination of a harvester.

The studies were carried out at the stand developed at the Institute of Agricultural Engineering of the Agricultural University in Wroclaw. The stand was characterized by the following features:

- it allows to incline a sieve basket in two planes (the studies were run for a side basket inclination of 10^0),
- it allows to regulate sieve position (the studies were run for the following inclination angles of sieve canopies: 0^0, 5^0, 10^0 and 15^0).

The kinematics' scheme of the stand has been presented in the author's Habilitation Thesis [2]. Both the size of a sieve basket and a total sieve surface are identical as those in a harvester. The same applies to kinematics parameters as the studies were based on the power transmission elements of a sieve basket applied in combine-harvesters.

3. Discussion of the results

The process of grain screening and cleaning is affected by many factors related both to the construction and kinematics parameters of a sieve itself but also by a composition of a grain mixture to be separated. The references show a significant difference between the determined limited parameters of the process effectiveness. It is then advisable to refer to the parameters presented.

Badania stanowiskowe dla każdego ustawienia daszków sita i różnego nachylenia kosza sitowego symulującego nachylenie terenu przeprowadzono w pięciu powtórzeniach, a wyniki badań poddano analizie statystycznej, którą przeprowadzono w oparciu o komputerowy pakiet statystyczny STATISTICA wersja 5.0 PL.

Analizę badanego materiału przeprowadzono dla nachylenia bocznego sita $\alpha = 10^0$ i czterech kątów nachylenia daszków sita $\gamma = 0^0$, 5^0, 10^0 i 15^0.

Przykładowe wykresy opisujące proces przesiewania ziarna pszenicy przedstawiono na rysunkach 2 - 5. Wyniki badań zestawiono w formie wykresów korelacji wartości przewidywanej względem wartości obserwowanej dla zmiennej zależnej MC – masy całkowitej (masa ziarna wraz z zanieczyszczeniami przesiana przez sito daszkowe).

Na rysunku 2 przedstawiono wykres korelacji procesu przesiewania dla kąta $\alpha = 10^0$ i daszków $\gamma = 0^0$ (symulacja sita płaskiego), dla którego współczynnik korelacji wyniósł $r = 0{,}97$ a błąd standardowy estymacji $\delta = 0{,}0061$.

Rysunek 3 przedstawia wykresy korelacji wartości obserwowanej do wartości przewidywanej dla kąta $\alpha = 10^0$ i daszków $\gamma = 5^0$. Dla tego ustawienia współczynnik korelacji wyniósł $r = 0{,}96$ a błąd standardowy estymacji $\delta = 0{,}0075$ i jest największy dla wszystkich badanych ustawień.

Najwyższy współczynnik korelacji $r = 0{,}98$ zaobserwowano dla kąta nachylenia daszków $\gamma = 10^0$. Błąd standardowy estymacji dla tego ustawienia jest najmniejszy i wynosi $\delta = 0{,}0058$ (rys.4).

Kolejny rysunek (rys. 5) przedstawia zależność dla kąta nachylenia daszków $\gamma = 15^0$, dla którego $r = 0{,}97$ a błąd standardowy estymacji $\delta = 0{,}0060$.

Powyższe wyniki obserwacji potwierdzają, iż dynamika procesu przesiewania ziarna pszenicy na sicie daszkowym nachylonym bocznie poprawi pracę zespołu czyszczącego kombajnu zbożowego.

The stand studies were repeated five times for each arrangement of sieve canopies and various positions of a sieve basket simulating land inclination. The results were statistically analysed with STATISTICA software, version 5.0 PL.

The material was tested for a side inclination of a sieve $\alpha = 10^0$ and four inclination angles of sieve canopies $\gamma = 0^0$, 5^0, 10^0 and 15^0.

Sample diagrams showing the process of wheat grain screening are presented in Figures 2 - 5. The results were compiled as correlation diagrams indicating the expected value and observed values for dependent variable MC – total mass (grain with impurities screened through a canopy sieve).

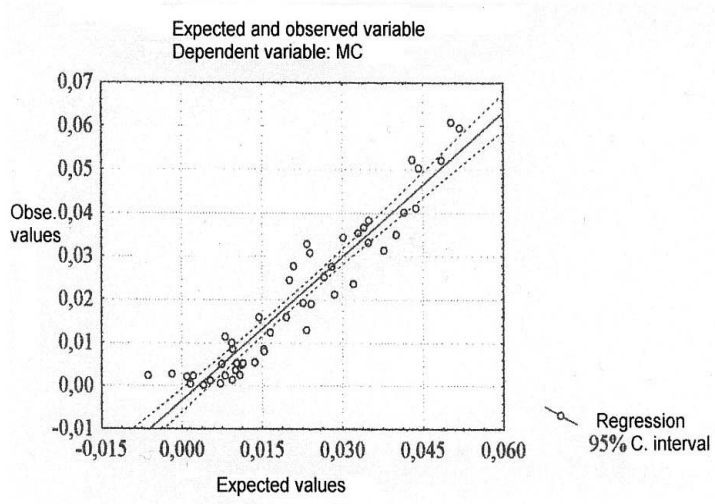
Figure 2 presents the correlation diagram for the screening process if the angles were $\alpha = 10^0$ and $\gamma = 0^0$ (simulation of flat sieve). The correlation coefficient was r = 0,97 and the mean estimation error $\delta = 0{,}0061$.

The diagrams showing the correlation between the observed and expected values for the angles $\alpha = 10^0$ and $\gamma = 5^0$ are presented in Fig. 3. The correlation coefficient was r = 0,96 and the mean estimation error reaching $\delta = 0{,}0075$ was the highest of all the positions tested.

The highest correlation coefficient $r = 0{,}98$ was recorded for the inclination angle of the roofs $\gamma = 10^0$. The mean estimation error for this position was the lowest and amounted to $\delta = 0{,}0058$ (Fig. 4).

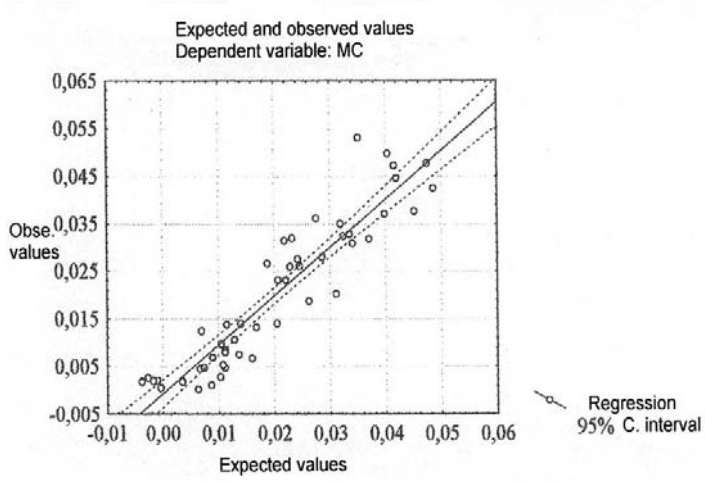
Figure 5 shows the relation for the roof inclination angle $\gamma = 15^0$, for which $r = 0{,}97$ and mean estimation error $\delta = 0{,}0060$.

The abovementioned results seem to confirm that the dynamics of wheat grain screening through a side-inclined canopy sieve will improve the work of a cleaning unit in a combine-harvester.



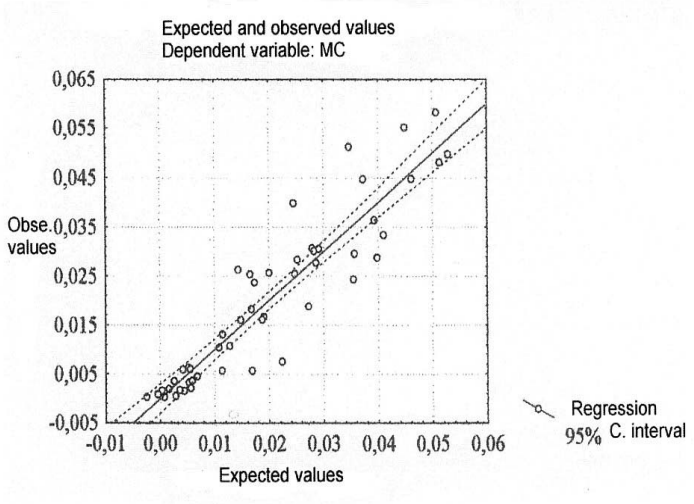
Rys. 4. Wykres korelacji wartości przewidywanej względem wartości obserwowanej dla zmiennej zależnej MC – masy całkowitej. Nachylenia bocznego sita $\alpha = 10^0$. Nachylenia daszków sita $\gamma = 10^0$. Współczynnik korelacji r = 0,98

Fig. 4. Correlation diagram of the expected and observed values for a dependent variable MC – total mass. Side inclination of a sieve $\alpha = 10^0$. Inclination of sieve canopies $\gamma = 10^0$. Correlation coefficient r = 0,98



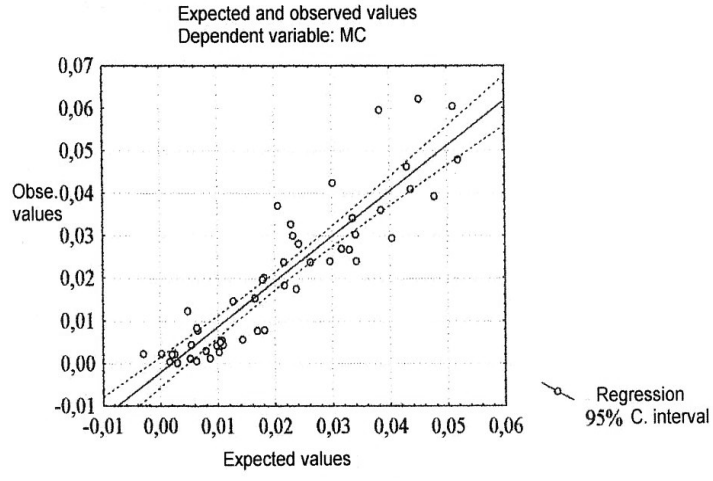
Rys. 5. Wykres korelacji wartości przewidywanej względem wartości obserwowanej dla zmiennej zależnej MC – masy całkowitej. Nachylenia bocznego sita $\alpha = 10^0$. Nachylenia daszków sita $\gamma = 15^0$. Współczynnik korelacji r = 0,97

Fig. 5. Correlation diagram of the expected and observed values for a dependent variable MC – total mass. Side inclination of a sieve $\alpha = 10^0$. Inclination of sieve canopies $\gamma = 15^0$. Correlation coefficient r = 0,97



Rys. 2. Wykres korelacji wartości przewidywanej względem wartości obserwowanej dla zmiennej zależnej MC – masy całkowitej. Nachylenia bocznego sita $\alpha = 10^0$. Nachylenia daszków sita $\gamma = 0^0$. Współczynnik korelacji r = 0,97

Fig. 2. Correlation diagram of the expected and observed values for a dependent variable MC – total mass. Side inclination of a sieve $\alpha = 10^0$. Inclination of sieve canopies $\gamma = 0^0$. Correlation coefficient r = 0,97



Rys. 3. Wykres korelacji wartości przewidywanej względem wartości obserwowanej dla zmiennej zależnej MC – masy całkowitej. Nachylenia bocznego sita $\alpha = 10^0$. Nachylenia daszków sita $\gamma = 5^0$. Współczynnik korelacji r = 0,96

Fig. 3 Correlation diagram of the expected and observed values for a dependent variable MC – total mass. Side inclination of a sieve $\alpha = 10^0$. Inclination of sieve canopies $\gamma = 5^0$. Correlation coefficient r = 0,96.

4. Wnioski

Analiza zjawisk zachodzących na sicie daszkowym nachylonym bocznie pod kątem $\alpha = 10^0$ skłania do sformułowania następujących wniosków:

1. Nachylenie poprzeczne sita daszkowego wpływa na dynamikę przemieszczania się masy ziarna pszenicy po jego powierzchni, o czym świadczą uzyskane wykresy korelacji przesiewu.
2. Wykresy korelacji wskazują na to, że dynamika procesu przesiewania na sicie daszkowym nachylonym bocznie jest najkorzystniejsza dla kąta nachylenia $\alpha = 10^0$ i $\gamma = 10^0$. Wynika to z ograniczeniem przemieszczania się masy czyszczonej przez daszki na niżej położoną część sita.
3. Konstrukcja sita daszkowego pozwoli wyeliminować drogie rozwiązania poziomowania poprzecznego bryły kombajnu jak i kosza sita, przy dostatecznej skuteczności czyszczenia podczas pracy kombajnu na pochyłościach do 15^0.

4. Conclusions

The analysis of the processes taking place on a canopy sieve that is side-inclined at an angle of 10^0 allows to draw the following conclusions:

1. Cross inclination of a canopy sieve affects the dynamics of wheat grain mass translocation along sieve surface. It has been confirmed by the diagrams of screening correlation.
2. Correlation diagrams indicate that the dynamics of screening through a side-inclined canopy sieve is the most beneficial for the inclination angles $\alpha = 10^0$ and $\gamma = 10^0$. It appears that the translocation of the mass to be cleaned through the canopies onto the part located below is limited.
3. The construction of a canopy sieve will make it possible to eliminate expensive cross levelling of both a harvester and a sieve basket and maintain satisfactory cleaning effectiveness when operating on the slopes up to 15^0.

5. References

[1] Banasiak J. 1999: *Agrotechnologia*. PWN, Warszawa.
[2] Bieniek J. 2003: *Proces separacji ziarna zbóż na sicie daszkowym w zmiennych warunkach pracy*. Zeszyty Naukowe Akademii Rolniczej we Wrocławiu, nr 462, Rozprawy CXCVIII, Wrocław.
[3] Dreszer A. K., Gieroba J., Ukalski J. 1998: *Kombajny zbożowe do pracy na terenach pochylonych*. Problemy Inżynierii Rolniczej, nr 19, PAN.
[4] Roszkowski A. 1989: *Kombajny zbożowe do pracy na zboczach*. Maszyny i Ciągniki Rolnicze, nr11.

Dr hab. inż. Jerzy Bieniek
Zakład Eksploatacji Maszyn Rolniczych
Instytut Inżynierii Rolniczej
Akademia Rolnicza we Wrocławiu
Ul. Chełmońskiego 37/41
51-630 Wrocław
tel. 071-3205721, tel/fax 3482486,
bieniek@imr.ar.wroc.pl

Miron CZERNIEC
Cyprian KOMORZYCKI

SZCZEGÓLNE PRZYPADKI STYKU WEWNĘTRZNEGO ELEMENTÓW CYLINDRYCZNYCH O PORÓWNYWALNYCH ŚREDNICH

PARTICULAR CASES OF INNER CONTACT CYLINDERS HAVING COMPARABLE DIAMETERS

W artykule podjęto problem styku wewnętrznego elementów cylindrycznych o porównywalnych średnicach z małymi odchyłkami od kształtu kołowego. Przedstawiono wyniki przybliżonego rozwiązania równania podstawowego opisującego styk dwuobszarowy, oraz rozważano współpracę elementów z błędami owalności oraz graniastości potrójnej i poczwórnej. Rozwiązania numeryczne przedstawione zostały w postaci wykresów.
Wszystkie znane badania dotyczące współpracy elementów cylindrycznych nie uwzględniają w swoich rozwiązaniach wpływu małych odchyłek od kształtu kołowego takich np. jak eliptyczność, owalność i graniastość. Odchyłki te mają istotny wpływ na wielkość i rozkład nacisków stykowych. Ich ocena ilościowa ma duże znaczenie praktyczne.

***Słowa kluczowe**: elementy cylindryczne, styk dwuobszarowy, eliptyczność, owalność*

The paper presented inner contact of cylinders having comparable in case of small out-of-roundness. There are presented results of asymptotic solutions, by collocation method the basic equation describing contact problem. The particular cases contact problem and deviations from circular shape, like bi-ared contact and joints with lobing elements were carried out. Numerical calculation were presented in graphical way.
All well-known solutions of cylindrical joints do not take into account small deviations from circular shape, like elipticity, lobing, ovality and so forth. The deviation of element conteurs has an effect on magnitude and distribution of the contact pressures. Therefore quantitive estimation of the effect is very important for practical reasons.

***Keywords**: mechanical contact, cylindrical elements, bi-area contact, lobing elements*

1. Introduction

All well-known solutions of cylindrical joints do not take into account small deviations from circular shape, like elipticity, lobing, ovality and so forth. The deviation of element conteurs has an effect on magnitude and distribution of the contact pressures. Therefore quantitative estimation of the effect is very important for practical reasons. In the presented article, authors' original results were presented. Quotation of earlier known solutions [1, 2, 3] were limited to indispensable minimum.

2. Basic equation of the problem

Interaction of the elements, of contours L_1 and L_2 (Fig. 1), in contact is caused by static forces N, T and couple of forces having moment M_0. Problem consists on determing distribution pressures contact $p(\alpha,\delta)$ and the contact zone limited by the angles $\alpha_{0\delta}$ and $\beta_{0\delta}$.

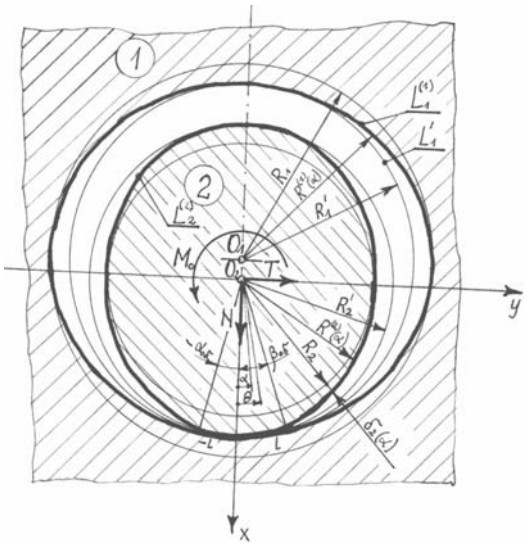


Fig.1. Scheme of the cylindrical joint for elements with small out – of – roundness

Equation obtained for $p(\alpha,\delta)$ in [3] takes the form:

$$k_1 \int_{-\alpha_{o\delta}}^{\beta_{o\delta}} ctg\frac{\alpha-\theta}{2}\left[p'(\theta,\delta)+fp(\theta,\delta)\right]d\theta = k_2\left[p(\alpha,\delta)-fp'(\alpha,\delta)\right]+$$

$$+k_3\int_{-\alpha_{o\delta}}^{\beta_{o\delta}} p(\alpha,\delta)\,d\alpha + k_4\left(N\cos\alpha + T\sin\alpha\right)+\frac{R_1-R_2}{R_1R_2}- \qquad (1)$$

$$-sin\pm\left\{2\left[\frac{f_{1x}'(\pm)}{R_1^2}-\frac{f_{2x}'(\pm)}{R_2^2}\right]-\left[\frac{f_{1y}''(\pm)}{R_1^2}-\frac{f_{2y}''(\pm)}{R_2^2}\right]\right\}+cos\pm\left\{2\left[\frac{f_{1y}'(\pm)}{R_1^2}-\frac{f_{2y}'(\pm)}{R_2^2}\right]+\left[\frac{f_{1x}''(\pm)}{R_1^2}-\frac{f_{2x}''(\pm)}{R_2^2}\right]\right\}$$

where: $f_{kx}(\alpha), f_{ky}(\alpha)$ - parameters describing deviation of contour L_1*(hole, k=1)* and L_2*(disk, k=2)* from given principal circles; $f_{kx}(\alpha)=x_k^*(\alpha,\delta)-x_k(\alpha)$, $f_{ky}(\alpha)=y_k^*(\alpha,\delta)-y_k(\alpha)$, x_k^*, y_k^* - parametric equations of elements out – for displacements of round contours before strain.

$$k_1=\frac{1}{8\pi}\left(\frac{1+\kappa_1}{G_1R_1}+\frac{1+\kappa_2}{G_2R_2}\right)$$

$$k_2=\frac{1}{4}\left(\frac{1-\kappa_1}{G_1R_1}-\frac{1-\kappa_2}{G_2R_2}\right)$$

$$k_3=\frac{1+k_1}{8\pi G\,R}$$

$$k_4=\frac{1}{2\pi}\left(\frac{\kappa_1}{G_1R_1}+\frac{1}{G_2R_2}\right)$$

G – shear modulus, $\kappa=3-4\nu$ - for plane state of strain, $\kappa=(3-\nu)/(1+\nu)$ - for plane state of stress, ν - Poisson ratio,

$$p'(\theta,\delta)=dp(\theta,\delta)/d\theta;$$

$$\begin{Bmatrix}N\\T\end{Bmatrix}=-\int_{-\alpha_{o\delta}}^{\beta_{o\delta}}\left[\sigma_r^{(2)}(\alpha,\delta)\begin{Bmatrix}\cos\alpha\\\sin\alpha\end{Bmatrix}m\tau_{r\alpha}^{(2)}(\alpha,\delta)\begin{Bmatrix}\sin\alpha\\\cos\alpha\end{Bmatrix}\right]d\alpha$$

$$\delta_r(\alpha,\delta)=-p(\alpha,\delta)$$

$$\tau_{r\alpha}(\alpha,\delta)=f\delta_r(\alpha,\delta)$$

f – coefficient of sliding friction.

3. Bi-area contact of cylinders with elipticity

We assume that elements are made of the same material *($G_1=G_2=G$, $\nu_1=\nu_2$)* and in the contact zone *$f=0$*. Contact mating of elements in the joint is determined only by force N, hence $\alpha_{0\delta}=\beta_{0\delta}$. Semi-axes of elliptic elements (Fig. 1) are equal:

$$a_1=R_1,\ b_1=R_1',\ a_2=R_2',\ b_2=R_2$$

and $a_1>b_1,\ a_2>b_2$

Elements radii are similar, i.e. $R_1\cong R_2=R$, but radial clearance $\varepsilon=R_1-R_2>0$.

Particular cases of cylinder deviations of their joints, two areas of contact may appear. Fig. 2 shows such a case with symmetric distribution of contact areas S_1 and S_2 in relation to pressing force N. Contact of the disk 2 with the hole 1 at first takes place in points P_1 and P_2 situated under the angle 2λ.

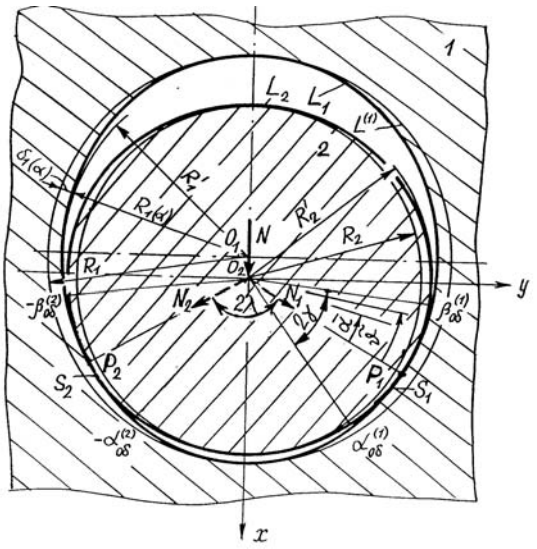


Fig. 2. Scheme of bi-area contact in the cylindrical joint

Calculations of the contact pressures and their distribution in the contact zones $S_1\left(\alpha_{0\delta}^{(1)}\le\alpha\le\beta_{0\delta}^{(1)}\right)$ or $S_2\left(-\alpha_{0\delta}^{(2)}\le\alpha\le-\beta_{0\delta}^{(2)}\right)$ are carried out according to (1), where the limits of integration correspond with the limits of contact zones, and N is substituted by $N'=0{,}5N/\cos\lambda$. An angle λ is determined from cotangency condition of element contours 1 and 2 points P_1 and P_2. In the case of ellipses, in co-ordinates xOy, these conditions take the form:

$$\left.\begin{aligned}\frac{(x_o+D)^2}{a_1^2}+\frac{y_o^2}{b_1^2}&=1\\ \frac{x_0^2}{b_2^2}+\frac{y_0^2}{a_2^2}&=1\end{aligned}\right\} \qquad (2)$$

$$\frac{b_1^2}{a_1^2}(x_o+\Delta)=\frac{a_2^2}{b_2^2}x_o \qquad (3)$$

where: Δ - distance between points O_1 and O_2, x_o, y_o - co-ordinates of contact point of contours.

Quantities Δ, x_o, y_o are expressed by equations:

$$x_o = \frac{b_1 b_2^2}{a_2}\sqrt{\frac{b_1^2 - a_2^2}{a_1^2 a_2^2 - b_1^2 b_2^2}}$$
$$y_o = \pm\sqrt{\frac{a_1^2 a_2^4 - b_1^4 b_2^2}{a_1^2 a_2^2 - b_1^2 b_2^2}} \qquad (4)$$

After transformations we obtain:

$$\lambda = arctg\frac{a_2}{b_1 b_2^2}\sqrt{\frac{a_1^2 a_2^4 - b_2^2 b_1^4}{b_1^2 - a_2^2}} \qquad (5)$$

In considered case, there possible cases of bi-area contact are possible:

1) elements 1 and 2 are elliptic,
2) element 1 is elliptic and element 2 is circular,
3) element 1 is circular and element 2 is elliptic.

Equation for the contact pressures $p(\tilde{\alpha},\delta)$ takes the form:

$$\frac{1}{\pi}\int_{\gamma_1}^{\gamma_2} ctg\frac{\tilde{\alpha}-\tilde{\theta}}{2}\, p'(\tilde{\theta},\delta)d\tilde{\theta} = \frac{2}{\pi}cos\tilde{\alpha}\int_{\gamma_1}^{\gamma_2} p(\tilde{\alpha},\delta)cos\tilde{\alpha}\,d\tilde{\alpha} +$$
$$+\frac{1}{2\pi}\int_{\gamma_1}^{\gamma_2} p(\tilde{\alpha},\delta)d\tilde{\alpha} + \frac{4\varepsilon G}{R(1+\chi)}\left[1-\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon}D_1(\alpha)-\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon}D_2(\alpha)\right] \qquad (6)$$

where: $\tilde{\alpha} = \alpha + \lambda, 0 \le \alpha \le \frac{\pi}{2}$, $\tilde{\theta} = \theta + \lambda, \gamma_1 \le \tilde{\alpha} \le \gamma_2$,
$\gamma_1 = \lambda - 0{,}5(\beta_{0\delta}^{(I)} - \alpha_{0\delta}^{(I)}), \gamma_2 = \lambda + 0{,}5(\beta_{0\delta}^{(I)} - \alpha_{0\delta}^{(I)})$,
$D_1(\alpha) = \cos^2\alpha, D_2(\alpha) = \sin^2\alpha$.

For specified cases of contacts:
1) $\varepsilon_1 = 2(\delta_1+\delta_2)$, $\varepsilon_2 = -(\delta_1+\delta_2)$, $(\delta_1+\delta_2) < \varepsilon$, $a_2 < b_1$
2) $\varepsilon_1 = 2\delta_1$, $\varepsilon_2 = -\delta_1$, $\delta_1 < \varepsilon$, $R_2 < b_1$
3) $\varepsilon_1 = 2\delta_2$, $\varepsilon_2 = -\delta_2$, $\delta_2 < \varepsilon$, $a_2 < R_1$.

Contact semi-angle $\gamma = 0{,}5(\beta_{0\delta}^{(1)} - \alpha_{0\delta}^{(1)})$ is determined from equilibrium condition:

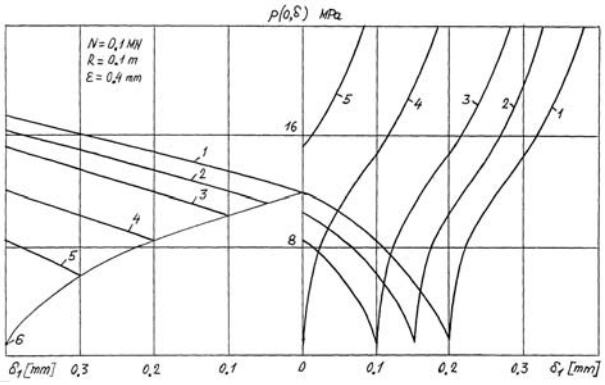


Fig.3. Plots of variations of the maximal contact pressures (uni- and bi-area contact): 1-δ_2=0, 2-δ_2=0.05mm, δ_2=0.05mm, 3-δ_2=0.1mm, 4-δ_2=0.2mm, 5-δ_2=0.3mm

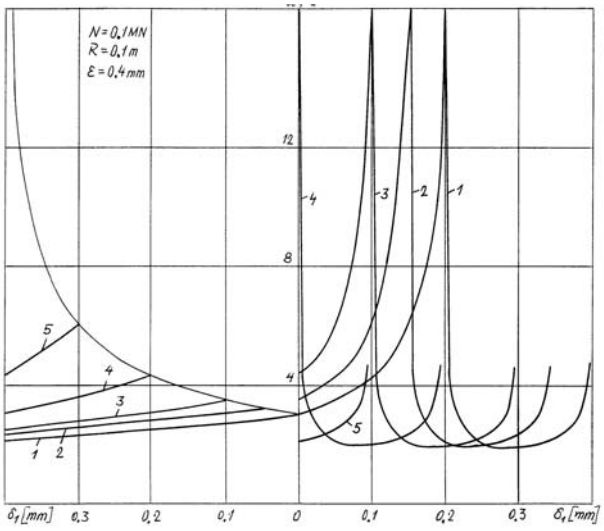


Fig.4. Plots of variations of the contact semi-angle (uni-and bi-area contact)

$$N' = R\int_{\gamma_1}^{\gamma_2} p(\tilde{\alpha},\delta)\cos\tilde{\alpha}\,d\tilde{\alpha} = 2\pi R\left(C_o\bar{\bar{A}}_o + C_2\bar{\bar{A}}_2\right) \quad (7)$$

where: $\bar{\bar{A}}_0 = 1-\tilde{b}^{-1};\tilde{b} = \sqrt{tg^2\frac{\gamma}{2}+1}$,

$$\bar{\bar{A}}_2 = 0{,}5\tilde{b}^{-1}[d_0^2(4-\tilde{b})+6(1-\tilde{b})];\ d_0 = tg\frac{\alpha_{0\delta}}{2}.$$

Equation (6) is solved using approximate collocation method and distribution of the contact pressures $p(\tilde{\alpha},\delta)$ is chosen in the following form [2]:

$$p(\tilde{\alpha},\delta) \cong (C_0 + C_2 tg^2\frac{\tilde{\alpha}}{2})\sqrt{tg^2\frac{\alpha_0\delta}{2} - tg^2\frac{\tilde{\alpha}}{2}} \quad (8)$$

where: C_0, C_2- collocations coefficients.

The following data were used in calculations: *N = 0.1 MN;* ε *= 0.4 mm; R = 0.1 m*; (Fig. 3 and 4).

In Fig. 3 and 4 are showed the maximal contact pressure p(0, δ) and the contact areas γ or $\alpha_{0\delta}$ (for uniarea contact) according to δ_1 and mutual orientation of elliptic contour axes. The lines on the left axis of ordinates correspond with orientation of ellipses axes showed in Fig. 1 – uniarea contact, whereas lines on the right correspond with mutual orientation of elliptic contours. The chart breaks off when $\delta_1 = \delta_2 = 0.1$mm for that orientation of ellipse axes (Fig. 1) and does not occur when 0.1mm≥δ≥0. The chart appears again for areas orientation showed in Fig. 1 (long axes of elliptic contours are perpendicular), but as the bi-area contact. Line 3 (Fig. 4) attains a minimum for $\delta_1 \cong 0.1$mmand then grows to infinity (theoretically) because $\lambda \to \pi/2$ and $N' \to \infty$.

Plots – Fig. 4. show the angles $\alpha_{0\delta}$ and γ of uniarea and bi-area contact, respectively, according to δ_1. One can notice that for line 3, when *p(0,δ)* reaches minimal value, the angle *γ* attains a maximum. It is predictable because applied *N'* acts on the larger area.

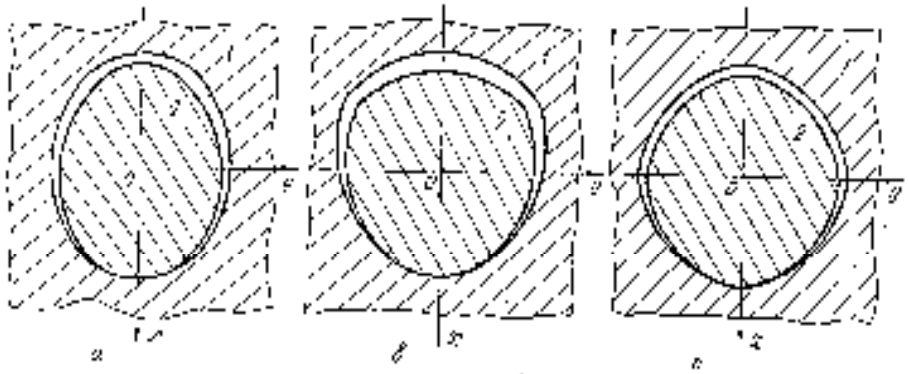


Fig. 5. Joints of lobing elements oriented symmetrically ($\delta_2 \le \varepsilon$, $\delta_1 \le \delta_2$): a) the oval disk in the oval hole, b) the trilobing disk in the trilobing hole, c) the tetralobing disk in the tetralobing hole

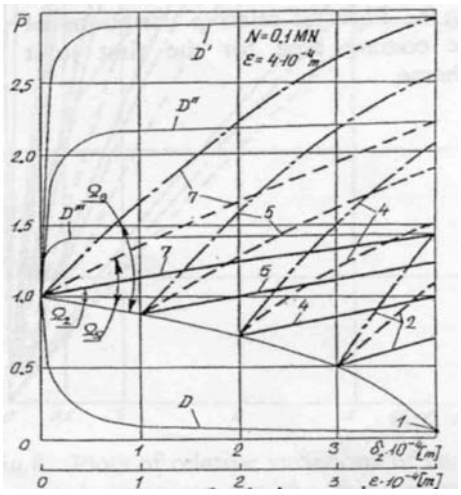


Fig.6. Plots of relative variations of the maximal pressures for the joints showed in Fig. 5

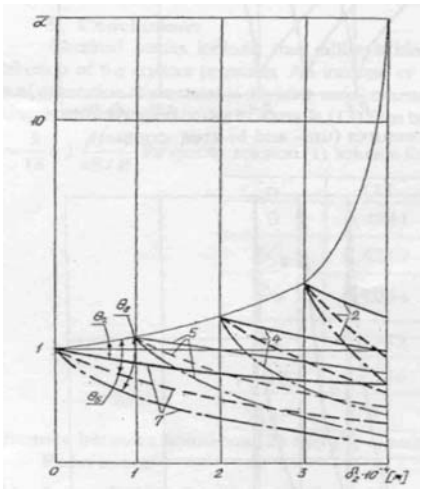


Fig.7. Plots of relative variations of the contact area joints showed in Fig. 5

It can be said that character of charts change of the contact semi-angles γ is converse to charts $p(0,\delta)$ and minimal value of $p(0,\delta)$ corresponds with maximal value of γ.

4. Joints with lobing

Let us consider a number of element joints with the same lobing and the same orientation (Fig. 5).

Computational results are presented in the graphical way (Fig.6), where zones of $\tilde{p}$ variation for showed computational schemes are denoted by Ω_2, Ω_5, and Ω_8 and boundary curves for other are denoted by D', D'' and D'''. Solid lines correspond with scheme 1 dashed with scheme 2 and dot-and-dash with scheme 3.

Where:

- scheme 1:
  $\delta_2 \le \varepsilon$, $\delta_1 \le \delta_2$, $D_1=1+3\cos 2\alpha$, $D_2=1-3\cos 2\alpha$;
- scheme 2:
  $\delta_2 \le \varepsilon$ $\delta_1 \le \delta_2$, $D_1=1+8\cos 3\alpha$; $D_2=1-8\cos 2\alpha$;
- scheme 3:
  $\delta_2 \le \varepsilon$ $\delta_1 \le \delta_2$, $D_1=1+15\cos 4\alpha$; $D_2=1-15\cos 2\alpha$.

Plots point out that more complex lobing causes an increase in the pressures at equal δ_1 i δ_2. The greater value of δ_2, the greater variation of the pressures occur when δ_1 i δ_2 are comparable.

Comparable values of changes of the contact areas for schemes 1,2,3 (Fig.5) are presented in Fig.7.

5. Conclusions

The plots in Fig.3 show variations of the maximal contact pressures for uni-and bi-area contact. Plots on Fig.4 show contact semi-angle $\alpha_{0\delta}$ or γ (semi-and bi-area contact) according to δ_1 and mutual orientation of elliptic contour axes. On plots – Fig.4 we can notice that, when contact pressure $p(0,\delta)$ reaches minimal value, the angle γ attains a maximum.

6. References

[1] Muscheliszwili H.M.: *Some basic problems of the theory mathematical of elasticity*. Moscow, Nauka, 1949 (in Russian, translated in English, 1953, Noordhoff,Groningen).

[2] Panasiuk W.W., Tepłyj M.J.: *Reviev of the contact problems in the theory of elasticity*. Kiev, Naukowa Dumka, 1975 (in Ukrainian).

[3] Andrejkiw A.E., Czerniec M.W.: *Description of contact interaction between rubbing machine elements*, Kiev, Naukowa Dumka, 1991 (in Russian).

[4] Person A.: *On the Stress Distribution of Cylindrical Elastic Bodies in Contact Dissertation Chalmers Teknicka Hogskola*, Goteborg 1964.

[5] Gladwell G.: *Contact problems in the Classical Theory of Elasticity*. Alphen an den Rijn.Sijthoff and Hordhoff, 1980.

****

Praca naukowa finansowana ze środków Komitetu Badań Naukowych w latach 2004-2005 jako projekt badawczy.

****

Prof. dr hab. inż. Miron Czerniec

Instytut Technologicznych Systemów Informacyjnych
Politechnika Lubelska
ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin
e-mail: m.czerneic@pollub. pl

Dr inż. Cyprian Komorzycki

Katedra Mechaniki Stosowanej
Politechnika Lubelska
ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin
e-mail: c.komorzycki@pollub.pl

Mariusz WAŻNY
Zdzisław IDZIASZEK

MODEL SYMULACYJNY RUCHU POCISKU PO JEGO WYLOCIE Z PRZEWODU LUFY

SIMULATIVE MODEL OF THE MOVEMENT OF A PROJECTILE AFTER LEAVING THE BARREL

W artykule przedstawiono jeden ze sposobów rozwiązania głównego problemu balistyki zewnętrznej. Zwrócono szczególną uwagę na istotę tego zagadnienia w aspekcie skuteczności zastosowania działka lotniczego. Jako narzędzie do rozwiązania przedstawionego zagadnienia wykorzystano specjalistyczne oprogramowanie CFD-FASTRAN. Obiektem badań był pocisk artyleryjski wystrzelony z działka lotniczego.

***Słowa kluczowe**: działko lotnicze, pocisk artyleryjski, symulacja, CFD-FASTRAN*

In the article was presented the way to solve the main issue of external ballistics. There paid the attention to the essence of the matter of effectiveness of the use air aviation cannons. The problem was solved by using the specialist software CFD-FASTRAN. The research object was the artillery shell launched from aircraft gun.

***Keywords**: aviation cannon, artillery projectile, simulation, CFD-FASTRAN*

1. Wstęp

Jednym z elementów wyposażenia bojowego wojskowych statków powietrznych są działka (szybkostrzelne armaty automatyczne) i karabiny lotnicze. Stanowią one zwykle autonomiczną część pokładowego systemu uzbrojenia lotniczego statku powietrznego i dzięki zastosowaniu odpowiedniej amunicji mogą być użyte zarówno do zwalczania celów powietrznych, jak i różnego rodzaju celów naziemnych. Cecha ta sprawia, że są wykorzystywane w szerokim zakresie. Uzasadnia to też potrzebę prowadzenia badań związanych z analizą czynników wpływających na pogorszenie wartości podstawowych parametrów użytkowych oraz udoskonaleniem procesu eksploatacji lotniczej broni lufowej. Do grupy podstawowych parametrów użytkowych tego rodzaju broni zaliczyć możemy m.in. żywotność lufy, szybkostrzelność, donośność. Możliwość wpływania na wartości tych parametrów, stanowi podstawę do lepszego wykorzystania „potencjalnego zasobu pracy" lotniczej broni lufowej w różnych warunkach eksploatacyjnych.

W trakcie procesu eksploatacyjnego występuje szereg przyczyn, takich jak np. zła obsługa techniczna, występowanie nadmiernych luzów pomiędzy wzajemnie pracującymi elementami, itp., mających negatywny wpływ na warunki pracy działka. To oddziaływanie bezpośrednio przekłada się na wartości wskaźników eksploatacyjnych takich, jak:

1. Introduction

The aviation barrel armament is usually an autonomous component of the onboard aircraft weaponry system. Nowadays, the military aircrafts are fitted with aviation cannons and machine guns, which, thanks to proper ammunition, can be used for destroying both aerial and surface targets. This feature causes the onboard barrel armament to be broadly implemented. Moreover, the research on improvement and development of a new weapon system are vital, as well as evaluation of symptoms and reasons of their essential technical parameters and performance deterioration. For these parameters the following indexes can be pointed out: barrel lifetime, fire rate, fire range etc. The possibility of having influence on the parameter of these values is the base for more effective use "potential operation capability" of the aviation barrel armament in various conditions of its application.

During the service process many reasons appear, such as poor technical service, the occurrence of excess clearance between working elements, etc., which have a negative impact on the cannon operation conditions. This impact has direct influence on the value of service indexes, such as:

- durability;
- reliability;
- projectile dispersion.

– trwałość;
– niezawodność;
– rozrzut.

Dysponując wartościami wymienionych parametrów można dokonać liczbowej oceny walorów eksploatacyjnych działek lotniczych.

Aspekt taktycznego zastosowania broni lufowej prawie zawsze związany jest z uzyskaniem określonego efektu w postaci niszczącego oddziaływania czynnika rażącego na wybrany cel. Analiza tego zagadnienia realizowana jest poprzez przyjęcie wskaźnika umożliwiającego dokonanie oceny i wyznaczenie jego wartości. Jednym ze wskaźników stosowanych do oceny skuteczności użycia środka bojowego jest prawdopodobieństwo porażenia celu. Jego określenie opiera się na znajomości rozmiarów celu oraz wielkość rozrzutu. Z kolei wartość opisująca rozrzut środków bojowych bardzo często używana jest jako wskaźnik służący do oceny realizacji zadania bojowego. Innym wskaźnikiem, stosowanym do oceny skuteczności realizacji misji taktycznej z użyciem lotniczych środków bojowych jest prawdopodobieństwo trafienia w cel. A zatem, analiza skuteczności użycia środka bojowego może być oparta na znajomości wielkości rozrzutu, prawdopodobieństwa trafienia w cel lub też prawdopodobieństwa porażenia celu.

Najistotniejszym aspektem realizacji procesu ataku przez wojskowy statek powietrzny jest zapewnienie takich warunków ataku, aby pocisk trafił w cel. Dokładność tego procesu uwarunkowana jest wieloma czynnikami związanymi m.in. z bronią, statkiem powietrznym, warunkami w jakich realizowane jest zadanie bojowe.

Do czynników związanych z bronią, które pogarszają warunki realizacji zadania bojowego możemy zaliczyć nadmierne zużycie przewodu lufy, zmiana geometrii lufy, niewłaściwe zamocowanie.

Wszystkie te czynniki wpływają na wartości początkowe parametrów ruchu pocisku, do których możemy zaliczyć jego prędkość początkową, kąt wylotu pocisku z przewodu lufy, czy też siły boczne występujące podczas opuszczania przez pocisk przewód lufy. Wyznaczając te parametry i uzależniając je od zmian wartości wielkości charakteryzujących wpływ powyższych czynników, możemy przeprowadzić analizę wpływu parametrów początkowych ruchu na wartość współrzędnych punktu upadku pocisku, a co za tym idzie określić wielkość powstałego rozrzutu.

Realizacja badań eksperymentalnych mających na celu określenie parametrów charakteryzujących tor lotu pocisku jest bardzo trudna. Przyczyną tego są warunki, w jakich następuje użycie lotniczej broni lufowej. Z tego też względu w analizie tego typu zagadnień wykorzystywane jest specjalizowane oprogramowanie umożliwiające symulację ruchu obiektu

Possessing the mentioned parameters enables determining the exact values of the servicing advantage of the aviation cannon evaluation. Implementation of the barrel armament is almost always connected with a specific effect, in the form of a devastating impact on a selected target. The analysis of this effect is conducted through the acceptance of an index that allows carrying out an evaluation and to determine its values. One of the indexes used to evaluate the combat effectiveness of the military asset is the probability of striking the target. In practice, the effectiveness evaluation of a given military asset is based on the knowledge of the target's dimensions as well as the values of the projectile dispersion. Another index used to evaluate combat effectiveness with the use of aerial military assets is the probability of hitting the target. So, the analysis of effective usage of the ammunition can be based on the knowledge of the projectile dispersion, hit probability or kill probability of the target.

The most important aspect of carrying out the attack process by military aircraft is assuring such attack conditions so that the projectile hit the target. Precision and success of this process depends on a variety of factors involved that are: arms, aircraft, conditions, in which combat mission are carried out.

Factors, which deteriorate conditions of carrying out combat missions, involving arms are: excessive wear of the barrel, permanent barrel geometry change, improper fixing of the cannon.

All of the above-mentioned elements have an impact on the initial parameters of the projectile movement, which includes initial velocity, the angle of the projectile discharge from the barrel or other forces that accompany the projectile when discharging from the barrel. After calculating these parameters and making them dependant on specific factors, an analysis can be carried out of the impact of initial movement parameters on the coordinates of the hit point and then determine an estimation of the projectile dispersion value.

Execution of the tests, which aim is to specify parameters characterising the path of the projectile is very difficult. The reason for this is the conditions in which the barrel armament is applied. Modern computer techniques are one of the methods used that allow the simulation of an object's movement in space with defined physical properties. The possibility of creating a virtual model of an existing technical object and submitting it to specific tests is a significant progress in the process of evaluating such type of phenomena. Presented in this article is a three dimensional simulation model of an artillery projectile after its discharge from a barrel. This task

w przestrzeniu o zdefiniowanych właściwościach fizycznych. Możliwość opracowania cyfrowego modelu pocisku i poddaniu go badaniom mającym na celu określenie odpowiedzi, na zadane warunki początkowe, jest istotnym postępem w procesie analizy tego typu zjawisk. Dysponując odpowiednim „narzędziem" postanowiono opracować wirtualny model umożliwiający przeprowadzenie symulacji ruch pocisku po jego wylocie z przewodu lufy. Do realizacji tego zadania wykorzystano pakiet programowy CFD-FASTRAN.

Realizacja powyższego tematu stanowi podstawę do dalszych prac związanych z określaniem skuteczności zastosowania szybkostrzelnych armat automatycznych w aspekcie zmian określonych parametrów użytkowych.

was carried out using a professional software package called CFD-FASTRAN.

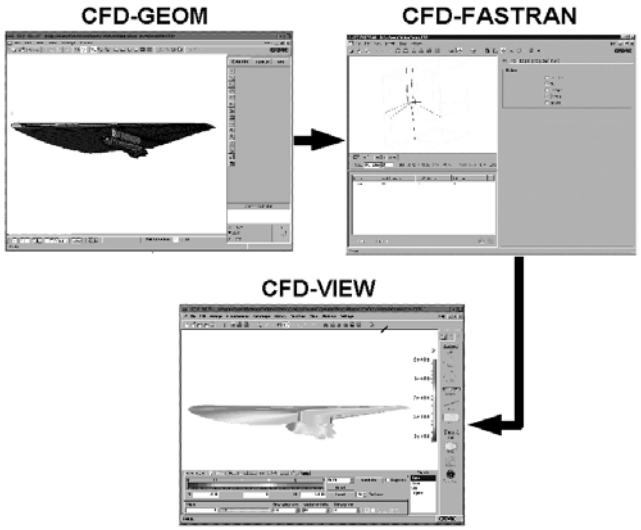
The realisation of the above-mentioned subject is the basis to carry out further studies involving the determination of the effectiveness of using quick-firing automatic cannons in the aspect of changes of defined usable parameters.

2. Charakterystyka programu CFD-FASTRAN

CFD-FASTRAN jest programem z dziedziny CFD (Computational Fluid Dynamics) przeznaczonych do analizy zagadnień aerodynamicznych i aerotermodynamicznych. Program ten znajduje zastosowanie w badaniu przepływów ściśliwych. Ma on strukturę modułową. W jego skład wchodzą trzy programy, tj. CFD-GEOM, CFD-FASTRAN i CFD-VIEW, stanowiące integralną całość. Program CFD-GEOM umożliwia opracowanie wirtualnego modelu do realizacji procesu symulacyjnego. Wybór właściwych parametrów początkowych symulacji, odnoszących się do analizowanego zjawiskiem oraz realizacja procesu obliczeniowego odbywa się w programie CFD-FASTRAN. CFD-VIEW umożliwia wizualizację informacji otrzymanych w trakcie realizacji symulacji. Przykładowy widok graficznego interfejsu użytkownika poszczególnych programów oraz kierunek przepływu informacji pomiędzy nimi przedstawia rysunku 1.

2. The profile of the CFD-FASTRAN software

CFD-FASTRAN is a program in the field of CFD (Computational Fluid Dynamics) designed to analyse aerodynamic and aerothermodynamics questions. This program is used in compressible flux studies. It possesses a modular structure. It contains three programs i.e.: CFD-GEOM, CFD-FASTRAN and CFD-VIEW, which are integrated. The CFD-GEOM program allows creating a virtual model for carrying out a simulation process. The selection of appropriate parameters of initial simulations that apply to the analysed phenomenon as well as the realization of the calculation process is done in the CFD-FASTRAN program. CFD-VIEW allows the visualization of information collected during the realisation of the simulation. An exemplary view of the user interface of each of the programs as well as the direction of information flow between them is presented in fig. 1.



Rys. 1. Schemat strukturalny pakietu programowego CFD-FASTRAN

Fig. 1. Schematic Representation of CFD-FASTRAN

1.1. CFD-GEOM – pre-procesor

Program CFD-GEOM służy do generacji geometrii obiektu oraz siatki obliczeniowej modelu. Tworzenie modelu do obliczeń oparte jest na generacji siatki (przestrzeni) obliczeniowej otaczającej rozpatrywany obiekt. Jej rozmiar oraz kształt zależy od geometrii obiektu badań. Cała siatka jest zbiorem *n* elementów o skończonej objętości.

Symulacja ruchu związana jest wygenerowaniem dwóch odrębnych siatek: ruchomej i nieruchomej. Pierwszą z nich jest siatka tworząca otoczenie badanego obiektu i ulegająca przemieszczeniu wraz z nim. Druga natomiast stanowi swoistą bazę odniesieniową, w której następuje przemieszczanie siatki ruchomej wraz z obiektem badań.

2.2. CFD-FASTRAN – procesor

Program ten, określany mianem procesora, jest najistotniejszym elementem pakietu programowego rozwiązującym równania opisujące przepływ. W jego środowisku następuje wprowadzenia wartości niezbędnych parametrów początkowych oraz wybór właściwych metod obliczeniowych do realizacji symulacji. Podstawowymi wielkościami, których wartości należy określić są:

– wektor prędkości $\bar{V}$;
– ciśnienie p;
– temperatura T;
– kąt natarcia α.

Wielkości te odnoszą się do powierzchni brzegowych siatki determinując w ten sposób własności strumienia przepływu. Określenie parametrów wejściowych, w odniesieniu do siatki ruchomej, związane jest z identyfikacją stanu początkowego obiektu badań (położenie środka masy, momenty bezwładności), przyjęciu rodzaju wymuszeń oddziaływujące na niego oraz określeniu więzów ograniczających ruch obiektu badań.

2.3. CFD-VIEW – post-procesor

CFD-VIEW jest programem umożliwiającym wizualizację otrzymanych wyników. W znaczący sposób ułatwia zrozumienie zjawisk oraz interpretację wyników obliczeń. Przy jego pomocy można odwzorować określone wielkości, uzyskane w wyniku symulacji. W tym celu nanosi się na daną powierzchnię kolory lub wykreśla się kontury odpowiadające wartościom przedstawianego parametru. Ponadto dostępne narzędzia zapewniają precyzyjne określenie wartości wybranego parametru w dowolnym punkcie przestrzeni obliczeniowej.

1.1. CFD-GEOM – pre-processor

The CFD-GEOM program is used to generate the geometry of the object and the grid of the model. The creation of the model for calculations is based on the generation of the grid (space) surrounding this object. Its size and shape depend on the geometry of the object. The whole grid is a set of n elements with a finite volume.

Simulation of the movement is related with generating two separate girds: movable and fixed. The first grid creates the research space of object and moves with this object. However, the second grid is the special base of reference, in which the displacement of the moveable grid and research object take place.

2.2. CFD-FASTRAN – processor

This program is called the processor, it is the most important element of software package, which solves equations describing flow. In this program necessary values of initial parameters are entered as well as the selection of suitable calculation methods for carrying out simulation are made. Basic values, which should be stated, are:

– vector velocity $\bar{V}$;
– pressure p;
– temperature T;
– angle α.

These sizes apply to the edge surfaces of the grid, which determining the property of the stream flow. Specifying the input parameters, in reference to the movable grid is connected with identifying the initial state of the research object (the position of the centre of mass, the moments of inertia), selecting the type of input function, which affects it and the defining of constraints restricting the movement of the research object.

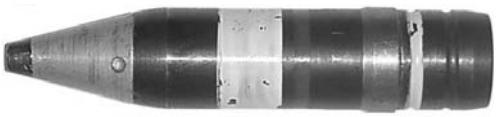
2.3. CFD-VIEW – post-processor

CFD-VIEW is a program, which enables the visualisation of received results. It makes it considerably easy to understand the effects and interpretation of calculated results. With its help specific sizes, achieved from the simulation, can be mapped. Thus, the given surface is coloured or a contour is drawn in correspondence with the value of the presented parameter. Moreover, the available tools assure precise specification of a chosen parameter value in any point of computational space.

3. Model fizyczny obiektu badań

Jako obiekt badań przyjęto pocisk OFZ-30NR (rys. 2) wystrzeliwany z działka NR-30 eksploatowanego na samolocie Su-22. Dysponując instrukcjami eksploatacyjnymi oraz opisem technicznym i rzeczywistym obiektem, wyznaczono następujące charakterystyki:
- geometrycznych (wymiary liniowe pocisku);
- masowych (położenie środka masy);
- bezwładnościowych (momenty bezwładności pocisku).

Wartości wymienionych parametrów stanowią dane niezbędne do realizacji procesu symulacyjnego. Do wyznaczenia charakterystyk masowych i bezwładnościowych posłużono się programem komputerowym Solid Edge, budując w jego środowisku wirtualny model pocisku (rys. 3) oraz określając rozkład masy poszczególnych jego elementów.



Rys. 2. Widok pocisku OFZ-30NR
Fig. 2. View of projectile OFZ -30NR

4. Model matematyczny

Model matematyczny umożliwiający realizację procesu symulacyjnego zawarty został w kodzie źródłowy oprogramowania CFD-FASTRAN. Opis procesu wyznaczania parametrów charakteryzujących przepływ można przedstawić (w formie uproszczonej) w oparciu o rozwiązanie równań: masy (1), pędu (2) i energii strumienia przepływu (3) [1]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + div\left(\rho \vec{V}\right) = 0 \qquad (1)$$

gdzie: ρ – gęstość strumienia przepływu, $\vec{V}$ – prędkość strumienia przepływu.

$$\iiint_W \rho \frac{d\vec{V}}{dt} dW = \iiint_W \rho \vec{F} dW + \iint_S \vec{p}_n dS \qquad (2)$$

gdzie: W – obszar płynu, S – powierzchnia kontrolna płynu, $\vec{F}$ – jednostkowa siła masowa, $\vec{p}_n$ – wektor naprężeń.

3. Physical model of research object

The OFZ-30NR projectile (fig. 2) was used as the object of research, which was fired from a NR-30 aviation cannon used in Su-22 aircraft. With the disposal of the user manual, technical reference and the actual object the following characteristics were stated:
- geometrical (the linear dimensions of the projectile)
- mass (the position of centre of mass)
- inertial (moments of inertia)

The values of these parameters compose indispensable data for carrying out the simulation process. To calculate mass and inertial characteristics the Solid Edge computer program was used for building a virtual model of the projectile (fig. 3) as well as defining the distribution of mass of its individual elements.

Figure. 2. View of projectile OFZ -30NR
Figure. 3. View of OFZ -30NR projectile virtual mode

Rys. 3. Widok modelu wirtualnego pocisku OFZ-30NR
Fig. 3. View of OFZ -30NR projectile virtual mode

4. Mathematical model

The mathematical model helps in the realisation of the simulation process, which is included in the source code of the CFD-FASTRAN software. The description of the process of determining parameters that characterise the flow can be presented (in simplified form) based on the solution of equations of: mass (1), speed (2) and the energy of stream of flow (3) [1]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + div\left(\rho \vec{V}\right) = 0 \qquad (1)$$

where: ρ – the flux density, $\vec{V}$ – the speed of stream of flow.

$$\iiint_W \rho \frac{d\vec{V}}{dt} dW = \iiint_W \rho \vec{F} dW + \iint_S \vec{p}_n dS \qquad (2)$$

where: W – the area of liquid, S – the control surface of liquid, $\vec{F}$ – elementary mass strength, $\vec{p}_n$ – the vector of strain.

$$\iiint_W \rho \frac{d}{dt}\left(c_v T + \frac{V^2}{2}\right) dW = \iint_S \vec{p}_n \vec{V} dS + \iiint_W \rho \vec{F} \vec{V} dW + \iiint_W \rho q dW + \iint_S \lambda \frac{dT}{dn} dS \qquad (3)$$

gdzie: c_v – ciepło właściwe przy stałej objętości, T – temperatura bezwzględna, q – ciepło strumienia, λ – przewodność cieplna.

where: c_v – specific heat near constant volume, T – absolute temperature, q – heat stream, λ – thermal conductance.

Rozwiązując powyższe równania wyznaczane są wartości ciśnienia, prędkości, temperatury itp. wielkości. Powyższe równania wykorzystywane są zarówno dla przypadku analizy zagadnienia, w którym nie jest rozpatrywany ruch pocisku, jak i w sytuacji gdy ruch ten występuje, tzn. następuje przemieszczenie się pocisku i siatki ruchomej względem siatki nieruchomej.

Do modelowania zagadnienia ruchu pocisku wykorzystywane są równania opisujące ruch swobodny ciała. Równania ruchu dla ciała sztywnego o stałej masie i masowych momentach bezwładności jakim jest pocisk artyleryjski są określane przez wzory (4) i (5) [2]:

$$m\frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{F} \tag{4}$$

$$\frac{\partial \vec{h}}{\partial t} + \vec{\omega} \times \vec{h} = \vec{M} \tag{5}$$

gdzie: $\vec{F}$ – wektor siły, $\vec{M}$ – wektor momentu względem środka ciężkości, m – masa pocisku, $\vec{v}$ – prędkość liniowa środka masy, $\vec{h} = \hat{I}\vec{\omega}$ – moment pędu, $\vec{\omega}$ – prędkość kątowa układu współrzędnych związanego z pociskiem.

W analizowanym przypadku ruch pocisku opisany został poprzez określenie jego sześciu stopni swobody. Główne etapy opisujące przemieszczenie pocisku wraz z siatką ruchoma można scharakteryzować przy pomocy następującego algorytmu:

A. Rozpatrywane jest ciało sztywne (pocisk) w chwili początkowej t_0 z prędkościami liniowymi $v_x^{t_0}, v_y^{t_0}, v_z^{t_0}$, z prędkościami kątowymi $\omega_x^{t_0}, \omega_v^{t_0}, \omega_z^{t_0}$ i z momentami pędu $h_x^{t_0}, h_y^{t_0}, h_z^{t_0}$.

B. W kolejnym kroku, dla czasu $t_0+\Delta t$, wyznaczane jest rozwiązanie równań opisujących przepływ, w którym porusza się pocisk. Wykorzystując powyższe rozwiązanie wyliczane są powstałe w czasie $t_0+\Delta t$ siły $\vec{F}\left(F_x, F_y, F_z\right)$ i momenty $\vec{M}\left(M_x, M_y, M_z\right)$. W rozpatrywanym przypadku uwzględniono występowanie sił i momentów aerodynamicznych oraz siłę grawitacji.

C. Wykorzystując wartości sił, wyznacza się przyspieszenia liniowe, prędkości i przemieszczenie ciała w czasie $t_0+\Delta t$ w inercjalnym układzie odniesienia:

$$v_x^{t_0+\Delta t} = v_x^{t_0} + \Delta t \cdot \frac{F_x^{t_0+\Delta t}}{m} \tag{6}$$

$$v_y^{t_0+\Delta t} = v_y^{t_0} + \Delta t \cdot \frac{F_y^{t_0+\Delta t}}{m} \tag{7}$$

$$v_z^{t_0+\Delta t} = v_z^{t_0} + \Delta t \cdot \frac{F_z^{t_0+\Delta t}}{m} \tag{8}$$

By solving the above-mentioned equations the values of pressure, speed, temperature etc. are determined. The above-mentioned equations are used both in case of question analysis, in which the movement of the projectile is not under examination as well as in the situation when this movement exists. The displacement of the projectile and movable grid follows in relation to the fixed grid.

In analysed event the movement of projectile was described by qualification six degrees of latitude. The 6DOF motion model requires additional information to determine how its body moves based on the physical properties and forces and movements. This achieved through the general equations of unsteady motion. The equations of motion for a rigid body with constant mass and mass moments of inertia are given by [2]:

$$m\frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{F} \tag{4}$$

$$\frac{\partial \vec{h}}{\partial t} + \vec{\omega} \times \vec{h} = \vec{M} \tag{5}$$

where: $\vec{F}$ – the resultant force vector of all forces (aerodynamic, point thrust, etc.), $\vec{M}$ – the moment vector about the body center of gravity, m – the body mass, $\vec{v}$ – linear velocity of the center of gravity, $\vec{h} = \hat{I}\vec{\omega}$ – the momentum of the momentum, $\vec{\omega}$ – the angular velocity about the body's center of gravity.

The 6DOF module involves solving the six scalar equations by a suitable numerical method in order to obtain the displacements and velocities from the force and moments. The essential steps involved in this computation are as follows:

A. Consider the rigid body in an initial state at time t_0 with linear velocities $v_x^{t_0}, v_y^{t_0}, v_z^{t_0}$, angular velocities $\omega_x^{t_0}, \omega_v^{t_0}, \omega_z^{t_0}$ and angular moments $h_x^{t_0}, h_y^{t_0}, h_z^{t_0}$.

B. Obtain the numerical solution at time $t_0+\Delta t$ for the flow field in which the body is moving. Using this, compute the resultant force $\vec{F}\left(F_x, F_y, F_z\right)$ and the moment $\vec{M}\left(M_x, M_y, M_z\right)$ at time $t_0+\Delta t$ by summing the effects of aerodynamics and gravity external forces/moments.

C. Integrate the forces numerically to obtain the linear accelerations, velocities and displacements of the body at time $t_0+\Delta t$. These quantities are referred to the inertial frame.

$$v_x^{t_0+\Delta t} = v_x^{t_0} + \Delta t \cdot \frac{F_x^{t_0+\Delta t}}{m} \tag{6}$$

$$v_y^{t_0+\Delta t} = v_y^{t_0} + \Delta t \cdot \frac{F_y^{t_0+\Delta t}}{m} \tag{7}$$

$$v_z^{t_0+\Delta t} = v_z^{t_0} + \Delta t \cdot \frac{F_z^{t_0+\Delta t}}{m} \tag{8}$$

$$\delta x^{t_0+\Delta t} = \frac{\left(v_x^{t_0+\Delta t} + v_x^{t_0}\right)\Delta t}{2} \quad (9)$$

$$\delta y^{t_0+\Delta t} = \frac{\left(v_y^{t_0+\Delta t} + v_y^{t_0}\right)\Delta t}{2} \quad (10)$$

$$\delta z^{t_0+\Delta t} = \frac{\left(v_z^{t_0+\Delta t} + v_z^{t_0}\right)\Delta t}{2} \quad (11)$$

D. Wykorzystując wartości momentów, następuje wyznaczenie składowych momentu pędu, prędkości kątowych i kątów obrotu pocisku w czasie $t_0+\Delta t$ w układzie odniesienia związanym z pociskiem:

$$h_x^{t_0+\Delta t} = h_x^{t_0} + \left(M_x^{t_0+\Delta t} - \omega_y^{t_0} h_z^{t_0} + \omega_z^{t_0} h_y^{t_0}\right)\Delta t \quad (12)$$

$$h_y^{t_0+\Delta t} = h_y^{t_0} + \left(M_y^{t_0+\Delta t} - \omega_z^{t_0} h_x^{t_0} + \omega_x^{t_0} h_z^{t_0}\right)\Delta t \quad (13)$$

$$h_z^{t_0+\Delta t} = h_z^{t_0} + \left(M_z^{t_0+\Delta t} - \omega_x^{t_0} h_y^{t_0} + \omega_y^{t_0} h_x^{t_0}\right)\Delta t \quad (14)$$

$$\begin{Bmatrix} \omega_x^{t_0+\Delta t} \\ \omega_y^{t_0+\Delta t} \\ \omega_z^{t_0+\Delta t} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{xx} - I_{xy} - I_{xz} \\ -I_{yx} \quad I_{yy} - I_{yz} \\ -I_{zx} - I_{zy} \quad I_{zz} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} h_x^{t_0+\Delta t} \\ h_y^{t_0+\Delta t} \\ h_z^{t_0+\Delta t} \end{Bmatrix} \quad (15)$$

$$\delta\Theta_x^{t_0+\Delta t} = \frac{\left(\omega_x^{t_0+\Delta t} + \omega_x^{t_0}\right)\Delta t}{2} \quad (16)$$

$$\delta\Theta_y^{t_0+\Delta t} = \frac{\left(\omega_y^{t_0+\Delta t} + \omega_y^{t_0}\right)\Delta t}{2} \quad (17)$$

$$\delta\Theta_z^{t_0+\Delta t} = \frac{\left(\omega_z^{t_0+\Delta t} + \omega_z^{t_0}\right)\Delta t}{2} \quad (18)$$

E. Wykorzystując obliczone w ten sposób przemieszczenia liniowe $\left(\delta x^{t_0+\Delta t}, \delta y^{t_0+\Delta t}, \delta z^{t_0+\Delta t}\right)$ i kątowe $\left(\partial\Theta_x^{t_0+\Delta t}, \partial\Theta_y^{t_0+\Delta t}, \partial\Theta_z^{t_0+\Delta t}\right)$ następuje przemieszczenie siatki modelu o wyznaczone wartości.

Opisany proces przedstawia algorytm wyliczenia wartości wielkości umożliwiających realizację symulacji ruchu siatki ruchomej, związanej z obiektem badań, względem siatki nieruchomej.

5. Proces symulacyjny

Przystępując do określenia parametrów wejściowych i uruchomienia symulacji w pierwszej kolejności dokonano charakterystyki obiektu badań celem wyznaczenia jego danych masowych oraz ustalenia wartości początkowej prędkości liniowej i kątowej pocisku. Dane te umożliwiły wypracowanie właściwych założeń upraszczających realizację procesu użycia artyleryjskiego środka bojowego. W oparciu o te dane przyjęto następujące założenia:

– ruch pocisku analizowany będzie od chwili opuszczenia przez niego przewodu lufy;
– na dno pocisku nie oddziaływują gazy prochowe;

$$\delta x^{t_0+\Delta t} = \frac{\left(v_x^{t_0+\Delta t} + v_x^{t_0}\right)\Delta t}{2} \quad (9)$$

$$\delta y^{t_0+\Delta t} = \frac{\left(v_y^{t_0+\Delta t} + v_y^{t_0}\right)\Delta t}{2} \quad (10)$$

$$\delta z^{t_0+\Delta t} = \frac{\left(v_z^{t_0+\Delta t} + v_z^{t_0}\right)\Delta t}{2} \quad (11)$$

D. Integrate the moments to obtain the angular momentum, angular rates and rotations of the body at time $t_0+\Delta t$. These quantities are referenced to the body-fixed frame.

$$h_x^{t_0+\Delta t} = h_x^{t_0} + \left(M_x^{t_0+\Delta t} - \omega_y^{t_0} h_z^{t_0} + \omega_z^{t_0} h_y^{t_0}\right)\Delta t \quad (12)$$

$$h_y^{t_0+\Delta t} = h_y^{t_0} + \left(M_y^{t_0+\Delta t} - \omega_z^{t_0} h_x^{t_0} + \omega_x^{t_0} h_z^{t_0}\right)\Delta t \quad (13)$$

$$h_z^{t_0+\Delta t} = h_z^{t_0} + \left(M_z^{t_0+\Delta t} - \omega_x^{t_0} h_y^{t_0} + \omega_y^{t_0} h_x^{t_0}\right)\Delta t \quad (14)$$

$$\begin{Bmatrix} \omega_x^{t_0+\Delta t} \\ \omega_y^{t_0+\Delta t} \\ \omega_z^{t_0+\Delta t} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{xx} - I_{xy} - I_{xz} \\ -I_{yx} \quad I_{yy} - I_{yz} \\ -I_{zx} - I_{zy} \quad I_{zz} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} h_x^{t_0+\Delta t} \\ h_y^{t_0+\Delta t} \\ h_z^{t_0+\Delta t} \end{Bmatrix} \quad (15)$$

$$\delta\Theta_x^{t_0+\Delta t} = \frac{\left(\omega_x^{t_0+\Delta t} + \omega_x^{t_0}\right)\Delta t}{2} \quad (16)$$

$$\delta\Theta_y^{t_0+\Delta t} = \frac{\left(\omega_y^{t_0+\Delta t} + \omega_y^{t_0}\right)\Delta t}{2} \quad (17)$$

$$\delta\Theta_z^{t_0+\Delta t} = \frac{\left(\omega_z^{t_0+\Delta t} + \omega_z^{t_0}\right)\Delta t}{2} \quad (18)$$

E. Use the displacements $\left(\delta x^{t_0+\Delta t}, \delta y^{t_0+\Delta t}, \delta z^{t_0+\Delta t}\right)$ and rotations $\left(\partial\Theta_x^{t_0+\Delta t}, \partial\Theta_y^{t_0+\Delta t}, \partial\Theta_z^{t_0+\Delta t}\right)$ computed above to move the nodes of the gird that models the moving body.

The described process presents an algorithm of calculating the values of sizes that allow the realisation of simulating the movement of the movable grid, which is related with the object of research, in relation to the fixed grid.

5. Simulating process

To state the input parameters and to be able to start the simulation characteristics of the object, research must be carried out first, which aim is to determine its mass data as well as establishing its initial linear velocity and projectile angle. This data enabled elaborating suitable assumptions simplifying the realisation of the process of using artillery military assets. Based on this data the following assumptions were established:

- movement of the projectile is to be analysed at the moment when it leaves from the barrel.
- powder gases do not act on the bottom of the projectile.

– pocisk porusza się z prędkością początkową V_o=*780 [m/s]*;
– prędkość obrotowa pocisku wynosi ω=*1090 [obr/s]*;
– na pocisk oddziaływują siła i moment aerodynamiczny oraz siła grawitacji;
– ruch pocisku odbywa się w przestrzeni obliczeniowej, w której prędkość strumienia przepływu wynosi *V=136 [m/s]* (w ten sposób zamodelowano ruch postępowy statku powietrznego podczas użycia artyleryjskich środków bojowych w trakcie realizacji misji taktycznej);
– ruch pocisku odbywa się w środowisku o charakterze turbulentnym.

Głównymi czynnikami determinującymi przyjęcie powyższych założeń były oprogramowanie oraz platforma sprzętowa wykorzystywana do obliczeń. Przyjęte wytyczne odnoszą się zarówno do przestrzeni obliczeniowej, reprezentowanej przez siatkę obliczeniową, w obrębie której przemieszcza się pocisk, jak i parametrów ruchu pocisku.

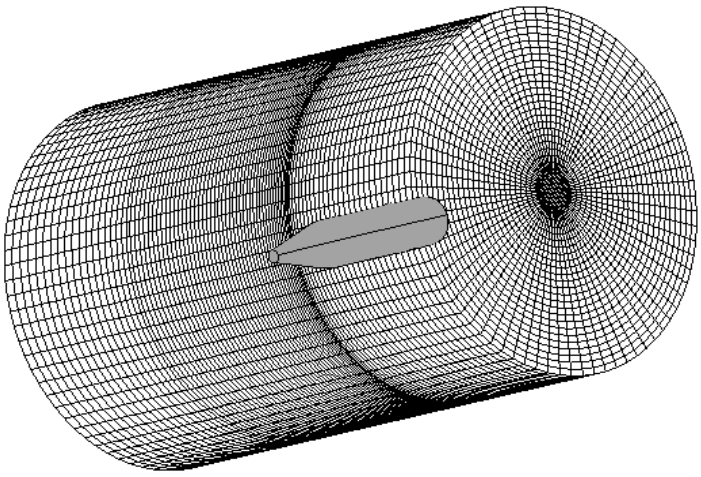
Określenie wartości parametrów wejściowych do rozwiązania sformułowanego zagadnienia stanowiło zakończenie pierwszego etapu (przygotowawczego), po którym przystąpiono do tworzenia modelu obliczeniowego. Istotnym elementem generowania geometrii obiektu było wyznaczenie właściwego podziału powierzchni pocisku. Na jego podstawie dokonano rozmieszczenia poszczególnych obszarów siatki obliczeniowej. Geometrię pocisku podzielono na 6 stref co sprawiło, że wszystkie obszary tworzące siatkę ruchomą stanowiły czternaście bloków, mieszcząc w swojej objętości 121410 komórek (rys. 4). Przestrzeń siatki nieruchomej zbudowano w oparciu o kształt prostopadłościanu. Wygenerowano w niej obszar zawierający 167359 komórek ograniczony wymiarami 2x2x6 [m].

- the initial velocity of the projectile is *Vo=780 [m/sec]*, it is equivalent to the projectile velocity when it leaves the barrel.
- rotational velocity of the projectile is *ω=1090 [rounds/sec].*
- aerodynamic force and moment as well as gravitational force acts on the projectile.
- the projectile is moving into calculation space, where the velocity of the flow stream equals V=136 [m/sec].
- the projectile is moving through a turbulent flow environment.

The main factors that determine the acceptance of the above-mentioned assumptions were the software and equipment used for calculations. The accepted guidelines refer both to the calculation space represented by the calculation grid, in which the projectile moves and the movement parameters of the projectile.

The preparation stage was completed after determining the input data for the solution of the formulated task, after which a calculation model was created. The key factor of generating the object geometry was determining its topology. The geometry of the projectile was divided into six areas. The sum of all the areas, which created a moving grid, was fourteen blocks, which comprise of 121410 cells (fig. 4). The space of the fixed grid was created based on a rectangular prism, which comprises of 167359 cells and was limited to the following dimensions 2x2x6[m].

The whole calculation process was carried out in two stages, in accordance with the obligatory algorithm in the CFD-FASTRAN program. The first stage concerned the projectile being still. Calculations allowed the flow characteristics to be determined based on the sizes defined on the surfaces that limit the area of the fixed calculation grid (the so-called border layer). These parameters are:



Rys. 4. Widok ruchomej siatki obliczeniowej wraz z obiektem badań
Fig. 4. View of the moveable calculation grid

Cały proces obliczeniowy przeprowadzono dwuetapowo według obowiązującego w programie CFD-FASTRAN algorytmu postępowania.

Pierwszy etap obliczeń dotyczył zagadnienia w którym pocisk pozostawał nieruchomy. W wyniku obliczeń wyznaczone zostały wartości charakteryzujące przepływ, w oparciu o wielkości zdefiniowane na powierzchniach ograniczających obszar nieruchomej siatki obliczeniowej (w tzw. warstwie brzegowej). Parametry te to:

- prędkość strumienia przepływu *V=136 [m/s]*;
- temperatura *T=293 [K]*;
- ciśnienie *p=101325 [Pa]*.

Na bazie przyjętych założeń, ruch pocisku opisano przy pomocy równań ruchu ciała sztywnego dla którego określono sześć stopni swobody. W tym celu, jako dane wejściowe do modelu opisującego ruch wprowadzono wartości wyznaczonych wcześniej charakterystyk masowych i bezwładnościowych pocisku oraz parametry charakteryzujące ruch pocisku, tj. wektory początkowej prędkości liniowej i kątowej. Dla tak ustalonych parametrów początkowych ruchu, uruchomiono proces obliczeniowy, w trakcie którego wyznaczano zarówno parametry przepływu, jak i wielkości charakteryzujące ruch pocisku. Po zakończeniu symulacji przystąpiono do analizy otrzymanych wyników.

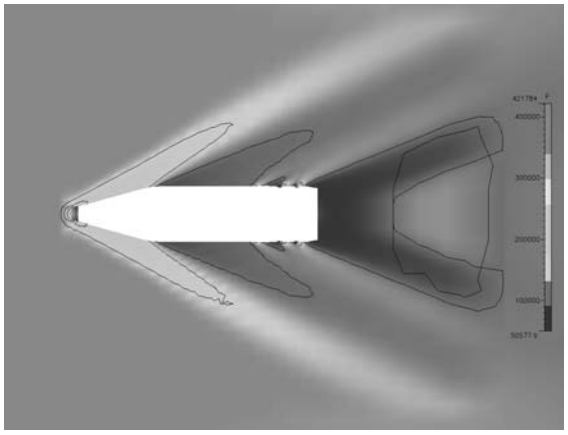
Wykorzystując program CFD-VIEW zobrazowano rozkład wartości ciśnienia w przestrzeni otaczającej znajdujący się w ruchu pocisk artyleryjski (rys. 5). Na rysunku 6 przedstawiono rozkład ciśnienia na powierzchni pocisku oraz kolejne fazy jego ruchu otrzymane w wyniku obliczeń. Na podstawie otrzymanych wyników wyznaczono przebieg wartości składowej poziomej wektora prędkości (rys. 7) oraz drogę przebytą przez pocisk (rys.8).

- stream flow velocity *V=136 [m/sec];*
- temperature *T=293 [K];*
- pressure *P=101325 [Pa].*

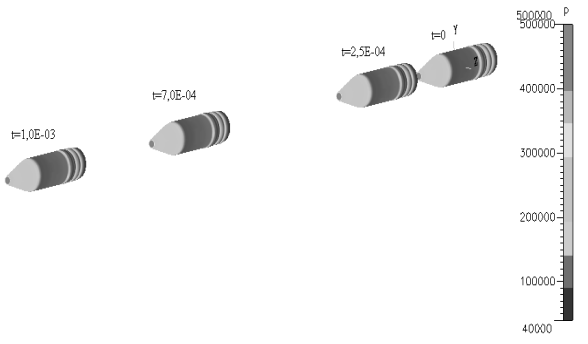
Based on the above-mentioned assumptions, the movement of the projectile was described with the help of the equation of motion for an immovable object, for which six degrees of freedom were stated. Therefore, the mass and inertial characteristics values as well as parameters characterising the projectile motion, i.e. linear and angular initial vector velocity, were introduced as input data to the earlier determined model that presented motion. For initial motion parameters defined using this method a calculation process was introduced, during which both stream flow parameters as well as sizes characterising the projectile motion were determined. After completing the simulation the final results were carefully analysed.

Figure 5 presents the distribution of pressure surrounding the moving artillery projectile in the CFD-VIEW program. Analysis of the pressure distribution around the projectile confirms that the character of change is acceptable. Concentration and rarefaction areas of the flow stream are clearly visible. Figure 6 shows the pressure distribution on the projectile surface as well as the next phases of its movement, which were obtained from the realisation of the simulation.

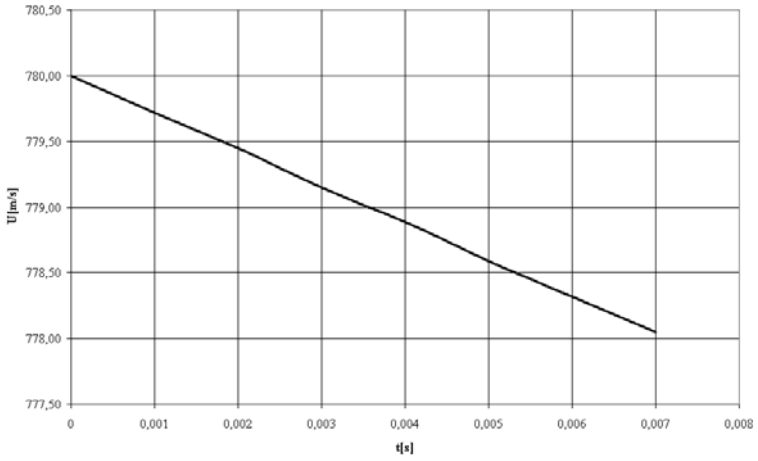
After processing data recorded in text-type files, some additional parameters were given: a distance covered by the projectile, changes of its linear and angular velocities with respect to the individual axis. Figure 7 presents the diagram of the changes of the vector velocity of the projectile following its axis. Figure 8 shows the distance covered by the projectile.



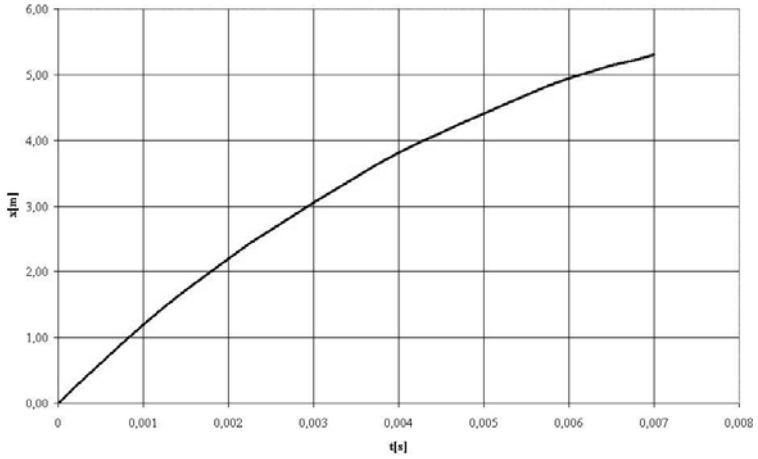
Rys. 5. Rozkład ciśnienia dookoła pocisku artyleryjskiego
Fig. 5. Pressure distribution around the artillery projectile



Rys. 6. Rozkład ciśnienia na powierzchni pocisku dla podanych wartości czasu lotu pocisku
Fig. 6. Pressure distribution on surface of bullet for given values of time of projectile flight



Rys. 7. Wykres zmian składowej poziomej wektora prędkości pocisku w funkcji czasu jego lotu
Fig. 7. Change of the horizontal component of the velocity vector



Rys. 8. Wykresy drogi przebytej przez pocisk wzdłuż osi x w funkcji czasu jego lotu
Fig. 8. The Distance covered by the projectile following on the x-axis

6. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań oraz w oparciu o analizę uzyskanych wyników można stwierdzić, że:

- wykorzystując oprogramowanie CFD-FASTRAN oraz dysponując wartościami charakterystyk masowych, geometrycznych i bezwładnościowych, można przeprowadzić symulację ruchu przestrzennego dowolnego typu pocisku;
- z przeprowadzonej analizy rozkładu ciśnienia w przestrzeni otaczającej pocisk (rys. 5), dokonując porównania ich z danymi zamieszczonymi w pozycji [3], wynika, że charakter zachodzących zmian jest poprawny (wyraźnie widoczne są obszary spiętrzania i rozrzedzania strumienia przepływu dookoła obiektu badań);
- istnieje możliwość analizy wpływu oddziaływania takich czynników jak: występowanie siły bocznej podczas wylotu pocisku z lufy, czy też zmiana prędkości wylotowej pocisku spowodowane uszkodzeniem lub zużyciem przewodu lufy, na kształt toru lotu pocisku. Na jej podstawie można określić wartości współrzędnych punktu upadku

6. Conclusion

Based on the execution of simulative models and preliminary tests, the following conclusion can be formulated:

- using the CFD-FASTRAN software as well as having the values of mass, geometrical and inertial characteristics it is possible to realise the simulation of spatial movement of any type of projectile;
- the conducted analysis of pressure distribution surrounding the projectile space (fig. 5), shows that the character of the changes underwent correctly (the areas of piling up and stream flow dilution around the tested object are clearly visible) when compared to data in [3];
- there is possibility of analysing the influence of the reaction of such elements like: the occurrence of a side force during projectile discharge from the barrel, or the change of the discharge speed of the bullet may be caused by damage or wear and tear of the inside of the barrel, on the flight path. On its basis it is possible to state the coordinates values of the point of fall of the projectile, and

pocisku, a w konsekwencji wartość powstałego rozrzutu;
– realizacja tego typu badań wymaga stosowania platformy sprzętowej o znacznej mocy obliczeniowej. Realizacja powyższych obliczeń przeprowadzona została na komputerze klasy PC, który wyposażony był w procesor 1,7 GHz. Proces obliczeniowy trwał 90 dni.

in consequence the value of the formed dispersion;
– realisation of this type of research requires using equipment with considerable computing power. The realisation of above-mentioned calculations was conducted on a PC-class computer equipped with a 1.7 GHz processor. The computing process lasted 90 days.

7. References

[1] Chlebny B., Sobieraj W., Wrzesień S.: *Mechanika płynów*, WAT, Warszawa 2003r.
[2] *CFD-FASTRAN Theory manual*, CFD Research Corporation, Huntsville 2002.
[3] Gacek J.: *Balistyka zewnętrzna, cz. 1 i cz. 2*, Wydawnictwo Wojskowej Akademii Technicznej, Warszawa 1999.
[4] Idziaszek Z.: *Metody oceny trwałości wybranych elementów działek lotniczych*, WAT (praca doktorska), Warszawa 1999r.
[5] Idziaszek Z. (współautor): *Analiza czynników determinujących trwałość lufy w aspekcie zwiększenia niezawodności broni*, Referat na konferencję „Amunicja 2002", Kołobrzeg 2002.
[6] Ważny M., Jasztal M., Misiorny A.: *CFD – nowe możliwości*, CADCAM FORUM nr 12/2000.
[7] Ważny M., Jasztal M., Misiorny A.: *CFD–GEOM*, CADCAM FORUM nr 02/2001.
[8] Ważny M., Jasztal M., Misiorny A.: *CFD-FASTRAN – wirtualny tunel aerodynamiczny*, CADCAM FORUM 3/2001, Warszawa 2001.

Dr inż. Mariusz WAŻNY
Dr inż. Zdzisław IDZIASZEK
Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechatroniki
ul. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa 49
tel. (0-22) 6837947, (22) 6837291, faks (0-22) 6857581
e-mail: mwazny@wp.pl, idziaszek@wmt.wat.edu.pl

Dariusz MAZURKIEWICZ

MONITOROWANIE STANU POŁĄCZEŃ KLEJONYCH TAŚM PRZENOŚNIKOWYCH W WARUNKACH RZECZYWISTYCH

MONITORING THE CONDITION OF ADHESIVE-SEALED BELT CONVEYORS IN OPERATION

Typowe układy transportu wewnątrzzakładowego, do jakich zaliczamy przenośniki taśmowe – charakteryzują się znaczną awaryjnością wynikającą w większości przypadków z nieprzewidywalności wystąpienia czynników powodujących np. zerwanie taśm. Nie istnieją systemy monitorujące pracę tego typu urządzeń, ani też systemy zapobiegające pojawieniu się stanów krytycznych poprzez odpowiednie sterowanie parametrami ich pracy. Ponadto układy takie, jako potencjalne obiekty sterowania charakteryzują się wielowymiarowością. Oznacza to skomplikowany charakter zależności pomiędzy poszczególnymi parametrami pracy przy obecności wielu sprzężeń. Analiza opracowań o charakterze teoretycznym pozwala wnioskować, że rozwiązanie tego problemu można znaleźć stosując do monitorowania parametrów pracy systemy inteligentne, w tym oparte na sztucznych sieciach neuronowych. System taki powinien zapewnić właściwe monitorowanie pracy układów transportowych oraz inteligentne sterowanie opierające się na analizie parametrów charakterystycznych dla danego obiektu, a mogących wpłynąć na wystąpienie stanów krytycznych.

Słowa kluczowe: złącza klejone, przenośnik taśmowy, monitorowanie

Standard intra-factory transportation systems, where belt conveyors are used, have high failure rate, which in most cases results from the unpredictability of factors e.g. the breaking-up belts. At the present, there are no existing systems, which can monitor the operation of these devices; neither are there systems for preventing occurrence at a critical stage through appropriate every day use. Moreover, such systems as potential objects of control are characterised with multi dimensions. This shows the complicated nature of dependences between individual operation parameters, with the presence of many couplings. An analysis of theoretical works, allow for the conclusion that the problem can be solved with the use of intelligent systems, including those based on artificial neuron networks. Such a system should ensure appropriate monitoring of the transportation systems and intelligent controlling based on the analysis of the parameter characteristic for the given plant that can influence the incident at critical stages.

Keywords: bonded joints, belt conveyor, monitoring

1. Wprowadzenie

Współczesne zagadnienia transportu wewnątrzzakładowego i składowania materiałów dotyczą nie tylko właściwego dobrania środków transportu do stawianych wymagań, jak np. transport bezpyłowy, bezpieczny, szybki itp., ale także obejmują problematykę doboru odpowiednich elementów i układów ich monitoringu i sterowania pracą w czasie rzeczywistym. Zastosowanie takich układów powinno między innymi przyczyniać do ograniczenia czynności obsługi, czy też stworzenia warunków do możliwie pełnej automatyzacji systemu transportu. Bardzo rzadko w takich przypadkach zwraca się również uwagę na potrzebę zmniejszenia awaryjności. Zwłaszcza poprzez moni-

1. Introduction

Contemporary issues of intra-factory transportation and the storing of materials, concern not only selective means of transport appropriate to the specific requirements (e.g. dust-free, safe or fast transport, etc.), but also problems of choosing appropriate elements and their real-time monitoring and operation controlling systems. Using such systems, should among others, contribute to limitation of the service staff's actions and the transport system's automation to the largest extent possible. In such cases, hardly any attention is paid to the necessity of reducing the system's failure rate, which could be achieved through real-time monitoring of those operation parameters that can signi-

torowanie na bieżąco w czasie rzeczywistym takich parametrów pracy, które w istotny sposób mogą przyczynić się do wystąpienia stanów krytycznych. Podobnie jest również w przypadku diagnozowania stanu maszyn i urządzeń oraz podejmowania na tej podstawie decyzji sterujących w celu wyeliminowania wspomnianych sytuacji i stanów krytycznych lub przeciwdziałania ich skutkom. Wynika to z faktu, że zagadnienie takie jest z wielu względów bardzo trudne do praktycznej realizacji. W większości przypadków rejestrowane dane musiałyby być bowiem na bieżąco mierzone przez odpowiedni układ czujników oraz analizowane przez personel, mający umiejętność wyciągania właściwych wniosków z prowadzonych obserwacji i podejmowania decyzji o zmianie parametrów pracy zagrażających bezpiecznej i bezawaryjnej pracy urządzenia.

W wielu przypadkach występują istotne ograniczenia możliwości wykonania dostatecznie prostego układu monitorująco-sterującego bez udziału czynnika ludzkiego. Pojawiające się w ostatnich paru dziesięcioleciach modele systemów inteligentnych opierające się chociażby na sztucznych sieciach neuronowych, pozwalające między innymi na realizację tzw. sterowania predykcyjnego, czy też tzw. „myślenia maszynowego" mogą być również zastosowane w przypadku monitoringu i sterowania maszyn roboczych, w tym także przenośników taśmowych. Dlatego też dużym wyzwanie naukowym oraz fascynującym zagadnieniem badawczym jest rozwiązanie jednego z problemów efektywnego monitoringu pracy typowych urządzeń transportu wewnątrzzakładowego, jakimi są przenośniki taśmowe poprzez zastosowanie odpowiedniego układu pomiarowego opierającego się na dobranym systemie inteligentnym, w celu przeciwdziałania stanom krytycznym mającym wpływ na zerwanie taśmy.

2. Górnicze przenośniki taśmowe z połączeniami klejonymi

Przenośniki taśmowe (rys. 1) to podstawowe urządzenia transportu wewnątrzzakładowego w przemyśle wydobywczym. Transport taśmowy ze względu na szereg zalet stosowany jest również w szeregu innych gałęziach przemysłu, np. w zakładach przeróbki surowców mineralnych, w przemyśle hutniczym, cementowo-wapienniczym, papierniczym, w portach morskich i śródlądowych, w budownictwie, rolnictwie i cukrowniach. Za pomocą przenośników taśmowych możliwa jest odstawa materiałów sypkich o różnych właściwościach fizyko – mechanicznych, przy niskim stopniu ich degradacji w czasie odstawy [1, 6].

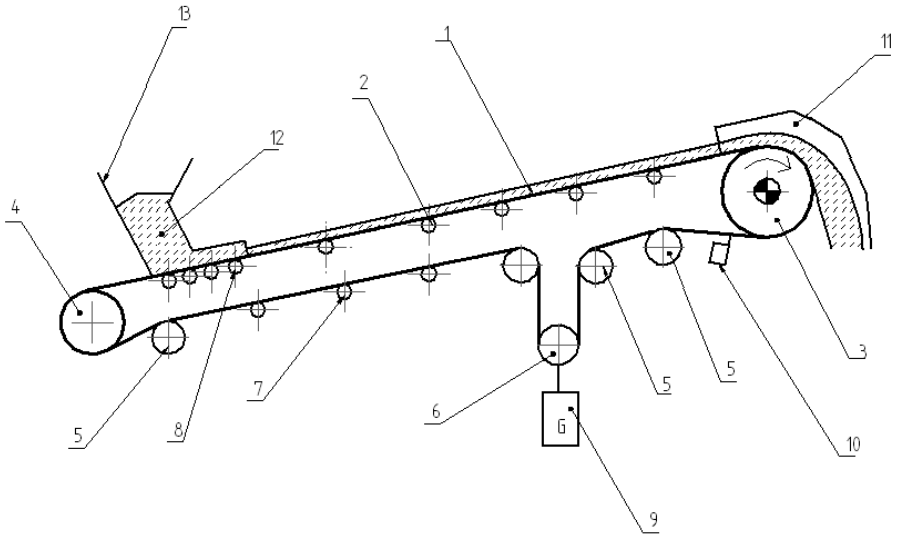
Istotą transportu w przemyśle wydobywczym jest ciągłe przenoszenie urabianych mas, odbywa-

ficantly contribute to the appearance of these critical states. This is also the case of diagnosing machines' and devices' condition and taking controlling decisions in order to eliminate the mentioned situations and critical states, or to counteract their effects. This results from the fact that, for many reasons, the issue is very difficult to accomplish in practice. In most cases, the registered data would have to be systematically measured by an appropriate system of sensors and then analysed by the stuff capable of drawing proper conclusions from these observations and of taking decisions to change operation parameters that threaten safe and failure-free operation of the device.

In many cases, there are substantial limitations of possibilities to construct a simple, not demanding the human factor, monitoring and controlling system. The intelligent systems' models that have been emerging for the last decades (based on, for example, artificial neuron networks and allowing, among others, for realisation of the so-called prediction control or "machine thinking") can also be used for monitoring and controlling working machines, including belt conveyors. It is a big scientific challenge and a fascinating research question to solve one of the problems of an effective operation and to monitor the typical intra-factory transport devices, e.g. the belt conveyors using a measuring system based on a good intelligent system, in order to prevent the critical states that can cause the belt tear-off.

2. Mining belt conveyors with bonded joints

Belt conveyors (Fig. 1) are basic devices of the intra-factory transport for the mining industry. Having a lot of good points, the belt transportation system is also used in many other industries, e.g. in mineral raw material treatment plants, the smelting industry, the cement industry, the paper-making industry, sea- and river ports, the building industry, agriculture and sugar factories. The belt conveyors allow for haulage of loose materials of different physical and mechanical characteristics, at a low level of the materials' degradation [1, 6].



Rys. 1. Schemat typowego przenośnika taśmowego [1]: 1 – taśma; 2 - krążnik górny; 3 – bęben napędowy (zrzutowy); 4 – bęben zwrotny; 5 - bęben odchylający; 6 – bęben napinający; 7 – krążnik dolny (powrotny); 8 – krążnik nadawowy; 9 – obciążnik; 10 – urządzenie czyszczące (zagarniak, skrobak) 11,13 – przesypy; 12 – transportowane nosiwo

Fig. 1. A scheme of a typical belt conveyor [1]: 1 – belt; 2 – upper runner; 3 – motion wheel (dropping); 4 – return wheel; 5 – diverting wheel; 6 – stretching wheel; 7 – bottom runner (return); 8 – feeding runner; 9 – weight; 10 – cleaning device (firmer, scraper); 11,13 – boosters; 12 – material handled

jące się za pomocą różnych środków transportu. Cechą charakterystyczną transportu kopalnianego jest dążenie do ujednolicenia zastosowanego środka transportu. Jeżeli wydobycie odbywa się w sposób ciągły, a przypadek taki jest jak najbardziej pożądany, wówczas najczęściej stosuje się transport taśmowy, który umożliwia bezpośrednią odstawę wydobytego surowca. W warunkach takich wymaga się dużej niezawodności i trwałości urządzenia transportującego urobek, co jest szczególnie kłopotliwe w przemyśle wydobywczym, z racji trudnych warunków pracy.

Taśma przenośnikowa, będąca jednocześnie najdroższym elementem przenośnika, bardzo często podlega różnym rodzajom uszkodzeń. Można wyodrębnić następujące przyczyny typowych uszkodzeń taśmy [1, 6]:

- Uszkodzenia pochodzące od naprężeń, jakim poddawana jest taśma w czasie pracy.
- Uszkodzenia wynikające ze wzajemnej współpracy z elementami przenośnika, mającymi bezpośredni kontakt z taśmą (krążniki, bębny napędowe, urządzenia czyszczące).
- Uszkodzenia pochodzące od transportowanego urobku (ostre krawędzie nosiwa i jego ruch względem taśmy).

Zerwanie taśmy jest najbardziej krytycznym stanem prowadzącym do konieczności zatrzymania przenośnika na długi czas w celu przeprowadzenia skomplikowanych i czasochłonnych napraw. Zerwanie taśmy ma również poważne skutki ekonomiczne. Przyczyną zerwania taśmy jest koncentracja naprężeń,

The essence of the mining industry transportation system is a continuous conveyance of the mined masses, performed with the use of different means of transport. A characteristic feature of the mining transportation system is the trials to unify the means of transport. If extracting is done permanently, and this is the most desirable case, the most often used transport is the belt one, as it allows for direct haulage of the extracted material. In these conditions, high reliability and durability of the transportation device is demanded, which is particularly troublesome in the mining industry because of the hard working conditions.

The conveyor belt, the most expensive element of the conveyor, is very often damaged. The following reasons for these damages can be enumerated [1, 6]:

- Damages resulting from stresses that affect the belt at its operation.
- Damages resulting from cooperation with the conveyor's elements that touch the belt directly (runners, motion wheels, cleaning devices).
- Damages caused by the transported materials (sharp edges of the material handled and its motion on the belt).

Breaking up the belt is the most critical state that leads to the stopping of the conveyor for a long period in order to make complicated and time-consuming repairs. Breaking up of the belt has also serious economic effects. The cause of the breaking up of the belt, is the concentration of stresses transferred by

które przenoszone są przez rdzeń taśmy. Taśma jest narażona na losowe, a więc trudne do wcześniejszego zaobserwowania przeciążenia transportowanym materiałem. Obciążenia te niejednokrotnie przekraczają obciążenia nominalne podane przez producenta taśmy. Efektem tego jest koncentracja naprężeń rozciągających w taśmie i jej zerwanie. Jest to sytuacja krytyczna, która powoduje trwałe unieruchomienie przenośnika. Zerwanie taśmy następuje najczęściej na złączu, które ma mniejszą nominalną wytrzymałość na zerwanie w porównaniu z samą taśmą.

Typowe złącza taśm, wykonywane np. metodą klejenia na zimno posiadają liczne wady i zalety. Technologie klejenia uznaje się za najbardziej właściwe metody wykonywania połączeń, ponieważ gwarantują one zachowanie ciągłości taśmy, mają duży wytrzymałość oraz trwałość, a ponadto dobrze współpracują z krążnikami i bębnami przenośnika. Do ich istotnych wad należy zaliczyć natomiast niską wytrzymałość na zrywanie w porównaniu z samą taśmą. Połączenia klejone są wprawdzie stosunkowo tanie, lecz odznaczają się znacznym rozrzutem wytrzymałości, co jest spowodowane różnymi warunkami temperaturowymi i wilgotnościowymi, które panują podczas ich wykonywania. W efekcie tego często dochodzi do zerwania złączy taśm przenośnikowych bez wystąpienia jakichkolwiek wcześniejszych symptomów mogących świadczyć o bliskim wystąpieniu uszkodzenia (analizowany obiekt diagnozowania jest układem dynamicznym) [2, 3, 5].

Nieprzewidziane zerwania taśmy mogą być również efektem jej mechanicznego zablokowania, bocznego schodzenia lub zanieczyszczenia bębnów [2], jednak sytuacje takie są możliwe do zaobserwowania przez obsługę urządzenia i w przypadku szybkiej reakcji można im zapobiec.

3. Możliwości diagnostyki i sterowania pracą przenośnika taśmowego w aspekcie możliwości przewidywania zbliżającego się zerwania tasmy

Zerwanie taśmy jest okolicznością powodującą długotrwałe unieruchomienie urządzenia oraz znaczne straty finansowe z tego właśnie powodu. Z racji charakteru i warunków pracy urządzenia oraz specyfiki sterowania, zachodzi potrzeba zastosowania do tego celu odpowiedniego inteligentnego układu monitoringu i automatycznego sterowania. Układ taki umożliwi przekształcenie urządzenia w „maszynę inteligentną" mającą możliwość „samodzielnego" reagowania na zmieniające się warunki pracy oraz eliminowania stanów powodujących zerwanie taśmy poprzez przewidywanie ewentualnych przyszłych parametrów pracy i konsekwencji ich wystąpienia [4].

the belt core. The belt is exposed to random (difficult to observe in advance) overloads with the transported material. These loads very often exceed the nominal ones, given by the belt's producer. As a result, the tensile stresses are concentrated in the belt and the belt breaks up. This critical situation causes durable immobilisation of the conveyor. The belt is usually broken up at the joint that has lower nominal tenacity than the belt.

Typical belt joints, made with e.g. the cold bonding method, have numerous advantages and disadvantages The gluing technologies are believed to be the most proper ones for making connections because they guarantee the maintenance of the belt's continuity, have high resistance and durability, and, moreover, they properly cooperate with the conveyor's runners and wheels. However, one of their essential drawbacks is low tenacity, in comparison with the belt. On one hand, the bonded joints are comparatively cheap, but on the other, they have large dispersion of tenacity, which is caused by different temperature and moisture conditions at bonding. As a result, the conveyor's belts often break up without previous symptoms, suggesting the approaching damage (the analysed object of diagnosis is a dynamic system) [2, 3, 5].

The unforeseen breaking-ups of the belt may also result form its mechanical blockage, side slipping-off or impurities on wheels [2]; however, these situations are easy to observe by the stuff and they can be prevented.

3. The possibilities of diagnosing and controlling the belt conveyor's operation in the aspect of possibilities of foreseeing the approaching belt break-up.

The belt breaking-up, causes a long-lasting standstill of the device and significant financial losses. Because of the character and operation conditions of the device, as well as the controlling specificity, it is necessary to use an appropriately intelligent monitoring and automatic controlling system. Such a system shall allow for the device transformation into an "Intelligent machine" that is able to react to the changing operation conditions "on its own", as well as eliminate states causing the breaking-up of the belt, through foreseeing possible future operation parameters and the consequences of their appearance [4].

Realizacja takiego celu jest możliwa poprzez ciągły pomiar i analizę wydłużenia złączy klejonych w czasie ich pracy. Odpowiedni do tego układ będzie miał zatem za zadanie diagnozowanie stanu urządzenia w oparciu o pomiary prowadzone na bieżąco, których wyniki będą w tym samym czasie analizowane prze odpowiednio nauczony system inteligentny, mający za zadanie podejmowanie decyzji o zatrzymaniu urządzenia, zmianie parametrów jego pracy lub sygnalizujący konieczność wymiany lub wzmocnienia złącza taśm. Innymi słowy - automatycznie dobierane parametry pracy będą w tym przypadku jednocześnie stanowiły zabezpieczenie urządzenia przed wystąpieniem stanów krytycznych.

Mając na uwadze powszechność stosowania w przemyśle przenośników taśmowych oraz brak efektywnych systemów monitorująco-sterujących przeciwdziałających awariom tych urządzeń w wyniku zerwania połączenia taśm, można wnioskować, że wyniki realizacji podjętego tematu przyczynią się nie tylko do zwiększenia wiedzy i doświadczenia w zakresie przemysłowego wykorzystania systemów inteligentnych, ale też spowodują ograniczenie strat spowodowanych przestojami w wyniku nieprzewidzianych awarii.

Drugorzędnym celem realizacji omawianego zagadnienia jest ponadto rzeprowadzenie analizy porównawczej różnych typów systemów inteligentnych, które mogą być stosowane do monitorowania i sterowania predykcyjnego w warunkach przemysłowych. Tematyka realizowanego zagadnienia łączy w sobie zatem problematykę:

1) budowy i eksploatacji maszyn roboczych transportu wewnątrzzakładowego,
2) monitoringu stanu urządzenia w oparciu o na bieżąco prowadzone pomiary,
3) oraz sterowania wykorzystującego analizę wyników diagnozowania przez odpowiednio przygotowane i nauczone systemy inteligentne.

Wszystkie te trzy zagadnienia łączą się z sobą nierozerwalnie w proponowanej koncepcji układu monitorująco-sterującego z wykorzystaniem systemów inteligentnych.

4. Projekt układu monitorującego stan złączy w czasie rzeczywistym

W obecnym okresie dąży się do tego, aby każdy proces transportu był coraz bardziej zmechanizowany i automatycznie sterowany. Stosowany w takim przypadku program sterowania powinien być odpowiednio połączony z systemem informacji. Podobnie, choć w bardzo ograniczonym zakresie, dzieje się w przypadku rozwoju konstrukcji przenośników taśmowych. Wynika to ze specyfiki konstrukcyjnej tych urządzeń

Realisation of this aim is possible through continuous measuring and analysing enlogations of the bonded joints during operation. Appropriate system shall diagnose the device's condition, based on the ongoing measurements. Their results shall be simultaneously analysed by a properly trained intelligent system whose task shall be to take decisions on stopping the device or changing its operation parameters. It could also signal the necessity of replacing or strain hardening of the belts' joints. In other words, automatically selected parameters shall at the same time protect the device against the occurrence of critical states.

Taking into consideration the universal use of belt conveyors in the industry and the lack of effective monitoring and controlling systems, that could prevent the failure of these devices resulting from the belts' breaking-up. It can be supposed that the results of this issue realisation shall contribute not only to broadening knowledge and experience in the field of industrial use of intelligent systems, but also to limiting losses caused by standstills resulting from unforeseen failures.

Moreover, the secondary aim of the discussed issue realisation is making a comparative analysis of different types of intelligent systems that can be used for monitoring and predictive controlling in industrial conditions. Therefore, the scope of the realised issue includes the following:

1) construction and operation of intra-factory transport working machines,
2) monitoring the device's condition based on the systematic measurements,
3) and controlling that use the analysis of diagnosis results by properly designed and trained intelligent systems.

All of the three issues are inseparably connected in the proposed concept of the monitoring and controlling system that uses the intelligent systems.

4. The design of a real time joints' condition monitoring system

Nowadays, the aim is to mechanise and automatically control all transport processes as much as possible. The controlling program used in this case should be connected to a system of information. Similarly, although in a very limited scope, it is done in the development of the belt conveyors' construction. This results from the construction specificity of these devices and their operation conditions. As it has been

oraz warunków ich pracy. Jak wspomniano wyżej, bardzo istotną dla zapewnienia ciągłej i bezawaryjnej pracy przenośników taśmowych jest możliwość występowania losowych przeciążeń transportowanym materiałem, znacznie przewyższających obciążenia nominalne, co przeważnie wynika ze zmiennej wydajności. W konsekwencji często powoduje to zerwania taśmy (złącza taśmy) trwale unieruchamiające prowadzony transport.

Prowadzone obecnie typowe prace badawcze i wdrożeniowe nad połączeniami wieloprzekładkowych taśm przenośnikowych zmierzają w większości do podniesienia wytrzymałości i trwałości różnego rodzaju połączeń, czy też optymalizacji ich geometrii. Dotychczas brak jest jakichkolwiek rozwiązań, czy nawet prób podjęcia tematu monitorowania stanu złączy w warunkach przemysłowych w rzeczywistym czasie ich pracy. Wynika to głównie ze znacznego skomplikowania ewentualnego układu monitorującego, pracującego w tych samych warunkach, co przenośnik oraz braku stosownych rozwiązań konstrukcyjnych. Ponadto dość skomplikowane byłoby też opracowanie dokładnego modelu matematycznego tak diagnozowanego obiektu.

Typowe taśmy przenośnikowe o różnym przeznaczeniu mają zbliżone parametry. Szczególnie istotna jest wielkość minimalnego wydłużenia taśmy w chwili zerwania, która przyjmuje z reguły wartość 17%-18%. Jej znajomość ma istotny wpływ na minimalną dopuszczalną wartość wydłużenia złącza w chwili zerwania. Producenci taśm podają, że względna trwałość połączenia wykonanego metodą klejenia w stosunku do trwałości taśmy wynosi przeciętnie od 50 do 100%. Może ona być zatem zarówno wysoka jak i średnia, a zależy to głównie od niekorzystnych czynników zewnętrznych, między innymi od jakości wykonanego połączenia oraz trwałości zastosowanych materiałów łączących, efektywności technologii klejenia, jak i warunków pracy. Nie bez znaczenia są też zmienne warunki panujące w czasie wykonywania złączy (temperatura, wilgotność względna itp.)

Przeprowadzona wstępna analiza stanu wiedzy na temat wytrzymałości taśm przenośnikowych oraz trwałości złączy wykonywanych metodą klejenia pozwala na postawienie następującej tezy badawczej:

Wydłużenie złączy taśm przenośnikowych w chwili zerwania jest wielkością zależną od właściwości samej taśmy (w tym od minimalnego dopuszczalnego wydłużenia taśmy w chwili zerwania) oraz od jakości wykonanego połączenia klejonego. Istnieje zatem możliwość monitorowania wydłużenia złączy w czasie pracy przenośnika, przy jednoczesnym określeniu wartości krytycznej wydłużenia, kiedy przestaje ono mieć charakter wydłużenia dynamicznego, związanego ze

mentioned above, a crucial question for maintaining continuous and failure-free operation of the belt conveyors is the occurrence of random overloads with the transported material, significantly exceeding the nominal loads, which usually is the effect of changing output. Consequently, the belt (belt's joint) is often broken up, which durably standstills the conveyed transport.

The currently conducted, typical research and implementation works on the joints of multi-interlayer conveyor belts are aiming at, in most cases, improving resistance and durability of different types of joints, or the optimisation of their geometry. So far, there are no solutions, or even trials, of monitoring the condition of joints in the industrial conditions in the real time of their operation. This is mainly caused by significant complication of the possible monitoring system, working in the same conditions as the conveyor, and the lack of appropriate constructional solutions. Moreover, to work out a mathematical model of an object diagnosed in such a way would be rather complicated.

Standard conveyor belts of different purpose have similar parameters. Particularly important is the length of the belt enlogation at the time of break-up; usually the value of 17%-18% is accepted. Its knowledge substantially influence the minimum accepted value of enlogation in the moment of breaking-up. The belts' producers inform that the relative durability of the glue joint, compared to the belt's durability is 50%-100% on average. That means it can be high or medium and it depends mainly on adverse external factors; among others, on the quality of joint and on the durability of materials used for the joint, bonding efficiency and operation conditions. Changing conditions of the environment while making the joins are also important (temperature, relative humidity, etc.)

An initial analysis of knowledge of conveyor belts' tenacity and durability of bonded joints allow for posing the following research thesis:

Enlogation of the conveyor belts at the time of break-up depends on the belt's characteristics (including the minimum accepted belt enlogation at the time of break-up) and on the quality of the bonded joint. Thus, it is possible to monitor the enlogations of joints at the conveyor operation, with the simultaneous defining the critical value of the enlogation, when it ceases to have the character of a dynamic enlogation connected to the changing operation conditions and becomes an value indicating the approaching breaking-up of the joint.

Moreover, the designed monitoring system shall be able to signal in advance about the occurrence of conditions accompanying the approaching breaking-up of the belt in the joint area. Appropriate construction

zmiennymi warunkami pracy, a staje się wielkością świadczącą o bliskim zerwaniu połączenia.

Projektowany układ monitorujący będzie miał ponadto możliwość zasygnalizowania z wyprzedzeniem, o zaistnieniu warunków towarzyszących zbliżającemu się zerwaniu taśmy w obszarze złącza. Odpowiednia konstrukcja pozwoli również na uzyskanie dodatkowych korzyści wynikających z jego zastosowania, między innymi poprzez:

- przeanalizowanie parametrów eksploatacyjnych przenośnika taśmowego, mających wpływ na częste awarie w wyniku zerwania taśm oraz opracowanie odpowiedniego systemu inteligentnego, który będzie umożliwiał monitorowanie warunków pracy maszyny i jej automatyczne sterowanie w celu eliminacji sytuacji krytycznych, - można bowiem przy danej wydajności, mocy i długości przenośnika wpływać na obciążenie taśmy poprzez zmianę jej prędkości,
- przeanalizowanie trwałości różnych typów połączeń klejonych taśm przenośnikowych w celu zwiększenia jakości złącza lub opracowania modyfikacji technologii ich wykonywania bez spowodowania straty wytrzymałości przekładek,
- przeprowadzenie analizy przyczyn wad wykonawczych połączeń,
- praktyczne porównanie właściwości stosowanych materiałów klejowych w aspekcie ich wytrzymałości na rozwarstwienie i ścinanie.

Wymierną korzyścią realizacji takiej właśnie koncepcji monitorowania i sterowania pracą analizowanego obiektu będzie między innymi:

- umożliwienie stałego nadzoru stanu wszystkich złączy taśm przenośnikowych w trakcie ich pracy, z wykorzystaniem metody bezinwazyjnej,
- identyfikacja złączy oraz ocena ich trwałości i niezawodności w czasie całego okresu pracy,
- eksploracja danych z monitoringu w czasie rzeczywistym,
- zapewnienie szybkiej reakcji układu na zmieniające się warunki pracy,
- zapewnienie możliwości szybkiej i właściwej reakcji układu na inne, nieprzewidziane stany pojawiające się w czasie pracy.

Schemat opracowanego układu monitorującego realizującego przedstawione powyżej cele przedstawia rysunek 2.

Opracowane i wykonane urządzenie testowane jest aktualnie w warunkach dołowych na przenośniku odstawy głównej kopalni L.W. Bogdanka S. A.

shall also allow for obtaining additional advantages of using it, among others, through:

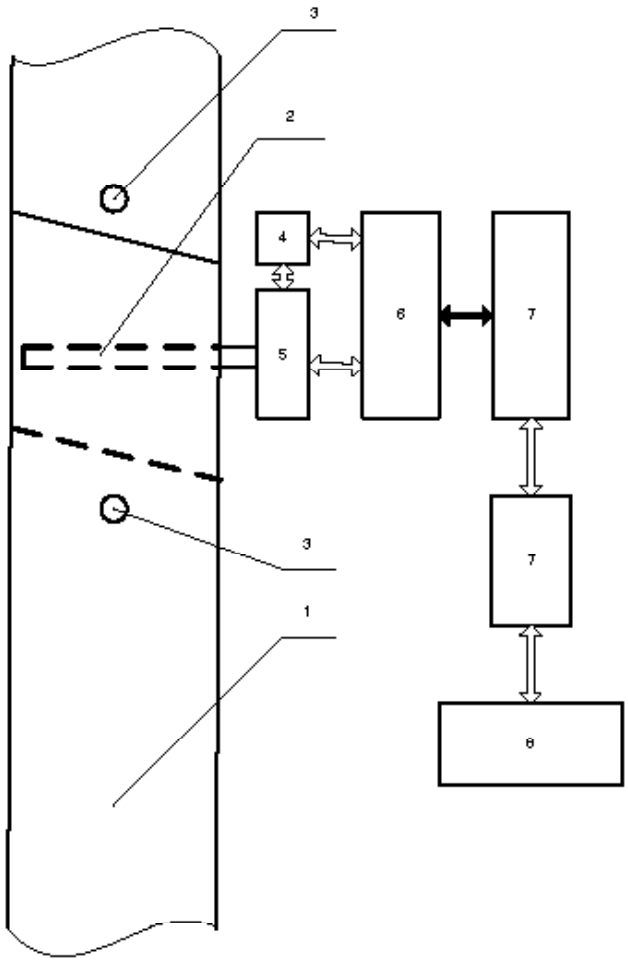
- analysing operation parameters of the belt conveyor, influencing the frequent occurrence of failures resulting from the break-up the belts and working out appropriate intelligent system that shall allow for monitoring the operation conditions of the machine and its automatic control in order to eliminate critical situations; it is possible to influence the belt load (at a given capacity, power and conveyor length) by changing its speed,
- analysing durability of different joints types of glued conveyor belts in order to improve the joint's quality or to work out the modification of their manufacturing technology without losses of the inter-layers' tenacity,
- making an analysis of reasons of faults in the produced joints,
- practical comparison of the bonding materials' characteristics regarding their resistance to separation and coagulation.

Notable benefits of the realisation of such monitoring and controlling concept shall be, among others:

- enabling constant supervision of all conveyor belts' joints condition at their operation, with the use of an inertia less method,
- joints identification and assessment of their durability and reliability through the whole operation period,
- exploration of the monitoring data in the real time,
- ensuring prompt reaction of the system to the changing operation conditions,
- creating the possibility of quick and proper system's reaction to other, unforeseen conditions occurring at the device's operation.

A scheme of the designed monitoring system that realise the aims presented above is shown in Figure no. 2.

The designed and constructed testing device is, for the time being, tested in the underground conditions on the main haulage conveyor of the L.W. Bogdanka S. A.



Rys. 2. Scheda ideowy konstrukcji układu monitorującego wydłużenie złączy taśm przenośnikowych: 1- taśma przenośnika, 2 – obszar złącza, 3 – znacznik, 4 – czujnik, 5 – urządzenie pomiarowe, 6 – sterownik mikroprocesorowy, 7 – urządzenie do transmisji danych cyfrowych, 8 – system komputerowy

Fig. 2. Schematic diagram of the system monitoring the enlogations of the conveyors belts' joins: 1- conveyor belt, 2 – joint area, 3 – marker, 4 – sensor, 5 – measuring device, 6 – microprocessor controller, 7 – a device for transmission digital data, 8 – computer system

5. Podsumowanie

Celem prowadzonych prac jest opracowanie metody monitoringu i sterowania parametrów pracy typowego urządzenia transportu wewnątrzzakładowego, która pozwoliłaby na przewidzenie warunków wystąpienia stanu krytycznego, a przez to uniknięcie awarii. W wyniku takiego opracowania, określone zostaną warunki konstrukcyjno-eksploatacyjnych urządzenia, mające wpływ na częste awarie w wyniku zerwania złączy taśm. W kolejnym etapie prac opracowany zostanie odpowiedni system inteligentny, który będzie umożliwiał monitorowanie warunków pracy maszyny roboczej i jej sterowanie w celu eliminacji sytuacji krytycznych. System taki opracowany będzie w oparciu o odpowiedni model inteligentny analizowanego obiektu. Do tego celu niezbędne jest zgromadzenie zbioru danych charakteryzujących obiekt oraz prze-

5. Summary

The aim of the conducted works is to work out a method of monitoring and controlling the parameters of standard intra-factory device operation. The method should allow for foreseeing conditions at a critical state incident, and in this way – for preventing a failure. Because of this work, the construction and operation conditions of the device shall be defined; the defined conditions influence frequent failures resulting from the breaking-up joints. At the subsequent stage, there shall be designed an appropriate intelligent system that shall allow for monitoring the operation conditions of the working machine and its controlling in order to eliminate the critical states. This system shall be worked out based on appropriate intelligent model of the analysed object. To achieve this aim, it is necessary to gather a collection of data characterising the plant

prowadzenie analizy dostępnych technik modelowania systemów inteligentnych pod kątem możliwości ich zastosowania w różnych obiektach rzeczywistych w zależności od specyfiki ich konstrukcji i warunków pracy. Po odpowiednim przeanalizowaniu warunków pracy analizowanego obiektu w aspekcie eliminacji nieprzewidzianych obciążeń, oraz po dobraniu i opracowaniu odpowiedniego modelu matematycznego, konieczne będzie opracowanie reguł sterujących. Ich algorytmy pozwolą na realizację założonych celów sterowania. Przeprowadzone zostaną badania symulacyjne polegające na opracowaniu systemu komputerowego w oparciu o wykonany model obiektu. Ich istotnym elementem będzie opracowanie systemu komputerowego do rejestracji, archiwizacji i przetwarzania wyników symulacji. Model taki pozwoli na właściwą ocenę i prognozowanie pracy obiektu, projektowanie i testowanie oraz analizę pracy systemu sterowania. Aby zrealizować tak założony cel pracy konieczne jest przeprowadzenie badań na obiekcie rzeczywistym. Przeprowadzone zostaną również opisane wcześniej badania symulacyjne oraz weryfikacyjne. Wnioski dotyczące praktycznych cech aplikacyjnych systemów inteligentnych i opisujących je modeli umożliwią łatwe przeniesienie wyników prac na inne tego typu obiekty rzeczywiste, które powinny posiadać zabudowane inteligentne systemy monitoringu i sterowania w czasie rzeczywistym.

and making an analysis of available system modelling techniques with the regard of the possibilities of using them in different real plants, depending on the specificity of their construction and operation conditions. After appropriate analysing the operation conditions of the plant with regard to elimination of unforeseen loads, and after selecting appropriate mathematical model, it shall be necessary to work out the controlling rules. Their algorithms shall allow for achievement of the control aims. Simulation research shall be made; they shall consist in working out a computer system based on the constructed plant's model. Their crucial element shall be designing a computer system for registration, archiving and processing the simulations' results. Such model shall allow for appropriate assessment and prognosis of the plant's operation, designing, testing, and analysing the controlling system operation. In order to realize such a complicated aim, it is necessary to conduct researches in a real plant. Also, the simulation and verification researches, mentioned above, shall be conducted. Conclusions concerning the practical characteristics of the applicable intelligent systems and the models describing them shall allow for easy transferring the works' results to other real plants of this type that need to have the real-time monitoring and controlling systems built-in.

6. References

[1] Antoniak J.: *Przenośniki taśmowe - wprowadzenie do teorii i obliczenia.* Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2004.

[2] Desowski A.: *Poradnik eksploatacji taśm przenośnikowych*. Zakłady Gumowe Górnictwa, Bytom 1999.

[3] *Górnicze taśmy PCV - informator, poradnik*. Bydgoskie zakłady Przemysłu Gumowego, Bydgoszcz 1994.

[4] Korbicz J. (red): *Diagnostyka procesów. Modele. Metody sztucznej inteligencji. Zastosowania.* WNT Warszawa 2002.

[5] Poradnik eksploatacji taśm przenośnikowych Bełchatowskich Zakładów Przemysłu Gumowego „Stomil Bełchatów", Bełchatów 1998.

[6] Żur T.: *Przenośniki taśmowe w górnictwie.* Wydawnictwo „Śląsk", Katowice 1979.

****

Praca naukowa finansowana ze środków Komitetu Badań Naukowych w latach 2004-2006
jako projekt badawczy

****

Dr inż. Dariusz Mazurkiewicz

Katedra Podstaw Inżynierii Produkcji
Politechnika Lubelska
Ul. Nadbystrzycka 36, 20-816 Lublin
E-mail: d.mazurkiewicz@pollub.pl

Boleslav KADLEČEK
Ladislav PEJŠA
Miroslav RŮŽIČKA

THE COMPARISON OF POWER, ECONOMY AND ECOLOGICAL PARAMETERS OF SPARK-IGNITION ENGINE OF LAWN MOWERS

The subject of this report is a description of measuring results and mutual comparison of power, economy and ecological parameters of spark-ignition engines. Four engines equipped with a vertical crank-shaft with power from 3 to 5 kW were compared. These engines were mounted as a drive unit on lawn mowers.

***Keywords**: engine, mower, power, torque, specific fuel consumption, emission, vibration*

Introduction

Small lawn mowers and other small mechanization, as chain-saws, brush-saws, tillers etc., driven by a combustion engines meet, from the point of view of economy and ecology, with similar problems of operation as are solved traditionally and in long-term with engine-driven vehicles and self-propelled agricultural machines. Combustion engines of small mechanization perform substantially smaller problem from the point of view of the harmfulness and of the impact on sustainable environment. On the other hand operators of the machines are immediately exposed mainly to a harmful emission impact and vibrations. That is why it is necessary to pay an adequate attention to problems of economical and ecological parameters as during a machine selection as during a machine maintenance.

For this particular purpose special measuring equipments i.e. power (efficiency) dynamometers and cooperating emission analyzers are not readily available in the market. That is why authors used under mentioned non-traditional measuring procedure based on dynamical efficiency measurement and so-called quasi-static measurement of emission parameters, fuel consumption and vibrations.

1. Brief description of the experimental measurement

The measurements were done at the emission control station and in laboratories of Department of Vehicles and Land Transport of Technical Faculty, Czech university of agriculture in Prague. These types of spark-ignition four-stroke engines with a vertical crank-shaft (Kawasaki engine, „Noname" - made in China, Briggs&Stratton-Intek engine and B&S-Quantum) were measured. The aim of measurement was to obtain a data and according to obtained data values to select the most suitable engine drive of a lawn mower. Data were compared from the point of efficiency parameters, emission impact on the environment, fuel consumption, noise and vibrations.

- The measurement of external revolution characteristics (i.e. torque [Nm] and power [kW] depending on engine revolutions [min^{-1}]). Measurement was carried out by a dynamic method on the base of free acceleration. Torque [Nm] is directly proportional to an angular acceleration [$rad.s^{-2}$] which was measured as well. Moments of inertia [$kg.m^2$] (of every moving mass) must be taken as a constant. The moment of inertia was determined by method of three-rope clamp measurement. Moments of inertia were determined independently for every flyweel of the engines, including a crank-shaft, carrier and chopper.
- The measurement of emission impact on environment (i.e. emission production CO_2 [%], CO [%], HC[ppm]) was carried out by NDIR analyzer (Non Dispersive Infra-Red absorption) under conditions:
  a) Standstill run-idle revolution mode of engine;
  b) Maximal operational revolutions and standstill run on-load mode of engines.
- The measurement of fuel consumption [$g.hod^{-1}$] was carried out under the same engine conditions see a), b). Mass rate of flow meter was used.
- The measurement of exhaust gas temperature, a heat sink (surface) of working engine cylinder temperature and spark plug temperature under the same engine conditions see a), b). This measurement was carried out with a contact thermometer TERMO-PEN (SKF)
- The measurement of vibrations (range of oscillation) [$mm.s^{-1}$] was carried out under the same engine conditions see a), b). This measurement was carried out with a contact vibration meter VIB-PEN (SKF).

All these four cases of measured combustion engines are the question of carburetor spark–ignition engines with a power regulator. It keeps revolutions in dependence on the engine load within the range of 2800-3000 [min^{-1}] according to type. These engines are possible to class as stationary spark-ignition piston combustion engines with single-chamber monocyclic (circuit) carburetor.

Carburetors of the compared engines consist of a main circuit only. It prepares fuel mixture (fuel with an air) mainly for high revolutions and full run load. The carburetor is without some special mechanism for run-idle engine mode and transition dynamic modes. These (above mentioned) technical and design parameters of measured engines did not enable to use a classical method –called the free acceleration which is usually used for e.g. car combustion engines.

2. Theoretical solution of the algorithm for measuring power parameters

The principle of establishing power parameter through the acceleration method is based on measuring angular acceleration ε [$rad \cdot s^{-2}$] of the crankshaft. This is directly proportional to the torque M [N.m]. When the moment of inertia I [$kg.m^2$] of all the mass which rotates with the crankshaft is known than the relation originated from Newton's second law is valid for bodies rotating around an invariable axis.

$$M = I \cdot \varepsilon \quad [N.m] \tag{1}$$

$$P = M \cdot \omega = I \cdot \varepsilon \cdot \omega \quad [W] \tag{2}$$

where: M – Torque [Nm] (effective value), I– moment of inertia [$kg \cdot m^2$], ε – angular acceleration [$rad \cdot s^{-2}$], ω – angular speed [$rad \cdot s^{-1}$].

The measuring method is based on the time of one crank revolution ($t_k - t_{k-1}$ for $\varphi_\kappa = 2\pi$) - the time range between the impulses of flywheel marker.

Averaged angular speed at the time t_k is based on two revolutions:

$$\omega_k = \frac{4\pi}{t_{k+1} - t_{k=1}} \quad [rad \cdot s^{-1}] \tag{3}$$

Angular acceleration of the engine crankshaft ε_k is evaluated as well as a mean value during two revolutions of crank:

3. The most important results of measurement

The over average effective power (see fig.1) and effective torque (see fig.2) were found out at Briggs & Stratton – Intek (190 cm^3) engine.

Effective power and torque parameters of the engine made in China (190 cm^3) and B&S–Quantum (190 cm^3) are comparable.

Lower power and torque parameters were found out at Kawasaki (179 cm^3) engines, that are respond to lower stroke volume.

The comparison of loss torques (fig.3) needed for the getting over of self passive resistance of engines is interesting. In comparison with theoretical presumptions engine Briggs & Stratton Intek had unusual low losses. Loss torque of the B&S-Intek engine is even lower then the Kawasaki engine which is equipped with the lowest stroke volume in comparison with the other engines.

Indicated power parameters are summary indicator of engine efficiency. It is evident (see fig.4) that entirely uncontested position in the area of power parameter among all compared engines has Briggs & Stratton–Intek engine. Other engines are approximately on the same level. Kawasaki engine has slightly lesser parameters that are caused by its smaller stroke volume.

B&S Quantum engine fulfill emission limits (see fig. 5) for non-driven carburetor engines under run-idle engine only. B&S Intek engine has slightly increased emission CO and weak mixture. Kawasaki engine is very weak and with too high emission CO. China engine has the worst total volume of directly harmful emission CO a HC with relatively low production CO_2 and too rich mixture.

B&S Quantum engine fulfill emission limits (see fig. 5) for non-driven carburetor engines under run-idle engine only. B&S Intek engine has slightly increased emission CO and weak mixture. Kawasaki engine is very weak and with too high emission CO. China engine has the worst total volume of directly harmful emission CO a HC with relatively low production CO_2 and too rich mixture.

Under the load-run engine mode (adjustment handler on MAX) with app. 3000 revolutions both B&S engines (in order Quantum, Intek) have accep-

$$\varepsilon_k = \frac{2}{t_{k+1} - t_{k-1}} \left(\frac{2\pi}{t_{k+1} - t_k} - \frac{2\pi}{t_k - t_{k-1}} \right) = \omega_k \left(\frac{1}{t_{k+1} - t_k} - \frac{1}{t_k - t_{k-1}} \right) \quad [rad \cdot s^{-2}] \tag{4}$$

where: t_k - a point on the time axis [s], for $k \in \{1,2, ...,k,....\}$, i.e., the instant of pulses from the engine speed sensor, ε_k - angular acceleration [$rad.s^{-2}$] of engine crankshaft close to the k-th time instant, ω_k - angular speed [$rad \cdot s^{-1}$] of the engine crankshaft, close to the k-th time instant (see (3)).

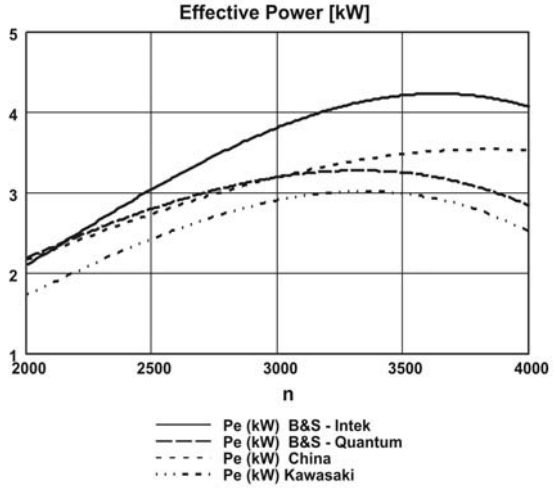


Fig. 1. Comparison of effective power

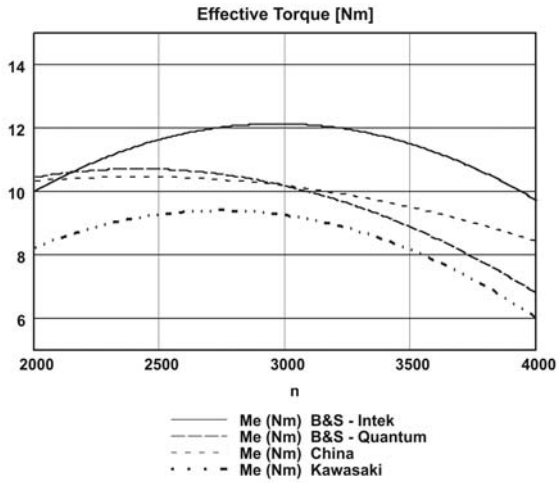


Fig. 2. Comparison of effective torque

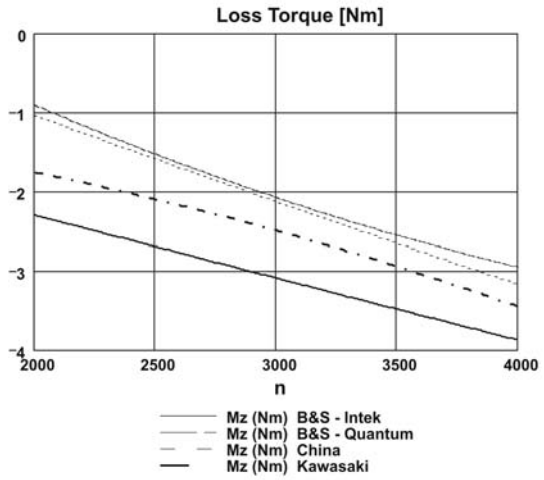


Fig. 3. Comparison of Loss Torques

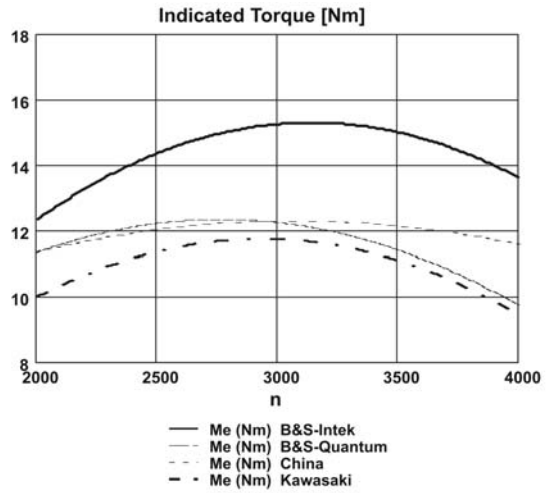


Fig. 4. Comparison of Indicated Torques

table emissions (see fig. 6) nevertheless with slightly increased emissions CO. Next is Kawasaki engine with too weak mixture (more than 4% of residual O_2). Made in China engine is the worst in all emission parameters. (more than 6% CO and hardly zero residua O_2) These parameters of China engine prove too rich mixture that was made with aim of achieve the surplus of power parameters (see fig. 1). These power parameters nevertheless cause the important decline of quality in emission proportionality.

Chart (see fig. 7) proves that the least economical engine is the China under both modes. Under load-run engine mode B&S – Intek engine is evidently the best in relation to the highest powers.

Temperature of exhaust gases increase with a load at all engine (see fig. 8); most notably it is seen at China engine. Spark-plug temperature is balanced at all measured engines with slight increase responding the load.

The accuracy of cutter carrier bearing affects vibrations of a whole mower. The chopper existence damped vibration in some cases but it increased in some cases on contrary. This effect was not searched from the point of quality of carriers. The evaluation of single engine is meaningless from the point of vibrations. It is possible to say in summary that vibration values (range of oscillation [$mm \cdot s^{-1}$]) are quite high at all searched types (see fig. 9). The

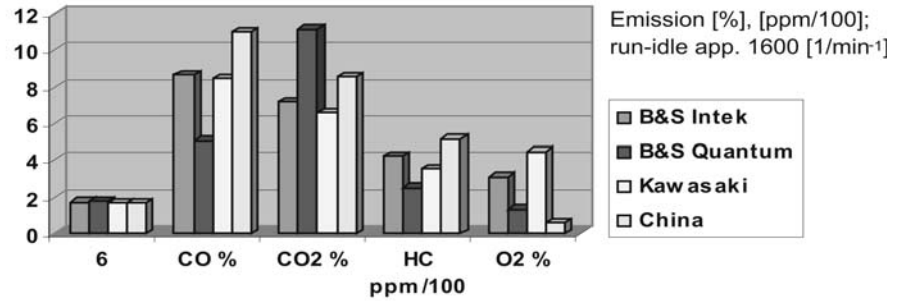


Fig. 5. Summary emission chart under run-idle engine mode app 1600 revolutions per minute (Adjustment handler in position „MIN".)

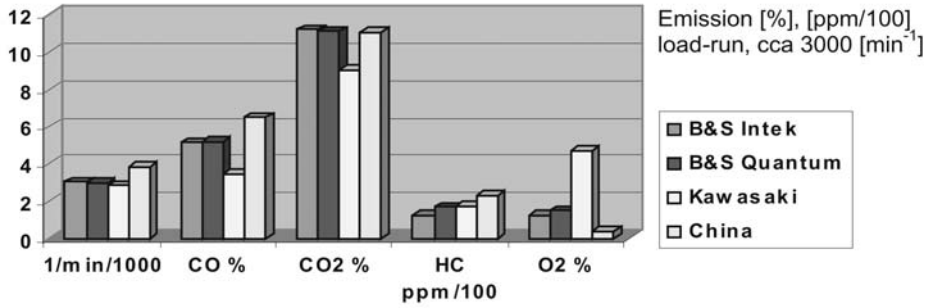


Fig. 6. Summary emission chart under run-load engine mode app. 3000 revolutions per minute (Adjustment handler in position „MAX")

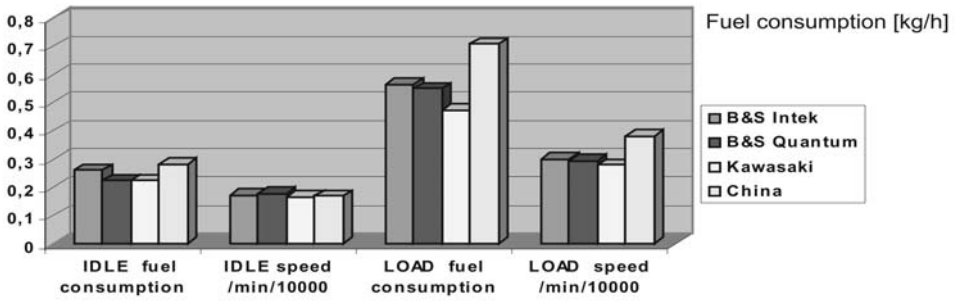


Fig.7. Summary fuel consumption chart [kg/hod.]. On the left - under idle-run engine mode (adjustment MIN), app. 1600 [min-1]. On the right - under load-run engine mode (adjustment MAX) app. 3000 [min-1]

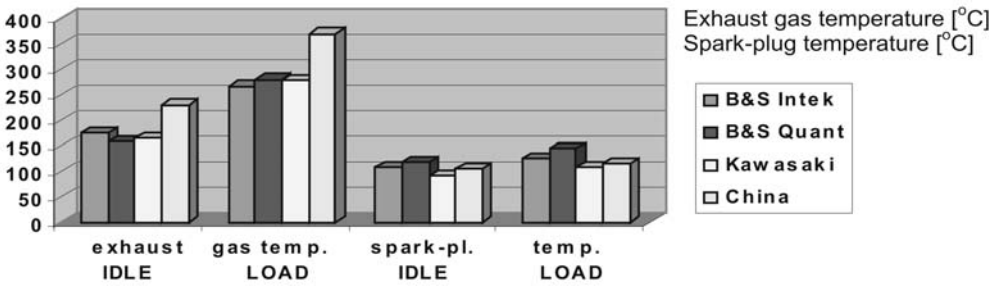


Fig. 8. Summary exhaust gas and spark-plug temperatures chart [°C] under idle-run engine mode, app. 1600 [min-1] and under load-run engine mode, app. 3000 [min-1]

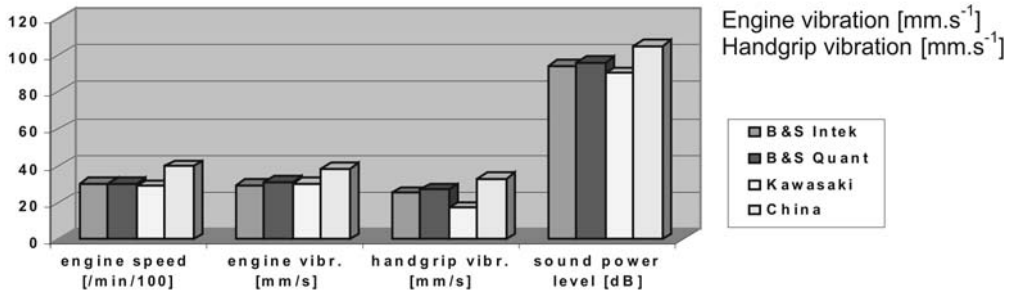


Fig. 9 Summary vibration chart (range of oscillation) [mm.s^{-1}] under load-run engine mode, app. 3000 [min-1]

measured values of noise are high as well namely China engine with more 100 dB.

4. Final conclusion

On the base of above mentioned measurements and analyses, authors evaluate measured engines from the point of power parameters, emission production, fuel consumption and vibration in this order:

Parameters	B&S Intek	B&S Quantum	Kawasaki	China
Power	1	3	4	2
Emission	2	1	3	4
Fuel consumption	1	2	3	4
Vibration&noise	3	2	1	4
Total	7	9	11	14
Classification	first-rate	very good	good low power	the worst cheap

5. References

[1] Kadleček, B., Pejša, L.: *Zpráva o výsledcích porovnávacího měření výkonových, ekono-mických a ekologických parametrů 4 ks zážehových motorů, pohonných jednotek zahradních sekaček*. Vypracováno na základě smlouvy o dílo č.: 04 01 29 / 31, ČZU Praha TF 2004, 31 str.

[2] Kawasaki.: *Owner´s Manual 4-stroke air cooled gazoline engine*., 2003 Kawasaki Heavy Industrie, LTD

[3] Briggs & Stratton.: *Owner´s Manual and Technical specifikation 4-stroke air cooled gazoline engine.* 0478 107 9321 J-EN , 2003, 31s.

Boleslav Kadleček
Ladislav Pejša
Miroslav Růžička
Czech University of Agriculture in Prague
Technical Faculty
Department of Vehicles and Grown Transport
Kamýcká 129, Praha 6 - Suchdol
165 21 Czech Republic

Věra VOŠTOVÁ
Terezie VONDRÁČKOVÁ
Miroslav RŮŽIČKA

FUTURE TRENDS IN DESIGN OF CONSTRUCTION AND AGRICULTURAL MACHINES

New trends in design of construction and agricultural machines are apparent mainly in aims that they should achieve e.g. economic transport, more efficient work technologies, environmental protection etc. The controlling process of building or agricultural technologies is often very similar. This operational control includes e.g. laser methods that operate construction and agricultural machines by means of total station; Global Position System (GPS) with a mobile map utilization that controls construction and agricultural machines etc. The mutual combination of these systems can be seen as well. Stability analysis of the system implementation is to be done in Czech Republic. The main reason for the analyses is eventual wearing out of firm's machinery. The paper describes the mathematical model of laser control and dozer's work technology with the utilization of GPS and laser.

Keywords: *construction machines, agricultural machines, GPS, laser, work technology*

1. Introduction

The design and utilization of modern construction and agricultural machines represent an area with the dynamic economy and technical development. Mainly in agriculture these machines play a key role and they are the main driving force of work efficiency increase and the increase of total production volume. They decrease simultaneously labour costs as well.

The base of the machines is usually designed as a wheel or caterpillar undercarriage. Every machine can be equipped with different additional working tools. These facilities change the machine's use from a single-purpose into a general-purpose – e.g. dozers, loaders, excavators, scrapers, graders and tractors.

Through the last fifteen years the amount and quality of provided services significantly and rapidly increased in the Czech Republic. The services are offered with a significant emphasis on the individual approach to customers with the aim to satisfy completely customers' requirements. Services with adequate quality can be only provided with a support of implemented modern technologies – mainly in agriculture. The implementation of technology represents not only direct investment but relatively heavy investment in software and hardware or indirect investment associated with a company's structural changes, employee training etc. Every company will be, sooner or later, face to the problem of modern technology implementation. The utilization of modern technologies is the only way to increase quality of offered services and to decrease company's operational costs.

One part of these modern technologies is automatic control or automatic operational methods. These methods consist of procedures (set of methods) and technical facilities ensuring the most effective control (based on utilization of economy - mathematical theory of control including the means for information collection, data transfer, storage and processing used in a decision-making processes).

The design of construction and agricultural machines' control will be lead not only in a direction of a modern structural element design but in a direction of machines' economical utilization, new work technologies and complete environmental protection. It is very probable that it includes modern methods of work control of agricultural machines as well – especially laser methods operating by means of a total station; global position system with a mobile map utilization etc.

Some of companies use the outworn machinery in the Czech Republic from time to time. That is why the stability analyses must be carried out before the laser equipment's implementation. The paper describes and proposes solution of this problem on the example of dozer's utilization.

2. Mathematical model of laser machine control

The main requirement for the dozer's equipment function is the earthmoving work with leveled (plane) terrain by a ploughshare blade. The level should be parallel with the laser plane at a distance of H_0. During the machine's operation the blade of working

tool follows the terrain unevenness ΔH_t and it deviates from the required plane.

A system utilizes the negative feedback principle; it means that the system is reacting against changes moving itself out of its balanced condition. Considering a speed when the process runs, it is necessary to deal with a stability of the proposed circuit by utilizing of frequency transfers in order to ensure a harmonic curve of the given quantities.

System description – (see Fig. 1): Receiver **P** will forward a signal to amplifier **Z** and, after that, to evaluation unit **VJ**, which will produce a signal for opening servo valve **SV**, which controls the tool hydraulic engine **HM**. The hydraulic engine corrects a deviation $\mathbf{\Delta H_n}$ by shifting the blade by $\Delta\mathbf{H}$, which will bring it back to its original required position. We use either direct or indirect working tool elevation control. The solution of direct control is described in a following text only. One of its features is the incorporated servo-valve into a high-pressure circuit. The primary advantage of this solution is a direct and quick control of HM hydraulic engines. The disadvantage of the solution is the disruption of the high-pressure circuit and the increased through-flow and pressure load of the control circuit. The circuit can become unstable and it has to be checked. The **1/p** term is a pure integration element used for formal mathematical transfer from the motion speed to the position. This system is the positioning system.

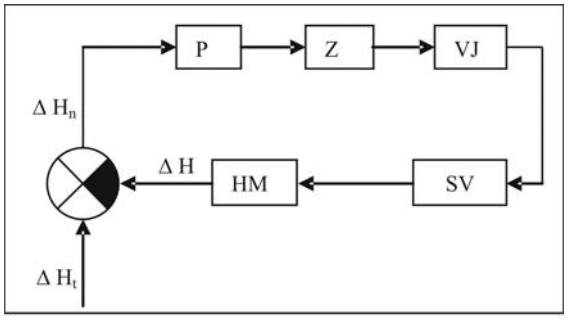


Fig. 1. Classic mechanized technology

3. Stability of solution

The stability of the proposed circuits was solved by means of the Michailov – Leonhard criterion. In this case it necessary to take into account the right side of the equation only – as a function of a complex variable. The left side of the equation has no impact on the circuit stability.

The notation of equation $M(\omega)$ of the n^{th} order is a parametric notation of the stability limit of the Michailov curve, which describes a stable circuit only when:

a) $M(0)>0$ – curve $M(\omega)$ starts on the positive half of the real axis;

b) $\lim_{\omega\to\infty} arg\, M(\omega) = n\cdot\frac{\pi}{2}$

The equation describes the direct control of a tool position and it is an equation of the 5th order. If the solution is to be stable, the Michailov curve has to start on the positive half of the real axis and it also has to run through 5 complex plane quadrants.

$$\lim_{\omega\to\infty} arg\, M(\omega) = 5\cdot\frac{\pi}{2} \qquad (1)$$

The equation describes the indirect control of tool position and it is an equation of the 6th order. If the solution is to be stable, the Michailov curve has to start on the positive half of the real axis and it also has to run through 5 complex plane quadrants.

$$\lim_{\omega\to\infty} arg\, M(\omega) = 6\cdot\frac{\pi}{2} \qquad (2)$$

4. Conclusion

The level of automation of industrial processes has become the growth measure and the growth factor in recent years. As in other branches electronic systems are widely applied into construction and agricultural machines especially at earthmoving machines of tractor type as well. This automation is used as in single structure elements as in machines' control. During the 90' the development achieved a goal from the simple and independent (functionally insulated) systems that indicate limited situations to warn machine's operator to the complex systems monitoring and controlling operational quantities. These systems are currently interconnected and the mutual systems' communication is created.

The most modern systems that control technological processes are based on data transfers between the main computer containing a construction site plans and the individual machines operating on that construction site. Machine's operators can get on-line information (display) presenting a relationship between their work results in comparison with the complete construction plan. They provided by machine's location information that includes the real and required surface condition. This situation allows operate more efficiently with the every machine, increase a work productivity and to decrease costs. For example, work efficiency of a dozer with a modern control system increased about 25% in comparison with a dozer using the usual work control system.

These supreme modern control systems represent a beginning of revolutionary changes in the field of earthmoving and agricultural works. Any later imple-

mentation of these modern methods can cause large economic losses. The success of companies on the market is, and it will be, dependent on the new technology utilization. This statement is valid quite generally and not only in civil and agricultural engineering.

5. References

[1] Voštová V.: *The way of building machines in 21st century.* Stavební informace 7, Prague 2000, special number BAUTEC, pp. 3 – 7.
[2] Kašpar M., Voštová V.: *Lasers in building industries and machine navigation*. ČKAIT Prague 2001, p. 147.
[3] Kašpar M., Voštová V.: *Navigation of Building and Agricultural Machines.* In: The 3rd International Symposium on Mobile Mapping Technology, Cairo, Egypt 2001, CD.

Věra Voštová
Terezie Vondráčková
Miroslav Růžička
Czech University of Agriculture Prague,
Technical Faculty
Department of Vehicles and Ground Transport
Kamýcká 129, Praha 6 - Suchdol
165 21 Czech Republic

FORMULARZ ZAMÓWIENIA PRENUMERATY KWARTALNIKA „EKSPLOATACJA I NIEZAWODNOŚĆ”

(wypełniony formularz proszę przesłać pocztą lub faxem na adres redakcji)

Nazwa firmy zamawiającej prenumeratę:

.....

.....

Adres:.....

Telefon: ..... Fax:.....

Numer identyfikacyjny NIP:.....

Zamawiam roczną prenumeratę kwartalnika PNTTE Warszawa i PAN O/Lublin pt: "Eksploatacja i Niezawodność" w ilości ..... egzemplarzy.

Cena rocznej prenumeraty 1 egzemplarza wynosi 100 złotych.

Adres do korespondencji:

(wypełnić jeżeli inny niż podany powyżej)

Imię i nazwisko:.....

Nazwa: .....

Adres:.....

Telefon: ..... Fax:.....

Upoważniam Polskie Naukowo-Techniczne Towarzystwo Eksploatacyjne (Warszawa) do wystawienia na podstawie niniejszego zamówienia faktury VAT bez mojego podpisu.

Data:..... Podpis osoby upoważnionej.....