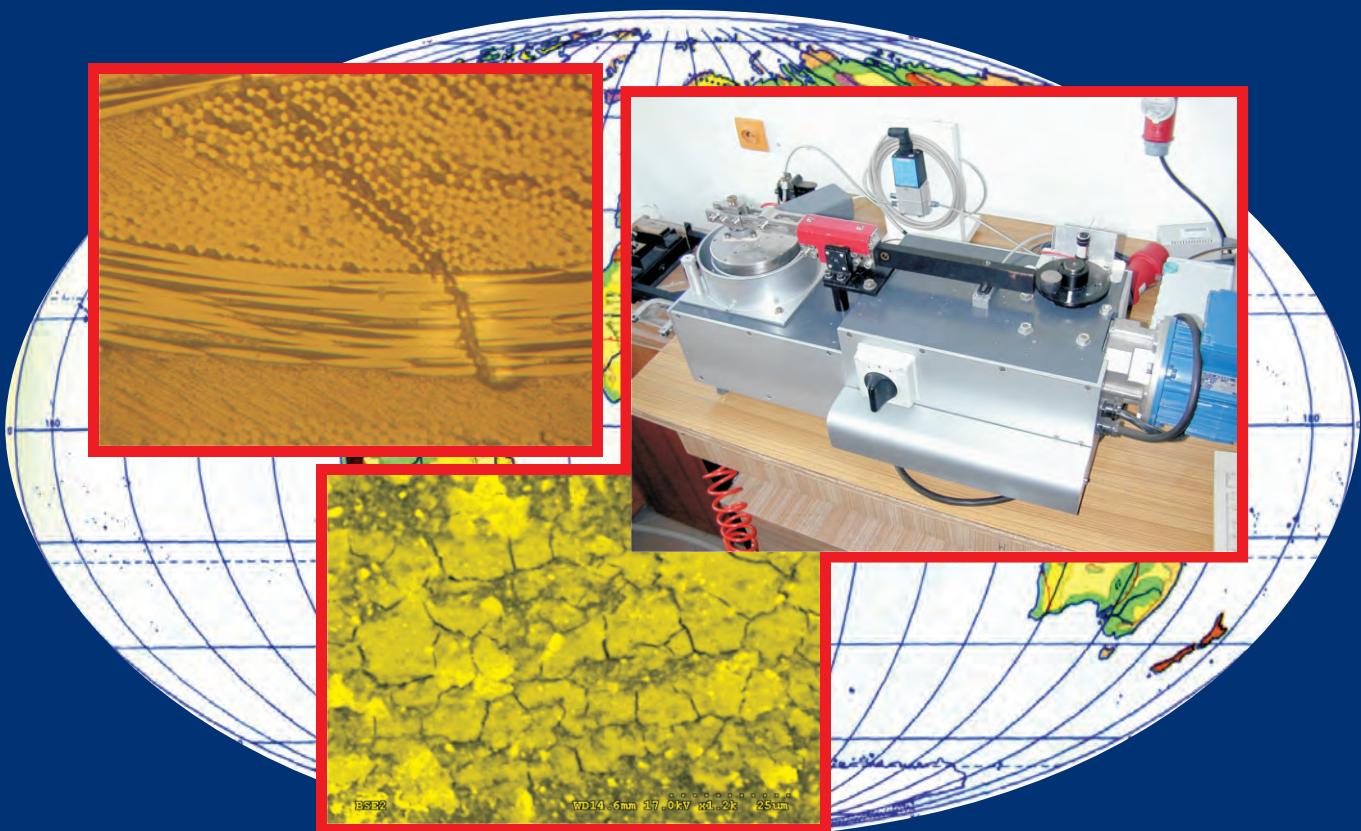


# EKSPLOATACJA I NIEZAWODNOŚĆ MAINTENANCE AND RELIABILITY



**Polskie Naukowo-Techniczne  
Towarzystwo Eksplotacyjne (Warszawa)**

**POLISH MAINTENANCE SOCIETY (WARSAW)**

# Scientific Board

**Professor Andrzej Niewczas, PhD, DSc (Eng)**

*Chair of Scientific Board*

*President of the Board of the Polish Maintenance Society*

**Professor Holm Altenbach, PhD, DSc (Eng)**

*Martin Luther Universität, Halle - Wittenberg, Germany*

**Senior Brig. Gen. Professor Zofia Bednarek, PhD, DSc (Eng)**

*The Main School of Fire Service, Warsaw*

**Associate Professor Jan Dąbrowski, PhD, DSc (Eng)**

*Białystok Technical University, Białystok*

**Professor Sławczko Denczew, PhD, DSc (Eng)**

*Warsaw University of Technology, School of  
Technical and Social Sciences in Płock*

**Professor Mirosław P. Wnuk**

*University of Wisconsin - Milwaukee, USA*

**Professor Andrzej Kusz, PhD, DSc (Eng)**

*University of Life Sciences in Lublin*

**Professor Štefan Liščák**

*Žilinska Universita, Žilina, Slovak Republic*

**Professor Václav Legat**

*Czech University of Agriculture, Prague, Czech Republic*

**Professor Jerzy Merkisz, PhD, DSc (Eng)**

*Poznań University of Technology, Poznań*

**Professor Gilbert De Mey**

*University of Ghent, Belgium*

**Associate Professor Zdzisław Chłopek, PhD, DSc (Eng)**

*Warsaw University of Technology, Warsaw*

**Dr Ilia Frenkel**

*Shamoon College of Engineering, Beer Sheva, Israel*

**Associate Professor Tomasz Nowakowski, PhD, DSc (Eng)**

*Wrocław University of Technology, Wrocław*

**Professor Leonas Povilas Lingaitis**

*Vilnius Gediminas Technical University, Vilnius, Lithuania*

**Professor Stanisław Radkowski, PhD, DSc (Eng)**

*Warsaw University of Technology, Warsaw*

**Professor Marek Orkisz, PhD, DSc (Eng)**

*Rzeszów University of Technology, Rzeszów*

**Professor Stanisław Piasecki, PhD, DSc (Eng)**

*Systems Research Institute of the Polish Academy of  
Sciences, Warsaw*

**Professor Leszek Piaseczny, PhD, DSc (Eng)**

*Polish Naval Academy, Gdynia*

**Professor Andrzej Seweryn, PhD, DSc (Eng)**

*Białystok Technical University, Białystok*

**Professor Zbigniew Smalko, PhD, DSc (Eng)**

*Air Force Institute of Technology, Warsaw*

**Professor Andrzej Sobiesiak**

*University of Windsor, Canada*

**Professor Marian Szczęrek, PhD, DSc (Eng)**

*Institute for Sustainable Technologies, Radom*

**Professor Katsumi Tanaka**

*Kyoto University, Kyoto, Japan*

**Professor Jan Szybka, PhD, DSc (Eng)**

*AGH University of Science and Technology, Cracow*

**Professor Irina Yatskiv**

*Riga Transport and Telecommunication Institute, Latvia*

## Co-financed by the Minister of Science and Higher Education

The Journal is indexed and abstracted in the Journal Citation Reports (JCR Science Edition), Scopus, Science Citation Index Expanded (SciSearch®) and Index Copernicus International.

The Quarterly appears on the list of journals credited with a high impact factor by the Polish Ministry of Science and Higher Education and is indexed in the Polish Technical Journal Contents database – BAZTECH and the database of the Digital Library Federation.

All the scientific articles have received two positive reviews from independent reviewers.

<b>Editorial staff:</b>	Dariusz Mazurkiewicz, PhD Eng (Editor-in-Chief, Secretary of the Scientific Board) Anna Rudawska, PhD Eng (Editorial secretary) Leszek Semotiuk, PhD Eng (Typesetting and text makeup) Krzysztof Olszewski, PhD Eng (Webmaster)
<b>Publisher:</b>	Polish Maintenance Society, Warsaw
<b>Scientific patronage:</b>	Polish Academy of Sciences Branch in Lublin
<b>Address for correspondence:</b>	"Eksplotacja i Niezawodność" - Editorial Office 20-618 Lublin, ul. Nadbystrzycka 36, Poland e-mail: office@ein.org.pl <a href="http://www.ein.org.pl">http://www.ein.org.pl</a>
<b>Circulation:</b>	550 copies

## SPIS TREŚCI - CONTENTS

---

### Nauka i Technika

Joanna MYSTKOWSKA, Jan R. DĄBROWSKI

**Charakterystyki tribologiczne układu kinematycznego zębów – materiał kompozytowy na stałe wypełnienia stomatologiczne**

**Tribological characteristics of the kinematics couple: tooth – composite material for permanent dental fillings .....** 4

Jerzy JÓZWIK, Paweł PIEŠKO, Grzegorz KRAJEWSKI

**Ocena testu QC10 do kontroli off-line obrabiarek sterowanych numerycznie CNC**

**Evaluation of QC10 ballbar diagnostics method for CNC machine.....** 10

Marius BABAN, Calin Florin BABAN, Florin Sandu BLAGA

**Planowanie obsługi narzędzi do obróbki plastycznej na zimno z wykorzystaniem logiki rozmytej**

**Maintenance planning of cold plastic deformation tools using fuzzy logic.....** 21

Henryka JORMAKKA, Pekka KOPONEN, Heimo PENTIKÄINEN, Hanna BARTOSZEWICZ-BURCZY

**Ataki fizyczne i elektroniczne na systemy energetyczne - identyfikacja zagrożeń i wymagania w celu przeciwdziałania im**

**On managing physical and cyber threats to energy systems identification and countermeasure requirements .....** 27

Dariusz MAZURKIEWICZ

**Badania wydłużalności i wytrzymałości złącz klejonych w aspekcie opracowania komputerowego systemu monitorowania ich stanu w czasie pracy przenośnika taśmowego**

**Tests of extendability and strength of adhesive-sealed joints in the context of developing a computer system for monitoring the condition of belt joints during conveyor operation.....** 34

Gediminas VAIČIŪNAS, Leonas Povilas LINGAITIS

**Wpływ krzywizn linii kolejowej na zużycie smarowanych i niesmarowanych obrzeży kół**

**The influence of railroad curves on the wear of lubricated and unlubricated wheel flanges .....** 40

Martin PEXA, Josef POŠTA, Zdeněk ALEŠ, Bohuslav PETERKA

**Pomiar momentu bezwładności silnika pojazdu**

**Moment of inertia measurement of vehicle engine .....** 44

Rafał RUSINEK

**Drgania w procesie skrawania stopu tytanu**

**Vibrations in cutting process of titanium alloy .....** 48

Rafał CHATYS, Zbigniew SKROBACKI

**Zastosowanie metody Browna do prognozowania zniszczenia kompozytu warstwowego**

**Applying the Brown method to forecast the failure of a laminate composite .....** 56

Zoja BEDNAREK, Paweł OGRODNIK, Daniel PIENIAK

**Laboratoryjna metoda oceny wpływu wysokich temperatur na parametry eksploatacyjne systemów połączeń żelbetowych**

**Laboratory method of evaluation of influence high temperatures on maintenance parameters of the reinforced concrete systems compounds.....** 67

Jianmin ZHAO, Mingjian ZUO

**Niezawodność szeregowych układów F: typu "k z n" przy uszkodzonych elementach składowych**

**Reliability of consecutive  $k$  out  $n:F$  systems with failed components.....** 79

Anna BURDUK

**Próba adaptacji szeregowych struktur niezawodnościowych do analizy i oceny ryzyka systemów produkcyjnych**

**An attempt to adapt serial reliability structures for the needs of analyses and assessments of the risk in production systems .....** 85

MYSTKOWSKA J., DĄBROWSKI J. R.: **Charakterystyki tribologiczne układu kinematycznego ząb – materiał kompozytowy na stałe wypełnienia stomatologiczne**; Eksplotacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability 2010; 3: 4-9.

W pracy przedstawiono charakterystyki tribologiczne układu kinematycznego ząb – materiał kompozytowy na stałe wypełnienia stomatologiczne. Badaniami poddano własne kompozyty zawierające źródła fluoru, nanokrzemionkę oraz modyfikator tarcia w postaci proszku polietylenu. Badania przeprowadzono przy użyciu specjalnie skonstruowanego testera tarcia zębów typu pin-on-disc w środowisku roztworu o pH śliny. Oceniano wpływ całkowitego obciążenia na współczynnik tarcia zaprojektowanych materiałów kompozytowych oraz zużycie liniowe badanych kompozytów i zużycie objętościowe tkanek zęba. Przeprowadzono obserwacje mikroskopowe struktur materiałów kompozytowych po badaniach tarciowych.

JÓZWIK J., PIEŚKO P., KRAJEWSKI G.: **Ocena testu QC10 do kontroli off-line obrabiarek sterowanych numerycznie CNC**; Eksplotacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability 2010; 3: 10-20.

W pracy przedstawiono wyniki badań diagnostycznych obrabiarek CNC. Dokonano analizy wybranych błędów obrabiarki CNC identyfikowanych za pomocą pręta teleskopowo kulowego. Ocenie jakościowej poddano typowe odchyłki geometryczne, takie jak: odchyłkę okrągłość, odchyłkę prostopadłości osi, odchyłkę okresową. W trakcie pomiarów wyznaczono ponadto błąd nawrotu i luz zwrotny w badanej osi. Wskazano na zalety oraz wady szybkiego testu QC10. Omówiono przyczyny powstawania badanych błędów oraz wskazano podstawowe sposoby ich minimalizacji. Uzyskane wyniki badań przedstawiono w postaci wykresów i tabel.

BABAN M., BABAN C. F., BLAGA F. S.: **Planowanie obsługi narzędzi do obróbki plastycznej na zimno z wykorzystaniem logiki rozmytej**; Eksplotacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability 2010; 3: 21-26.

W przypadku systemów technicznych, na ogół cechujących się dużą złożonością, ich otwartość można wykorzystać do poprawy niezawodności systemu stosując odnawianie profilaktyczne. Skuteczne zwiększenie niezawodności złożonych narzędzi do obróbki plastycznej na zimno zależy w znacznym stopniu od charakterystyki czynności obsługowych, dlatego też w strategiach odnowy powszechnie stosuje się odnawianie profilaktyczne. W pracy omówiono podejście do planowania obsługi wykorzystujące logikę rozmytą, które można stosować w przypadkach, gdy analityczne wyprowadzenie funkcji niezawodności jest niemożliwe. Przedstawiono oparty na logice rozmytej proces decyzyjny w zakresie planowania czynności obsługowych omawianych narzędzi. Jego zastosowanie zilustrowano w studium przypadku. Wyniki studium przypadku pokazują, że logika rozmyta jest metodą, która może być z powodzeniem stosowana w planowaniu obsługi narzędzi do obróbki plastycznej na zimno.

JORMAKKA H., KOPONEN P., PENTIKÄINEN H., BARTOSZEWCZ-BURCZY H.: **Ataki fizyczne i elektroniczne na systemy energetyczne - identyfikacja zagrożeń i wymagania w celu przeciwdziałania im**; Eksplotacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability 2010; 3: 27-33.

Centra dyspozycji i sterowania systemami energetycznymi narażone są na różnego typu niebezpieczeństwa. Należą do nich między innymi kleski żywiołowe, ataki hakerów, czy terrorystów, a także niezamierzone błędy popełniane przez personel. Artykuł przedstawia metody zapobiegające tym zagrożeniom. Proponuje protokół mogący posłużyć do wykrycia braków w zabezpieczeniu przed zagrożeniami, jak i do oceny stanu bezpieczeństwa systemów energetycznych. Pod uwagę brane są zarówno zagrożenia fizyczne, jak i ataki elektroniczne.

MAZURKIEWICZ D.: **Badania wydłużalności i wytrzymałości złącz klejonych w aspekcie opracowania komputerowego systemu monitorowania ich stanu w czasie pracy przenośnika taśmowego**; Eksplotacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability 2010; 3: 34-39.

Artykuł prezentuje wyniki przeprowadzonych badań laboratoryjnych wydłużalności i wytrzymałości typowych złącz klejonych taśm przenośnikowych. Celem badań było poznanie parametrów wytrzymałościowych złącz w celu określenia wytycznych dla projektowanego układu monitorującego, którego zadaniem będzie przeciwdziałanie nieprzewidzianemu zerwaniu taśmy w obszarze każdego złącza wykonanego na trasie przenośnika taśmowego. Do badań laboratoryjnych wykorzystano typowe złącze wykonane i eksplotowane w kopalni Lubelski Węgiel „Bogdanka” S.A.

VAIČIŪNAS G., LINGAITISL. P.: **Wpływ krzywizn linii kolejowej na zużycie smarowanych i niesmarowanych obrzeży kół**; Eksplotacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability 2010; 3: 40-43.

W artykule omówiono konieczność wyznaczania stanu lokomotywnych zestawów kołowych i jego zmian. Przedmiotem badań jest obrzeże koła lokomotyw. Bezpieczny ruch kolejowy w dużej mierze zależy od niezawodności zestawu kołowego lokomotyw. W przedstawionej pracy skonstruowano złożony model ścierania obrzeża koła lokomotyw dla niesmarowanych i smarowanych obrzeży kół. Model ten uwzględnia przebieg lokomotyw i promień krzywizny.

MYSTKOWSKA J., DĄBROWSKI J. R.: **Tribological characteristics of the kinematics couple: tooth – composite material for permanent dental fillings**; Eksplotacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability 2010; 3: 4-9.

The paper presents a tribological characteristics of the kinematics couple: tooth – composite material for permanent dental fillings. Two original composites containing fluorine sources, nanosilica and a friction modifier in the form of polyethylene powder were investigated. The wear tests were carried out in a special solution of saliva pH using a special pin-on-disc tribotester. The impact of total load on the friction coefficient of designed composite materials and linear wear of both the analyzed materials and volume wear of the tooth samples were evaluated. The composites' friction surface including wear particles was examined by SEM.

JÓZWIK J., PIEŚKO P., KRAJEWSKI G.: **Evaluation of QC10 ballbar diagnostics method for CNC machine**; Eksplotacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability 2010; 3: 10-20.

This paper presents results of CNC machine tool testing. Analyses of error were performed with ballbar method. This method allowed to investigate geometric errors as circularity, squareness, straightness as well as reversal spikes and backlash. Evaluated errors were discussed and compensation procedures were proposed. Obtained results were described in tables and figures.

BABAN M., BABAN C. F., BLAGA F. S.: **Maintenance planning of cold plastic deformation tools using fuzzy logic**; Eksplotacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability 2010; 3: 21-26.

For technical systems, generally of high complexity, their open feature may be employed to improve system reliability by preventive renewal. The effectiveness of increasing complex cold plastic deformation tools depends considerably on the characteristics of their maintenance actions and renewal policies are widely used to carry out the preventive renewal. If the derivation of an analytical reliability function is impossible, a fuzzy logic approach for maintenance planning is emphasized in this paper. The fuzzy logic decision process for planning the maintenance activities of these tools is presented and a case study illustrates its application. The results of the case study demonstrate that fuzzy logic is a method which can be successfully used in maintenance planning of cold plastic deformation tools.

JORMAKKA H., KOPONEN P., PENTIKÄINEN H., BARTOSZEWCZ-BURCZY H.: **On managing physical and cyber threats to energy systems identification and countermeasure requirements**; Eksplotacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability 2010; 3: 27-33.

Control centers of energy systems are subjects to different kind of threats such as natural disasters, hackers, or terrorist attacks, or finally unintentional personnel errors. The article introduces some protection methods against those threats. It proposes a protocol to be used for routine self-assessment to provide companies with feedback on the effectiveness of their security policy. The protocol can be used as well during security audits for detection of energy systems infrastructure vulnerabilities. Both, physical and cyber attacks are taken into consideration.

MAZURKIEWICZ D.: **Tests of extendability and strength of adhesive-sealed joints in the context of developing a computer system for monitoring the condition of belt joints during conveyor operation**; Eksplotacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability 2010; 3: 34-39.

The paper presents the results of the laboratory tests conducted on the physical elongation and strength of typical adhesive-sealed joints of conveyor belts. The tests were aimed at examining the strength parameters of the joints to define some guidelines for a monitoring system designed to prevent unpredicted belt ruptures in the area of each joint occurring throughout the belt conveyor route. In the laboratory, typical joints were tested as manufactured and as used in the Lubelski Węgiel „Bogdanka” S. A. coal mine.

VAIČIŪNAS G., LINGAITISL. P.: **The influence of railroad curves on the wear of lubricated and unlubricated wheel flanges**; Eksplotacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability 2010; 3: 40-43.

Therefore, the condition of the locomotive wheelsets and its variations should be determined. Research object is the locomotive wheel flange. Safe railway traffic largely depends on the locomotive wheelset reliability. A complex model of the locomotive wheel flange abrasion, taking into account the locomotive run and curve radius, was constructed for unlubricated and lubricated wheel flanges.

PEXA M., POŠTA J., ALEŠ Z., PETERKA B.: **Pomiar momentu bezwładności silnika pojazdu**; Eksplotacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability 2010; 3: 44-47.

Coral częściej do pomiaru parametrów eksploracyjnych pojazdów drogowych wykorzystuje się metody dynamiczne, które stawiają niskie wymagania co do czasu i nakładów pieniężnych. Dynamiczny pomiar parametrów pracy silnika na ogół opiera się na znajomości masowego momentu bezwładności silnika i mechanizmów przekładniowych, włączając w to kola napędowe. Jednakże otrzymanie wskazania odpowiedniego momentu bezwładności nie jest rzeczą prostą. W pracy opisano nową propozycję możliwości pomiaru przeprowadzanego na stanowisku badawczym wyposażonym w luźno osadzone walki. Wynikiem pomiaru jest moment bezwładności, którego znajomość możemy wykorzystać do pomiaru parametrów eksploracyjnych, wydajności hamulców, itd.

RUSINEK R.: **Drgania w procesie skrawania stopu tytanu**; Eksplotacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability 2010; 3: 48-55.

Praca przedstawia wyniki badań eksperymentalnych procesu skrawania stopu tytanu Ti6Al4V. W eksperymencji mierzono siły skrawania oraz przemieszczenia przedmiotu obrabianego podczas skrawania z różnych głębokościami. Następnie, zarejestrowane sygnały przeanalizowano metodą współrzędnych opóźnionych, stosowaną do badania zjawisk nieliniowych, otrzymując mapy Poincaré i wykresy rekurencyjne. Wyniki tych badań pozwoliły na identyfikację rodzaju drgan i dobór odpowiednich parametrów skrawania. W ostatniej części pracy wyniki badań skrawania stopu tytanu porównano z wynikami otrzymanymi dla klasycznej i kwasoodpornej stali.

CHATYS R., SKROBACKI Z.: **Zastosowanie metody Browna do prognozowania zniszczenia kompozytu warstwowego**; Eksplotacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability 2010; 3: 56-66.

Przeprowadzono badania wytrzymałościowe polegające na rozciąganiu ze stałą prędkością  $\dot{\epsilon}$  do momentu zniszczenia trzydziestu próbek kompozytu warstwowego wzmacnionego włóknem szklanym, formowanego metodą RTM. Dane empiryczne charakteryzowały się dużym rozrzutem, co wymagało wykonania analizy statystycznej. Dla uzyskanych danych zaproponowano metodę umożliwiającą wyznaczenie prognozy naprężeń niszczących próbki. Prognoza powstaje w oparciu o analizę relacji empirycznej pomiędzy odkształceniem a naprężeniem w stanach poprzedzających zniszczenie próbki z zastosowaniem metody Browna.

BEDNAREK Z., OGRODNIK P., PIENIAK D.: **Laboratoryjna metoda oceny wpływu wysokich temperatur na parametry eksploracyjne systemów połączeń żelbetowych**; Eksplotacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability 2010; 3: 67-78.

Artykuł prezentuje wyniki badań wpływu temperatur występujących podczas pożaru na przyczepność stali do betonu oraz oszacowanie tego wpływu na spadek przyczepności pomiędzy stalą zbrojeniową i betonem, w warunkach pożaru oraz po przebytym pożarze. W pracy przedstawiono wyniki badań przyczepności stali gładkiej St3S oraz żebrowanej 18G2 do betonu C16/20 i C40/50 w warunkach popożarowych oraz w trakcie trwania pożaru. We wszystkich przebadanych przypadkach stwierdzono znaczący spadek przyczepności betonu do stali zbrojeniowej na skutek oddziaływanego temperatur pożarowych. Przebadano również wpływ wytrzymałości betonu oraz gatunku stali (gładka, żebrowana) na spadek przyczepności w temperaturach pożarowych. Udowodniono, że występują istotne różnice przy badaniu przyczepności po pożarze oraz podczas trwania pożaru, które świadczą o częściowym nawrocie przyczepności. Przedmiot badań jest ściśle związany z bezpieczeństwem konstrukcji budowlanych w czasie trwania pożaru, jak i z oceną ich dalszego użytkowania po przebytym pożarze.

ZHAO J., ZUO M. J.: **Niezawodność szeregowych układów F: typu "k z n" przy uszkodzonych elementach składowych**; Eksplotacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability 2010; 3: 79-84.

W artykule opracowano model analizy niezawodności szeregowych układów F: typu „k z n” uwarunkowany identyfikacją kilku uszkodzonych elementów w systemie. W przedstawionym modelu, system zostaje podzielony na kilka podsystemów według granic wyznaczanych przez następujące po sobie uszkodzone elementy składowe. Najpierw formułuje się niezawodność podsystemów, a model niezawodności systemu otrzymuje się analizując relacje pomiędzy podsystemami a systemem jako całością. W artykule rozważano przypadki układów liniowych i kołowych. Zastosowanie proponowanego modelu zilustrowano przykładem.

BURDUK A.: **Próba adaptacji szeregowych struktur niezawodnościowych do analizy i oceny ryzyka systemów produkcyjnych**; Eksplotacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability 2010; 3: 85-96.

Ryzyko towarzyszy każdej działalności gospodarczej. Wielkość zakłóceń przebiegu procesu produkcyjnego, spowodowanych występowaniem czynników ryzyka, bardzo mocno wpływa na parametry i całościowe wyniki systemów produkcyjnych. Niestety bardzo rzadko dokonuje się analizy i oceny ryzyka procesu produkcyjnego na poziomie operacyjnym. Być może spowodowane jest to niezbyt przydatnymi w rzeczywistości produkcyjnej metodami ilościowymi proponowanymi przez literaturę. W odpowiedzi na ten stan rzeczy w pracy zdefiniowano system produkcyjny zgodnie z teorią systemów, natomiast ryzyko jako synonim zawodności. Artykuł prezentuje metodę wyznaczania ryzyka dla systemu produkcyjnego o strukturze szeregowej, która została zweryfikowana na przykładzie praktycznym.

PEXA M., POŠTA J., ALEŠ Z., PETERKA B.: **Moment of inertia measurement of vehicle engine**; Eksplotacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability 2010; 3: 44-47.

The use of dynamic methods for measuring operational parameters of road vehicles begins to increase due to its low demands on time and investment funds. Dynamic measurement of engine performance parameters are generally based on knowledge of the rotating mass moment of inertia of engine and gearing mechanisms including driving wheels. However, it is difficult to obtain an indication of the correct moment of inertia. This paper describes a newly proposed possibility of measurement that is carried on roll test bed with loose rollers. The result of measurement is the moment of inertia, which can also be used in the measurement of performance parameters, brake performance, etc.

RUSINEK R.: **Vibrations in cutting process of titanium alloy**; Eksplotacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability 2010; 3: 48-55.

This work presents experimental investigations of cutting process in which the titanium alloy (Ti6Al4V) is cut. During the experiment the cutting forces and displacements of the workpiece are measured as a function of the cutting depth. The obtained signals are analysed using methods useful for nonlinear phenomena that is the method of delay coordinates, Poincaré maps and recurrence plots. The results let us identify kind of vibrations and select the most proper cutting parameter. Finally, the results of titanium alloy cutting are compared with outcomes of classical and stainless steel machining.

CHATYS R., SKROBACKI Z.: **Applying the Brown method to forecast the failure of a laminate composite**; Eksplotacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability 2010; 3: 56-66.

A fiberglass-reinforced laminate composite material formed by resin transfer molding (RTM) was tested for tensile strength. Thirty samples were stretched with a constant velocity until they failed. As there was a large scatter of empirical data, a statistical analysis was performed. The data were used to forecast stresses that lead to the material failure. The forecast was based on the stress-strain relationship immediately before failure. The forecasting involved simple exponential smoothing using the Brown method.

BEDNAREK Z., OGRODNIK P., PIENIAK D.: **Laboratory method of evaluation of influence high temperatures on maintenance parameters of the reinforced concrete systems compounds**; Eksplotacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability 2010; 3: 67-78.

The paper presents results from the research on fire temperature influence on steel-concrete bond and on the bond reduction for both in-fire status and after-fire status. In the paper has been described bond test and results for materials St3S (smooth), 18G2 (ribbed) reinforcement steel and C16/20, C40/50 concreter, both for in the fire and after-fire conditons. A significant reduction of steel-concrete bond was found as the result of fire temperature. Influence of concrete strength and of rebar type (smooth, ribbed) on the bond reduction in fire temperatures was tested. It was proven that significant bond property differences exist between in-fire tests and after-fire tests, which evidence that the bond is regained partially after the fire exposure. The research subject is closely related to the in-fire construction structures safety as well as with the after-fire construction structures usability evalution.

ZHAO J., ZUO M. J.: **Reliability of consecutive k out n:F systems with failed components**; Eksplotacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability 2010; 3: 79-84.

In this paper, a model is developed for analysing the reliability of consecutive k out n:F systems under the condition that several failed components are identified in the system. The system then is partitioned into a number of subsystems by the consecutive failed components. The subsystem reliability is formulated first and the model of system reliability is obtained by analysing the relationship between the subsystems and the system. Both linear and circular cases are considered. An example is given to illustrate the operation of the proposed model.

BURDUK A.: **An attempt to adapt serial reliability structures for the needs of analyses and assessments of the risk in production systems**; Eksplotacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability 2010; 3: 85-96.

Each business activity is accompanied by a risk. The extent of the production process disturbances caused by the presence of risk factors strongly affects the parameters and overall performance of production systems. Unfortunately, analyses and assessments of the risk in production processes are carried out very rarely at the operational level. This may be caused by the fact that quantitative methods proposed by the literature are not very useful in production practice. In response to this state of affairs, the concept of production system was defined in this study in accordance with the theory of systems, while the risk was treated as a synonym of unreliability. This paper presents a method of determining the risk for a production system with a serial structure, which was verified on a practical example.

# NAUKA I TECHNIKA

Joanna MYSTKOWSKA  
Jan R. DĄBROWSKI

## CHARAKTERYSTYKI TRIBOLOGICZNE UKŁADU KINEMATYCZNEGO ZĄB – MATERIAŁ KOMPOZYTOWY NA STAŁE WYPEŁNIENIA STOMATOLOGICZNE

### TRIBOLOGICAL CHARACTERISTICS OF THE KINEMATICS COUPLE: TOOTH – COMPOSITE MATERIAL FOR PERMANENT DENTAL FILLINGS

*W pracy przedstawiono charakterystyki tribologiczne układu kinematycznego ząb – materiał kompozytowy na stałe wypełnienia stomatologiczne. Badaniom poddano własne kompozyty zawierające źródła fluoru, nanokrzemionkę oraz modyfikator tarcia w postaci proszku polietylenu. Badania przeprowadzono przy użyciu specjalnie skonstruowanego testera tarcia zębów typu pin-on-disc w środowisku roztworu o pH śliny. Oceniano wpływ całkowitego obciążenia na współczynnik tarcia zaprojektowanych materiałów kompozytowych oraz zużycie liniowe badanych kompozytów i zużycie objętościowe tkanek zęba. Przeprowadzono obserwacje mikroskopowe struktury materiałów kompozytowych po badaniach tarcioowych.*

**Slowa kluczowe:** tarcie, zużycie, zęby, kompozyty stomatologiczne.

*The paper presents a tribological characteristics of the kinematics couple: tooth - composite material for permanent dental fillings. Two original composites containing fluorine sources, nanosilica and a friction modifier in the form of polyethylene powder were investigated. The wear tests were carried out in a special solution of saliva pH using a special pin-on-disc tribotester. The impact of total load on the friction coefficient of designed composite materials and linear wear of both the analyzed materials and volume wear of the tooth samples were evaluated. The composites' friction surface including wear particles was examined by SEM.*

**Keywords:** friction, wear, teeth, dental composites.

#### 1. Wprowadzenie

Zużycie materiałów stomatologicznych jest jedną z głównych wad niemalże każdego rodzaju wypełnienia [7, 8]. Prowadzi się liczne badania w kierunku otrzymania nowych, o lepszych właściwościach tribologicznych materiałów stomatologicznych [6]. Z uwagi na szeroką możliwość modyfikacji składu chemicznego, największe nadzieję związkane z otrzymaniem takiego materiału pokładane są w kompozytowych materiałach na stałe wypełnienia stomatologiczne [2, 11]. Podczas projektowania nowych kompozytów stomatologicznych bierze się pod uwagę uzyskanie kompozytów o niskim współczynniku tarcia i małym zużyciu, a jednocześnie wykazujących minimalny wpływ na zużycie przeciwstawnych tkanek zęba. W celu obniżenia zużycia i współczynnika tarcia materiałów stomatologicznych, intensywnie modyfikuje się skład stosowanych napełniaczy [5, 13]. Znaczna poprawa w tym kierunku może być uzyskana wskutek zastosowania odpowiedniego napełniacza, zwanego modyfikatorem tarcia. Najnowsze doniesienia literaturowe wskazują

#### 1. Introduction

The wear of dental materials is one of the major defects involving almost every type of dental filling [7, 8]. In recent years, considerable efforts have been made to develop innovative dental fillings possessing superior tribological characteristics [6]. The best way to develop such materials is to use composites because of wide possibility of chemical composition modification [2, 11]. Thus, intensive research is being carried out to find such composite materials for dental fillings that would guarantee both little friction and wear of composite materials in contact with counter sample and simultaneously the minimal influence on wear of antagonistic teeth. To reduce the friction and wear coefficients of dental materials, the composition of applied fillers is greatly modified [5, 13]. A marked improvement of the tribological properties of a material can be obtained by using an appropriate filler, called friction modifier. The latest literature data point to a significant influence of nanoparticles on the structure and properties of composite mate-

także na istotny wpływ nanocząstek na strukturę i właściwości użytkowe kompozytu. W porównaniu do powszechnie stosowanych makro- i mikrocząstek, nanocząstki cechują się równomiernym rozproszeniem w żywicy w skali nano. Dzięki temu nanokompozyty charakteryzuje większa twardość i odporność na zużycie [4]. W przypadku kompozytów stomatologicznych wykorzystywanym nanoproszkiem jest głównie silanizowana nanokrzemionka. Stosowana obok powszechnie używanych napełniaczy proszkowych wpływa na obniżenie współczynnika tarcia i zużycie materiału [14]. Ocenę charakterystyk tribologicznych materiałów stomatologicznych przeprowadza się na specjalnie skonstruowanych symulatorach tarcia [1, 3] przy zastosowaniu różnych materiałów przeciwwrótki [12, 16].

Celem niniejszej pracy było porównanie właściwości tribologicznych dwóch własnych materiałów kompozytowych na stałe wypełnienia stomatologiczne z uwzględnieniem ich wpływu na zużycie tkanek zębów.

## 2. Materiały i metody badań

W niniejszej pracy przetestowano pod względem tribologicznym dwa kompozyty ceramiczno-polimerowe. Każdy z kompozytów składał się z osnowy organicznej, którą stanowiła mieszanina żywicy Bis-GMA (bisphenol A polyethylene glycol diether dimethacrylate), TEGDMA (triethylene glycol dimethacrylate) i DEA-EMA (diethylaminoethyl methacrylate) oraz system fotoinicjatorów i stabilizatorów. Do osnowy organicznej wprowadzono napełniacze proszkowe w postaci źródeł fluoru (fluorowane szkło o symbolu J-20, fluorek iterbu  $\text{YbF}_3$  i fluorek strontu  $\text{SrF}_2$ ), nanokrzemionka ( $n\text{-SiO}_2$ ) oraz modyfikator tarcia – polietylen (PE). Napełniacze poddane były zabiegowi silanizacji w roztworze środka silanizującego. Zabieg polegał na nanoszeniu aktywnych grup silanowych na powierzchnię cząstek napełniacza w wyparce próżniowej. Głównym zadaniem tych grup jest łączenie nieorganicznego proszku z organiczną bazą polimerową.

Po procesie homogenizacji materiałów, kompozyty utwardzano w formach z PTFE - poli(tetrafluoroetylenu) w czasie 40 sekund. Badane materiały oznaczono symbolami KW1 i KW2, a ich skład przedstawiono w tab. 1.

Badania tarciowe przeprowadzono na specjalnie skonstruowanym symulatorze tarcia zębów. Widok urządzenia z zaznaczonym węzłem tarcia przedstawia rys. 1a. Jest to pneumatycznie sterowany tester tribologiczny typu pin-on-disc. Urządzenie to wprowadza ruch postępowo-zwrotny i obciążenia cykliczne działające na badaną próbkę [10]. Zastosowano następujące parametry tarcia: obciążenie – 20 MPa; czas tarcia pojedynczej próby każdego kompozytu – 5 godz., częstotliwość ruchu próbki: 1.5 Hz, droga tarcia odniesiona do kompozytu: 2.5 mm. Dobór parametrów tarcia miała na celu odzworowanie warunków tarcia panujących w jamie ustnej. Przebadano po 6 próbek każdego kompozytu.

Tab. 1. Skład materiałów kompozytowych  
Tab. 1. Composition of the materials

Symbol materiału Materials' symbol	Zawartość składników, [%obj.] / Component content, [vol.%]					
	Osnowa organiczna Organic matrix	Szkło J-20 J-20 glass	$\text{YbF}_3$	$\text{SrF}_2$	$n\text{-SiO}_2$	PE
KW1	40	40	10	-	7	3
KW2	40	40	-	10	7	3

rials. In contrast to commonly used macro- and microparticles, nanoparticles are characterized by uniform dispersion in resin at nano scale. As a result, nanocomposites show higher hardness and wear resistance [4]. In the case of dental composites, the preferred nanopowder is silanated nanosilica. Used along with common powder fillers, it significantly decreases the friction coefficient and material wear [14]. The evaluation of tribological characteristics of dental fillings on special friction simulators is provided [1, 3] using different counter sample's material [12, 16].

The aim of this study is to compare the tribological properties of two original composite materials for dental fillings composed of two different fluorine sources and analyze their impact on the wear of teeth enamel.

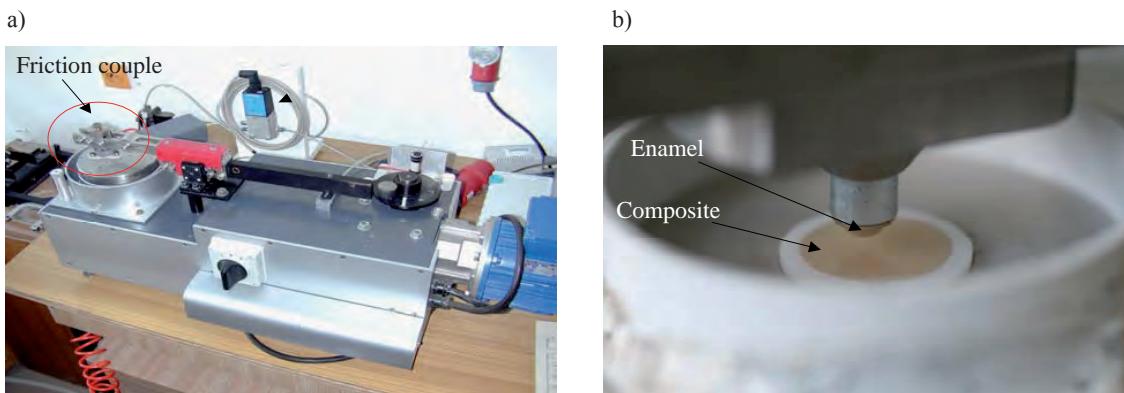
## 2. Materials and research methods

In this work two ceramic-polymer composites were tribologically tested. Each composite consisted of a polymer matrix in which the mixture of the following organic resins was used: Bis-GMA (bisphenol A polyethylene glycol diether dimethacrylate), TEGDMA (triethylene glycol dimethacrylate), DEA-EMA (diethylaminoethyl methacrylate) and a system of photoinitiators and stabilizers. Into organic matrix the powder fillers in form of fluorine sources (fluoridated glass with J-20 symbol, ytterbium fluoride  $\text{YbF}_3$  and strontium fluoride  $\text{SrF}_2$ ), nanosilica ( $n\text{-SiO}_2$ ) and friction modifier – polyethylene (PE). The other part of the composite was a mixture of inorganic powders: fluorine sources and friction modifiers. The surface of all inorganic fillers was treated with functional silane. The aim of the silanization process is to absorb active silane groups on powder surface at vacuum evaporator. After the silanisation process reactive silane is combined with inorganic filler and can co-polymerize with the polymer network.

All constituents were weighed into a porcelain mortar and precisely mixed until uniform polymer paste was obtained. The paste was placed into cylindrical PTFE - polytetrafluoroethylene molds and subjected to hardening for 40 seconds. The composition of the materials marked with symbols KW1 and KW2 is presented in tab. 1.

Tribological tests were conducted on special teeth wear simulator. The tribological tester picture with friction couple is presented in fig. 1a. It is a special pneumatic-controlled pin-on-disc tribological tester.

The device exerted progressive-returnable motion and cyclic loads on the material's surface [10]. The following process parameters were used: load – 20 MPa; friction time of each composite sample test – 5 hours, frequency of sample motion – 1.5 Hz, composite friction path – 2.5 mm. The parameters simulated natural oral cavity friction conditions. Six samples of each material were evaluated.



Rys. 1. Widok symulatora tarcia (a) i węzła tarcia (b)

Fig. 1. Friction tester (a) and friction couple (b)

Węzeł tarcia, którego widok szczegółowy prezentuje rys. 1b, składał się z próbki i przeciwwybki. Próbką w eksperymencie były wytworzone kompozyty ceramiczno-polimerowe, zaś przeciwprobką stanowiło szkliwo ludzkie osadzone w aluminiowej oprawie. Próbki szkliwa wycinano z zębów trzonowych i przedtrzonowych, usuniętych ze względów ortodontycznych. Proces tarcia wykonano w środowisku roztworu o pH = 6,8, odpowiadającym pH śliny.

Badania tribologiczne pozwalają oszacować współczynnik tarcia i ocenić zużycie liniowe badanych materiałów oraz zużycie objętościowe tkanek zębów przeciwwstawnych (szkliwa).

Zużycie kompozytów określano poprzez pomiar zużycia liniowego w miejscu śladu tarcia na podstawie pomiaru chropowatości powierzchni przy wykorzystaniu profilografometru Taylor Hobson. Zużycie badanych próbek szkliwa obliczano, jako objętościowy ubytek materiału, odniesiony do drogi tarcia [9].

Po procesach tarcia powierzchnie próbek kompozytowych w miejscu śladu tarcia obserwowano za pomocą mikroskopu skaningowego Hitachi S 3000N.

### 3. Wyniki badań

W badaniach określano współczynniki tarcia kompozytowych materiałów z przeznaczeniem na stałe wypełnienia stomatologiczne oraz zużycie liniowe badanych materiałów i zużycie objętościowe twardych tkanek zębów (szkliwa).

#### 3.1. Współczynnik tarcia

Wartości współczynników tarcia własnych materiałów kompozytowych o symbolach KW1 i KW2 przedstawiono na rys. 2. Z wykresu widać, iż w początkowej fazie tarcia zachodzą procesy docierania współpracującego węzła tarcia. Współczynniki tarcia obu kompozytów maleją w czasie w ciągu pierwszych dwóch godzin tarcia, po czym stabilizują się i przez następne 3 godziny przyjmują wartości ok. 0,39 - 0,40. Nieco większe wartości współczynnika tarcia przyjmuje kompozyt z dodatkiem fluorku strontu (KW1).

#### 3.2. Zużycie kompozytów i szkliwa zębów

Obok współczynnika tarcia analizowano również wpływ tarcia na zużycie materiałów kompozytowych i przeciwwstawnych tkanek zęba.

The friction couple, which is detailed in fig. 1b was composed of sample and counter sample. The tested samples were fabricated ceramic-polymer composites, and the counter sample - human enamel mounted in alumina form (fig.1b). The enamel samples were cut out from molar and premolar teeth, extracted for orthodontic reasons. The friction process was conducted in the presence of solution with pH=6.8 (pH of natural saliva).

The experimental investigations have made it possible to estimate friction coefficients, linear wear of materials and volume wear of inverse hard tooth tissues.

The composite wear was estimated by linear wear at wear track on the basis of surface roughness measured using Taylor Hobson profilographometric techniques. The wear of the examined enamel samples, such as the volume tissue wear related to friction track, was evaluated [9].

Following the friction process, composite sample surfaces at wear track were examined using scanning electron microscope Hitachi S 3000N.

### 3. Results

Friction coefficients of original composites for dental fillings and linear wear of investigated composites and volume wear of hard tooth tissues (enamel) were investigated.

#### 3.1. Friction coefficient

The measurements of friction coefficients of KW1 and KW2 composite materials are presented in fig. 2. As seen from the graph an initial friction phenomenon between the co-operating couple can be observed at the beginning of the process. The friction coefficients of both composites decreased during the first two hours, then they stabilized for the following 3 hours at the level of 0.39-0.40. It was also discovered that the friction coefficient of the composite strongly depended on its composition and was found to be higher in the material with an addition of strontium fluoride (KW1).

#### 3.2. Wear of composites and teeth enamel

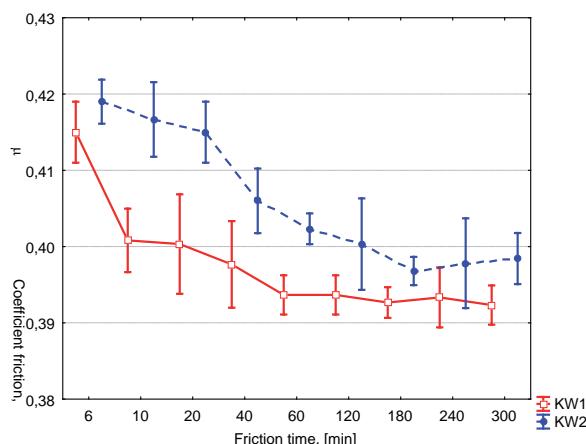
Apart from the measurements of friction coefficients, the investigations included the analysis of the impact of friction on both the composite materials' wear and inverse tooth tissues.

Zużycie liniowe zaprojektowanych w niniejszej pracy materiałów kompozytowych wynosi w granicach 21 µm dla kompozytu KW2 na bazie fluorku strontu i 24 µm dla materiału KW1 z dodatkiem fluorku iterbu (rys. 3). Jest to relatywnie niska wartość zużycia i według danych literaturowych odpowiada wartości zużyciu handlowych materiałów kompozytowych [15].

Dokonano również pomiaru zużycia materiału przeciwpróbki, którą stanowiło ludzkie szkliwo. Objętościowe zużycie szkliwa wynosiło ok. 0,48 mm<sup>3</sup> w przypadku tarcia w układzie z kompozytem KW2 i ok. 0,54 mm<sup>3</sup> w przypadku tarcia w układzie z kompozytem KW1 na bazie fluorku iterbu. Odpowiednie wyniki prezentowane są na rys. 4.

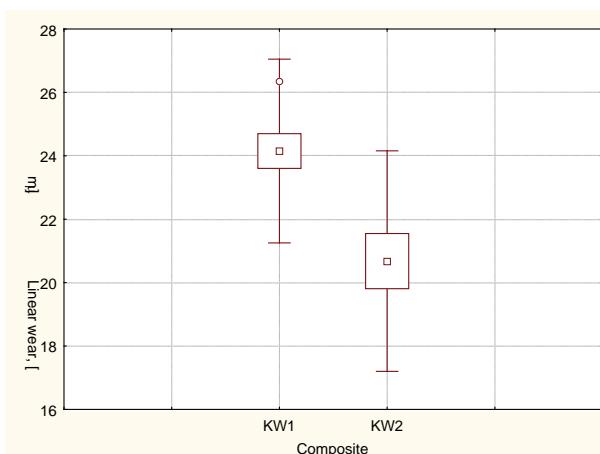
Uzyskane wyniki badań wskazują, że właściwości tribologiczne materiałów kompozytowych zależą w dużym stopniu od składu chemicznego. Istotny jest więc odpowiedni dobór napełniaczy proszkowych, zarówno źródeł fluoru i modyfikatorów tarcia.

Po testach tribologicznych wykonano obserwacje mikroskopowe śladów tarcia na powierzchni obu badanych materiałów. Na rys. 5 przedstawiono różnice w powierzchniowej strukturze kompozytów po procesach tarcia. W obu materiałach widać mikropęknięcia w ich strukturze. W przypadku materiału KW2 wyraźnie widoczne są pęknięcia w obszarze warstw wierzchnich, prawdopodobnie o charakterze zmęczeniowym. Ze zdjęć widać wyraźne różnice strukturalne pomiędzy materiałami. Obserwuje się dodatkowo występowanie wolnych cząstek napełniających o różnych rozmiarach.



Rys. 2. Przebieg współczynników tarcia kompozytów KW1 i KW2 podczas procesu tarcia

Fig.2. Friction coefficients of the tested materials



Rys. 3. Zużycie liniowe kompozytów podczas tarcia

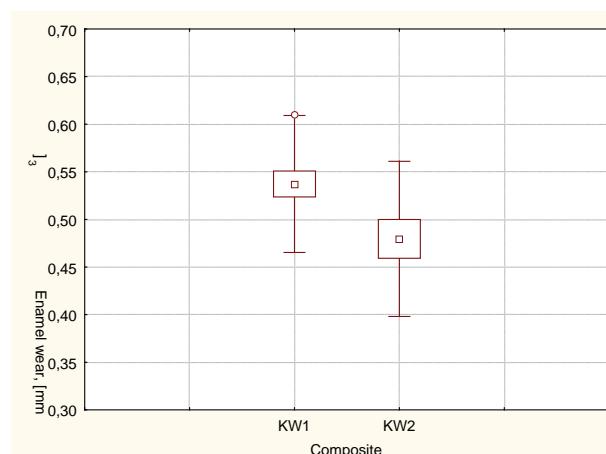
Fig. 3. Line wear of the composites

The linear wear of the analyzed composite materials is close to 21 µm for KW2 composite with addition of strontium fluoride and 24 µm for KW1 composite with addition of ytterbium fluoride (fig. 3). A relatively low wear of the authors' original composite materials was observed. It was similar to the wear of commercially available dental fillings [15].

One of the most important parameters associated with the wear properties of dental composites is the rate of wear of the enamel of the antagonistic teeth. In the investigations the volume loss of the enamel was evaluated after the wear tests against the composites. The results of these investigations are shown in fig. 4. The KW2 composite with strontium fluoride showed a lower rate of wear of enamel counter-samples (about 0,48 mm<sup>3</sup>) than KW1 composite (about 0,54 mm<sup>3</sup>) filled with ytterbium fluoride addition.

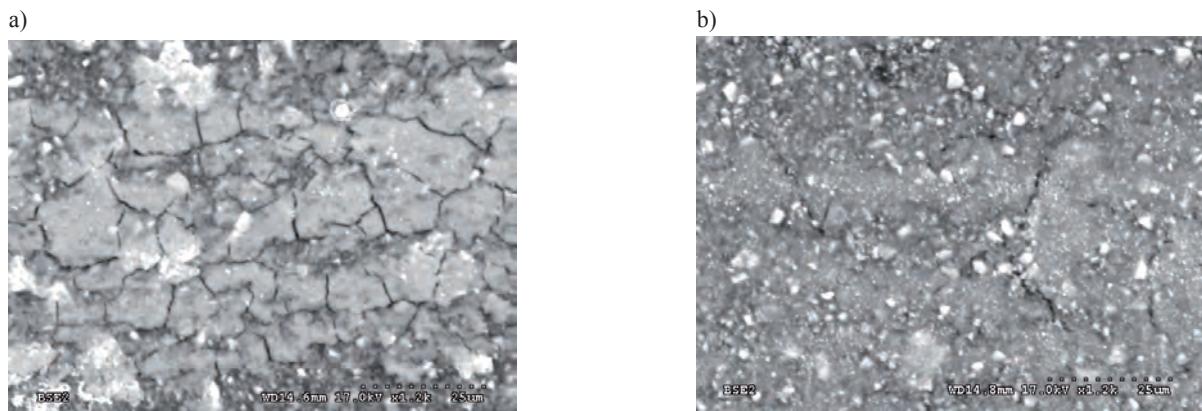
The investigation results show that the tribological characteristics of the composite materials produced by the authors are dependent, to a high degree, on the chemical composition of the samples. Hence an appropriate choice of powder fillers in form of fluorine sources and friction modifiers is very important.

Following the friction tests, microscopic observations of the composite surfaces, at wear tracks, were made. Some differences between the surface structures of the tested materials are presented in fig. 5. In both materials some microcracks in their structure are observed. In the case of KW2 composite, considerable microcracks in the material structure, showing fatigue characteristics, are observed. Fig. 5 also illustrates significant structural differences between KW1 and KW2. Additionally, on the materials' surface, some free filler particles of different dimensions were observed.



Rys. 4. Zużycie objętościowe szkliwa podczas tarcia

Fig.4. Volume wear of the enamel counter samples



Rys. 5. Ślad tarcia kompozytów po tarciu: a) KW1, b) KW2  
Fig. 5. Wear tracks of composites: a) KW1, b) KW2

#### 4. Dyskusja

Z dokonanego przeglądu literatury wynika, że rozwój badań nad materiałami stomatologicznymi wskazuje wyraźną tendencję do stosowania materiałów kompozytowych. Wynika to głównie z korzystnych właściwości mechanicznych i estetycznych tego typu wypełnień oraz szerokiej możliwości kształtuowania ich struktury i właściwości biofunkcjonalnych. W poszukiwaniu nowych, lepszych materiałów kompozytowych na stałe wypełnienia stomatologiczne szczególną uwagę zwraca się m.in. na poprawę charakterystyk tribologicznych. Próby opracowania optymalnego składu chemicznego skłaniają do poszukiwania nowych lepszych substytutów żywicy Bis-GMA oraz napełniaczy, głównie modyfikatorów tarcia. Ważnym z punktu widzenia komfortu pacjenta i satysfakcji lekarza jest stosowanie wypełnień o korzystnych charakterystykach tribologicznych. Chodzi w szczególności o zwiększenie odporności na zużycie wypełnień, a jednocześnie obniżenie zużycia zębów przeciwnych (kontaktowych). Problematyka ta została podjęta w niniejszej pracy - zwłaszcza w kontekście kształtuowania charakterystyk tribologicznych badanych materiałów, jak również metodyki badań. Do badań tarcioowych wykorzystano specjalnie skonstruowany symulator tarcia zębów. W badaniach tych oceniano współczynniki tarcia oraz zużycie materiałów i tkanek zębów przeciwnych.

W warunkach fizjologicznych wpływ na zużycie zębów i materiałów stomatologicznych ma duża liczba i złożoność czynników zewnętrznych (obciążenie, temperatura) i wewnętrznych (śliną, stan tkanek zęba).

W niniejszej pracy do badań tribologicznych zastosowano specjalnie skonstruowany symulator tarcia zębów, a badania przeprowadzono przy parametrach odpowiadających naturalnym warunkom jamy ustnej. Badaniom poddano dwa własne materiały kompozytowe na stałe wypełnienia stomatologiczne. Wyniki współczynnika tarcia, zużycia materiałów i szkliwa zębów wykazują nieznaczne różnice pomiędzy badanymi materiałami. Zaobserwowano, że dodatek fluorku strontu w niewielkim stopniu wpływa na podwyższenie współczynnika tarcia i jednocześnie obniża zużycie liniowe testowanego materiału i szkliwa materiału przeciwpróbki. Można więc sądzić, że kompozyty KW1 i KW2 po odpowiedniej modyfikacji składu chemicznego mogą być zaproponowane do stosowania na stałe wypełnienia stomatologiczne.

#### 4. Discussion

Studying the literature data on the subject one can observe a strong tendency to use composite materials for the new generation of dental fillings. This is due to good mechanical and aesthetic properties of the composites as well as enormous possibilities of shaping their structural and biofunctional properties. In this context particular attention is focused on the tribological characteristics, which are responsible for the durability of the dental fillings. Attempts at creating optimal chemical compositions of the materials involve looking for substitutes of Bis-GMA resin and fillers, mainly friction modifiers.

An essential factor, especially from the point of view of the patient's comfort and dentist's satisfaction is the use dental fillings characterized by good tribological properties, which are mainly connected with an increase of dental filling wear resistance and simultaneous decrease of inverse (contact) teeth wear. This problem was undertaken by the present authors, particularly in the context of shaping tribological characteristics of the analyzed materials and testing methods. Thus, special equipment applying reciprocating movement and cyclic loading to test the materials was devised. During the tests, friction coefficients and wear of materials and inverse teeth tissues were evaluated.

In the physiological conditions a number of internal and external factors such as saliva, teeth tissue conditions, load and temperature exert considerable impact on the tooth wear and dental fillings.

The testing method, in which the composite samples worked against the human enamel counter-specimen, simulated the masticatory pattern occurring in the mouth whilst eating. Two originally made composite materials for permanent dental fillings were tested. The results of friction coefficients, wear of materials and teeth enamel exhibit minor differences between tested materials. It was observed that the addition of strontium fluoride had little influence on the increase of the material's friction coefficient. However a decrease of linear wear of the tested material and enamel counter-sample was observed. Thus, it could be concluded that KW1 and KW2 composites, after an appropriate modification of their chemical composition, are potential materials for permanent dental fillings.

## 5. Podsumowanie

W pracy określono charakterystyki tribologiczne układu kinematycznego zębów – materiał kompozytowy na bazie żywicy Bis-GMA i źródła fluoru. Podczas badań zaobserwowano, że zużycie przez tarcie kompozytów ceramiczno-polimerowych przeznaczonych na stałe wypełnienia stomatologiczne zależy od rodzaju napełniacza proszkowego i jest niższe dla kompozytu z dodatkiem fluorku strontu. Kompozyt ten wpłynął także na niższy stopień zużycia szkliwa zęba. Z kolei niższe wartości współczynnika tarcia uzyskano dla kompozytu na bazie fluorku iterbu.

## 5. Summary

In this work tribological characteristics of the kinematics couple: tooth - composite material on the basis of Bis-GMA resin and fluorine sources were investigated. The results showed that the wear of ceramic-polymer composites intended for dental fillings clearly depends on the type of powder filler used and is lower for a composite with an addition of strontium fluoride. Also the enamel wear is found to be lower in a couple containing the same powder filler. However, the composite with an addition of ytterbium fluoride is characterized by a lower friction coefficient.

\*\*\*\*\*

*This work was supported by the Statutory Work of Department of Materials and Biomedical Engineering (Faculty of Mechanical Engineering, Białystok Technical University). The authors are grateful to the Institute of Glass, Ceramics, Refractory and Construction Materials (Warsaw) for working out and preparation of the J-20 glass for the research.*

\*\*\*\*\*

## 6. References

1. Adachi L K, Saiki M, de Campos T N. An in vitro investigation of human enamel wear by restorative dental materials. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* 2001; 249(2): 465-468.
2. Antunes P V, Ramalho A. Study of abrasive resistance of composites for dental restoration by ball-cratering. *Wear* 2003; 255: 990-998.
3. Heintze S D, Cavalleri A, Forjanic M, Zellweger G, Rousson V. A comparison of three different methods for the quantification of the in vitro wear of dental materials. *Dental Materials* 2006; 22: 1051-1062.
4. Mandikos M N, McGivney G P, Davis E, Bush P J, Carter M. A comparison of the wear resistance and hardness of indirect composite resins. *The Journal of Prosthetic Dentistry* 2001; 85(4): 386-395.
5. Mystkowska J, Dąbrowski J R. The influence of friction process on the structure of composite. *Engineering of Biomaterials* 2007; 69-72: 26-29.
6. Mystkowska J, Dąbrowski J R. The influence of selected powder fillers on the tribological properties of composite materials for dental fillings. *Solid State Phenomena* 2009; 144: 33-38.
7. Nagarajan V, Jahanmir S, Thompson V. In vitro contact wear of dental composites. *Dental Materials* 2004; 20: 63-71.
8. Oh W, DeLong R, Anusavice K J. Factors affecting enamel and ceramic wear: A literature review. *The Journal of Prosthetic Dentistry* 2002; 87: 451-459.
9. Sajewicz E. On evaluation of wear resistance of tooth enamel and dental materials. *Wear* 2006; 260: 1256-1261.
10. Sajewicz E, Kulesza Z. A new tribometer for friction and wear studies of dental materials and hard tooth tissues. *Tribology International* 2007; 40: 885-895.
11. Shabanian M, Richards L C. In vitro wear rates of materials under different loads and varying pH. *The Journal of Prosthetic Dentistry* 2002; 87: 650-656.
12. Shortall A C, Hu X Q, Marquis P M. Potential countersample materials for in vitro simulation wear testing. *Dental Materials* 2002; 18: 246-254.
13. Siejka-Kulczyk J, Mystkowska J, Lewandowska M, Dąbrowski J R, Kurzydłowski K J. The influence of nano-silica on the wear resistance of ceramic-polymer composites intended for dental fillings. *Solid State Phenomena* 2009; 151: 135-138.
14. Wetzel B, Haupert F, Friedrich K, Zhang M Q, Rong M Z. Impact and wear resistance of polymer nanocomposites at low filler content. *Polymer Engineering and Science* 2002; 9: 1919-1927.
15. Yap A U J, Teoh S H, Chew C L. Effects of cyclic loading on occlusal contact area wear of composite restoratives. *Dental Materials* 2002, 18: 149-158.
16. Zantnar C, Kielbassa A M, Martus P, Kunzelmann K H. Sliding wear of 19 commercially available composites and compomers. *Dental Materials* 2004; 20: 277-285.

---

**Dr inż. Joanna MYSTKOWSKA**

**Prof. dr hab. inż. Jan R. DĄBROWSKI**

Zakład Inżynierii Materiałowej i Biomedycznej

Wydział Mechaniczny

Politechnika Białostocka

ul. Wiejska 45c, 15-351 Białystok, Polska

tel. (085) 746-92-50

e-mail: j.mystkowska@pb.edu.pl, jrd@pb.edu.pl

---

Jerzy JÓZWIK  
Paweł PIEŚKO  
Grzegorz KRAJEWSKI

## OCENA TESTU QC10 DO KONTROLI OFF-LINE OBRABIAREK STEROWANYCH NUMERYCZNIE CNC

## EVALUATION OF QC10 BALLBAR DIAGNOSTICS METHOD FOR CNC MACHINE

W pracy przedstawiono wyniki badań diagnostycznych obrabiarki CNC. Dokonano analizy wybranych błędów obrabiarki CNC identyfikowanych za pomocą pręta teleskopowo kulowego. Ocenie jakościowej poddano typowe odchyłki geometryczne, takie jak: odchyłkę okrągłości, odchyłkę prostopadłości osi, odchyłkę okresową. W trakcie pomiarów wyznaczono ponadto błąd nawrotu i luz zwrotny w badanej osi. Wskazano na zalety oraz wady szybkiego testu QC10. Omówiono przyczyny powstawania badanych błędów oraz wskazano podstawowe sposoby ich minimalizacji. Uzyskane wyniki badań przedstawiono w postaci wykresów i tabel.

**Słowa kluczowe:** obrabiarka CNC, dokładność geometryczna obrabiarki, diagnostyka obrabiarek, odchyłka okrągłości, odchyłka prostopadłości osi, luz zwrotny, błąd nawrotu, kompensacja błędów.

This paper presents results of CNC machine tool testing. Analyses of error were performed with ballbar method. This method allowed to investigate geometric errors as circularity, squareness, straightness as well as reversal spikes and backlash. Evaluated errors were discussed and compensation procedures were proposed. Obtained results were described in tables and figures.

**Keywords:** CNC machine, geometric accuracy, diagnostic of machine, circularity, squareness error, backlash, reversal spikes, error compensation.

### 1. Wprowadzenie

Zastosowanie maszyn CNC w obróbce wiórowej pozwala na konstytuowanie nowej powierzchni o dużej dokładności geometrycznej. W celu uniknięcia błędów związanych z zarysem geometrycznym oraz zapewnienie uzyskiwania maksymalnych wartości wskaźników jakościowych wyrobu, konieczna jest szybka i stosunkowo częsta diagnostyka maszyn CNC [1-4].

Diagnostyka obrabiarek sterowanych numerycznie jest bardzo ważnym zagadnieniem, które powinno być rozpatrywane zarówno przez producentów jak również użytkowników maszyn. Istnieje wiele metod i technik diagnostyki maszyn technologicznych. Bazują one na dynamicznych i semistatycznych procesach resztkowych. Do oceny stanu maszyny wykorzystywane są łatwo mierzone wielkości fizyczne, skorelowane z różnymi typami błędów obrabiarki [7, 8, 21-23]. Wielkościami tymi są np.: drgania, emisja akustyczna, ciepło itp. [7]. Badania dokładności obrabiarek są znormalizowane i opisane w Normie Międzynarodowej ISO 230 (z ang. Acceptance code for machine tools), która jest zatwierdzona przez Polski Komitet Normalizacyjny. Polskie Normy PN-ISO 230 [14] określają zarówno ogólne przepisy badania obrabiarek, jak i szczegółowe metody wyznaczania poszczególnych odchyłek oraz tolerancje ograniczające ich dopuszczalne wartości. Nowoczesne metody sprawdzania dokładności obrabiarek obejmują trzy grupy błędów: dynamiczne, geometryczne oraz luzy [7, 19]. Spośród urządzeń pozwalających na sprawdzanie dokładności geometrycznej obrabiarek CNC można wyróżnić: QC10 ballbar, Cross Grid, R-test, HMS - Head Measuring System opatentowany przez firmę Fidia [5, 15, 17, 18, 20].

### 1. Introduction

The application of CNC machine tools in cutting allows for creation of a new surface of high geometrical accuracy. CNC machine tool has recently been treated as standard in manufacturing industry, because it allows for machining of complicated shapes of workpiece. Depending on condition of the machine, final products can be inaccurate though. A lot of error sources of machine may have influence on accuracy of machining performance. In order to avoid errors related to geometrical outline and in order to achieve maximum values of quality indexes of a product and a frequent and quick CNC machine tool diagnostics is necessary. In order to achieve satisfied accuracy it is very important to check machine accuracy periodically [1-4].

Machine diagnostics is very important not only for final users, but also machine manufacturers should test it on production level. There are several diagnostic methods and techniques used for this purpose. They are based on dynamic and semi-static residual processes. Evaluation of machine tool accuracy applies easily measurable physical values correlated with the most common errors of machine tools [7, 8, 21-23], such as: vibration, acoustics, heat, etc [7]. Also international standards fully described the machine tool errors evaluation method. The most common is ISO230 titled Standards Acceptance code for machine tools [14], which is accepted by Polish Committee for Standardization. The Polish Norm PN-ISO 230 describes not only general rules of CNC machine tool measurement, but also detailed methods of particular errors determination and tolerance of its maximum acceptable value. Modern testing methods of CNC machine tool error measurement cover three sources

Ocenę dokładności geometrycznej obrabiarki dokonuje się często z wykorzystaniem technik laserowych (interferometria laserowa) [6, 7]. Nie mniej jednak techniki te są stosunkowo czasochłonne i kosztowne. Ponadto interpretacja uzyskanych wyników i ich wykorzystanie praktyczne może być kłopotliwe i trudne, chociażby z uwagi na liczność czynników wpływających na sam proces pomiaru, jego dokładność a czasami nawet dokładność wykonywanych obliczeń.

Istotnym ograniczeniem metod interferometrycznych w pomiarach maszyn jest dosyć duża czasochłonność ustawienia optyki interferometru, zwłaszcza dla maszyn o zakresach obróbczych powyżej kilku metrów. Niewątpliwą zaletą metod interferometrycznych jest możliwość pomiaru całej osi obróbcej i uzyskanie informacji o błędach w pełnym zakresie przesuwów [6, 7].

Dla uzyskania wymaganej dokładności realizowanych ruchów i precyzji zajmowanych położeń, nie wystarczy tylko naprawa bieżących usterek. Konieczne staje się okresowe badanie diagnostyczne połączone z ewentualną regulacją np. układów sterowania, napędów, itp. Alternatywą dla klasycznych metod diagnostycznych obrabiarek CNC stanowi zautomatyzowany szybki test kołowości realizowany przez urządzenie QC10 ballbar [5, 9, 12, 14, 24]. Norma ISO 230-2 opisuje to urządzenie jako pręt teleskopowo kulkowy [14]. W artykule nazwy te będą stosowane zamiennie.

System QC10 ballbar pozwala na szybką i efektywną ocenę niedokładności obrabiarek. W efekcie umożliwia podjęcie działań serwisowych i obsługi technicznej na podstawie zaobserwowanego - bieżącego stanu technicznego. Stosowanie szybkiego testu diagnostycznego QC10 pozwala na dokumentowanie stanu technicznego obrabiarek, porównywanie i klasyfikowanie różnych obrabiarek według ich zdolności do zapewnienia odpowiedniej dokładności obróbki. Jest to szczególnie ważne w przedsiębiorstwach z dużym parkiem maszynowym gdyż pozwala na przenoszenie zadań obróbkowych wyrobów o wysokich wymaganiach jakościowych na te maszyny, które umożliwiają zachowanie wysokiej dokładności wymiarowo-kształtowej [10, 11, 13, 16, 19].

of machine tools errors: dynamic, geometric and play errors [7, 19]. The most popular ones are QC10 ballbar, Cross Grid, R-test, HMS-Head measuring system [5, 15, 17, 18, 20]. Mentioned HMS system manufactured by Fidia, is a fully automated measuring system which can be used for evaluation of linear and rotary axes. This measuring device can evaluate static and dynamic errors. For evaluation of geometric errors also laser interferometers are commonly used [6, 7]. This method is most time consuming and quite expensive in comparison to other diagnostics methods. Moreover, the result interpretation and its application may be confusing and difficult, due to multiple factors of measurement process, its accuracy as well as accuracy of performed measurement itself. A significant limitation in CNC machine tool measurement is a relatively big time consumption of setting of interferometer optics especially for CNC machine tool with machining scope of several meters. Undoubtedly, its advantages are the possibility of measurement of total CNC machine tool axis and collection of information about errors within the total measurement scope. Obtained results clearly describe the machine's geometric errors. Interferometer method is also fundamental in case of calibration linear positioning for CNC machine [6, 7].

In order to obtain the acceptable accuracy of machine tools (movements, positioning, etc.) it is very important to perform some procedures for timely diagnostics of the machine as well as correction of parameters. The alternative for classical diagnostic methods of CNC machine tools is an automated, quick, QC10 ballbar circularity test which is fully consistent with ISO 230-2 standards [5, 9, 12, 14, 24]. ISO 230 describes the tool as a ballbar transducer (ball telescoping bar) [14]. For the purpose of the paper both names are used interchangeably.

QC10 ballbar system provides the method for quick and effective of inaccuracy of CNC machine tools. In effect, it allows for undertaking of service activity and technical service on the basic of observed, current technical condition. It also allows for detecting inaccuracies induced by its controller and servo drive systems. After the QC10 ballbar test has been carried out, the system produces a diagnostic plot. This can be analysed – either visually or by using the software – to identify specific errors within the machine tool. The QC10 ballbar system is also a proper system for assessment of the most accurate machine from the whole stock of machine tools and choice of a proper machine for corresponding task [10, 11, 13, 16, 19].

## 2. Metodyka badań

### Charakterystyka urządzenia diagnostycznego QC-10 ballbar

Urządzenie diagnostyczne QC10 ballbar (rys. 1) umożliwia wykrywanie błędów geometrycznych występujących w układach napędowych obrabiarek CNC, zwłaszcza wprowadzanych przez układ mechaniczny, układ pomiarowy oraz błędów wprowadzanych przez serwonapędy.

Spośród najważniejszych odchyłek identyfikowanych podczas testu urządzeniem QC10 ballbar należy wymienić: odchyłkę okrągłości, odchyłkę prostopadłości osi, odchyłkę okresową oraz błąd nawrotu, luz zwrotny w badanej osi i luz poprzeczny.

Wśród pozostałych błędów identyfikowanych przez system QC10 ballbar są: błąd prostoliniowości, błąd cykliczny, błąd spirali, błąd skali, błąd nadążania, zmianę offsetu, zmianę pro-

## 2. Research methodology

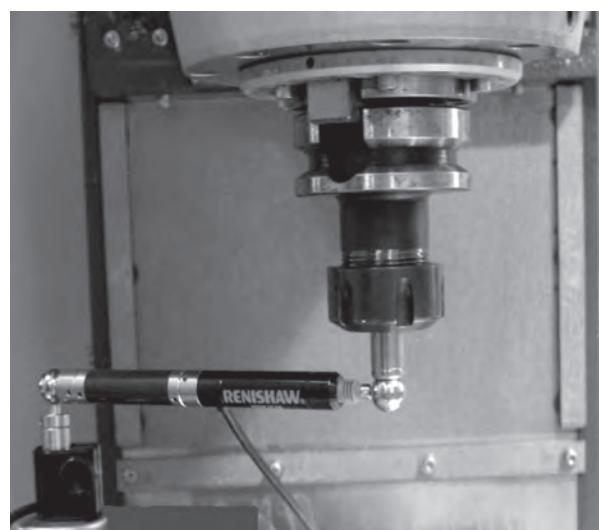
### QC10 ballbar system overview

QC10 ballbar system (fig. 1) allows for evaluation of geometric errors, resulting from servo mechanisms and mechanical mechanisms, measurement systems and other errors. As shown in fig. 1, the detecting part of ballbar consists of two precise balls connected to a bar made of tungsten carbide. The two balls are magnetically attracted on 3 point supported sockets. The most important errors identified during test by QC10 ballbar system are: circularity error, squareness error, cyclic error, reversal-spikes error, backslash error and radial clearance. Among other errors identified by QC10 ballbar system are: linearity error, spiral error, scaling error and mismatch, offset change, radius change and other. Measurement and interpretation of the results are completed according to provisions of ISO-230-4 [14]. Quick QC10 ballbar system test allows for measurement of circu-

mienia i inne. Pomiar i interpretacja wyników są realizowane zgodnie z wytycznymi normy PN-ISO 230-4 [14].

Szybki test urządzeniem QC10 ballbar pozwala na pomiar odchyłki okrągłości ruchu w interpolacji kołowej obrabiarki sterowanej numerycznie (rys. 1).

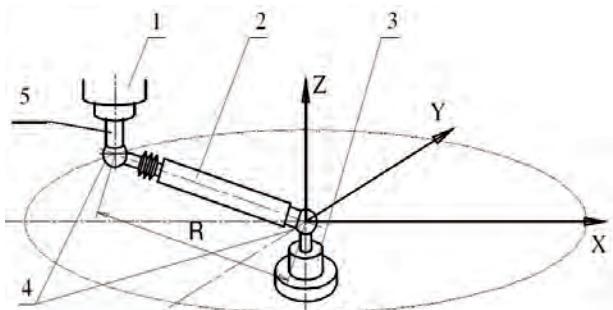
a)



Rys. 1a. Zasada pomiaru diagnostycznego frezarek CNC szybkim testem QC10 ballbar [7]

larity error during circulation interpolation with constant feed-rate of CNC machine tool. Completion of a proper analysis of geometrical accuracy of machine tool, requires performance of a circularity movement within  $360^\circ$  in both directions (clockwise and reversal) (fig. 2). In order to preserve the contact speed

b)



Rys. 1b. Schemat i zasada przygotowania do testu; 1 – wrzeciono frezarki, 2 – przetwornik pomiarowy (teleskopowy pręt kinematyczny), 3 – podstawa magnetyczna centrująca, 4 – końcówki kuliste, 5 – uchwyt magnetyczny, R – promień zarysu nominalnego

Fig. 1. Principle of ballbar measurement [7]: a) general view, b) QC10 ballbar system; 1 – machine spindle, 2 – ballbar transducer, 3 – magnetic base, 4 – ball assembly, 5 – tool cup assembly, R – radius of the test

W czasie pomiaru za pomocą przetwornika pomiarowego 2 (pręt teleskopowo kulowy) mierzony jest aktualny promień wykonywanego ruchu kołowego. Aktualne położenie kątowe przetwornika obliczane jest na podstawie czasu wykonywania ruchu ze stałym posuwem styczny. Do wykonania poprawnej analizy dokładności geometrycznej obrabiarki wymagane jest wykonanie pomiarów w zakresie ruchu  $360^\circ$  ( $0^\circ$ ÷ $360^\circ$ ), w obu kierunkach (zgodnie i przeciwnie do ruchu wskazówek zegara), co przedstawiono na rys. 2. Aby w czasie pomiaru była zachowana stała prędkość ruchu posuwowego  $v_f$ , każdy właściwy ruch pomiarowy powinien być poprzedzony rozbiegiem i zakończony wybiegiem (rys. 2).

Jeżeli dana obrabiarka CNC nie wykazuje błędów, wykres kołowy realizowanego ruchu powinien być idealnym okręgiem. Obecność jakichkolwiek błędów obrabiarki wprowadza zniekształcenia i odstępstwa od okręgu idealnego. Analizując taki wykres można określić źródła występowania tych błędów w układzie napędowym.

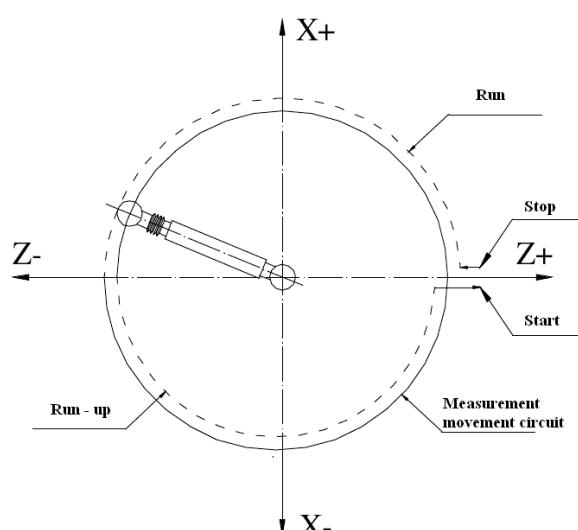
Dostarczone oprogramowanie do urządzenia QC-10 ballbar umożliwia przeprowadzenie analizy otrzymanych wyników, podając wartości poszczególnych błędów składowych oraz ich procentowy wpływ na całkowitą odchyłkę okrągłości.

of feed-rate, every proper measurement movement should be initiated with warming-up run and accomplished by overrun.

The changes in distance between two balls are read out by the LVDT transducer and the obtained signals are transformed and shown as the radius changes in ballbar software. The numerical values from the counter are processed by PC and the deviation from the base circle is plotted as motion error trace by a X-Y plot shown in fig. 2.

In this measuring method the rotating angle is not detected. Instead the apparent rotating angle is calculated from the circumferential feed - rate of the circular interpolation motion  $v_f$ . If the machine accuracy is perfect, circular plot will appear as the ideal circle. Errors of machines give some distortion in circular plot. Fig. 3 describes the installation method on typical machine tool. The analysis of such figure may help to determine sources of errors occurrence in servo mechanism. The software of QC10 ballbar system allows for analysis of results, giving values of particular partial errors and percentage influence on summary circularity error.

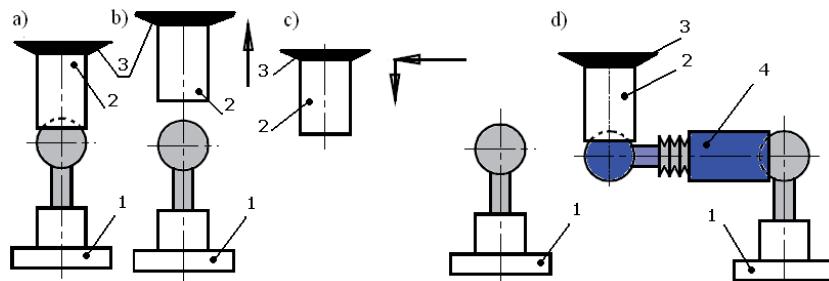
It is possible to measure full circle  $360^\circ$  but also  $180^\circ$  test. Test arcs smaller than  $180^\circ$  are not recommended and sh-



Rys. 2. Schemat pomiaru w zakresie ruchu  $360^\circ$  [7]

Fig. 2. Ballbar operation in whole circle [7]

Instalacja urządzenia QC-10 ballbar na frezarkach przebiega w sposób przedstawiony na rys. 3.



Rys. 3. Schemat instalacji urządzenia QC-10 na frezarkach CNC [7]: a) ustawienie punktu bazowego, b) pionowe odsunięcie gniazda, c) ustawienie w pozycji startowej, d) instalacja przetwornika, 1 - podstawa magnetyczna, 2 - uchwyt magnetyczny, 3 - tulejka zaciskowa, 4 - przetwornik pomiarowy (teleskopowy pręt kinematyczny)

Fig. 3. QC10 ballbar mounting procedure [7]: a), b) centering, c) move to initial position, d) transducers mount, 1 - magnetic base, 2 - tool cup assembly, 3 - tool holder, 4- measuring transducer

Pomiar kołowości można wykonywać również w innym zakresie ruchu niż  $360^\circ$ , np. w zakresie ruchu  $-180^\circ \div 180^\circ$ ;  $0^\circ \div 90^\circ$ ;  $80^\circ \div 100^\circ$  itd. Jednakże wykonanie niepełnego okręgu ogranicza możliwości diagnostyczne urządzenia jedynie do interpretacji graficznej zmian promienia.

## Przebieg badań

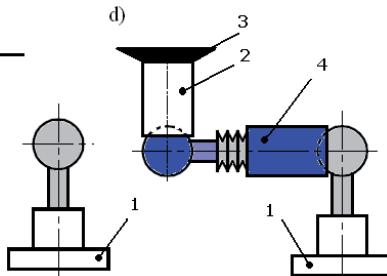
Celem nadzorżennym pracy jest identyfikacja i ocena ilościowa sześciu głównych odchyłek oraz błędów obrabiarki CNC. Główny cel pracy stanowi również określenie związków pomiędzy parametrami testu a wynikami pomiarów diagnostycznych. W pracy zostanie zawarta ilościowa i jakościowa ocena wpływu prędkości ruchu posuwowego stołu frezarki  $v_f$  na wartość błędu nawrotu. Celem pośrednim pracy jest wykazanie przydatności szybkiego testu diagnostycznego QC10 ballbar w okresowych badaniach stanu obrabiarki CNC.

Wśród najważniejszych odchyłek i błędów obrabiarki CNC należy wyróżnić odchyłkę okrągłości, definiowaną przez normę ISO 230-4 następująco: „linię na płaszczyźnie nazywa się okrągłą jeśli wszystkie jej punkty są zawarte między dwoma okręgami współśrodkowymi, których odległość promieniowa nie przekracza danej wartości”. Pozostałe błędy obrabiarki CNC identyfikowane w teście za pomocą pręta teleskopowo kulkowego składają się na odchyłkę okrągłości. Wśród nich wyróżnia się odchyłkę prostopadłości osi, błąd nawrotu, luz zwrotny w badanej osi, luz poprzeczny.

Prace eksperymentalne realizowano na czterosiowym, pionowym centrum obróbkowym (frezarskim) wyposażonym w system sterowania numerycznego FANUC. W celu poprawnego wykonania badania diagnostycznego wykonano następujące czynności:

- określono płaszczyznę pomiarów (plaszczyzna X-Y),
- wyznaczono miejsca pomiarowe na stole frezarki (4 położenia w układzie kwadratu),
- zdefiniowano wartości prędkości ruchu posuwowego stołu frezarki ( $v_f = 500; 1000; 3000$  mm/min),
- określono wartość promienia interpolowanego okręgu, dobierając odpowiednią długość teleskopowego pręta kinematycznego ( $R = 100$ ),
- określono kąt realizacji testu:  $360^\circ$ ,
- zdefiniowano wartość współczynnika rozszerzalności cieplnej obrabiarki i jej temperaturę,

uld only be used where space constraints prevent a  $180^\circ$  or  $360^\circ$  test. Test arcs of less than  $90^\circ$  should not be used. However,



the performance of an incomplete circle, limits the diagnostics capability of the measurement system only to graphics presentation and interpretation of radius change.

## Run of tests

The main task in research was to diagnose the machine tool as well as to describe interactions between test parameters and errors evaluated by ballbar system. Additional task was to research influences between feed-rate of machine and reversal spikes errors. Another task in this research was to prove usefulness of the device QC10. One of the most significant parameters of accuracy is circularity, defined by ISO 230 standard. Circularity is defined as the difference between the largest and smallest radius recorded by the ballbar as the machine moves around the larger circularity value. The diagnostics analysis can be used to identify the cause of any circularity error, providing the test is performed over a complete  $360^\circ$ . Experimental results did on 4-axis vertical machine tool with FANUC controller. Measuring procedure was performed as follows:

- test plane X-Y was defined,
- proper place on machine (4 locations in square plane) was determined,
- feed-rate of vertical CNC machine tool table  $v_f$  as: 500; 1000; 3000 mm/min was determined,
- circle radius of the test  $R=100$  mm, adjusting the proper length of the telescopic kinematic bar, was defined,
- radius of the full tests  $360^\circ$  was defined,
- the material expansion coefficient of machine tool and its temperature was defined,
- to machine control system the CNC programme completing the measurement path was introduced (fig. 2)
- the QC10 ballbar on the machine plate was mounted (fig. 3),
- the software parameters were prepared,
- the test was performed,
- the measurement of results was analyzed and it was presented on graphs and in the table,
- main errors were defined and their quality analysis was performed,
- the test 4 - series and 5 - repeatable series were completed.

- do układu sterowania obrabiarki CNC wprowadzono odpowiedni program realizujący ruch pomiarowy (rys. 2),
- zamontowano przetwornik pomiarowy na stole frezarki (teleskopowy pręt kinematyczny) (rys. 3),
- ustawiono odpowiednie parametry zbierania danych w środowisku programu Ballbar,
- przeprowadzono pomiar właściwy,
- przeanalizowano wyniki pomiarów oraz przedstawiono je w postaci wykresów oraz zestawień tabelarycznych.
- określono rodzaje występujących odchyłek oraz błędów oraz dokonano ich oceny ilościowej,
- pomiary realizowano w czterech seriach (cztery położenia) z 5 powtórzeniami.

W efekcie realizowanych pomiarów uzyskano wyniki badań (raport testu diagnostycznego), które poddano szczegółowej analizie. Raport testu diagnostycznego zawiera wszystkie znaczące wartości wyznaczonych błędów i odchyłek oraz ich procentowe udziały w całkowitej odchyłce okrągłości obrabiarki CNC.

### 3. Analiza wyników pomiarów

W oparciu o przeprowadzone badania eksperymentalne oraz pomiary otrzymano wyniki pozwalające na częściową ocenę stanu obrabiarki (badania przeprowadzono w płaszczyźnie X-Y). W tabelach 1 oraz 2 przedstawiono wartości głównych odchyłek i błędów obrabiarki sterowanej numerycznie CNC oraz ich udziały procentowe w sumarycznej odchyłce okrągłości.

Rys. 4 przedstawia procentowe udziały sześciu znaczących odchyłek i błędów obrabiarki CNC. Z przedstawionego na rys. 4 wykresu wynika, że największą wartość średniego procentowego udziału stanowi odchyłka prostopadłości osi (14,5%).

Efektem występowania na obrabiarce odchyłki prostopadłości jest brak wzajemnej prostopadłości frezowanych płaszczyzn (rys. 5). Brak prostopadłości osi przyczynia się również do istotnych problemów związanych z kształtuaniem powierzchni cylindrycznych, zarówno zewnętrznych jak i wewnętrznych.

Występowanie odchyłki prostopadłości wynika ze złego wzajemnego ustawienia prowadnic osi X i Y, zużycia prowad-

The result of completed measurement was put under detailed analysis. The report of diagnostic test includes all important values of errors and their percentage participation in the total circularity error of CNC machine tool.

### 3. Analysis of the test results

On the basis of the conducted research and measurement the results were received. It allows for partial assessment of the CNC machine tool. In table No. 1 and No. 2 average errors of CNC machine tool and their percentage participation in summary circularity squareness error were presented. Test results were performed for X-Y plane. Percentage screen provides a polar plot of captured data followed by diagnosis of errors. The plot exhibits the magnitude of errors. They are listed in percentage terms and shown in fig. 4. Percentages indicate what proportion of the overall non-circularity error can be attributed to the diagnosed errors. These are listed in a priority order with the largest error on top. From the percentage screen we know that the most important errors were influenced by squareness error (14.5%).

The squareness error is caused when the X and Y axes of the machine are not at 90° to one another at the position on the machine where the test is being performed. The lack of the squareness error of axis may cause severe errors related to

Tab. 1. Średnie wartości odchyłek i błędów obrabiarki CNC dla czterech grup testów w płaszczyźnie X-Y  
Tab. 1. Average errors of CNC machine tool for four groups of tests in plane X-Y

	Długość ramienia teleskopowego pręta kinematycznego: R = 100 mm, kąt realizacji testu: 360° Ballbar radius: R = 100 mm, data capture arc: 360°				
	Test	1	2	3	4
Odchyłka prostopadłości Squareness error	μm/m	65.6	45.3	85.5	65.8
	%	18	10	16	14
Luz zwrotny Y Backlash Y	μm	↑-3.8 ↓-5.7	↑-4.6 ↓-3.9	↑-3.5 ↓-5.5	↑-3.5 ↓-5.8
	%	16	10	10	12
Odchyłka okresowa Y Cyclic error Y	μm	↑5.8 ↓6.1	↑4.0 ↓4.1	↑6.1 ↓6.0	↑5.7 ↓5.5
	%	17	9	11	12
Błąd nawrotu X Reversal spikes X	μm	→0.0 ←2.7	→2.6 ←1.9	→3.8 ←3.0	-
	%	7	10	13	-
Błąd nawrotu Y Reversal spikes Y	μm	↑0.0 ↓2.7	↑-5.0 ↓0.0	↑-4.3 ↓3.0	↑-5.3 ↓0.0
	%	7	11	14	11
Odchyłka okrągłości / Circularity	μm	20.4	17.1	23.9	22.1

Tab. 2. Średnie wartości odchyłek i błędów obrabiarki CNC wyznaczone przy różnych wartościach prędkości ruchu posuwowego stołu frezarki w płaszczyźnie X-Y

Tab. 2. Average error values versus feed rate of machine for XY plane test

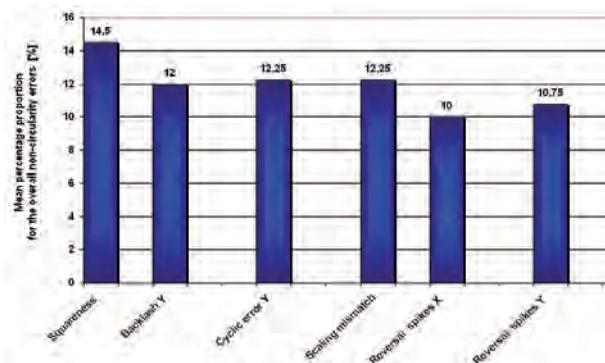
		Długość teleskopowego pręta kinematycznego: R = 100mm, Kąt realizacji testu: 360° Ballbar radius: R = 100 mm, data capture arc: 360°		
		Prędkość ruchu posuwowego $v_t$ [mm/min] / Velocity of the test $v_t$ [mm/min]		
		500	1000	3000
Odchyłka prostopadłości Squarness error	μm/m	84.1	65.8	73.7
	%	17	14	14
Luz zwrotny Y Backlash Y	μm	↑-3.5 ↓-5.3	↑-3.5 ↓-5.8	↑-3.0 ↓-5.5
	%	11	12	10
Odchyłka okresowa Y Cyclic error Y	μm	↑6.3 ↓5.8	↑5.7 ↓5.5	↑5.0 ↓5.3
	%	13	12	10
Różnica odchyłki pozycjonowania Scaling error	μm	8.4	10.8	9.9
	%	9	12	9
Błąd nawrotu Y Reversal spikes Y	μm	↑-4.4 ↓2.4	↑-5.3 ↓3.0	↑-6.6 ↓3.2
	%	14	11	18
Odchyłka okrągłości Circularity	μm	22.9	22.1	21.9
		Średnia odchyłka okrągłości 22,3 / Average Circularity 22.3		

nic lub ich odkształceń sprężystych oraz cieplnych. Przyczyną powstawania odchyłki prostopadłości może być również nie właściwe lub nieprecyzyjne wypoziomowanie stołu obrabiarki. Jednak, w trakcie badań objętych zakresem pracy, po wykonaniu pomiarów na różnych wysokościach w kierunku osi Z przyczyna ta została wykluczona. Świadczy o tym powtarzalny charakter błędu na każdej z badanych wysokości.

Odchyłka prostopadłości może mieć charakter lokalny ale również może występować na całej długości osi. Wynikają stąd różne podejścia jej minimalizacji. W przypadku lokalnych odchyłek prostopadłości osi, jako sposób przeciwdziałania błędów obróbki wynikającym z odchyłki prostopadłości jest unikanie obróbki w miejscach, w których odchyłka prostopadłości osi obrabiarki osiąga wysokie wartości. Wymaga to jednak przebadania pozostałych obszarów stołu w przestrzeni roboczej oraz identyfikacji i właściwej interpretacji braku prostopadłości osi. W przypadku występowania odchyłki prostopadłości na całej długości, środkiem zaradczym pozostaje korekta ustawienia prowadnic, zaś w ostateczności - przy dużym zużyciu pro-

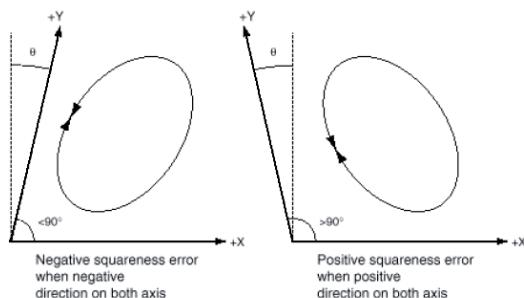
the cylindrical construction surface, both external and internal (fig. 5). The axes may be bent locally or there may be an overall axis misalignment in the machine.

The axes X-Y of the machine tool may be drooping causing them to misalign at certain locations. The machine guideways may be worn excessively causing certain amount of play in the axes when they move, its flexibility and thermal displacement. The cause of squareness error may be also improper or imprecise plane leveling. However, during research, after measurement on different level, directed towards X axis, the reason was eliminated. It can be justified by the same character of an error on each height. The value is the angle between the two axes in the test plane, less than 90°. Ideally, the two axes should be perfectly perpendicular to each other, this would result in a squareness error of zero value. The squareness error may have local character but it may also occur in the whole axis' length. Different ways of its minimization result from it. As a way of prevention from machining errors, the avoidance of cutting process in places where the error value is big, is suggested. It



Rys. 4. Średni procentowy udział sześciu znaczących odchyłek i błędów obrabiarki CNC w całkowitej odchyłce okrągłości

Fig. 4. Average percentage proportion for the significant non-circularity errors of CNC machine tool in overall circularity error



Rys. 5. Efekt wpływu ujemnej  $\theta < 90^\circ$  i dodatniej  $\theta > 90^\circ$  odchyłki prostopadłości osi na wzajemne położenie kształtowanych płaszczyzn [18]

Fig. 5. Typical squareness errors and it is influence on circularity plot [18]

wadnic, ich wymiana. Podstawową odchyłką wpływającą na dokładność wymiarowo kształtową wytwarzanych na obrabiarkach CNC wyrobów jest identyfikowana w teście kołowości systemem QC10 ballbar odchyłka okrągłości. Na rys. 6 przedstawiono przebieg zmian odchyłki okrągłości w zestawieniu z odchyłką prostopadłości osi. Przyczyną występowania odchyłki okrągłości mogą być także niewłaściwie dobrane napędy obrabiarki CNC, błędy sterowania oraz błędy układów pomiarowo kontrolnych obrabiarki. Podstawową czynnością jaką należałoby wykonać w celu minimalizacji odchyłki okrągłości jest doprowadzenie do prostopadłości osi, regulacja napędów oraz wyeliminowanie zakłóceń sterowania. Ponadto minimalizacja poszczególnych rodzajów błędów spowoduje zmniejszenie odchyłki okrągłości obrabiarki CNC.

Na rys. 7 zaprezentowano charakter zmian średnich wartości luzu zwrotnego dla czterech grup testów w płaszczyźnie X-Y. Z przedstawionego zestawienia wynika, że dla testów 1, 3 i 4 charakter zmian i wartość luzu zwrotnego są powtarzalne, zaś w teście drugim wyniki odbiegają od obserwowanego trendu.

Luz zwrotny jest efektem luzów w układzie napędowym obrabiarki lub w układzie pomiarowym (luz w połączeniu śruba-nakrętka, zużycie przekładni). Przyczyną powstawania luzu zwrotnego może być również luz w przekładni zębatej układu napędowego, prowadnicach lub złe naciągnięcie paska zębatego czy też niedostateczna sztywność układów. Luz zwrotny w przypadku jego dodatniej wartości objawia się występowaniem krótkich odcinków prostych (płaszczyzn) w trajektorii ruchu frezu w czasie prowadzenia obróbki w interpolacji kołowej (rys. 8).

W efekcie dochodzi do przerwy ruchu podczas zmiany kierunku działania napędu posuwu w konkretnej osi (Y lub X). Zasadniczą czynnością minimalizującą wartość luzu zwrotnego jest wykasowanie luzów w układzie napędowym (prowadzi, śruby, itp.) i pomiarowym, kompensacja bezpośrednio w układzie sterującym obrabiarki a ostatecznie wymiana uszkodzonych lub zużytych elementów obrabiarki.

Na rys. 9 zaprezentowano przykładowy przebieg zmian wartości błędu nawrotu dla czterech grup testów w płaszczyźnie X-Y.

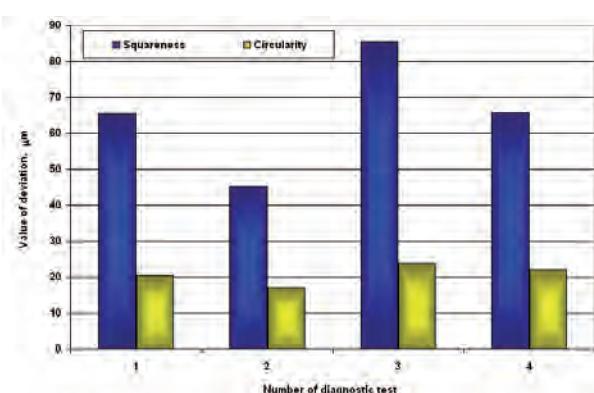
Z zaprezentowanego na rys. 9 wykresu wynika, że wszystkie testy wykonane dla badanej obrabiarki CNC zachowują powtarzalny charakter zmian oraz mają zbliżone wartości w poszczególnych próbach. Objawem błędu nawrotu jest chwilowy

requires, however, the measurement of the plane surfaces in the working space, identification and interpretation of squareness errors. If the squareness error occurs in the whole length of the axis the measure is the quideways set, if necessary (if quideways are worn excessively) they must be replaced. The basic error that influences the shape and dimensional accuracy of workpiece is the identified during QC ballbar circularity test (circularity error). A positive squareness error indicates that the angle between the two positive axes exceeds 90°. A negative squareness error indicates that the angle between the two positive as is less than 90°. This is illustrated in fig. 6 along with the type of plot that may be obtained in these circumstances. The reason of the circularity error may be also wrongly matched servo mechanisms of CNC machine tool, control system errors and measurement system errors. The basic activity which must be performed to minimize the circularity error, is the effect of squareness, regulation of servo mechanisms and elimination of control system interferences. Minimize of particular kinds of errors will cause the minimize of circularity errors of CNC machine tool.

Fig. 7 presents the character of changes of average values of backlashes for four groups of tests in X-Y plane. For 1, 3 and 4 tests the character of change and value of backlash are repeatable, but in test 2 the results is different than the observed trend.

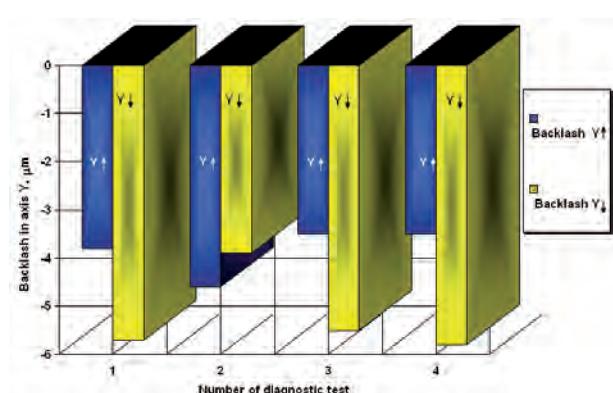
Backlash is the results of clearance in the drive system or measurement system of the machine clearance (crest clearance, wearing of transmission, etc.). This is typically caused by ballscrew endfloat or a worn drive nut. There may be a play in the guideways of the machine, causing a dwell in motion, when the direction in which the machine is being driven changes (fig. 8).

The effect of positive backlash on a machine is that a circular interpolated cutter path will show a short flat. Fig. 8 illustrates how the Y axis approaches a perfect circle but then diverges because the axis has stopped. Plot scaling changes the flat, which is actually machined, into a backlash step on the diagnostic plot as the machine appears to go beyond the perfect circle. If  $e$  is the height of the backlash step on the diagnostic plot, then the length of the flat on the cut part can be calculated as the square root of  $e$  multiplied by the diameter of the cut made. On fig. 9 presented dispersion of reversal spikes measurement for X and Y axis for four groups of tests.



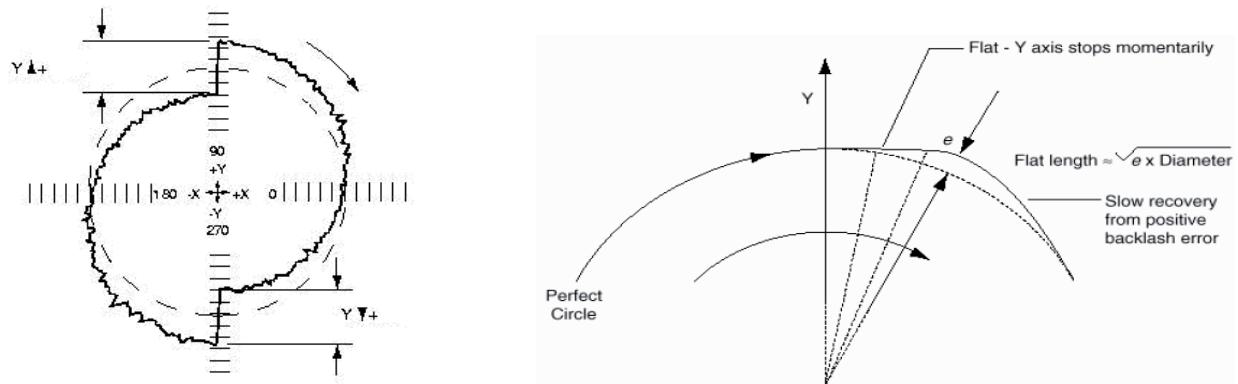
Rys. 6. Przebieg zmian średnich wartości odchyłek prostopadłości i okrągłości w płaszczyźnie X-Y dla czterech grup testów

Fig. 6. The dispersion of average values of squareness and circularity error for few group of tests in X-Y plane



Rys. 7. Przebieg zmian wartości średnich luzu zwrotnego dla czterech grup testów w płaszczyźnie X-Y

Fig. 7. Dispersion of backlash measurement for four group of test in X-Y plane

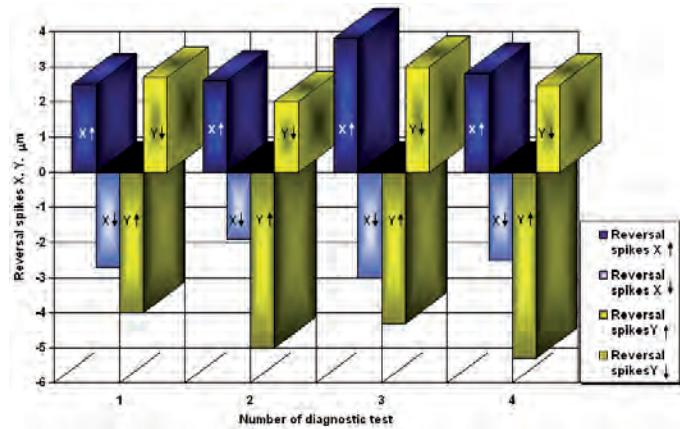


Rys. 8. Wpływ dodatniego luzu zwrotnego na realizowaną trajektorię ruchu [18, 24]: a) geometryczna reprezentacja błędu, b) zniekształcenie trajektorii ruchu

Fig. 8. The effect of positive backlash on a machine [18, 24]: a) geometrical representation of error; b) distortion of perfect path movement

skok odchyłki na wykresie kołowym testu diagnostycznego, przedstawionego przykładowo na rys. 10 a. Zasadniczym powodem powstawania błędu nawrotu jest zbyt wolna odpowiedź serwonapędu na sygnał z układu sterowania w chwili zmiany kierunku ruchu (przejście przez oś w interpolacji kołowej). Duże opóźnienie ruchu spowodowane zbyt małym położeniowym współczynnikiem wzmacnienia  $k_v$  powoduje zmianę trajektorii ruchu w stosunku do zadanej toru.

Innymi przyczynami powstawania błędu nawro- tu jest luz w układzie napędowym (luz na śrubie tocznej lub przekładni zębatej) oraz niewłaściwa praca serwonapędów. Cechą charakterystyczną błędu nawrotu jest to, że po pewnym

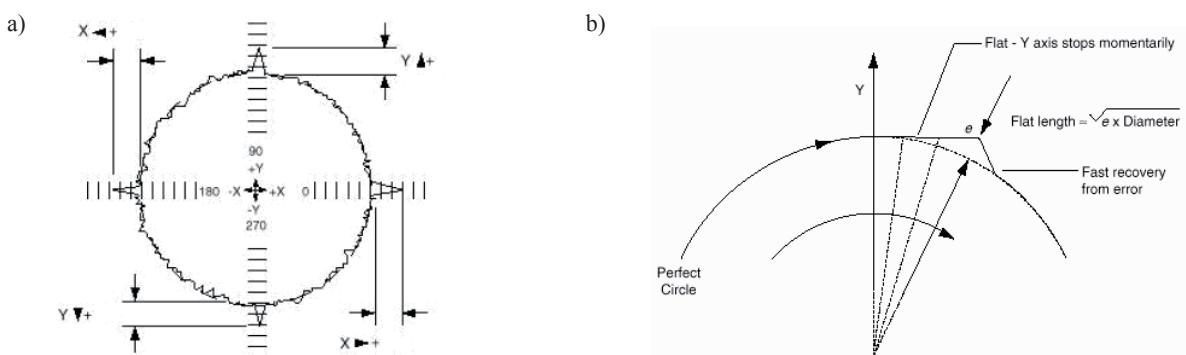


Rys. 9. Przebieg zmian wartości średnich błędu nawrotu dla czterech grup testów w płaszczyźnie X-Y

Fig. 9. Dispersion of reversal spikes measurement for four group of test in X-Y plane

Obtained results show high repeatability of measurement of reversal spikes in particular CNC machine tools. The effect of a reversal spike is that a circular interpolated cutter path will show a small flat followed by an inward recovery step. Fig. 10 a illustrates how the Y axis approaches a perfect circle but then diverges because the axis has stopped. The basic reason for the occurrence of reversal spikes error is a slow response of servo mechanism to the signal of steering control system, in the moment of reverse of movement during circle

interpolation. Severe delay of movement, caused by a small positional support index, it causes the change of trajectory of movement as related to the path. Other reason for reversal spi-



Rys. 10. Wpływ błędu nawrotu na realizowaną trajektorię ruchu [18, 24]: a) geometryczna prezentacja błędu w teście kołowości, b) zniekształcenie trajektorii ruchu

Fig. 10. The effect of a reversal spikes to the circularity plot [18, 24]: a) influence into circularity plot, b) influences to the perfect circle

czasie od momentu przejścia położenia zadanego osi X przez oś Y, silnik osi Y wykona ruch i serwonapęd zlikwiduje błąd w tej osi (rys. 10 a i b). Zasadniczym przedsięwzięciem zmierzającym do minimalizacji błędu nawrotu jest wykasowanie luzów w układzie napędowym i pomiarowym. Trwały efekt minimalizacji błędu nawrotu przyniesie odpowiednie nastawienie współczynników wzmacnienia regulatora położenia. W niektórych układach sterowania maszyn CNC istnieje także możliwość kompensowania błędu nawrotu.

W drugiej części badań diagnostycznych dokonano oceny wpływu prędkości ruchu posuwowego  $v_f$  na wartości odchyłek i rejestrowanych błędów. W tab. 2 przedstawiono analizowane średnie wartości odchyłek i błędów obrabiarki CNC zarejestrowane dla trzech różnych prędkości ruchu posuwowego frezarki w płaszczyźnie X-Y. Z tab. 2 wynika, że wartość średnia odchyłki okrągłości badanej obrabiarki wynosi  $22.3 \mu\text{m}$ , a zakres zmian odchyłki obejmuje bardzo wąski przedział  $1 \mu\text{m} < 21.9 \mu\text{m}; 22.9 \mu\text{m} >$ .

Na podstawie prezentowanych wyników badań diagnostycznych należy stwierdzić, że istotny wpływ na wartość całkowitej odchyłki okrągłości ma błąd nawrotu. Świadczą o tym zamieszczone w tab. 2 średnie udziały procentowe tego błędu w całkowitej odchyłce okrągłości ( $11\div18\%$ ). Powyższe wyniki świadczą również o tym, że błąd nawrotu w największym stopniu jest uzależniony od wartości prędkości ruchu posuwowego stołu frezarki  $v_f$ . Wyniki badań wpływu prędkości ruchu posuwowego stołu frezarki  $v_f$  podczas realizacji testu diagnostycznego przedstawiono w postaci graficznej na rys. 11.

Przedstawione na rys. 11 charakterystyki wskazują na liniowy charakter zmian błędu nawrotu w funkcji prędkości ruchu posuwowego  $v_f$ . Z rys. 11 wynika również, że wartość błędu nawrotu w osi Y rośnie w kierunku ujemnym wraz ze wzrostem prędkości ruchu posuwowego (t.j. podczas przechodzenia osi Y pod osią X, na wykresie kołowości pojawia się pik w kierunku dośrodkowym Y okręgu) oraz rośnie w kierunku dodatnim podczas przechodzenia osi Y nad osią X (na wykresie kołowości pojawia się pik na zewnątrz okręgu wzdłuż osi Y). Maksymalne wartości błędu nawrotu ( $-6.6 \mu\text{m}, 3.2 \mu\text{m}$ ) zaobserwowano dla prędkości ruchu posuwowego  $v_f = 3000 \text{ mm/min}$ .

Uzyskane wyniki badań eksperymentalnych skłaniają autorów do określenia w przyszłości związków funkcyjnych zależności zaobserwowane wartości błędów i odchyłek testowanych obrabiarek od sterowalnych parametrów realizacji testów diagnostycznych. Wymaga to jednak zbudowania bogatej bazy danych dotyczących określonej grupy obrabiarek CNC oraz opracowania metod pozwalających na przewidzenie i kompensację błędu nawrotu.

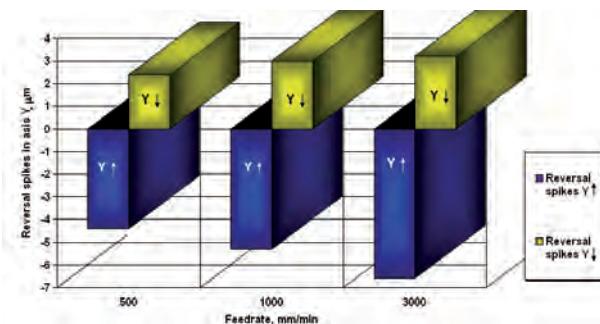
kes error is clearance in servomechanisms or transmission and improper work of servo mechanisms. The characteristic feature of reversal spikes error is that after some time from the moment of initial level of axis X through axis Y the engine of axis Y will make a movement and than servo mechanism will delete the error in the axis (fig. 10 a and 10 b). The basic task, that leads to minimize of the reversal spikes error is the cancellation of clearance in the servo mechanism of the CNC machine tool. The constant effect of minimize of reversal spikes error may be achieved by proper set of positional support index of the positioning regulator. Plot scaling changes the flat, which is actually machined, into a spike on the diagnostic plot as the machine appears to go beyond the perfect circle. If  $e$  is the height of the spike on the Ballbar plot then the length of the flat on the cut part can be calculated as the square root of  $e$  multiplied by the diameter of the cut made.

The next step in research was to evaluate the machine feedrate into circularity as well as other errors. Feedrate changed from 500 to 3000 mm/min but accuracy of machine defined by circularity was between  $<21.9 \mu\text{m}$  and  $22.9 \mu\text{m}>$

Table 2 presents average values of machine errors for different feed-rate of machine tool.

Described results show that the most affected type of error by the measuring speed was reversal spikes. An attempt to identify the influence of machine feed-rate on the machine at which the reversal spikes are minimised by performing a number of tests at various machine feed-rates. Use the best feed-rate identified for finishing cuts during circular interpolation.

It is confirmed by the shown in table 2 percentage participation of the error in the complete circularity error ( $11\div18\%$ ). The abovementioned results show that the reversal spikes error depends mostly on the feed-rate value of the plane. Results of measurement of feed-rate of machine plane during test are presented on fig. 11. The results presented in fig. 11 show that the reversal spikes error value in axis Y minimizes altogether with feed rate growth (during the movement of axis Y under axis X – on the circularity figure appears the peak inwards axis Y of the circle) and grows in the movement of axis Y above axis X (on the circularity figure appears the peak outwards axis Y of the circle). Maximum values of the error ( $-6.6 \mu\text{m}\div3.2 \mu\text{m}$ ) were observed for the feed rate  $v_f$  equal  $3000 \text{ mm/min}$ . The achieved results of the experimental research show that the authors may measure the functional relations of dependencies of errors and tested CNC machines and steering parameters of diagnostic tests. It requires the construction of a complex database of



Rys. 11. Przebieg zmian błędu nawrotu w funkcji prędkości ruchu posuwowego  $v_f$

Fig. 11. Reversal spikes errors vs. machine speed of feed-rate

cowanie modelu pozwalającego na optymalizację warunków realizacji testów diagnostycznych. W efekcie przyczyni się to do zmniejszenia stopnia niepewności pomiarów mających na celu ocenę stanu geometrycznego obrabiarek CNC. Przedstawione w pracy wyniki stanowią również fragment szeregu czasowego, który w przyszłości będzie stanowił podstawę realizacji zadania prognostycznego, pozwalającego przewidywać stan geometryczny obrabiarki na podstawie „stanów przeszłych”.

### 4. Podsumowanie i wnioski

Badania diagnostyczne eksploatowanych obrabiarek CNC z wykorzystaniem QC10 ballbar zmierzają do poprawy stanu technicznego obrabiarki poprzez usystematyzowaną i ukierunkowaną obsługę techniczną. W konsekwencji pozwalają na minimalizację odchyłek wynikających z pogarszającego się stanu technicznego obrabiarki. Zasadniczą wadą testu QC10 jest możliwość jego realizacji jedynie w trakcie przerw w pracy produkcyjnej maszyny. Wyłączenie obrabiarki z procesu produkcyjnego i badanie w całej przestrzeni obróbkowej są niewątpliwie głównymi wadami testu QC10. Nie mniej jednak łatwość realizacji cyklu pomiarowego i automatyczna identyfikacja poszczególnych rodzajów błędów oraz stosunkowo łatwa interpretacja wyników testu kołowości to niewątpliwie ważne zalety systemu QC10 ballbar. Wykonując 10-minutowe testy na każdej obrabiarce CNC np. co 3 miesiące możliwe jest określenie, które obrabiarki dokonują interpolacji z błędami większymi niż 25 mikrometrów. W przypadku błędów przekraczających tę wartość, obrabiarka nie jest w stanie utrzymać określonych tolerancji obróbki części i w związku z tym prawdopodobne jest wystąpienie braków. Oznacza to, że maszyna wymaga konserwacji.

W oparciu o przeprowadzone badania i analizę wyników pomiarów diagnostycznych testowanej obrabiarki nie można stwierdzić jednoznacznie, że obrabiarka spełnia stawiane jej wymagania. Wynika to z ograniczonej liczby wykonanych pomiarów diagnostycznych. W przypadku realizacji testów lokalnych tylko niewielki zakres osi w przestrzeni obróbkowej został przebadany, co utrudnia całościową i kompleksową ocenę błędów obrabiarki. Można jedynie przypuszczać, że obrabiarka nie przekroczy dopuszczalnych wartości odchyłek. Przypuszczenie to zostanie potwierdzone po zbadaniu pełnych zakresów przemieszczeń wzduż poszczególnych osi sterowanych numerycznie i wyznaczeniu całkowitych błędów w poszczególnych płaszczyznach X-Y, Y-Z, X-Z. Z punktu widzenia jakości oceny diagnostycznej badanej maszyny autorzy zamierzają prowadzić gruntowną analizę dokładności badanej maszyny realizując szersze badania diagnostyczne w całej przestrzeni obróbkowej. Będą one obejmować pomiary w różnych miejscach tej przestrzeni przy kilku wartościach prędkości ruchu posuwowego dla każdego miejsca stosując różne wartości promienia interpolowanego okręgu. Autorzy podejmą również próbę weryfikacji uzyskanych wyników innymi metodami diagnostycznymi.

### 5. References

1. Bryan J.B. A simple method for testing measuring machines and machine tools; Part 1: Precision Engineering 1982; 4, 2: 61.
2. Bryan J.B. A simple method for testing measuring machines and machine tools; Part 2: Precision Engineering 1982; 4, 3: 125.
3. Caban J., Iskra R., Józwik J., Kamieńska-Krzowska B. Ocena stanu maszyny technologicznej CNC z zastosowaniem interferometrii

a group of CNC machine tools and construction of a model which allows for optimization of conditions of diagnostic tests' completion. In effect, it will help to lessen the level of uncertainty of measurement which is aimed at the check of CNC machines geometrical state. The abovementioned effects, presented in the paper are also a fragment of temporal series, which in future may be a basis of the prognosis task allowing for diagnostics of geometrical state of CNC machine on the information about past state.

### 4. Conclusions

Diagnostic results of machine using QC10 ballbar method lead to improvement of technical state of the machine, through systematized and directed technical service. In conclusion, deviations resulting from the impairment of machine technical control are minimized. The possibility of the QC10 test completion only at the time of machine outage in the production phase is a substantial drawback of the test. Exclusion of the machine from the production process and research identification in processing are main disadvantages of the QC10 test. But it is easy to conduct the measurement cycle and to identify the particular error types as well as it is relatively easy to interpret the circular test, which is undoubtedly the main asset of the QC10 ballbar test. Performance of 10 minutes test on each machine e.g. each 3 months enables determination of the machine which interpolates with errors of a value higher than 25 micrometers. In case of higher value errors, the machine tool will not keep the determined part processing tolerance; as a result deficiencies may occur. This indicates that the machine requires maintenance. On the basis of the research and analysis of diagnostic measurements of the machine, one may not unequivocally state that the machine completes requirements imposed. It results from the number of diagnostic measurements conducted.

In case of local tests completion, only a small axis scope of machining space was researched, which hinders the complete assessment of machine errors. One can assume that the machine will not exceed the permissible deviation values. The supposition will be confirmed only after the research of complete scope of shifts along certain CNC axis is completed and after determination of total errors of certain X-Y, Y-Z, X-Z surfaces. Detailed analysis of the machine will be conducted by the authors from the perspective of diagnostic evaluation, by performance of a broad diagnostic research of full machining space. It will include measurement in different locations, using different values of interpolated circle radius. The authors will also verify results, using other diagnostic methods.

- laserowej. Monografia pod red. J. Józwik i inni „Techniki wytwarzania w budowie maszyn – aktualne zagadnienia badawcze”. Lublin: LTN, 2007.
4. Curran E., Phelan P. Quick check error verification of coordinate measuring machines; Journal of Materials Processing Technology 2004;155-156: 1207-1213.
  5. Honczarenko J., Kwaśniewicz J. Nowe systemy pomiarowe do sprawdzania dokładności obrabiarek CNC. Mechanik 2008;12: 1012-1016.
  6. Iwasawa K., Iwama A., Mitsui K. Development of a measuring method for several types of programmed tool paths for NC machine tools using a laser displacement interferometer and a rotary encoder, Precision Engineering 2004; 28, 4: 399–408.
  7. Józwik, J., i inni. Prognozowanie dokładności obrabiarki CNC na podstawie szeregu czasowego. Cz. 1. Wybrane urządzenia diagnostyczne obrabiarek CNC. Published by Scientific and Technical Society at the University of Zilina. Slovakia, 2009.
  8. Józwik, J., i inni. Prognozowanie dokładności obrabiarki CNC na podstawie szeregu czasowego. Cz. 2. Prognozowanie odchyłki okrągłości i prostopadłości osi obrabiarki CNC. Published by Scientific and Technical Society at the University of Zilina. Slovakia, 2009.
  9. Kakino Y., Ihara Y., Shinohara A. Accuracy Inspection of NC Machine Tools by Double Ball Bar Method, Hasnser Verlag Publishers, 1993.
  10. Král J. et al. Obmedzujúce limity dnešných CNC obrábacích centier. Acta Mechanica Slovaca 2008; 12, 3: 219-222.
  11. Král J. et al. Verifikácia presnosti NC a CNC trojosej frézy. In: Acta Mechanica Slovaca 2008; 12, 3: 229-232.
  12. Lei W.T., Sung M.P., Liu W.L., Chuang Y.C. Double ballbar test for the rotary axes of five-axis CNC machine tools. International Journal of Machine Tools and Manufacture 2007; 47, 2: 273-285.
  13. Nakazawa H., Ito K. Measurement system of contouring accuracy on NC Machine Tools. Bull. Japan Soc. Prec. Eng. 1978; 12, 4: 189.
  14. PN-ISO 230-4:1999 – Przepisy badania obrabiarek. Badania okrągłości w obrabiarkach sterowanych numerycznie.
  15. Rzysko T. Nowe systemy pomiarowe do stosowania na tokarkach CNC. Mechanik 2001; 10 (74): 665.
  16. Schwenke H., Knapp W., Haitjema H., Weckenmann A., Schmitte R., Delbressine F. Geometric error measurement and compensation of machines—An update. CIRP Annals - Manufacturing Technology 2008; 57, 2: 660-675.
  17. Szafarczyk M. Urządzenie do sprawdzania dokładności obrabiarek 5-osiowych. Mechanik 2005; 4 (79), 268.
  18. Ślązak Ł. Magdziak M. Nowoczesne systemy pomiaru przedmiotów na obrabiarkach NC. Mechanik 2007; 5-6 (81): 483 ÷ 489.
  19. Uhlmann E., Hohwieler E., Geisert C.. Monitoring of Slowly Progressing Deterioration of CNC-Machine Axes. 2nd I'PROMS Virtual International Conference 3-14 July 2006 Intelligent Production Machines and Systems. Copyright © 2006 Elsevier Ltd., 2006.
  20. Weikert S. R-Test, a New Device for Accuracy Measurements on Five Axis Machine Tools, CIRP Annals 2004; 53, 1: 429 .
  21. Wypysiński R. Wektorowa metoda sprawdzania maszyn NC na przykładzie tokarek. XI Konferencja Naukowo-Techniczna Automation 2007. Warszawa: Pomiary Automatyka Robotyka 2007.
  22. Wypysiński R. Zastosowanie niezależnego układu współrzędnych do badania dokładności maszyn NC. XII Konferencja Naukowo-Techniczna Automation 2008. Warszawa: Pomiary Automatyka Robotyka 2008.
  23. Wypysiński R.: Vector Bar for accuracy testing of NC lathes, IV International Conference on Machining and Measurement of Sculptured Surfaces, No A/2/MMSS06.
  24. Qiu H., Nishitani H., Kubo A., Yamamoto J., Hirakawa I. Examinations on Motion Accuracy Evaluation Based on the Ball Bar Test for a Machining Center; Bulletin of the Faculty of Engineering Kyushu Sangyo University 2003; 40:11-18.

---

**Dr inż. Jerzy JÓZWIK**

**Mgr inż. Paweł PIEŠKO**

Katedra Podstaw Inżynierii Produkcji

Politechnika Lubelska

Ul. Nadbystrzycka 36, 20-816 Lublin

e-mail: j.jozwik@pollub.pl; p.piesko@pollub.pl

**Mgr inż. Grzegorz KRAJEWSKI**

Instytut Metrologii i Inżynierii Biomedycznej

Politechnika Warszawska

Ul. Św. Andrzeja Boboli 8, 02-525 Warszawa

e-mail: gkrajewski@gazeta.pl

---

## **PLANOWANIE OBSŁUGI NARZĘDZI DO OBRÓBKI PLASTYCZNEJ NA ZIMNO Z WYKORZYSTANIEM LOGIKI ROZMYTEJ**

## **MAINTENANCE PLANNING OF COLD PLASTIC DEFORMATION TOOLS USING FUZZY LOGIC**

*W przypadku systemów technicznych, na ogół cechujących się dużą złożonością, ich otwartość można wykorzystać do poprawy niezawodności systemu stosując odnawianie profilaktyczne. Skuteczne zwiększenie niezawodności złożonych narzędzi do obróbki plastycznej na zimno zależy w znacznym stopniu od charakterystyki czynności obsługowych, dlatego też w strategiach odnowy powszechnie stosuje się odnawianie profilaktyczne. W pracy omówiono podejście do planowania obsługi wykorzystujące logikę rozmytą, które można stosować w przypadkach, gdy analityczne wyprowadzenie funkcji niezawodności jest niemożliwe. Przedstawiono oparty na logice rozmytej proces decyzyjny w zakresie planowania czynności obsługi omawianych narzędzi. Jego zastosowanie zilustrowano w studium przypadku. Wyniki studium przypadku pokazują, że logika rozmyta jest metodą, która może być z powodzeniem stosowana w planowaniu obsługi narzędzi do obróbki plastycznej na zimno.*

**Słowa kluczowe:** uszkodzenie, monitorowanie drgań, logika rozmyta, planowanie obsługi.

*For technical systems, generally of high complexity, their open feature may be employed to improve system reliability by preventive renewal. The effectiveness of increasing complex cold plastic deformation tools depends considerably on the characteristics of their maintenance actions and renewal policies are widely used to carry out the preventive renewal. If the derivation of an analytical reliability function is impossible, a fuzzy logic approach for maintenance planning is emphasized in this paper. The fuzzy logic decision process for planning the maintenance activities of these tools is presented and a case study illustrates its application. The results of the case study demonstrate that fuzzy logic is a method which can be successfully used in maintenance planning of cold plastic deformation tools.*

**Keywords:** failure, vibration monitoring, fuzzy logic, maintenance planning.

### **1. Introduction**

Metal forming is one of the most modern fields in the technology machine building, offering great advantages in terms of rational use of materials, high productivity and cost saving [3, 19]. Increasing complexity of tools used in these processes has conducted to a systematic approach of their function with a special attention to maintain their performances in time. For complex technical systems such as the tools used in cold plastic deformation processes, renewal possibilities are available. Therefore, their effectiveness depends on the reliability, as well as on the fault detection and the planning of the maintenance actions.

The development of a reliability model is based on the notion of failure, when at least one of the cold plastic deformation tool performances exceeds its tolerance limits [4]. The high degree of individualization of each cold plastic deformation tool, the high number of variables of a deformation process and complex interactions between them lead to a lack of accurate information on their failure. The limited and not systemized information about failure of cold plastic deformation tools represent a major impediment in studying the reliability of these tools.

The adoption of distribution law is a fundamental problem of the reliability modeling and in formulating renewal policies of technical systems prior to their failure. Specification of the reliability model requires considerable effort in adoption the law distribution and in estimating its parameters [4]. If the derivation of an analytical reliability function is impossible, the renewal policies cannot be designed. Taking into account that the transi-

tion between stage of good function and stage of failure of cold plastic deformation tools is achieved by several intermediate stages characterized by certain levels of performance, the fuzzy logic may be a solution for planning the maintenance actions.

Fuzzy methodology is indicated as an important tool not only to analyze the complex behavior of a system [16], but also to improve a system maintainability using appropriate maintenance practices. Although the idea that fuzzy logic might be used for their maintenance planning is provocative [1, 5, 10, 18], the researches in the field of cold plastic deformation processes are relatively underdeveloped.

Within this framework, this article focuses on developing a fuzzy approach for maintenance planning of cold plastic deformation tools and is organized as follows. First, a data acquisition system based on vibration analysis for monitoring the failure of cold plastic deformation tools is described. Then, the fuzzy logic decision process for planning the maintenance activities of these tools is depicted. A case study demonstrates the application of the fuzzy logic system in the case of a combined shearing for fine mechanics. Several conclusions and a recommendation for future research are presented at the end of the study.

### **2. Failure identification of cold plastic deformation tools**

The knowledge of influences and determination of causal phenomena of cold plastic deformation tools failure is confronted with the reduced volume of experimental data. This leads to

a relatively high level of uncertainty in the estimation of proper function of the tools. On the other hand, the methods of diagnosing failure do not have a universal character, so depending on the nature of processes, equipments or systems, specific methods must be put into practice each time. The vibration monitoring is indicated as an important technique for failure diagnosis [ 8, 12, 13, 15].

The wear of the active elements of cold plastic deformation tools, which are moving relatively, is one of the main cause of their failure and vibration spectrum analysis may be employed for the failure identification. Each active element generates a particular signal and any change in frequency can be measured and identified with monitoring vibration devices.

For failure identification of active elements, a data acquisition system based on vibration amplitude monitoring was used. The vibration amplitude is expressed in velocity units [mm/sec] and comparing the vibration amplitude value at a moment with its reference value, the failure can be detected. The data acquisition system is composed by sensor-TopMessage device-personal computer.

The data acquisition system was developed around a notebook with extension slot for TopMessage device. The signal from sensor is transferred to the TopMessage device, which include the AMDT/V module for vibration monitoring. The Vibrolab software is employed for vibration analysis and monitoring. Both TopMessage and Vibrolab are made by Delphin Technology AG (Germany).

### 3. A fuzzy approach for maintenance planning of cold plastic deformation tools

The capacity of cold plastic deformation tools to accomplish their mission depend on their intrinsic reliability and on the characteristics of the maintenance actions. Therefore, their effectiveness groups both reliability and maintainability, because they treat the same design elements and use the same mathematics base in their approaches.

Within this context, the reliability modeling of cold plastic deformation tools must be performed. Because of the complexity of physico-chemical phenomena that lead to the degradation of their specified function, phenomena that are not subject to deterministic laws, the reliability analysis must be carried out by the probability theory and mathematical statistics.

The central problem of reliability modeling of cold plastic deformation tools is the adoption of the distribution law, using a goodness-of-fit test based on the theory of hypothesis testing. The Kolmogorov-Smirnov test is one of the best known goodness-of-fit tests, in which the distribution law is accepted if and only if [4, p.34]:

$$\max_{1 \leq i \leq n} |F(t) - \hat{F}(t)| < d_{1-\alpha}(n) \quad (1)$$

where  $F(t)$  and  $\hat{F}(t)$  are the true and estimated cumulative distribution function,  $\alpha$  is the risk of first order,  $n$  is the sample and  $d_{1-\alpha}(n)$  is the  $1-\alpha$  percentile of the Kolmogorov-Smirnov distribution. The parameters of the proposed distribution law must also be estimated from the experimental data. The reliability measures estimated in the reliability studies are used as input data in the design of the renewal polices to improve the tool effectiveness. The periodic and non-periodic are the main types of renewal policies and several criteria can be used in designing

renewal policies [4, 7, 9]. The periodic renewal policy is described by the same time interval between two successive preventive renewals, while the non-periodic renewal policy is based on system age. Therefore, the block replacement policy is a deterministic policy and the age replacement policy is a random one.

The main problem appears when the available distribution laws are rejected by the goodness-of-fit test. A combination or succession of exponential distributions can be used to approximate the true distribution law, at any level of accuracy [4]. However, is very difficult or even impossible to design the renewal policies for a such distribution.

Fuzzy methodology is one of widely applied expert system methodologies in many fields [11] and the studies available in the literature demonstrate the importance of fuzzy logic in maintenance actions. Kobbacy [10] points fuzzy logic as an important tool in the applications of artificial intelligence techniques in the maintenance field. The choosing of the most adequate maintenance approach based on a fuzzy multiple criteria decision making methodology is shown in [1], while Sudiarso and Labib [18] present a fuzzy logic algorithm to an integrated maintenance/ production scheduling. Using the fuzzy set theory, an algorithm for specifying the best type of maintenance has been developed in [5].

In the case of cold plastic deformation tools, the fuzzy logic decision process for planning the maintenance activities is based on:

1) Setting up the inputs in the fuzzy decision system

$$C = \{C_1, C_2, \dots, C_j, \dots, C_m\} \quad (2)$$

These inputs represent the evaluation criteria set in relation to which the maintenance planning will be determined.

2) Defining the domain of values for each evaluation criterion

$$\begin{aligned} C_1 : D_1 &= [L_1^{\inf}, L_1^{\sup}] \\ &\vdots \\ C_j : D_j &= [L_j^{\inf}, L_j^{\sup}] \\ &\vdots \\ C_m : D_m &= [L_m^{\inf}, L_m^{\sup}] \end{aligned} \quad (3)$$

where  $L_j^{\inf}, L_j^{\sup}$  are the lower respectively the upper limit of the domain of values associated with the criterion  $C_j, j = \overline{1, m}$

3) Defining linguistic variable associated with each evaluation criterion

Each evaluation criterion is associated with a linguistic variable. For simplicity, the linguistic variable will have the same name as the evaluation criterion. Thus  $C_j$  criterion will become the linguistic variable  $C_j, j = \overline{1, m}$ .

4) Establishing linguistic terms associated with each linguistic variable

For each linguistic variable, the linguistic terms are defined [6, 14]. They serve to fuzzy characterize the crisp information. The set of linguistic terms associated with each linguistic variable  $C_j$  is:

$$\begin{aligned}
 C_1 : GL_1^C &= \{GL_{11}^C, GL_{12}^C, \dots, GL_{1k}^C\} \\
 &\vdots \\
 C_j : GL_j^C &= \{GL_{j1}^C, GL_{j2}^C, \dots, GL_{jk}^C\} \\
 &\vdots \\
 C_m : GL_m^C &= \{GL_{m1}^C, GL_{m2}^C, \dots, GL_{mk}^C\}
 \end{aligned} \tag{4}$$

5) Establishing of membership functions associated with each linguistic term of relation (4)

$$\begin{aligned}
 C_1 \rightarrow GL_1^C \rightarrow FA_1^C &= \{fa_{11}^C, fa_{12}^C, \dots, fa_{1k}^C\} \\
 &\vdots \\
 C_j \rightarrow GL_j^C \rightarrow FA_j^C &= \{fa_{j1}^C, fa_{j2}^C, \dots, fa_{jk}^C\} \\
 &\vdots \\
 C_m \rightarrow GL_m^C \rightarrow FA_m^C &= \{fa_{m1}^C, fa_{m2}^C, \dots, fa_{mk}^C\}
 \end{aligned} \tag{5}$$

Several membership functions are available, and they are shown in [6, 17].

6) Defining the outputs of the decision process. For the maintenance planning of cold plastic deformation tools, the scheduled time when preventive renewals should be carried out T is proposed as output.

7) Defining the domain of values for the output T

$$T : D_T = [L_T^{\inf}, L_T^{\sup}] \tag{6}$$

where  $L_T^{\inf}, L_T^{\sup}$  are the lower respectively the upper limit of the domain of values associated with the output T.

8) Defining linguistic variable associated the output: for simplicity, the output T will become the linguistic variable T.

9) Establishing linguistic terms associated with the linguistic variable T

$$T : GL^T = \{GL_1^T, GL_2^T, \dots, GL_k^T\} \tag{7}$$

10) Establishing the membership functions associated with linguistic terms of relation (7)

$$T \rightarrow GL^T \rightarrow FA^T = \{fa_1^T, fa_2^T, \dots, fa_k^T\} \tag{8}$$

11) Setting up the method of connecting the different values of membership functions (the inference rules)

In the case of cold plastic deformation tools, the AND operator is used and the inference rules have the following form:

$$RIN_1 : \text{IF } (C_1 = GL_{11}^C \text{ AND } \dots \text{ AND } C_m = GL_{m1}^C) \text{ THEN } (T = GL_1^T) \tag{9}$$

$$RIN_i : \text{IF } (C_i = GL_{ij}^C \text{ AND } \dots \text{ AND } C_m = GL_{mj}^C) \text{ THEN } (T = GL_j^T) \tag{9}$$

$$RIN_r : \text{IF } (C_r = GL_{rk}^C \text{ AND } \dots \text{ AND } C_m = GL_{mk}^C) \text{ THEN } (T = G_k^T) \tag{9}$$

12) Establishing the defuzzification method

Several methods are available for defuzzification and the centroid method is employed in this paper. Its expression is presented in [14, p.101; 17, p.98] and can be written as:

$${}^0T = \frac{\int_T T \cdot {}^0fa_{rez}^T(T) \cdot dT}{\int_T {}^0fa_{rez}^T(T) \cdot dT} \tag{10}$$

#### 4. Case study

The maintenance planning using fuzzy logic was applied for active elements of a fine mechanics plastic deformation tool (a combined shearing tool). We assumed that after each corrective repair, the active elements are brought to the same state, eliminating the wear accumulated since the preceding failure.

The times-to-failure were achieved employing the data acquisition system. Comparing the amplitude of vibration with the situation when the active elements are in a good state (figure 1), respectively in a failure state (figure 2), the times-to failure can be identified.

Using the data acquisition system, the following times to failure of the tools were obtained (in cycles): 12943, 14959, 15714, 17137, 18011, 19822, 22117, 24148, 26997, 28889, 29783, 34315. Taking into account a first risk  $\alpha=0.1$ , the more widely used laws in reliability modeling of cold plastic deformation tools, respectively alpha and power laws [2], are rejected by the Kolmogorov-Smirnov goodness-of-fit test.

The maintenance planning can be achieved in this case based on the fuzzy logic decision process depicted in section 3. A fuzzy decision system called Fuzzy\_maintenance\_Combined\_Shearing was developed using Fuzzy Logic Toolbox of Matlab software (figure 3).

The amplitude of vibration  $C_1$  [mm/s] and the distance (break clearance) between the active elements of the combined shearing tool  $C_2$  [mm] are adopted as inputs. The number of

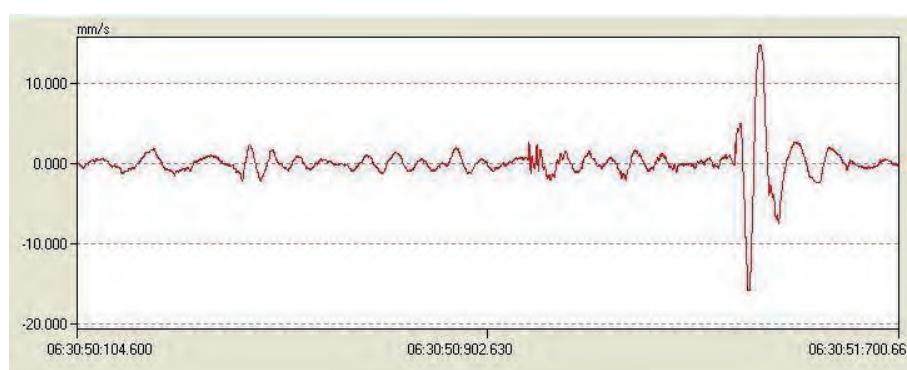


Fig. 1. The vibration amplitude for the good state of the active elements

cycles to the preventive renewal  $O_1$  [cycles] is used as output. The domain of values of each input is: C1:D1=[16.75;20.45]; C2:D2=[1.40;1.65], while for the output is O1:DO1=[0;22500]. The inference rules are shown in figure 4.

Figure 5 presents the graphical representation of the  $O_1=f(D_1, D_2)$ . As an example, if C1= 17.9 mm/s and C2=1.51 mm, O1=15200 cycles. Therefore, the number of scheduled cycles to the next renewal of the combined shearing tool is 15200 cycles.

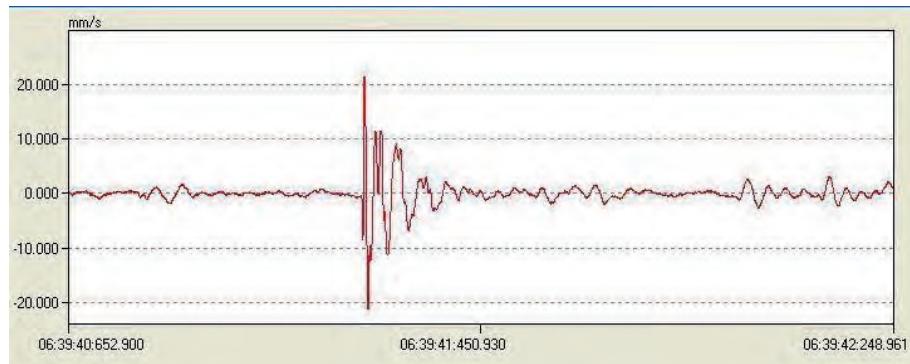


Fig. 2. The vibration amplitude for the failure state of the active elements

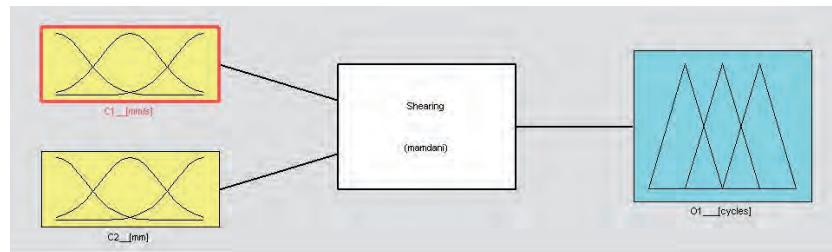


Fig. 3. The fuzzy decision system Fuzzy\_maintenance\_Combined\_Shearing.fis

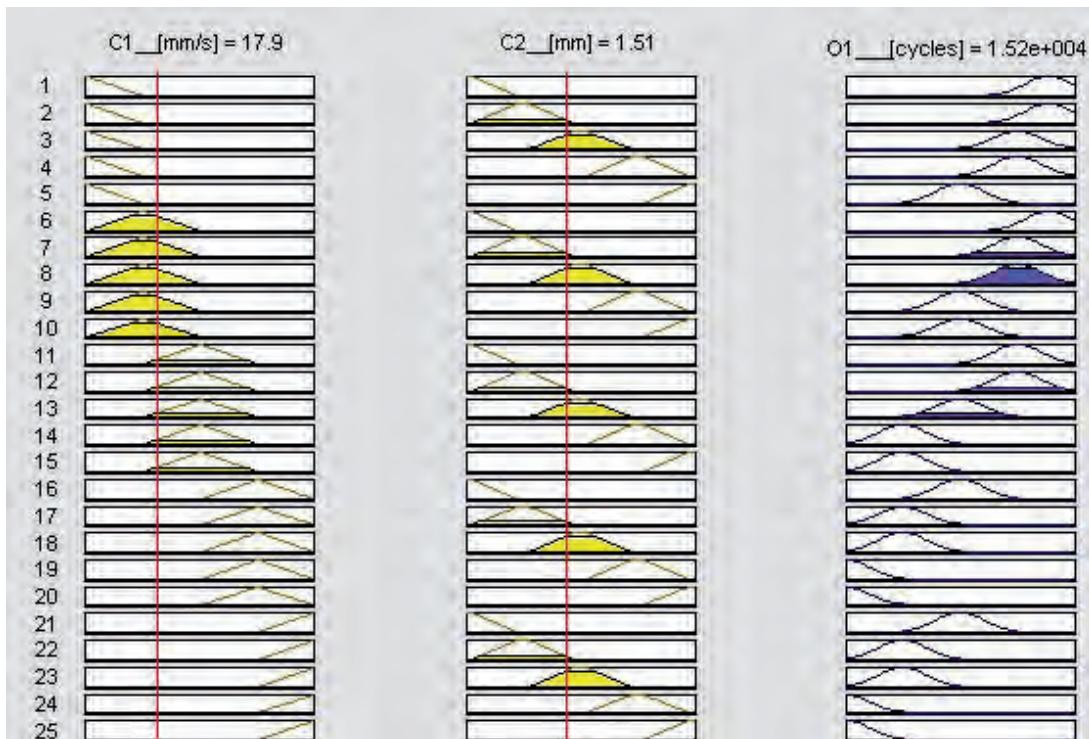


Fig. 4. The inference rules

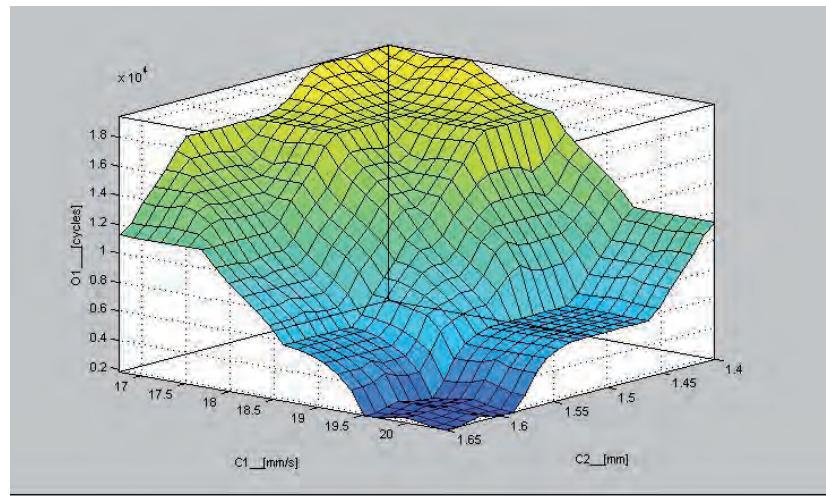


Fig. 5. The graphical representation of the  $O_1 = f(D_1, D_2)$

## 5. Conclusions

Adequate maintenance actions of complex technical systems to prevent failures has become increasingly important. Renewal policies are generally the major maintenance actions carried out in the case of cold plastic deformation tools. For this purpose, the reliability modeling of cold plastic deformation tools must be performed by a goodness-of-fit test. Kolmogorov-Smirnov test was proposed to adopt the reliability model and a data acquisition system was developed for the identification of the times-to-failures.

However, after testing the available distribution laws against the experimental data the possibility to reject some of the most used laws can appear, while for other distribution laws is very difficult or impossible to design renewal policies. In such a situation, we emphasize fuzzy logic for maintenance planning.

The studies available in the literature demonstrate the importance of fuzzy logic in maintenance actions, but not so much work has been done on applying fuzzy logic for maintenance planning of cold plastic deformation tools. A fuzzy logic decision process for planning their maintenance activities is depicted and a fuzzy decision system developed using Fuzzy Logic Toolbox of Matlab software demonstrates its application for a fine mechanics plastic deformation tool.

In conclusion, fuzzy logic for maintenance planning provides a proactive method to renewal cold plastic deformation tools prior to their failure. The results of the case study demonstrate that the fuzzy logic is a method which can be successfully used in maintainability planning of these tools. The combination of fuzzy logic with neural networks or genetic algorithms for maintenance planning of cold plastic deformation tools is an important area for future researches.

\*\*\*\*\*

*The research was in part undertaken using the equipments purchased in the Capacities Grant no. 125/cp/I/2007, supported by the Romanian National Authority for Scientific Research. Any findings, results or conclusions expressed in this article belong to authors and do not necessarily reflect the views of the Romanian National Authority for Scientific Research.*

\*\*\*\*\*

## 6. References

1. Al-Najjar B., Alsyouf I. Selecting the most efficient maintenance approach using fuzzy multiple criteria decision making. International Journal of Production Economics 2003; 84: 85–100.
2. Baban C.F., Baban M., Radu I.E., Integrated system for reliability modeling of cold plastic deformation tools used in the car industry. Annual Reliability and Maintainability Symposium Seattle USA 2002; 212-216.
3. Boljanovic V. Sheet Metal Forming Processes and Die Design. Industrial Press, 2004.
4. Catuneanu V., M., Mihalache A., N. Reliability Fundamentals. Amsterdam: Elsevier, 1989.
5. Chaudhuri D., Suresh P. V. An algorithm for maintenance and replacement policy using fuzzy set theory. Reliability Engineering & System Safety 1995; 50(1): 79-86.
6. Chen G., Pham T.T. Introduction to Fuzzy Sets, Fuzzy Logic, and Fuzzy Control Systems. CRC Press, 2001.
7. Elsayed E.A. Reliability Engineering. Addison Wesley Longman, 1996.
8. Jardine A.K.S., Joseph T., Banjevic D. Optimizing condition-based maintenance decisions for equipment subject to vibration monitoring. Journal of Quality in Maintenance Engineering 1999; 5(3): 192-202.
9. Jurča V., Hladík T., Aleš Z. Optimization of preventive maintenance intervals. Eksplotacija i Niezawodnosc - Maintenance and Reliability 2008, 3(39): 41-44.

10. Kobbacy K.A.H. Artificial Intelligence in Maintenance. In Kobbacy K.A.H., Murthy D.N.P.(eds). Complex System Maintenance Handbook. London: Springer, 2008; 209-234.
11. Liao S.H. Expert system methodologies and applications – a decade review from 1995 to 2004, Expert Systems with Applications 2005; 28(1): 93-103.
12. Radkowski S. Use of vibroacoustical signal in detecting early stages of failures. Eksplotacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability 2007; 3(35): 11-18.
13. Rehorn A.G, Jiang J., Orban P.E., Bordatchev E.V. State-of-the-art methods and results in tool condition monitoring: a review. International Journal of Advanced Manufacturing Technology 2005; 26(7-8): 693-710.
14. Ross T. Fuzzy Logic with Engineering Applications. John Wiley & Sons, 2 edition, 2004.
15. Scheffer C., Girdhar P. Practical Machinery Vibration Analysis and Predictive Maintenance. Elsevier, 2004.
16. Sharma R.K., Kumar D., Kumar P. Fuzzy methodology – a pragmatic tool to model, analyse and predict complex behaviour of industrial systems. International Journal for Computer-Aided Engineering and Software 2007; 24(4): 319-346.
17. Sivanandam S. N., Sumathi S., Deepa S. N. Introduction to Fuzzy Logic using MATLAB. Springer, 2006.
18. Sudiarso A., Labib, A.W. A Fuzzy Logic Approach to an Integrated Maintenance / Production Scheduling Algorithm. International Journal of Production Research 2002; 40(13): 3121-3138.
19. Tschdtsch H., Metal Forming Practise: Processes - Machines – Tools. Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 2006.

---

**Prof. eng. Marius BABAN, PhD**

**Prof. eng. Calin Florin BABAN, PhD**

**Prof. eng. Florin Sandu BLAGA, PhD**

Faculty of Management and Technological Engineering  
University of Oradea, 1, Universitatii st., Oradea, Romania

E-mail: mbaban@uoradea.ro

E-mail: cbaban@uoradea.ro

E-mail: florin\_bлага2000@yahoo.com

---

Henryka JORMAKKA  
Pekka KOPONEN  
Heimo PENTIKÄINEN  
Hanna BARTOSZEWCZ-BURCZY

## ATAKI FIZYCZNE I ELEKTRONICZNE NA SYSTEMY ENERGETYCZNE - IDENTYFIKACJA ZAGROŻEŃ I WYMAGANIA W CELU PRZECIWDZIAŁANIA IM

### ON MANAGING PHYSICAL AND CYBER THREATS TO ENERGY SYSTEMS IDENTIFICATION AND COUNTERMEASURE REQUIREMENTS

*Centra dyspozycji i sterowania systemami energetycznymi narażone są na różnego typu niebezpieczeństwa. Należą do nich miedzy innymi klęski żywiołowe, ataki hakerów, czy terrorystów, a także niezamierzone błędy popełniane przez personel. Artykuł przedstawia metody zapobiegające tym zagrożeniom. Proponuje protokół mogący posłużyć do wykrycia braków w zabezpieczeniu przed zagrożeniami, jak i do oceny stanu bezpieczeństwa systemów energetycznych. Pod uwagębrane są zarówno zagrożenia fizyczne, jak i ataki elektroniczne.*

**Słowa kluczowe:** systemy dyspozycji i sterowania, bezpieczeństwo.

*Control centers of energy systems are subjects to different kind of threats such as natural disasters, hackers, or terrorist attacks, or finally unintentional personnel errors. The article introduces some protections methods against those threats. It proposes a protocol to be used for routine self-assessment to provide companies with feedback on the effectiveness of their security policy. The protocol can be used as well during security audits for detection of energy systems infrastructure vulnerabilities. Both, physical and cyber attacks are taken into consideration.*

**Keywords:** control systems, security.

#### 1. Introduction

The complexity of operating power system has recently increased and the equipment failures and operational errors are more likely and of bigger impact. As the energy systems directly influence life and wellbeing of citizens in modernized countries, they should be protected to the greatest possible extend, starting from all kind of physical threats, short or long-term system disturbances, natural disasters, accidents, human errors, to highly motivated and well-funded computer and control experts organized in terrorist groups. While protection against physical threats and random faults and failures has been considered for long time, the security of electronic communications and information distribution have been thought of peripheral importance until recent years.

The development of control systems for the energy industry has been focused almost exclusively on implementing equipment that can keep the power system reliable. This was due to the fact that the control networks were designed and believed to be isolated from the external communication. Additionally, the Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) systems were very specialized and used proprietary software and hardware equipment where the details of implementation were known only by the vendor and therefore the systems were thought to be secure. Both, control systems and understanding security, have developed since. Different fora provide guidance on industrial automation systems security, an example is the National Institute of Standards and Technology (NIST) with its Guide to Industrial Control Systems (ICS) Security [1], or

Instrumentation, Systems, and Automation Society (ISA) creating guidance documents and standard [2] on introducing IT security to existing industrial control and automation systems. Security by obscurity is no longer considered a valid concept. The control systems are increasingly using public networks for different internal and external wide area communication purposes. At the same time proprietary control systems are being replaced by equipment with standardized interfaces, while the standardized communication protocols connecting the systems to external networks are well documented and available not only to implementers, but also to all types of hackers, terrorists and industrial spies including. Failure of control- and protection systems can lead to huge costs and risk human safety. In addition, intruders are looking for possibilities to use the industrial control systems as a penetration route to other systems. As a result, the centres of the energy domain and the SCADA systems controlling multiple field devices become high-profile targets for terrorist. Therefore all the players of the power industry have to know that safety and security must include physical means such like fences, gates, guards, alarm systems, but also electronic protection measures like firewalls, or intrusion detection system, as well as actual risks assessments and plans for emergency actions.

Although the security level of power systems and particularly SCADA-based systems is increasing, it still does not correspond to the possible threat consequences. There are large number of implemented industrial control systems which are relatively insecure due to different kinds of vulnerabilities. Therefore companies need formal programs for establishing stan-

dard-based approach to security that would define security requirements and provide guidance regarding rules to be followed to ensure the highest degree of their systems security in everyday routine as well as actions to be taken during incidents.

This article discusses security vulnerabilities and a protocol to be used for routine self-assessment to provide companies with feedback on the effectiveness of their security policy. It takes into consideration both, the physical and cyber attacks. The protocol can be used as well during security audits for detection of all kind of threats and potential attacks on the energy systems infrastructure. As the systems are pretty complex and part of the security maintenance and monitoring is quite often outsourced to external companies, it is better to simplify the rules to be followed by dividing the protocol into parts directed to various entities for controlling their own resources.

## 2. Physical threats on electricity infrastructure

The electricity supply infrastructure is exposed to many kinds of threats. In order to understand the vulnerabilities and to (cost-efficiently) mitigate their consequences, it is necessary to consider both the cyber threats and the various physical threats. Often the resilience is much worse and consequences much more dramatic, when several vulnerabilities contribute simultaneously. For decades electric utilities have had security policies and plans that identified vulnerabilities, assigned personnel competence at different levels, and set out in detail which emergency procedures have to be followed to minimize or prevent damage and losses of infrastructure. They also included regulations in case of a bomb threat, hostage situation, and other major disturbances like terrorists, and criminal activities. Security policies, operating standards and procedures should be strictly obeyed and tested by audit protocols. Areas of control are procedures, operating standards, practices and organisational structures. An example of such protocol concerning physical vulnerabilities that could have impact on destroying elements of electric system is discussed in the rest of this chapter. It covers:

- natural disasters (storms, hurricanes, floods, earth quakes, ice or frost building),

- faulty components due to ageing, overloading, poor material, system complexities etc.,
- human errors and accidents,
- deliberate physical attacks to power plants, power transmission lines, sub-stations, transformers, control centres, communication equipment by criminals or terrorists.

Another attention worth threat is a potential loss of domestic or imported fuel supply as a result of political and/or military actions, embargoes, transmission, and transportations problems. Such cases may lead to limitation of energy fuels, not sufficient fuel quality, and as a consequence to disruptions of the operation of the electricity infrastructure. Although threats can be "incidental" or results of malicious behaviour of attackers, still a lot of threats result from human errors or insufficient understanding of procedures.

Electricity supply interruptions in minutes per year in EU countries are shown in the 4th Benchmarking Report, on Quality of Electricity Supply 2008 by the Council of the European Energy Regulators [3] and they show that the impact of exceptional events such as storms, snow storms and icing dominates. The highest peak was caused by the storm Gudrun that occurred in Sweden on 8th January 2005. About 663 000 people stayed without electricity supply for several days and several people even for weeks. Total about 30 000 km power lines were damaged due to blustery wind. These outages created the total estimated cost of 274 millions Euro.

Another case was recorded in Münsterland (Germany) on 25th of November 2005, which was affected by a combination of wet snow falls, icing and storm. As a result of this rough weather many towers of the distribution grid (110/20/0,4-kV) broke down. 25 km of the high voltage line (220/110 kV) and 120 km of low voltage lines (20/10/0,4 kV) were destroyed. Approximately 80 000 consumers stayed without power up to 5 days. Consumers from Belgium and Netherlands were affected because of this disturbance, as well. These outages created the total cost of ca. 20 millions Euro.

Minutes lost per customer per year in European Union countries in 1999-2007 due to system supply interruptions shows figure 1 [3].

Another factor that highly influences the power supply disturbances are terrorist attacks. A number of such attacks on

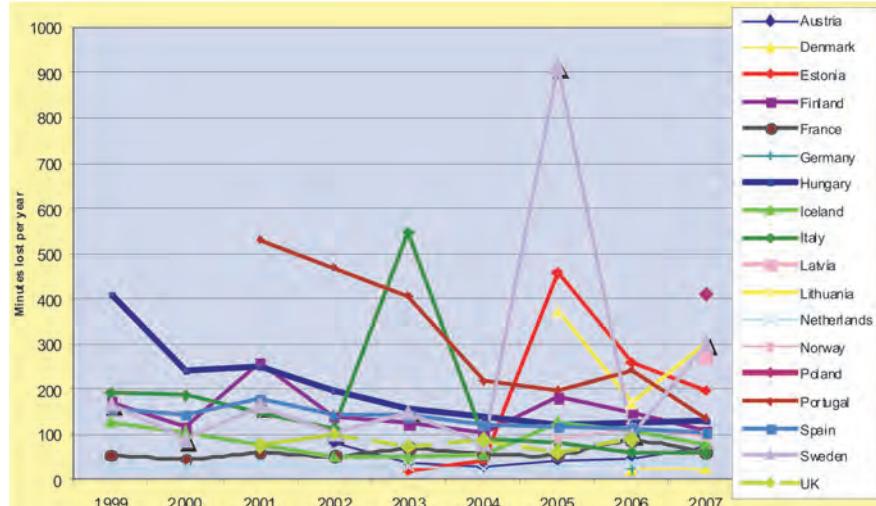


Fig. 1. Electricity supply interruptions in minutes per year in EU countries [3]

electric system have been documented around the world over the last few decades. For example, [4] reported a database for 27 countries outside USA for the period 1994-2004 with the total number of about 192 terrorist attacks. Mostly About 58% of the attacks took place in Colombia, 8% in Iraq and 6% in Spain, 3% in Russia, Pakistan and France. The remaining 21 countries accounted together for 19%. About 59 % of the attacks targeted at electricity transmission, 13% at substations and 12% at power generation. Transmission lines are easier to attack but also easier and faster to repair than large transformers. Electric power plants are least accessible to attacks but have long restoration times. Most of the interruption time experienced by the customers originates from the power distribution grid. However, the power distribution grid is hardly a prime target for a physical attack, because the impact of the event is limited compared to an attack against transmission grid and likely also to a sophisticated cyber attack against distribution grids.

To mitigate the above risks the following measures could be employed:

- redundancies and back up systems located adequately far from each other,
- adequate generation capacity distributed in the region,
- capability to run critical parts of the grid islanded from the infrastructure,
- increasing operational margins and system reserves,
- back up power generation arrangements of critical information and communication technologies (ICT),
- improving controllability of active and reactive power flows with power electronic systems (Flexible Alternative Current Transmission System),
- efficient limitation of damage and fast restoration,
- adequate own and outsourced human resources,
- fault tolerance and graceful degradation of systems,
- control and monitoring of physical access.,
- improved automation and protection, smart grid technologies,
- diagnostic tools,
- audit and risk analysis.

However, as considerable costs are associated with the above methods, it is not a trivial task to choose the best combination of them. We collected them into 4 groups according to the utilities that they relate to: power plants, control centres, power grids and substations. This way there has been created a list of requirements that can be used as a guide on provisioning security, or an audit protocol for checking the level of security state in a power infrastructure. Some of the requirements are specific to a particular area, but some are common to several domains. For instance, usually utilities mitigate risks using redundancies of physical equipment and communication networks in different configurations, which provide greater reliability, availability and quality to the highest possible level. Redundancy is necessary not only in case of malicious attacks. Increased complexity of electric systems used for power transmission or distribution could lead to hidden common mode faults and vulnerabilities, human errors during engineering, installation, operation, modification, or maintenance and testing. Redundancies give an additional possibility of reducing the consequences of failures. Common mode vulnerabilities and interdependencies with other system may easily remain unnoticed and reduce the true redundancy in critical situations. Also use of system models, simulation tools and threat scenarios to deal with the multiplicity

of challenges helps to achieve expected level of preparation for potential physical attack or system failure.

The level of a power plant protection depends on several factors, one of them being the size of the power plant. The biggest of them, depending on fuel, contain fundamental critical assets including generators, power turbines, control room and substation to deliver energy to the grid. Here, security policies and operating standards and procedures clearly define rules and task for all employees and visitors and access is limited to employees, contractors, and visitors with entity-issued identification badges. Nuclear power plants use more strict and complex security systems, which require multiple physical support and specific security measures. In case of small renewable power plants the level of security is not that high. They are equipped with some security elements such as perimeter alarm system, security guard, monitoring etc., but some of them are unattended. While an attack on a single small power plant is not critical to the operation of the electricity infrastructure, the situation changes when the penetration of these plants in the system is high. This is becoming increasingly relevant as the penetration of distributed generation increases.

In case of control centres physical protection can be provided by solidly constructed separate buildings inside several barriers. Access to a control centre and to a dispatcher control room should be possible only with controlled authorization procedures, and restricted to authorised personnel. For that purpose can serve such methods as an electronic entry system with entry cards, locked doors with keyed entry, alarm systems, CCTV (closed-circuit television).

Information and control system intelligence and data storage are increasingly distributed from control centres to substations and terminal devices. Substations rely on their own security plans, which define the criteria for handling threats, vulnerabilities and their potential consequences. They contain several critical assets necessary for transmission and distribution of electricity, including: transformers, circuit breakers, bus bars, switches, auxiliary high voltage equipment and auxiliary equipment for control and protection. As they are located in various areas such as urban, rural, and industrial/commercial, they have somewhat different challenges and opportunities regarding protection from physical threats. Most typically big substations have several physical security perimeters such as a fence, a control house building, security guard, alarm systems, a CCTV, and motion detectors. Access to these critical substations is limited, monitored, including authorization and procedures. The least critical substations use less security assets, but for instance in urban areas even whole substation are built underground due to better physical security, but also land costs.

The situation is different for the electricity grids that are more exposed to natural disasters and incidents. In general, power grids are physically unattended, but use a variety of systems such as SCADA/EMS (Supervisory Control and Data Acquisition/Energy Management System) that monitor, control and protect them from disruption, to limit losses and speed up restoration. Measures increasing protection of power grid against physical threats include: underground cables instead of overhead lines, redundant lines, routes and substations, transportable spare parts, protection of information concerning transmission and distribution lines etc. The grids will be made smarter and interacting with more and smaller customers thus enabling more distributed generation and demand response than now.

This development will increase the capabilities to autonomous operation which improves resilience of the distribution system to failures in any single physical point such as a control centre or major node in the transmission grid. But it will also make the system more complex and enable running it with smaller physical margins thus making the system increasingly dependent on ICT, control centres and cyber security.

All the above requirements have been collected into a list of requirements to create an audit protocol. The audit protocol concerns physical attacks to electric system and contains issues related also to obligations of electric utility personnel. The protocol would allow better understanding of the threats and potential failures in the control centre, power plants, power grids and substations, thus helping to evaluate and develop strategies to prevent and mitigate the consequences of incidents and outages. An example of a few selected recommendations of the protocol is presented in table 1.

### 3. Cyber security of power control systems

Although information infrastructure in several domains share many common attributes regarding information technology (IT) deployment, there are also features specific to certain domains. For instance in a typical IT systems data confidentiality and integrity is the main requirement. In control systems it is the human safety followed by protection of the system processes to save from harm the environment and prevent financial losses, so system availability and integrity are the core priorities. Thus, to define a set of requirements that help to improve dependability of SCADA-based systems and ensure their fault and intrusion tolerance, it is necessary to take into account the majority of possible vulnerabilities of SCADA system and to define countermeasures that can influence the system. To fulfil

its goal, the resulting document listing all the requirements has to be addressed to the personnel directly responsible for the critical infrastructure's security, it has to be exhaustive, but at the same time not daunting, concerning only the area of the personnel responsibility. Therefore, to make the task clear, we divided the structure of the information and control system of a modern power plant according to different personnel responsibility area into (see figure 2):

- the control room's software – the SCADA local area network (LAN),
- the demilitarized zone LAN (DMZ LAN) providing connections to the external networks,
- the substations, field devices (sensors and actuators) and their connection to SCADA LAN,
- the communication networks including wide area networks (WANs) used for connections to other parties like the administrative network, or other control centres

and developed a list of requirements forming an audit protocol for each of the above parts. The requirements will be discussed in the remaining part of this section.

One of the main factors that have to be taken into account in case of the control room system's security is the approach of the personnel to the demands of the new situation, where the system is not anymore a stand-alone island, but is connected to external networks. Therefore for instance the access rights to the SCADA LAN devices should be strictly defined and obeyed. There should not be anymore the situation when all users share a common password which is seldom changed, because the control room is locked and only some persons have access to it. Examples of the protocol's selected requirements concerning the personnel access rules are presented in table 2 (No 1 and 2), but the protocol contains also such related recommendations like password length and structure, policies for manage-

*Tab. 1. Audit protocol – physical requirements*

Facility:	Power plant XXX		Identification:	YYY	Date:	25.05.09
No	Entity	Activity	Security threat	Security concepts - recommendations	According to recommendations (Yes/No)	Comment
1	Control Centres	System operation and control.	Physical attacks that could have impact on destroying control centres.	Clearly specified rules and actions to be taken in case of emergency.		
				Available reliable, secure, and fast communication infrastructure.		
12.	Power plants	Generation	Physical damage by external impact (malicious attack, natural disaster, random events, theft, etc.).	An emergency communication system available.		
23.	Power grids	Transmission - high voltage lines, - underground cables and overhead lines.	Physical damage by malicious attack, natural disaster, random events, theft, etc.	Provided automatic system for line/supply reclosing.		
				Provided redundant lines, different routes for each line.		
34.	Substations	Transmission of electricity from power plants to the transmission system, change of voltages level.	Physical damage by malicious attack, natural disaster, random events, theft, etc.	Indoor substation with solid construction buildings.		
				Available lists of appropriately scaled subsystems' customers for information/to be used in case of the system failure.		

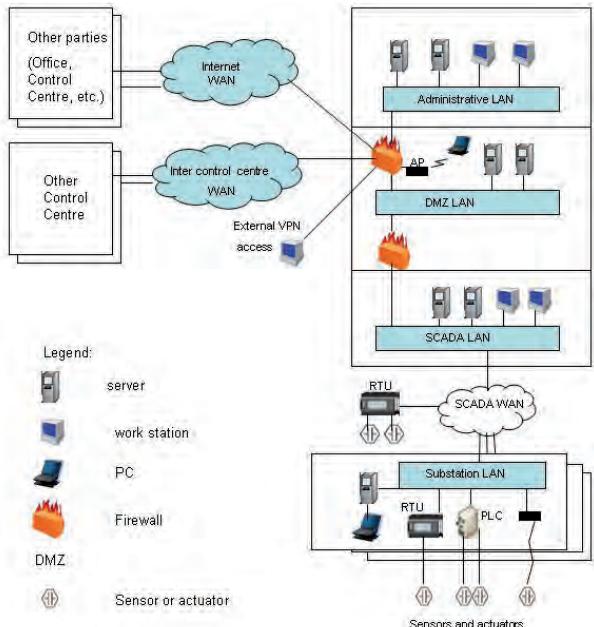


Fig. 2. Distributed Industrial Control System (ICS), Overview of Generic Structure

ment of users' passwords and more general requirements as for personnel training program, system audits, or policies review. Substantial part of the protocol is dedicated to technical issues such as software updates and testing, protection against malware, or intrusion detection.

In a business oriented, competitive market it is crucial to provide fast and secure communication among different market players as well as between power plants' control system and administrative/business divisions of the company. Taking into consideration the security of the devices connected to the SCADA LAN, the best solution is to avoid direct access to the devices. We recommend adding an additional, dedicated network segment called demilitarized zone (DMZ), and place there all the SCADA LAN servers that need to be accessed from outside of the SCADA network. As some of the servers may not provi-

de strong authentication mechanism, authentication and access control could be done by firewalls located in the DMZ, which at the same time block access to unnecessary services. Especially, direct connections to the Internet should be prohibited. If in the control room services such as access to a mailbox or web pages are needed, they should be provided by another network located physically in the same room, but not connected to the SCADA LAN. This brings another requirement – use of any unauthorized devices like CD, DVD discs, or memory sticks on nodes of SCADA LAN should be prohibited, while the authorized ones should be scanned against viruses.

To further prevent direct communication with administrative network, the DMZ may contain replicas of all of the administrative network's servers that need to be accessed by the control system. This way all the traffic would be terminated at the DMZ, with no direct connections. However, if for some reason direct connection to SCADA LAN is required and granted, it should be monitored and the system should be regularly observed for malicious activities. This includes scanning with the help of antivirus software, but also with intrusion detection system (IDS) to prevent unauthorized access attempts. As scanning may disturb the normal operation of the control system, the solution recommended in the audit protocol is to run the intrusion detection software in a system that mirrors the operational one. In this case processes and procedures have to be defined to ensure that the mirror system is identical to the main one. Although this involves some effort, the mirror system is recommended to be used for testing updates, both the control and the security software patches. Such solution provides also high level of redundancy. Additionally to the above, it is recommended that the SCADA LAN and DMZ are designed and built in a way that failure of a single component does not affect the whole network, and that the risk assessment is always present.

As usage of DMZ is currently not very common, the protocol allows alternative solution, where DMZ is replaced by a set of firewalls in which case correct configuration of the firewalls is very crucial. They have to protect the SCADA servers from unauthorized access and malware, have to monitor access to and from SCADA devices and restrict unnecessary services, preferably based on source and destination port numbers.

Tab. 2. Audit protocol – SCADA LAN and DMZ

Facility:	Power station XXX		Identification:	YYY	Date:	dd.mm.yy
	No	Entity				
1	SCADA LAN	Authentication policy - password management	Passwords are not properly assigned, network compromised.	Passwords assigned to individual users, not to devices (i.e. the same for all users).		
2	SCADA LAN	Authentication and access policies - password management	Passwords are used for too long time, network compromised.	Passwords regularly changed.		
				The number of failed access attempts limited		
30	DMZ	Antiviral software	Malware installation	Antiviral software up to date.		
				In signature based software, all new signatures added as soon as they are available.		
				The software tested before deployment in order not to compromise normal ICS operation. Tests against critical situations performed.		

Very crucial from security point of view is the provision of SCADA LAN's secure communication with substations via which information from field devices is obtained and control commands to them sent. In spite of the fact that field devices are located in remote unmanned locations, cyber attacks on them are considered to create a smaller threat than the attacks on the SCADA LAN due to the opinion that attack on a single device cannot cause a substantial damage. This opinion, however, is not justified, as there are successful attacks on the SCADA LAN done via the remote field devices presented in the literature (e.g. [5]). Therefore, it is important to protect the access to the devices and to ensure the integrity of the messages sent to the SCADA LAN. Requirements related to those two areas, access control and message integrity, take the main part of the field devices audit protocol. Recommended is protection of the devices by using access control whenever possible. Particular attention is paid to wireless, or remote connections if such are allowed for maintenance or administrative reason.

Message integrity protection depends very much on the type of the SCADA WAN connecting substations with SCADA LAN and the networks used for substation-field devices communication. The types of the networks vary depending on the power plant. Some of the networks inherently provide message integrity, some have to use external mechanisms like encryption, to fulfil the requirement. Therefore, the protocol does not

specify how the message integrity is provided, but mandates its provision. Except for lack of integrity checking mechanisms, and vulnerabilities such as inadequate access control/authentication methods of substation and field devices, the protocol address also threats related to lack of reliable synchronized time stamps, lack of encryption between sensors and substation devices, or lack of proper monitoring of the communication. Requirements related to those threats are recommended, as not fulfilling them may lead to:

- Inserting inaccurate data to falsify information in the system databases,
- Stopping ongoing operations,
- Modifying data to initiate inappropriate actions by system operators and cause unjustified alarms, or on the contrary stopping from issuing alarms
- Modifying the system software that will produce unpredictable results,
- Inserting unauthorized changes to programmed instructions of programmable logic controllers or remote terminal units causing changes to alarm thresholds, order premature shutdown of processes or disable control equipment.

Examples of the protocol related to substations are presented in table 3

*Tab. 3. Audit protocol – substations and remote connections.*

Facility:	Power station XXX		Identification:	YYY	Date:	dd.mm.yy
No	Entity	Activity	Security threat	Security concepts - recommendations	According to recommendations (Yes/No)	Comment
21	Substation LAN + field devices	Message integrity	Reply attacks, data manipulation	Integrity of data guaranteed. Methods like cryptographic checksum (hash) and secure storing or transmitting the timestamp, message sequence number and checksum together with the message for later verification should be used.		
24	Substation LAN + field devices	Redundancy policy	Functionality of the system can not be maintained in case of critical components failure.	Critical components and back up solutions identified.  The system checked against failing components not generating unnecessary traffic e.g. cascading event.		
34	Remote connections	Remote access to the SCADA LAN	Lack of strong authentication support from SCADA devices, making the access control vulnerable to external attacks. Direct access to the control network may disable security monitoring of the connection, or enable DoS attacks.	Direct access to the control network blocked.  Access allowed only via approved equipment  Strong authentication of any remote user (remote support personnel) done at DMZ or at the firewall level.  Remote access enabled only when required, approved, authenticated and monitored.		
41	Communication networks	Policy regarding service level management and redundancy	The internal or outsourced ICS communications provider compromises security and availability to cut costs. Lack of adequate redundancy and availability especially during emergency situations. (e.g. communications capacity may be too much shared with other communications purposes)	Service level agreement (SLA) signed and followed.  Regular audits of subcontractors checking compliance with SLA  Adequate transparency of implementation ensured.		

The final part of the audit protocol addresses the security of SCADA LAN's external connections. Those include connections to cooperating business partners, other control centres, and remote connections used e.g. for software maintenance services outsourced to specialized companies, or provided by own personnel. As the type of the networks varies from private networks to the Internet, their vulnerabilities may differ, but the requirements are the same. One of the main requirements is that the networks by default are linked to DMZ, not directly to the SCADA LAN. In case if the company does not support DMZ, the connections should use strong authentication methods at the firewall level, especially that such methods may not be supported by SCADA LAN devices.

To prevent man-in-the-middle, or data interception attacks, virtual private networks are recommended. Because of the nature of the services provided by the power plant, special attention is brought to connections availability, which in some cases is more important than data confidentiality. Therefore a good choice is usage of devices avoiding latency problems and careful selection of cryptographic mechanisms. To increase the availability level, the protocol requires redundancy of the vital elements of the connections, including backups of devices configuration. Those recommendations are in general important in the whole system of the infrastructure including SCADA LAN, substations and DMZ.

As some of the system elements may be leased and some of the security services outsourced, it is mandated that service level agreements with the services or networks providers are signed, and regularly audited.

### 5. References

1. Guide to Industrial Control Systems (ICS) Security, National Institute of Standards and Technology, September 2008, pp. 156, ([csrc.nist.gov/publications/drafts/800-82/draft\\_sp800-82-fpd.pdf](http://csrc.nist.gov/publications/drafts/800-82/draft_sp800-82-fpd.pdf))
2. ISA SP99.: Integrating Electronic Security into the Manufacturing and control Systems Environment, Instrumentation, Systems, and Automation Society, ISA-TR99.00.02-2004, April 2004
3. 4th Benchmarking Report, on Quality of Electricity Supply 2008, Council of the European Energy Regulators, December 2008, pp. 177, ([www.energy-regulator.eu](http://www.energy-regulator.eu) )
4. Zimmerman R, Restrepo C. , Dooskin N. , Freyissinet J. , Hartwell R. , Mille J., Remingto W. : Diagnostic tools to estimate consequences of terrorism attacks against critical infrastructure. Center for Risk and Economic Analysis of Terrorism Events, University of Southern California, LA, California, draft report #05-014, May 31, 2005. pp. 66.
5. Holstein D. , Tengdin J. , Wack J. , Butler R. , Draelos T. , Blomgren P. : Cyber Security for Utility Operations, [www.sandia.gov/scada/documents.htm](http://www.sandia.gov/scada/documents.htm), 2005.

---

### 4. Conclusions

Well-known and new threats including the terrorist attacks, as well as recent development of SCADA systems from isolated to interconnected networks increase the need for critical infrastructure protection. For maximum protection, bringing together physical and cyber security is required. The consequences and mitigation methods are to a large extent the same, similar or interconnected. Certain physical security is necessary for achieving cyber security and vice versa. A major difference is that physical attack is typically local or regional and a cyber attack can be global.

To ease the task of power system security maintenance, the critical assets required protection were identified and list of possible threats related to their security and safety was created. In the next step countermeasures to those threats were proposed and evaluated. The countermeasures presented in the form of requirements, as discussed in this article, can be used as a protocol for power system security and safety (self)evaluation. The protocol has been tested in three different energy companies, and was found useful for identifying security/safety breaches. The results presented in this paper are based on the work funded by the EU project Octavio (Energy System Control Centers Security, an EU Approach) and Finnish national project Moverti (Monitoring for network security status in modern data networks).

---

**Prof. dr Henryka JORMAKKA**

**Dr. Sc.Tech Pekka KOPONEN**

**Eng. Heimo PENTIKÄINEN**

VTT (Technical Research Centre of Finland)

P.O. Box 1000, FI-02044 VTT, Finland

e-mail: Henryka.Jormakka@vtt.fi

e-mail: Pekka.Koponen@vtt.fi

e-mail: Heimo.Pentikainen@vtt.fi

**Dr Hanna BARTOSZEWICZ-BURCZY**

Institute of Power Engineering, Energy Economic Section

01-330 Warsaw, ul. Mory 8, Poland

e-mail: hanna.burczy@ien.com.pl

---

# BADANIA WYDŁUŻALNOŚCI I WYTRZYMAŁOŚCI ZŁĄCZY KLEJONYCH W ASPEKCIE OPRACOWANIA KOMPUTEROWEGO SYSTEMU MONITOROWANIA ICH STANU W CZASIE PRACY PRZENOŚNIKA TAŚMOWEGO

## TESTS OF EXTENDABILITY AND STRENGTH OF ADHESIVE-SEALED JOINTS IN THE CONTEXT OF DEVELOPING A COMPUTER SYSTEM FOR MONITORING THE CONDITION OF BELT JOINTS DURING CONVEYOR OPERATION

Artykuł prezentuje wyniki przeprowadzonych badań laboratoryjnych wydłużalności i wytrzymałości typowych złączy klejonych taśm przenośnikowych. Celem badań było poznanie parametrów wytrzymałościowych złączy w celu określenia wytycznych dla projektowanego układu monitorującego, którego zadaniem będzie przeciwdziałanie nieprzewidzianemu zerwaniu taśmy w obszarze każdego złącza wykonanego na trasie przenośnika taśmowego. Do badań laboratoryjnych wykorzystano typowe złącza wykonane i eksploatowane w kopalni Lubelski Węgiel „Bogdanka” S.A.

**Słowa kluczowe:** przenośnik taśmowy, taśma przenośnikowa, złącza klejone, wytrzymałość złączy, komputerowy system monitorowania stanu złączy.

The paper presents the results of the laboratory tests conducted on the physical elongation and strength of typical adhesive-sealed joints of conveyor belts. The tests were aimed at examining the strength parameters of the joints to define some guidelines for a monitoring system designed to prevent unpredicted belt ruptures in the area of each joint occurring throughout the belt conveyor route. In the laboratory, typical joints were tested as manufactured and as used in the Lubelski Węgiel "Bogdanka" S. A. coal mine.

**Keywords:** belt conveyor, belt transportation reliability, adhesive-sealed joints, joint strength.

### 1. Introduction

According to Żur's definition [23], a belt conveyor is a limited range, continuously moving transport facility that carries material on the belt surface, between two belts or inside a belt. There are a number of belt conveyor designs which, when expanded into a transport system, form one of the most crucial elements used by mining companies (for both underground and opencast operations), chemical, food, power companies, etc. The conveyor transport, being in many cases a principal element of extended transport systems, must comply with numerous requirements. According to Antoniak [4], the latter includes the high reliability of a single conveyor in terms of prolonged daily working time, low operating costs, easy relocation and elevated belt strength. In particular, the latter element of the belt conveyor structure plays an important role since the belt cost frequently accounts for 40-50% of the total equipment cost. The conveyor belt is exposed to a number of impairments of different type and origin.

According to Antoniak [1-4], the conveyor belt should be chosen to ensure it can carry the highest tensile forces that occur under different conveyor operation conditions, and have a suitable reliability and safety rating. When purchasing a belt, the user receives an appropriate certificate that states the type and number of the belt, the belt minimum lengthwise tensile strength, the belt maximum percentage elongation at a load equal to 10% of the belt rated strength the minimum percentage

value of the belt elongation at failure etc. The actual values of the above strength parameters are in this case compared with their equivalents, in conformity with respective requirements. This follows from the fact that conveyor belts have a number of requirements to meet in terms of durability, strength, incombustibility, etc. When analysing typical designs of conveyor belts, Żur [23] underlines the fact that the belt transmits lengthwise forces necessary to overcome movement resistances, and therefore it must be characterised by a sufficient lengthwise and crosswise strength to enable the absorption, without any damage all loads occurring at the output drop in the dumping equipment and while carrying the material over the roller sets. Transferring high forces from the conveyor drive to the belt through the drive wheels is equally important. The belt must also be flexible enough to settle into a trough shape, and yet at the same time it must not be so flabby that it folds between the rollers. Certainly, it must also be sufficiently durable and resistant to punctures, mechanical damage and abrasion, while being insensitive to weather and atmospheric conditions [1, 9, 23]. Antoniak [1, 4] assesses the requirements to be met by typical conveyor belts, and concludes by emphasising the requirement for very high strength of the belt segment joints.

In recent years, a number of studies have been carried out [1-3, 11, 12] aimed at selecting suitable designs and strengths of belts and their elements. It is equally important to achieve improvements to the strength parameters of the belts. In consequence, individual studies focus on the conveyor belt structure

(the material of the belt, the type and material of the core, the thickness of facings and rims), belt production methods, and belt acceptance tests. The studies also include suitable storage and transport methods. Considerable attention is also paid to rheologic models, for example, aimed at mapping belt strength parameters under dynamic loading or formatting the adhesive layer in adhesive-bonded joints and adhesive-mechanical joints [7, 8].

On the other hand, much less attention is paid to conveyor belt joints. The following conditions must be met to achieve the required value of joint strength: the tensile strength of joined belts should not be lower than the nominal strength, the joined belts should be of the same type, the joined belts should have two or more but equal number of fittings, and the joints should be made free of faults. In practice, joints are made in compliance with in-company instructions or the adhesive manufacturers' recommendations, and these very often differ. The conditions designed to ensure high strength and durability are not always complied with, either, which is mainly a consequence of performing such works in underground conditions of limited comfort. Therefore, as described in the literature [1, 4, 11], in order to achieve a joint with the highest strength, only belts from the same manufacturer should be used, of the same type and made of the same fittings in terms of the material strength, the method of weaving and the technological processing. The strength of the resulting joined belts is lower than the nominal level with different extendability or number of fittings.

A significant volume of the research work conducted in Poland and abroad is restricted to methods of joining belts, the technologies used, the types of mechanical and adhesive-sealed joints as well as the assessment of the impact of various factors on joint durability or strength [4, 11]. One commonly overlooked fact is that although typical belt joints (e.g. those made with the cold bonding method) have numerous advantages, they have also equally numerous faults. Bonding technologies are considered to be the most suitable for making joints as they ensure maintaining belt continuity, have high strength and durability, and, moreover, they mate well with the rollers and drive wheels of the conveyor system. Some important shortcomings include a low tenacity when compared with the belt itself. Although adhesive-sealed joints are relatively inexpensive, they are characterised by a significant diversity in strength, which results from different temperature and humidity conditions prevailing during joint production. The actual accuracy of the joint itself is important, as joints are frequently made in underground mine conditions that can hardly be called comfortable.

As a result, belt joints frequently break during conveyor operation without any preceding symptoms that might indicate an imminent occurrence of such an impairment. Although some effort is aimed at raising the durability and reliability of conveyor belt joints; nevertheless, users of belt conveyors, while having at their disposal sophisticated drive structures, control systems and operation parameter monitoring systems, are left on their own as regards the problem of unpredictable belt joint ruptures. Some unpredictable belt ruptures may result from a mechanical blockage of the belt, a side descent or wheel contamination, and such situations can be observed by the operating personnel and prevented if reacted to quickly enough. Nevertheless, this is not an effective method of counteracting joint rupture. It should be remembered that a rupture is not only a threat to the personnel, but it also means significant economic

losses resulting from a long stoppage of not only a single belt conveyor (the damaged one) but also of the whole transport system that the conveyor forms part of.

As demonstrated above and in previous publications [12–14], during research studies into belt conveyor construction and the design of supporting elements, insufficient attention is paid to conveyor belt joints although their strength significantly affects the durability and reliability of the whole transport facility and even the whole system that includes the belt conveyors. For this reason, for several years research work has been carried out at the Lublin Technical University aimed at analysing the strength properties of adhesive-sealed joints from the point of view of developing a system monitoring joint condition during belt conveyor operation. Relevant laboratory test results are presented in this paper.

### 2. Conveyor belt joints and joint strength

Conveyor belts are manufactured in sections of specific lengths and so delivered to the customer. Belt users join all the sections when installing the conveyor to obtain an endless run. During the operation, new belts and those transferred from other, no longer exploited facilities are joined (relocation). During the life of a belt it may be constantly lengthened or shortened, depending on the mining method used (from borders, to borders). Conveyors are moved to new locations and constructed from different belt segments. In consequence, the number of belt joints is subject to continuous change, and hence difficult to control. The joints should have the highest possible tensile strength and the lowest number of joints along the conveyor route. In mining conditions, these requirements are frequently difficult to meet, especially since the number of belt joints continuously increases during an individual belt's life. The above conditions must be met for the joint strength to achieve the required value. The conditions are partly related to the tensile strength of the joined belts, the belt type, the number of fittings and the lack of any manufacture defects.

Typical fabric/rubber belts are joined using one of the following three methods: hot vulcanisation, room temperature vulcanisation (bonding) as well as by means of mechanical connecting elements. Mechanical belt joints can be separable or inseparable, and must have a relative strength of not lower than 60% of the belt nominal tensile strength. Vulcanised and adhesive-sealed joints of fabric/rubber belts are made on the same joint structures, utilising gradual overlap joints [1, 4, 10]. According to Antoniak [4], the theoretical strength of such a joint compared with the nominal belt strength is 67% for three flittings, 75% for four flittings, 80% for five and 84% for six. According to provisions of the standard [17], the tensile strength of a belt with such a joint should be:

$$t_{zr\ pw} \geq 0.85 \cdot t_{zr\ n} \cdot \frac{z-1}{z} \quad (1)$$

where  $z$  is the number of flittings.

It is also possible to determine the strength loss of the belt caused by joining its segments (known as strength loss in the belt joint). The loss value is specified by the respective DIN standard [15], depending on the type of core flittings and the joint type.

Adhesive technologies are considered to be the most appropriate methods of making joints since they guarantee ma-

intaining belt continuity, result in high strength and durability and, moreover, allow mating well with the conveyor rollers and wheels. On the other hand, significant shortcomings of these types of technology include a low tenacity when compared to the belt itself. Adhesive-sealed joints are relatively cheap; however, they are characterised by a significant dispersion caused by different temperature and humidity conditions that prevail during joint production, and accuracy of joint alignment itself is difficult to achieve. A consequence of these factors is that belt joints frequently rupture during conveyor operation without any preceding symptoms that might indicate an imminent occurrence of such an impairment. A conveyor stopped due to a belt rupture in the joint area is certainly undesirable, not only for economic reasons but also in view of the necessity to maintain the continuity of deliveries of the mined materials. For that reason, the Lublin Technical University, together with the company Lubelski Węgiel Bogdanka S.A., being the most modern and most innovative Polish coalmine, commenced the tests of strength and extendability of conveyor belt joints. The tests were partly aimed at analysing belt conveyor operation parameters that have an impact on frequent failures resulting from belt ruptures, as well as at developing an appropriate system for monitoring the equipment operational conditions and related automatic control to eliminate any critical situations. Another important test objective was to analyse the durability of various types of conveyor belt joints in order to enhance the joint quality or to develop modifications in joint execution technology without any loss in the flitting strength. Additionally, it was decided to analyse the reasons for manufacturing faults in joints and to compare the properties of adhesive materials applied from the point of view of their resistance to delamination and shearing.

In the context of constructing a computer system for monitoring conditions of adhesive-sealed conveyor belts, it was also important to assess the rupturing force value as well as to examine the rupture mechanism itself and to observe the joint behaviour at the moment of imminent permanent damage to the joint. An initial analysis of the conveyor belt strength and the durability of the joints made with the bonding method was combined with the above-described laboratory tests to enable us to propose the following research thesis:

*The elongation of conveyor belt joints at the rupture moment depends on the properties of the belt itself (including the minimum admissible belt elongation at rupture) as well as on the quality of the adhesive-sealed joint achieved. Therefore, it is possible to monitor the joint elongation during the conveyor operation, while at the same time determining the critical value of the elongation when it ceases to be a dynamic elongation related to changeable operating conditions and instead becomes a value signalling an imminent joint rupture.*

### 3. Laboratory tests of conveyor belt joints

Conveyor belt joints are usually tested in laboratory conditions using static or dynamic methods. The static methods consist in determining the tensile strength of a belt sample with a joint at an attempted rupture. The dynamic methods consist in applying a pulsating load to the belt sample with a joint by passing it through two turning wheels. The conditions for testing conveyor belts joints are specified in respective standards [15-21]. However, the tests are rather difficult to conduct since they require the use of special equipment, including level testing machines capable of rupturing a real size sample of a joint with a belt with a relatively high elongation value at rupture.

The laboratory tests [5, 6] conformable with the above objective started with an assessment of the strength and extendability of textile/rubber belts as applied by the company Lubelski Węgiel "Bogdanka" S.A. which cooperated in the test works with the Lublin Technical University. The tests included:

- measurement of the joint elongation value at the rupture time,
- measurement of the whole sample elongation (adhesive-sealed joint + belt) at rupture,
- progress of the joint elongation with a load till the rupture time, in compliance with the standard requirements,
- progress of the whole sample elongation (adhesive-sealed joint + belt) with a load till the rupture time, in compliance with the standard requirements,
- determination of the rupture force.

The laboratory tests involved the use of three belt joints. They were marked as I, II and III. The first two joints were new and made according to internal recommendations, while joint number III had been used previously for over two months in underground conditions on a typical wall haulage conveyor. The joints supplied for the tests had the following dimensions: width 1200 mm, length 1900 mm (joints I and II) and width 1200 mm and length 2800 mm (joint number III). The tested belt joints were made with the cold bonding method with the use of a four-flitting belt.

According to requirements of the PN-C-94147 standard [19], samples 200 mm wide were to be cut off from the joint for tensile strength tests. The test sample length was 1900 mm with slight deviations from that dimension. To ensure the same testing conditions, the length of all samples was equalised to 1900 mm. Five samples (marked as I/1 to I/5 etc.) were cut off from each joint. The dimensional markings assumed are shown in fig. 1. The laboratory tests were carried out on a ZP-40 testing machine. The samples were mounted in the testing machine jaws with a steady distance between the jaws of  $L_z=1270$  mm being maintained. The stretching speed was 100 mm/min.

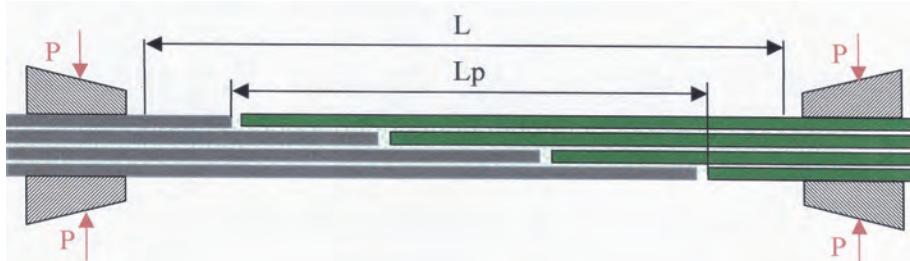


Fig. 1. Dimensional markings of the conveyor belt joints tested [5, 6]

The stretching progress was registered by the testing machine provided with appropriate software, and the  $L_p$  joint elongation was measured with a digital video camera placed over the joint butt from the side of the immovable jaw of the tensile testing machine. The butt line was marked on the belt cover and a millimetre gauge attached on the line of the second joint butt indicating the size of the joint elongation, which in turn was registered by the video camera simultaneously with the size of the force stretching the joint [22].

This enabled a recording of elongations of the both measured sizes simultaneously with the force gauge indications. Table 1 presents results of the laboratory tests. An example diagram of a test sample rupture (fig. 2) presents on the abscissas axis the sample length increase as measured by the tensile testing machine jaw travel. This value does not correspond to the actual sample elongation due to a partial pushing out of the samples from the clamping jaws.

A direct measurement of the total elongation of the joint and the belt, important from the point of view of determining the best location for monitoring system markers in the actual conditions, would not be possible due to the insufficient length of the tested samples. The length was 1900 mm instead of the required minimum of 2200 mm (joint length + 2 additional sections 600 mm each). In connection with the above, additional extendability measurements of the belts themselves ( $\varepsilon_i$ ) were carried out with stresses corresponding to rupture stresses of individual belt joints. Then we calculated the total sample length increase  $\Delta L_z = \Delta L_p + \Delta L_r$  in millimetres as well as  $\varepsilon_i$  as a percentage. The assumed length  $L_z$  amounts to 1270 mm. The results obtained are presented in table 2. We have also decided that in future the results will be verified by subsequent tests of full size samples.

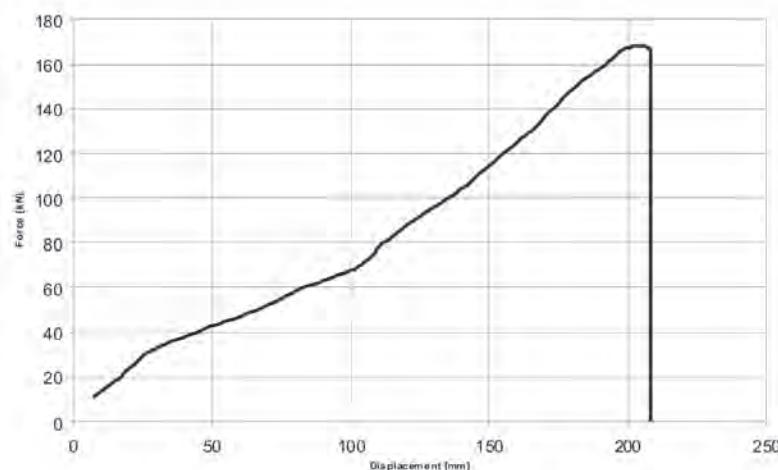


Fig. 2. Diagram of an example test sample rupture

Tab. 1. Results of adhesive-sealed joint strength and extendability tests

Sample number	I/1	I/2	I/3	I/4	I/5	II/1	II/2	II/3	II/4	II/5	III/1	III/2	III/3	III/4	III/5
Sample width, $B$ [mm]	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
Breaking force, $F$ [kN]	167.2	189.8	203.7	167.9	186.4	187.1	161.1	174.4	169.4	192.2	139.8	176.4	165.1	152.2	184.8
Tensile strength, $R$ [kN/m]	836.0	949.0	1018.5	839.5	932.0	935.5	805.5	872.0	847.0	961.0	699.0	882.0	825.5	761.0	924.0
Tensile strength, $R_s$ [kN/m]			915.0					884.2					818.3		
Initial length of the joint, $L_p$ [mm]			995.0					1002.0					922.0		
Length gain, $\Delta L_p$ [mm]	199	208	213	201	205	230	218	225	219	240	174	190	182	171	184
Length gain, $\Delta L_p$ [mm]			205.2					226.4					180.2		
Elongation of the tested length at break up, $\varepsilon_p$ [%]			20.6					22.6					19.5		

Tab. 2. Results of strength and extendability tests of adhesive-sealed joint and belt sections

Joint number	I	II	III
Belt extendability, $\varepsilon_i$ [%]	19.8	19.4	18.5
Total length, $L_z$ [mm]	1270	1270	1270
Belt length outside the joint, $L_r$ [mm]	275	268	348
Length increase, $\Delta L_r$ [mm]	54.4	52.0	64.4
Section total elongation, $\Delta L_z$ [mm]	259.6	278.4	244.6
Section total elongation, $\varepsilon_{iz}$ [%]	20.4	21.9	19.2

## 4. Final conclusions

The results of the laboratory tests give some information on the analysed joint from the point of view of its strength and the data can be used to obtain on the theoretical strength of the adhesive-sealed joint. They also form a significant confirmation of the research thesis regarding the concept of monitoring the conveyor belt joint elongation under mining conditions in order to prevent unpredicted joint ruptures during conveyor operation. The theoretical strength of an adhesive-sealed joint for four flittings [4] is 75% of the belt rated strength. In the course of the laboratory tests, the results obtained were slightly lower than the theoretical values. The analysed samples tensile strength ranged from 50% to 57 % of the belt nominal lengthwise tensile strength, with the lowest value obtained for sample no. III, which had been in use for two months prior to the tests. Consequently, the resulting low value (50%) might have resulted from partial wear of the belt, although the result obtained was not particularly affected by that fact since the values obtained in the tests of the new samples were similar (several percent higher).

Slightly better results were obtained in case of percentage elongation at rupture. They ranged from 19.5% to 22% for the joint sample tested, giving values much higher than the minimum belt material elongation at rupture - which should amount to 10% according to the requirement. At the same time, the values for the exploited belt and the new ones were nearly the same. This is proof of the good maintenance of the strength parameters of the belts and joints in spite of their being intensively used in mining conditions for several-months.

A significant value (from the point of view of the designed monitoring system) is the actual percentage elongation at rupture for the joint segment together with the adjacent belt material. This follows from the necessity to indicate a site for future installing of the monitoring system markers as well as determining the boundary values for alarm signals. If a marker has to be installed in a joint area the joint strength may be significantly reduced. Installation of markers in the area outside the joint would be much more comfortable and, additionally, would allow the differentiation of installation sites to facilitate a subsequent identification of joints. In the tests, the percentage elongation of the measure joint length (joint + belt sections outside the joint) at rupture was slightly lower than the percentage elongation of the joint itself, which is a simple consequence of the difference in the tensile strength between the joint area and the joint area

with additional belt sections on both sides. However, the values obtained did not differ much and were mutually proportional; they ranged from 19.5% to 22% for the joint and from 18.2% to 21.9% for the joint measured together with belt sections on both sides of the joint.

The laboratory tests produced some interesting information on the extendability and strength of conveyor belt joints as required for determining alarm signal values of the future monitoring system. The aim of the system will be to prevent belt ruptures in the joint area through a continuous measurement and assessment of length changes of each joint, irrespective of the joint type. However, the studies conducted so far have to be continued and supplemented to obtain a more comprehensive understanding of the subject. It is necessary to carry out laboratory tests according to an analogous program for other types of belts and other types of joints, including those made of new belts as well as joints with mechanical reinforcements, if only for the purpose of comparison. It is also indispensable to verify the results obtained in real operation conditions and the effect of a dynamic type of load.

However, considering the commonness of the application of belt conveyors in the industry as well as the absence of effective monitoring and control systems to prevent equipment failures resulting from belt joint ruptures, one can presume that the results of the this research work and that of the subsequent implementation work will not only contribute to extending the knowledge and experience as regards belt conveyor operation, but they will also help to reduce the losses caused by the down-times resulting from unpredicted failures.

The continuation of the conducted research and development work is aimed not only at constructing a suitable computer system for monitoring the conveyor belt joints elongation, but also at transforming the system into an intelligent machine, capable of unaided reaction to changing operating conditions and eliminating the conditions causing belt ruptures through predicting possible future operation parameters and their consequences. The intelligent system, when properly designed and specified on the basis of actual measured data, will be assigned with the task of making decisions on stopping the facility, changing its operating parameters or signalling the necessity to replace or strengthen a joint. In other words, automatically selected operating parameters will serve as equipment protection against occurrence of critical conditions. The system will function on the basis of a dynamic object control system based on the neuron control model.

\*\*\*\*\*

*The research work financed with the means of the Polish State Committee for Scientific Research  
in the years 2007-2011 as a research project*

\*\*\*\*\*

## 5. References

1. Antoniak J. Underground transport facilities and system in coalmines. Poland: Śląsk Publishers, Katowice 1976.
2. Antoniak J. Monitorowanie, kontrola i sterowanie procesów transportowych w górnictwie podziemnym. Maszyny Dźwigowo-Transportowe 2001; 1.
3. Antoniak J. The development of belt conveyors and conveyor systems till the year 2010 in Relation to the Growing Mining Concentration. Mechanizacja i Automatyzacja 2001; 1.
4. Antoniak J. Belt Conveyors. Introduction to the Theory and Calculations. Poland: Publishing House of the Silesian Technical University, Gliwice 2004.
5. Badania właściwości wytrzymałościowych złącza klejonego ze wzmacnieniem mechanicznym. Sprawozdanie nr LTT/02/05 Laboratorium Transportu Taśmowego Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej (materiały niepublikowane).

6. Badania wytrzymałości i wydłużalności połączeń taśm tkaninowo-gumowych. Sprawozdanie nr Z-4/04/04 Laboratorium Transportu Taśmowego Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej (materiały niepublikowane).
7. Czowniuk JW, Matwijenko WA. Analytical dependences for determining parameters of adhesive-rivet joints. Technologia i Automatyzacja Montażu 1994; 2: 38-40.
8. Czowniuk JW, Matwijenko WA. The rheological model and the mechanism for adhesive layer constituting in adhesive and adhesive-mechanical joints. Technologia i Automatyzacja Montażu; 1994; 2: 35-38.
9. Desowski A. A guide to conveyor belt use. Poland: Zakłady Gumowe Górnictwa, Bytom 1999.
10. Mining PVC belts – A directory and guidebook. Poland: Bydgoskie Zakłady Przemysłu Gumowego, Bydgoszcz 1994.
11. Hardygóra M, Komander H. The strength of multi-flitted joints of conveyor belts. Przegląd Górniczy 1998; 2: 10-13.
12. Mazurkiewicz D. Monitoring the condition of adhesive-sealed belt conveyors in operation. Eksplotacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability 2005; 3: 41-49.
13. Mazurkiewicz D, Computer system for monitoring the condition of conveyor belt joints. Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa 2006; 4 (423): 14-22.
14. Mazurkiewicz D. Analysis of the ageing impact on the strength of the adhesive sealed joints of conveyor belts. Journal of Materials Processing Tech. 2008; 208: 477-485.
15. Standard DIN 22110. Testing methods for conveyor belt joint; determination of time strength for conveyor belt joint; (dynamic testing method).
16. Standard DIN 22110-2. Testing methods for conveyor belt joints – part 2: endurance running tests, determination of running time belt joints at conveyor belts with textile plies.
17. Standard PN-74/C-94143. Textile/rubber belts for general purpose conveyors.
18. Standard PN-75/C-05011. Testing methods for conveyor belts. Determination of tensile strength as well as of relative and permanent elongation.
19. Standard PN-C-94147. Rubber products. Conveyor belt joints made using the vulcanisation method.
20. Standard PN-EN ISO 1120:2004. Conveyor belts. Determination of strength of mechanical joint. The static method.
21. Standard PN-EN ISO 7622-2:2002 (U). Conveyor belts with steel cords. Testing traction properties. Part 2: Measuring tensile strength.
22. Report from Research Project 620004/1. Testing endurance and extendability of textile/rubber belt joints. Not published. Wrocław 2004.
23. Źur T. Belt conveyors in mining. Poland: Śląsk Publishers, Katowice 1979.

---

**Dr Dariusz MAZURKIEWICZ, Eng.**

Lublin University of Technology  
Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin, Poland  
Tel./fax: +48-81-5384-229  
e-mail: d.mazurkiewicz@pollub.pl

---

## WPŁYW KRZYWIZN LINII KOLEJOWEJ NA ZUŻYCIE SMAROWANYCH I NIESMAROWANYCH OBRZEŻY KÓŁ

## THE INFLUENCE OF RAILROAD CURVES ON THE WEAR OF LUBRICATED AND UNLUBRICATED WHEEL FLANGES

W artykule omówiono konieczność wyznaczania stanu lokomotywnych zestawów kołowych i jego zmian. Przedmiotem badań jest obrzeże koła lokomotyw. Bezpieczny ruch kolejowy w dużej mierze zależy od niezawodności zestawu kołowego lokomotyw. W przedstawionej pracy skonstruowano złożony model ścierania obrzeża koła lokomotyw dla niesmarowanych i smarowanych obrzeży kół. Model ten uwzględnia przebieg lokomotyw i promień krzywizny.

**Słowa kluczowe:** niezawodność zestawu kołowego, obrzeża kół, smarowanie, krzywizny linii kolejowej, promień krzywizny.

Therefore, the condition of the locomotive wheelsets and its variations should be determined. Research object is the locomotive wheel flange. Safe railway traffic largely depends on the locomotive wheelset reliability. A complex model of the locomotive wheel flange abrasion, taking into account the locomotive run and curve radius, was constructed for unlubricated and lubricated wheel flanges.

**Keywords:** wheelset reliability, wheel flanges, lubrication, railroad curves, curve radius.

### 1. Introduction

Safe railway traffic largely depends on the locomotive wheelset reliability. Therefore, the condition of the locomotive wheelsets and its variations should be determined. The latter depend not only on the state of the locomotive under frame but on the railway and traffic conditions as well.

### 2. Research object

Research object is the locomotive wheel flange. The purpose of a wheel flange is to prevent derailing of the wheel along its circumference [1, 2]. The rolling radius of a wheel flange on the rail is larger than the rolling radius of a wheel. Therefore, the contact surface slips causing the flange to wear. In particular, the wear is a product of the friction force  $F$  equal to the reaction force  $N$  and friction coefficient  $\varphi$  ( $F = N \varphi$ ).

A schematic view of the contact zone of the wheel flange and the rail is presented in figure 1.

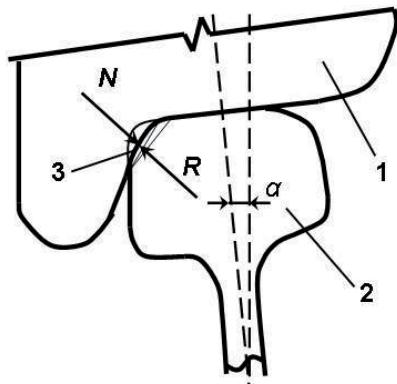


Fig. 1. A schematic view of the contact zone of the wheel flange and the rail: 1 – wheel; 2 – rail; 3 – contact zone

Measurement of the flange abrasion is made 20 mm below the flange top. The thickness of the new flange should be 33 mm. The difference between the actual thickness and the above dimension will be referred to as flange abrasion  $y$ .

Theoretically, the abrasion of the flange is calculated by the formula:

$$y = IL \quad (1)$$

where  $I$  is intensity of abrasion;  $L$  is the slide path of rubbing surfaces, m.

Abrasions intensity is calculated by the formula:

$$I = K \alpha \sqrt{\frac{h}{r} \frac{p_a}{p_r} \frac{1}{n}} \quad (2)$$

where  $K$  is coefficient of surface roughness (for rail and wheel contact  $K=0.2$ );  $\alpha$  is the relationship between the contiguous areas of the rubbing surfaces at the contact area (usually,  $\alpha=1$ );  $p_a$  is the highest pressure at the contact area,  $p_r$ ;  $p_r$  is the average

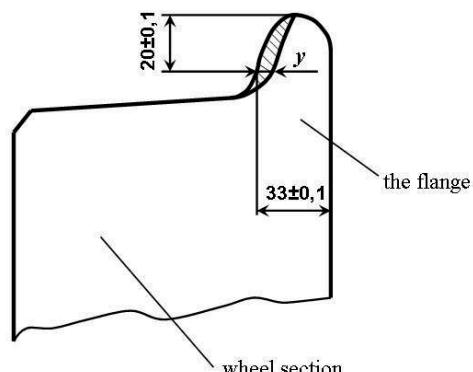


Fig. 2. Measurement of tyre flange abrasion

pressure at the contact area,  $p_a$ ;  $n$  is the number of cycles;  $h/r$  is the ratio of the rubbing surface roughness height to radius.

The average pressure at the contact area is calculated by the formula:

$$p_r = \frac{N}{A} \quad (3)$$

where  $N$  is the proof load, N;  $A$  is the contact area, m<sup>2</sup>.

The highest pressure at the contact area is calculated by the formula:

$$p_a = 0,578 \sqrt[3]{\frac{N^2}{\Theta^2 r^2}} \quad (4)$$

where  $\Theta$  is modulus of elasticity of the material, N/m;  $r$  is the radius of the surface curvature of the body in the contact area, m.

Since it is hardly possible to determine  $p_a$ , the value of which depends on the continually changing contact area, a full-scale experiment was made to determine abrasion intensity of the wheel flange.

*Scientific novelty.* A mathematical model has been constructed and validated, allowing wear intensity of wheelset flanges on the road curves to be determined, depending on the curve radius and the locomotive run.

*Significance of research.* The suggested model can be used for calculating the remaining service life of wheelsets and predicting the amount of the repair work and the need for wheelset replacement.

*Description of research.* Three freight (Russian-made) locomotives of the series 2M62 were tested. These locomotives consist of two sections of the total engine power reaching 2 940 kW and mass of 238 ton. Every section has six axles and the average speed of locomotives is 80 km/h. The rolling radius of the wheel circumference is 1 050 mm. The tests were made on the rail track, 75 % of which was straight, while the remaining section had curves with the radii of 650 and 1 200 meters. The stiffness ratio of the rolling wheel surface to rail was 1:1. Every time when the average distance of 10 thous. km was run, flange abrasion was measured by a measuring machine.

*The research results.* The values of the average wear of the wheels of all locomotives with lubricated and unlubricated wheel flanges, depending on the locomotives run, are given in figure 3.

The correlation coefficient is about one when the values are approximated by 3<sup>rd</sup> power polynomial [3, 4]. The approximated relationships between abrasions and the locomotive run are

described for lubricated and unlubricated wheel flanges by the regression equations as follows:

for unlubricated wheel flanges:

$$y_1 = 4 \cdot 10^{-15} x^3 - 10^{-9} x^2 + 0.0001 \cdot x \quad (5)$$

$$R^2 = 0.9183$$

for lubricated wheel flanges:

$$y_2 = 2 \cdot 10^{-15} x^3 - 6 \cdot 10^{-10} x^2 + 7 \cdot 10^{-5} x \quad (6)$$

$$R^2 = 0.986$$

where  $y_1$  and  $y_2$  denote wheel abrasion, mm;  $x$  is the locomotive run, km;  $R$  is a correlation coefficient.

### 3. Constructing a mathematical model

A mathematical model is based on the equations (5) and (6). The equations describe the variation of the wheel flange depending on the locomotive run for the case of a given reduced curve radius (1 740 m). The tests have shown that, among other things, the abrasion of both rails and wheel flanges depend on the reduced curve radius. Abrasion of the rail head, depending on the curve radius, is shown in figure 4 [5].

By approximating the relationship between an average abrasion and the curve radius, we get the equation:

$$y_b = 1476 \cdot r^{-1.173} \quad (7)$$

$$R^2 = 0.993.$$

where  $y_b$  is rail head abrasion, mm;  $r$  is a reduced curve radius, m;  $R$  is a correlation coefficient.

Since surface stiffness ratio of the rail to the wheel is about one, it can be assumed that the abrasion of the wheel flange and rail head equally depends on the curve radius. To determine the influence of the curve radius on the wheel flange abrasion, let us combine equation (7) with equations (5) and (6). Wear intensity is inversely proportional to the curve radius, therefore, a term of the equation, determining the curve radius, can be used as a multiplier in the function:

$$y_1 = (4 \cdot 10^{-15} x^3 - 10^{-9} x^2 + 0.0001 \cdot x) \cdot A \cdot 1476 \cdot r^{-1.173} \quad (8)$$

for unlubricated flanges:

$$y_2 = (2 \cdot 10^{-15} x^3 - 6 \cdot 10^{-10} x^2 + 7 \cdot 10^{-5} x) \cdot A \cdot 1476 \cdot r^{-1.173} \quad (9)$$

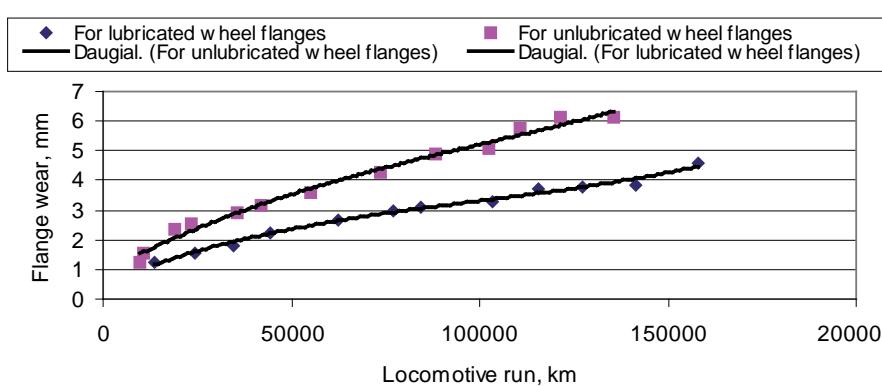


Fig. 3. Abrasion values depending on the locomotive run

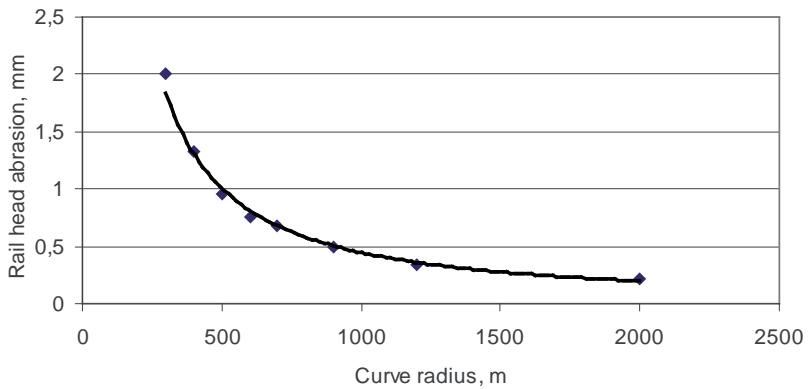


Fig. 4. Rail head abrasion depending on curve radius

for lubricated flanges, where  $A$  is a coefficient showing the relation between the abrasions of a rail and a wheel set.

It is known that when a reduced curve radius is equal to 1 740 m, then,  $y_b$  should be equal to:

$$\begin{cases} r = 1740; \\ y_b = A \cdot 1476 \cdot r^{-1.173} = 1 \end{cases} \quad (9)$$

It can be calculated from (9) that the product ( $A \cdot 1740$ ) is equal to  $6\ 330 \cdot r^{-1.173}$ . The equations (7) and (8) will make a mathematical model determining the variation of abrasion, depending on the locomotive run and a reduced curve radius:

$$y_1 = (4 \cdot 10^{-15} x^3 - 10^{-9} x^2 + 0,0001 \cdot x) \cdot 6\ 330 \cdot r^{-1.173} \quad (10)$$

for unlubricated flanges:

$$y_2 = (2 \cdot 10^{-15} x^3 - 6 \cdot 10^{-10} x^2 + 7 \cdot 10^{-5} x) \cdot 6\ 330 \cdot r^{-1.173} \quad (11)$$

for lubricated flanges.

Implementing the constructed mathematical model. The dependence of unlubricated wheel flanges abrasion on the locomotive run and the radii of the road curves is shown in figure 5.

The relationship between lubricated wheel flange abrasion and the locomotive run, with the radius of railroad curve taken into account is presented in figure 6.

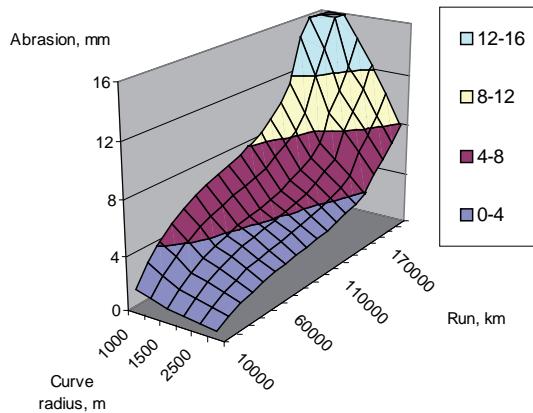


Fig. 5. The relationship between unlubricated wheel flange abrasion and the locomotive run, with the radius of railroad curve taken into account

The graphs presented in figures 5, 6 allow us to determine the locomotive run when the wheel flange abrasion reaches the highest admissible value of 8 mm for different curve radii. For this purpose, a section is passed through a horizontal plane towards the abrasion limit (in this case, 8 mm). The relationship between the longest locomotive run and the curve radius is given in figure 7.

The analysis of the curves presented in figure 6 shows that service life of the locomotive wheelsets can be increased by 1.25 times on the typical curves of Lithuanian railroads, with the radii ranging from 1 000 to 2 500 m, by lubricating wheel flanges.

#### 4. Conclusions

1. The relationships (5), (5) between the wear of the locomotive wheel flanges and the locomotive run were established, taking into account the reduced radius of the road curves.
2. The abrasion model of the rail flange (7), taking into account the curve radius, was constructed.
3. A complex model of the locomotive wheel flange abrasion, taking into account the locomotive run and curve radius, was constructed for unlubricated (10) and lubricated (11) wheel flanges.

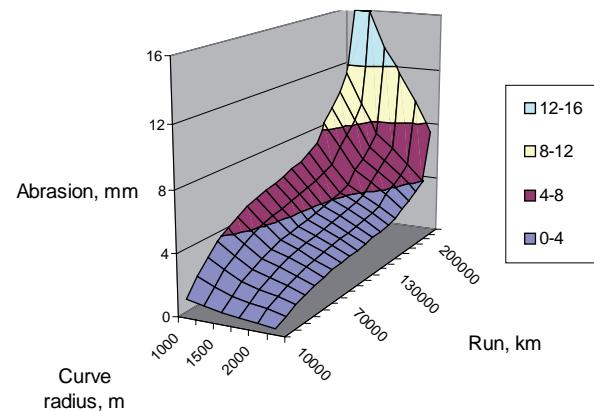


Fig. 6. The relationship between lubricated wheel flange abrasion and the locomotive run, with the radius of railroad curve taken into account

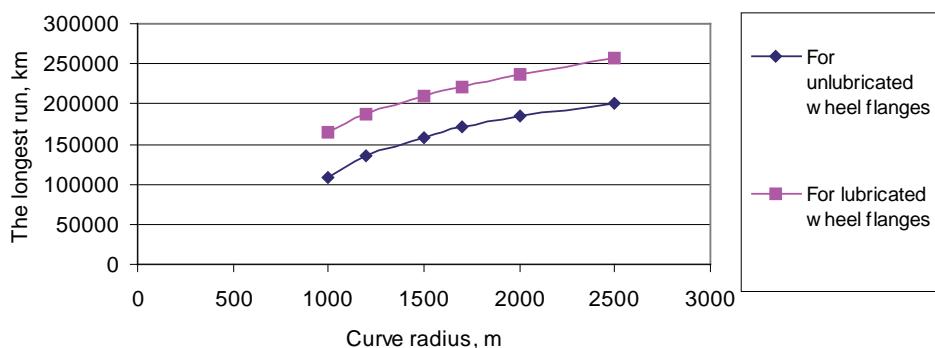


Fig. 7. The relationship between the longest locomotive run and the curve radius

## 5. References

1. Mikaliūnas Š, Lingaitis L P, Vaičiūnas G. The analysis of wear intensity of lubricated and unlubricated locomotive wheel sets flanges. Transport: Journal of Vilnius Gediminas Technical University and Lithuanian Academy of Sciences Vilnius Gediminas Technical University, Lithuania 2004; 19(1): 32–36.
2. Lingaitis L P, Mikaliūnas Š, Vaičiūnas G. Research on railway traction rolling stocks tyres wear. International Conference Mechatronic Systems and Materials MSM 2005: Vilnius, Lithuania 20–23 October 2005: abstracts. Vilnius: Technika, 2005, 123.
3. Lingaitis L P, Mikaliūnas Š, Vaičiūnas G. The analysis of wear intensity of the locomotive wheel – sets. Eksplotacija i Niezawodnosc - Maintenance and Reliability, 2004; 3: 23–28.
4. Vaičiūnas G, Lingaitis L P, Mikaliūnas Š. Determining Major Factors Causing the Wear of Wheelset Tyres. Solid State Phenomena.
5. Povilaitienė I. Influence of Geometrical Parameters of Railway Gauge upon Rail Durability on Curves. Summary of Doctoral Dissertation. Vilnius: Technika, 2004, 32.
6. Dukkipati R V, Narayana Swamy S, Osman M O M. Independently rotating wheel systems for railway vehicles. Vehicle System Dynamics, 1992; 21(5): 297–327.
7. Fang L, Zhou Q D. An explanation of the relation between wear and material hardness in three-body abrasion. Wear 1999; 151: 313–321.

---

**Doc. dr. Gediminas VAIČIŪNAS**  
**Prof. habil. dr. Leonas Povilas LINGAITIS**  
 Dept of Railway Transport  
 Vilnius Gediminas Technical University  
 Ul. J. Basanaviciaus nr 28, LT-03224 Vilnius, Lithuania  
 e-mails: vaic@ti.vgtu.lt; leonasl@ti.vgtu.lt

---

## POMIAR MOMENTU BEZWŁADNOŚCI SILNIKA POJAZDU

### MOMENT OF INERTIA MEASUREMENT OF VEHICLE ENGINE

Coraz częściej do pomiaru parametrów eksploatacyjnych pojazdów drogowych wykorzystuje się metody dynamiczne, które stawiają niskie wymagania co do czasu i nakładów pieniężnych. Dynamiczny pomiar parametrów pracy silnika na ogół opiera się na znajomości masowego momentu bezwładności silnika i mechanizmów przekładniowych, włączając w to koła napędowe. Jednakże otrzymanie wskaźania odpowiedniego momentu bezwładności nie jest rzeczą prostą. W pracy opisano nową propozycję możliwości pomiaru przeprowadzanego na stanowisku badawczym wyposażonym w luźno osadzone walki. Wynikiem pomiaru jest moment bezwładności, którego znajomość możemy wykorzystać do pomiaru parametrów eksploatacyjnych, wydajności hamulców, itd.

**Słowa kluczowe:** moment bezwładności silnika, parametry eksploatacyjne, stanowisko badawcze wyposażone w walki.

The use of dynamic methods for measuring operational parameters of road vehicles begins to increase due to its low demands on time and investment funds. Dynamic measurement of engine performance parameters are generally based on knowledge of the rotating mass moment of inertia of engine and gearing mechanisms including driving wheels. However, it is difficult to obtain an indication of the correct moment of inertia. This paper describes a newly proposed possibility of measurement that is carried on roll test bed with loose rollers. The result of measurement is the moment of inertia, which can also be used in the measurement of performance parameters, brake performance, etc.

**Keywords:** moment of inertia of engine, performance parameters, roll test bed.

#### 1. Introduction

Wide development of the dynamic measurement of operating parameters of vehicles and internal combustion engines in recent years offers new possibilities in the diagnosis. One of many possible applications of dynamic acceleration measurement is the measurement of performance parameters (torque, power) of the combustion engine [4]. Measurements can be made only on the engine itself or on the roll test bed or on the test road [3]. In all cases it is necessary to include the correct value in the calculation of the engine moment of inertia, or the whole vehicle. Effect of moment of inertia is essential when measuring the engine itself.

This article focuses on the description of the possibility of measuring the moment of inertia of the engine by itself. Application for the whole vehicle is quite similar. There are several ways to obtain the moment of inertia of the engine:

- *Obtaining information from the manufacturer* - This is not usually a problem with modern engines, factory diagnostic devices offer the possibility of measuring the performance parameters through the acceleration method. Information about the moment of inertia of the engine should be in the diagnostic tools available. The problem is if there is no factory diagnostics, detailed information about the vehicle, or in the case of obsolete vehicles.
- *Calculation* - Moment of inertia can be determined and calculated from the dimensions and other information of various components. This option is very time consuming and requires precise knowledge of the mechanical design and dimensions of all components [9].

- *With makeweight* - Using makeweight of known moment of inertia can be performed two measurements. One measurement with makeweight and second without it. Then, by comparing the results of both measurements can be calculated moment of inertia of the engine [8].

$$I = \frac{F_A}{d_2 - d_1} \quad (1)$$

where:  $I$  – moment of inertia ( $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ ),  $F_A$  – represents added external load ( $\text{N}\cdot\text{m}$ ),  $d_1, d_2$  – deceleration rate ( $\text{rad}\cdot\text{s}^{-2}$ )

- *New engine* - If there is a new engine for which the manufacturer guarantees performance parameters, acceleration measurements can be carried out. Then it is possible to determine the value of moment of inertia of the engine by return in order to match the performance parameters with the table values.

- *Dynamometer* – Similarly, as a new engine dynamometer can be used [8]. Moment of inertia is assigned to the resulting values of the acceleration measurements in order to correspond to the values measured on the dynamometer.

$$I = \frac{M_D}{\varepsilon_M} \quad (2)$$

where:  $I$  – moment of inertia ( $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ ),  $M_D$  – effective torque from rolldynamometer ( $\text{N}\cdot\text{m}$ ),  $\varepsilon_M$  – acceleration ( $\text{rad}\cdot\text{s}^{-2}$ )

- *Average* – Exactness of this method assume measurement of large number of vehicles with the same engine and a gradual refining of moment of inertia.

But sometimes it is impossible to get to the actual moment of inertia with any of described ways [10]. For example, because there is no dynamometer or a new vehicle or the manufacturer's information and it is not possible to mount the make-weight of known moment of inertia. In such cases, there are suitable several other ways, such as measuring of vehicle acceleration on the road or on roll test bed with loose rollers or on the roll test bed itself.

This paper describes the possibility of determining the moment of inertia using modified roll test bed. Authors of the paper invented this method and applied for its patent. It is possible to use proposed method in order to realize dynamic measurement of power parameters [2]. Based on behaviour of power parameters there can be determined technical state and potential faults of engine [7]. Such approach can contribute to better economy and primarily to ecology of vehicle utilization [1, 5].

## 2. Material and methods

Structural adjustment of roll test bed, originally designed only to check the brakes, consisted in the removal of gearbox and connecting electric motors to frequency converters (this is not strictly necessary). Detail of the test bed adjustments is shown in the figure 1, frequency converters are shown in the figure 1B. Angular velocity and angular acceleration of the vehicle engine are calculated from the time recorded data of incremental rotating speed sensor. The sensor (figure 1A) gives 1024 pulses per revolution (with time accuracy within 20 nanoseconds) at this described specific application. The sensor is attached to the rollers of test bed. Required values of vehicle's engine are defined by reduction of measured values in the overall speed ratio between vehicle's engine and rollers of test bed.



Fig. 1. Roll test bed: A - Incremental sensor of roller's revolution, B - Frequency converter

Possibilities of utilization of roll test bed are extensive and include dynamic measurement of performance parameters of engines of vehicles, measurement of transmission ratios, measuring the dynamic braking forces, etc. Data collection is carried out with eight-channel collector, which ensures online data preprocessing and passes data to the operating computer type PC which is connected through the USB port.

Procedure finding moment of inertia of the vehicle engine is implemented in three steps, which are logically connected and, if necessary, it is possible to print a protocol.

- 1) The first step is to measure gear ratio between the engine and rollers of test bed for each vehicle. Revolutions of roller test bed measured by an incremental sensor and rev-

olutions of engine measured by the other external sensor are compared. To measure the revolutions of the vehicle engine, it is most suitable to use the diagnostic plug OBD. For instance, if a motor vehicle has 820 rpm, and rollers of test bed have 265 rpm, then the overall gear ratio is 3,094.

- 2) The second step is to measure all inertial mass, i.e. the mass of engine, transmission and wheels of the vehicle and rolls and other rotating masses of test bed, reduced to the circumference of rollers. Frequency converters controlled by electric motors are used to measure and it is possible for them to change the performance of approximately 15 to 30 kW (according overload set on converter). Given procedure, in view of the performance characteristics of electric motors roll test bed, is different for engines of vehicles with low inertia mass (lower stroke volume, approximately up to 1,4 dm<sup>3</sup>) and for vehicles with engines higher inertia mass (higher stroke volume more than 1,4 dm<sup>3</sup> and diesel engines).
  - a) Measurement of inertial mass of smaller engines is simpler. The vehicle's engine is running at idling speed revolution, there is geared up chosen gear speed (recommended is the second). Rollers of test bed are driven by vehicle's wheels and these wheels are spinning with revolutions according idle revolution of engine. After that the electric motors of roller test bed are connected; the frequency converters are set higher speed revolutions than speed revolutions that correspond to idle revolutions of the vehicle. All rotating mass are accelerated by virtue of known power of electric motors. During the acceleration are measured values of the immediate velocity and acceleration, which is calculated from the mass inertia of the rotating mass, reduced with the circumference of rollers.
  - b) For vehicles' engines with larger inertial mass it is not enough electric power to accelerate the testing of all the rotating mass of the idling speed revolutions. At first the vehicle on the rollers is started by using its own engine to a speed of about 50 km/h and then electric motors are connected. Gas pedal is fully released and all the rotating mass starts to decelerate. The performance of the electric motors which drives rollers of test bed slows down this deceleration. During deceleration, there are again measured values of instantaneous velocity and acceleration (i.e. deceleration) of them is again calculated inertial mass of the rotating mass, reduced with the circumference of rollers.
- 3) In the third step is necessary to determine the inertial mass of all rotating parts except the engine and the relevant parts of the gearbox. The procedure is the same as in the second step, but is no gear shifted.

Note: If the engine power has to be measured, according to the procedure described above is supplemented by the action acceleration of the vehicle on the rollers at the full fuel supply. The result is a course of torque and power depending on speed. Figure 2 describes an example of the number of performance characteristics of combustion engine of a car Skoda Fabia 1,4 (55 kW) [6].

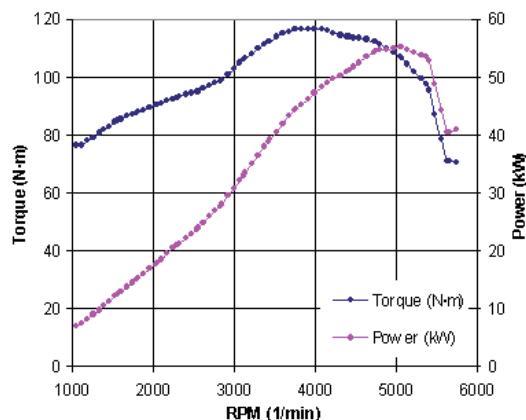


Fig. 2. Performance parameters - Skoda Fabia I,4

### 3. Results

The method of measuring the moment of inertia of the engine was applied to the vehicle Skoda Octavia II 2,0 TDI (103 kW). It is a vehicle that belongs to the category 2b - engines with higher mass of inertia. The resulting measured and calculated values are in the table 1, where the columns listed in the overall gear ratio between motor vehicles and the roll test bed, the total inertial mass of the rotating mass of vehicle reduced the circumference of rollers, the rotating mass inertia weight without motor vehicles reduced the circumference of a roller the resulting moment of inertia of the rotating mass of the vehicle engine.

The required result is the moment of inertia of the rotating masses of engine. To verify the accuracy of the method there were carried of a number of repeated measurements. The results are shown in figure 3.

Tab. 1. Results of measurement of vehicle Skoda Octavia II 2,0 TDI

Measurement	Gear ratio (-)	The total inertial mass of the vehicle (kg)	The inertia mass without engine of vehicle (kg)	Moment of inertia of engine (kg·m <sup>2</sup> )
1.	3,07	589,31	390,62	0,329
2.	3,07	573,12	388,32	0,306
3.	3,07	580,64	389,94	0,316
4.	3,07	576,84	387,36	0,314
5.	3,07	579,14	387,43	0,318
6.	3,07	572,89	385,61	0,310
7.	3,07	579,21	388,04	0,317
8.	3,07	572,22	386,48	0,308
9.	3,06	578,47	387,07	0,317
10.	3,06	576,78	386,55	0,315

Tab. 2. List of vehicles – an example of measured moment of inertia

Producer	Vehicle model	Year of production	Fuel type	Engine volume (dm <sup>3</sup> )	Power (kW)	Moment of inertia of engine (kg·m <sup>2</sup> )
Hyundai	i20	2008	gasoline	1,2	57,2	0,0961
Peugeot	107	2008	gasoline	1,0	50	0,0741
Peugeot	308 SW	2008	diesel oil	1,6 HDI	80	0,2082
Škoda	Octavia II	2006	diesel oil	2,0 TDI	103	0,3152
Škoda	Octavia II	2004	gasoline	2,0 FSI	110	0,3293
Škoda	Favorit	1991	gasoline	1,3 carburetor.	46	0,1317
Škoda	Octavia	2005	gasoline	1,6 MPI	75	0,1882
Škoda	Roomster	2007	diesel oil	1,4 TDI	59	0,2619
Škoda	Felicia	1998	gasoline	1,3 MPI	50	0,1361
Škoda	Felicia	2000	gasoline	1,4 Sport	100	0,1556

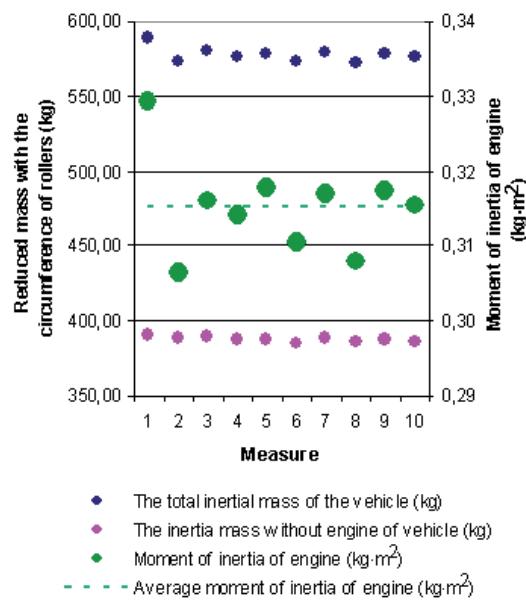


Fig. 3. Results of repeated measurement of inertial mass and moment of inertia of engine

The average value of moment of inertia of the vehicle engine Skoda Octavia II 2,0 TDI (103 kW) is 0,3152 kg·m<sup>2</sup>. A greater deviation from the average (4.5%) for the first measurement is probably due to the fact that the engine was before heated to operating temperature, but the transmission was cold. The differences are negligible in the individual measurements after the temperature stabilization of the engine and gearbox.

Table 2 describes an example of measured moment of inertia of chosen vehicles. Besides moment of inertia there is

also nominal power of engine (according producer), volume of engine, type of fuel, year of production, producer and vehicle model.

## 4. Discussion and conclusion

Moment of inertia is one of the necessary input data for diagnostic non-assembling acceleration measurement. The correct and accurate detection is usually the main problem of these measurements. There are several options for finding moment of inertia, however, there are not always easily feasible.

Moment of inertia of all parts (rotating with the engine in neutral) can be obtained by the procedure described above. This is not a moment of inertia of the engine by itself, but for the purposes of measuring the acceleration performance parameters is not misleading. These are precisely those masses which are accelerating during the acceleration measurement.

Method proposed by authors is suitable for cases where it is available roll test bed, even with low power. The method provides a specific value of moment of inertia of the rotating mass

of the vehicle engine and immediately after provides its basic performance characteristics.

The method was experimentally verified on the vehicle Skoda Octavia II 2,0 TDI (103 kW) using a roll test bed with electric motor with mere output (7,5 kW) of one pair of rolls. The moment of inertia for the vehicle was set  $0,3152 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ . This value seems very likely correct. The first practical measurements of chosen vehicles were launched after an experimental validation of the method. An example of results is given in table 2.

Known value of moment of inertia can be used for dynamic measurements of the engine of entire vehicle, both in measuring the performance parameters as well as the performance of automotive brakes.

There are still other methods applicable to the measurement of the roll test bed or the test section of the road, except that the proposed method of finding the moment of inertia of the engine of vehicle.

\*\*\*\*\*

*Paper was created with the grant support - CZU 31190 / 1312 / 313121 - Accuracy of measurement of performance parameters on the roll test bed.*

\*\*\*\*\*

## 5. Reference

1. Chlopek Z. Ecological aspects of usány bioethanol fuel to power combustion engines. Eksplotacja i Niezawodnosc - Maintenance and Reliability 2007; 3(35): 65-68.
2. Hromádko J, Hromádko J, Kadlec B. Problems of power parameters measurement of constantspeed engines with small cylinder volume by acceleration method. Eksplotacja i Niezawodnosc - Maintenance and Reliability 2007; 1(33): 19-22.
3. Hromádko J, Höning V, Miler P. Applications of NRTC cycle to determine a different fuel combustion and harmful emissoins cause by changes of engine's technical conditions. Eksplotacja i Niezawodnosc - Maintenance and Reliability 2008; 4(40): 63-65.
4. Kadlec B, Pejša L, Pexa M. Virtual Vehicle - Driving Cycle Aplication for Measuring Emission and Fuel Consumption on HDVS. Eksplotacja i Niezawodnosc - Maintenance and Reliability 2002; 4(16): 40-42.
5. Kadlec B, Pejša L, Ružička M, Sviták M, Tvrzský T. The possibilities of electronic toll's utilization in relation to environment conservation and road safety. Eksplotacja i Niezawodnosc - Maintenance and Reliability 2006; 3(31): 66-71.
6. Pexa M, Červenka V. Dynamic performance parameters measuring on free rollers problems. Reliability, Safety and Diagnostics of Transport Structures and Means. Pardubice 2008: 255-258.
7. Sawicki P, Zak J. Technical diagnostic of a fleet of vehicles using rough set theory European Journal of Operational Research 2009; 193 (3): 891-903.
8. United States Patent, cit. [20090925].
9. Zhang D, Hu X, Yuan L. Error analysis on measuring the moment of inertia of complex shaped components with trilinear pendulum. Nongye Jixie Xuebao/Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery 2008; 39 (3): 37-40.
10. Zhu M, Deng Z, Fang Z. Measuring methods for mass parameters of an engine. Nongye Jixie Xuebao/Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery 2005; 36 (4): 34-38.

---

**Ing. Martin PEXA, Ph.D.  
Prof. ing. Josef POŠTA, CSc.  
Ing. Zdeněk ALEŠ  
Ing. Bohuslav PETERKA, Ph.D.**

Department for Quality and Dependability of Machines  
Czech University of Life Sciences Prague, Faculty of Engineering  
Kamýcká 129, Praha 6 – Suchdol 165 21, Czech Republic  
e-mail: pexa@tf.czu.cz

---

## DRGANIA W PROCESIE SKRAWANIA STOPU TYTANU

### VIBRATIONS IN CUTTING PROCESS OF TITANIUM ALLOY

Praca przedstawia wyniki badań eksperymentalnych procesu skrawania stopu tytanu Ti6Al4V. W eksperymencie mierzono siły skrawania oraz przemieszczenia przedmiotu obrabianego podczas skrawania z różnymi głębokościami. Następnie, za-rejestrowane sygnały przeanalizowano metodą współrzędnych opóźnionych, stosowaną do badania zjawisk nieliniowych, otrzymując mapy Poincare i wykresy rekurencyjne. Wyniki tych badań pozwolily na identyfikację rodzaju drgań i dobór odpowiednich parametrów skrawania. W ostatniej części pracy wyniki badań skrawania stopu tytanu porównano z wyni-kami otrzymanymi dla klasycznej i kwasoodpornej stali.

**Słowa kluczowe:** stopy aluminium, proces skrawania, dynamika skrawania.

*This work presents experimental investigations of cutting process in which the titanium alloy (Ti6Al4V) is cut. During the experiment the cutting forces and displacements of the workpiece are measured as a function of the cutting depth. The obtained signals are analysed using methods useful for nonlinear phenomena that is the method of delay coordinates, Poincare maps and recurrence plots. The results let us identify kind of vibrations and select the most proper cutting parameter.*

*Finally, the results of titanium alloy cutting are compared with outcomes of classical and stainless steel machining.*

**Keywords:** titanium alloys, cutting process, dynamics of cutting.

#### 1. Introduction

Titanium alloys belong to so called superalloys which have high strength combined with high heat resistance and corrosion as well. Therefore titanium alloys are applied for extremely loaded components e.g. in civil and military aviation. The demand for a steadily growing productivity and product quality led to increasing of cutting parameters and this, in combination with their particular mechanical and physical properties can also make difficult machining. Additionally a further growth of a civil air traffic is predicted for the next years. Therefore the productivity of titanium alloy machining is one of the major challenges in production engineering [1]. Nowadays, new methods of titanium alloys cutting such as water jet cutting, laser cutting [3], plasma cutting are used especially in conditions of high part precision and short production time: [4]. Each of these modern, nonconventional means of materials processing has certain benefits, but also shortcomings that are discussed in the paper.

Beside various machining method, different kind of tools are tested. Despite, many researchers believe that alloyed cemented carbide (W-Ti/Ta)C-Co is not suitable for machining of titanium alloys. However, the result of study reported in [9] shows that the alloyed uncoated carbide (W-Ti/Ta/Nb)C-Co and alloyed CVD-coated carbide have good possibility to use in end milling of titanium alloy Ti-6242S even under extreme dry cutting condition. Authors explain it is probably due to the grain size of tools' substrate, its geometry and the class of titanium alloy Ti-6242S. Series of machining trials on the range of cutting speed between 60 and 150 m/min are conducted. These speeds can be treated as a traditional because high speed cutting refers to cutting speeds which are about five to ten times higher. Characteristics of cutting forces obtained for alloy Ti6Al4V at cutting speed up to 700 m/min are reported in [1]. Results received from different scientific institutes exhibit meaningful differences depending on a tool geometry and coatings.

A comparison of titanium alloys Ti6Al4V and Ti555.3 machinability for a traditional turning process is presented in [2].

The specific cutting force and specific feed force, tool wear, chip morphology, rake face and cutting edge after machining were analysed. The outcomes reveal that although the cutting force decreases versus cutting speed (up to 90 m/min), tool wear measured as a flank wear area considerably grows for higher cutting speeds. Nevertheless from point of view of final product user, the surface roughness seems to be a very important factor. Such investigations are talked over in [10]. A comprehensive review of machinability of titanium alloys is presented in [6]. The paper points out the main problems associated with the machining of titanium alloys as well as tool wear and the mechanism responsible for tool failure. It is found that the straight tungsten carbide cutting tools maintain their superiority in most machining processes, while CVD coated carbides and ceramics come out not to be such a good tool. As a major cause of a rapid tool wear, high cutting temperature is indicated whereas, the low modulus of elasticity of titanium alloys is a principal reason of chatter during machining.

During high speed cutting, it is important to understand the chip formation mechanism. Therefore paper [12] describes the effect of different influential variables including the tool chip angle, cutting velocity, chip thickness and also the structure of Inconel 718 and Ti6Al4V on chip formation and cutting forces. The experimental examination is completed with temperature measurements. For the cutting speed from 5 m/s to 80 m/s the specific cutting force behaves in a classical way, that means the force falls down when the cutting speed is higher regardless of the a clearance angle.

An interesting and novel solution to improve productivity of titanium and nickel alloys cutting is developed in [18]. Authors introduced diamond tool with forced cooling system that is efficient for high speed machining.

Most of published paper concerning cutting of titanium alloys have pure experimentally nature but there are such of them in which a mathematical model is developed, e.g. tool life mathematical model for end milling is discussed in [8]. The theoretical results are compared to experimental ones with a po-

sitive effect. The tool life models show that the cutting speed is the main factors on the tool life, followed by the feed and axial depth of cut. Increase many of these three cutting variables leads to reduction of tool life.

On the basis of above literature one can conclude that scientific papers mainly exhibit results of force measurements during cutting under different, conventional and high speed conditions. This paper goes further because outcomes of titanium alloy Ti6Al4V turning is compared to stainless (EZ6NCT25) and ordinary (C45) steel and then a new method of time series analysis is proposed.

## 2. Experimental set up and results

Experimental investigations were conducted on the experimental setup presented in fig. 1. The measurement set up is composed of the piezoelectric dynamometer Kistler 9257B, charge amplifier type 5017B and laser sensors optoNCDT 1605/2 (Micro-Epsilon Messtechnik), "sample and hold" module (SC2040) and analog-digital converter NI 6071E by National Instruments. All the signals from the dynamometer and the lasers are transmitted to the analog-digital converter, which is connected to a computer system. A workpiece used in the experiment had the same measurements and was made of titanium alloy Ti6Al4V, stainless steel EZ6NCT25 and constructional steel C45. The workpiece was cut on the lathe C11 with rotational speed of 710rpm and different cutting depth from 0.4mm

to 3.0mm. The rest of technological parameters were settled (constant). The detailed description of parameters employed in the experiment is presented in tab. 1.

Theoretical investigations carried out on the basis of turning process model in which a dry friction effect plays a key role demonstrate an influence of the cutting depth on system stability and on the amplitude of vibrations during machining [15, 16]. Therefore experimental investigations here are performed for various cutting depth from 0.4mm to 3mm. The results of forces measurements are presented graphically in fig. 2 for titanium alloy Ti6Al4V, stainless steel EZ6NCT25 and constructional steel C45. The curves show the mean value of cutting forces with standard deviation as a vertical bar. Generally, forces ( $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ ) raise with the cutting depth what is in accordance with the classical theory although, for instance paper [12] reports some evidence about decreasing force with growing depth. The force change can be treated as a linear or almost linear that is also modelled in some papers.

It is proved that forces of titanium alloy turning are smaller than stainless steel and even than constructional steel C45 which is rather seemed to be well machinable. Looking at a displacement chart (fig. 3) which presents a standard deviation of workpiece vibrations in z direction, one can explain why the cutting forces are smaller than in case of steel cutting.

Namely, the stiffness of titanium alloy is smaller than constructional steel and therefore bigger vibrations are visible spe-

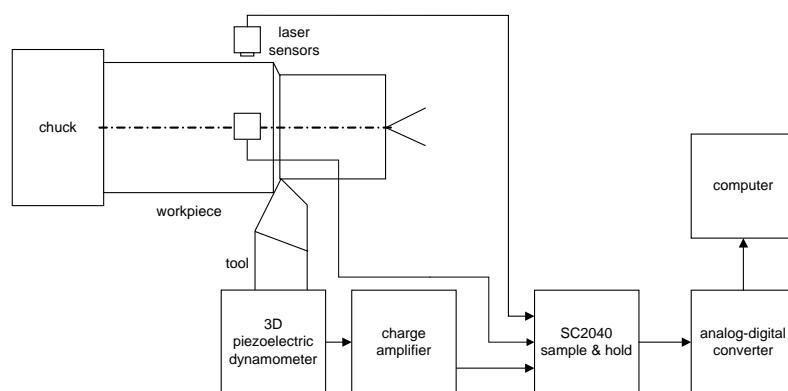


Fig. 1. Experimental set up scheme

Tab. 1. Cutting condition

No	Rotational speed [rev/min]	Feed [mm/rev]	Sampling frequency [Hz]	Tool cutting edge angle	Cutting depth [mm]
Titanium alloy					
186	710	0.25	2000	45	3.0
187	710	0.25	2000	45	2.6
190	710	0.25	2000	45	1.8
193	710	0.25	2000	45	0.9
194	710	0.25	2000	45	0.4
Constructional (ordinary) steel C45					
195	710	0.25	2000	45	2.9
196	710	0.25	2000	45	2.3
199	710	0.25	2000	45	1.7
202	710	0.25	2000	45	1.0
203	710	0.25	2000	45	0.4
Stainless steel EZ6NCT25					
204	710	0.25	2000	45	2.8
205	710	0.25	2000	45	2.3
208	710	0.25	2000	45	1.75
211	710	0.25	2000	45	1.0
212	710	0.25	2000	45	0.5

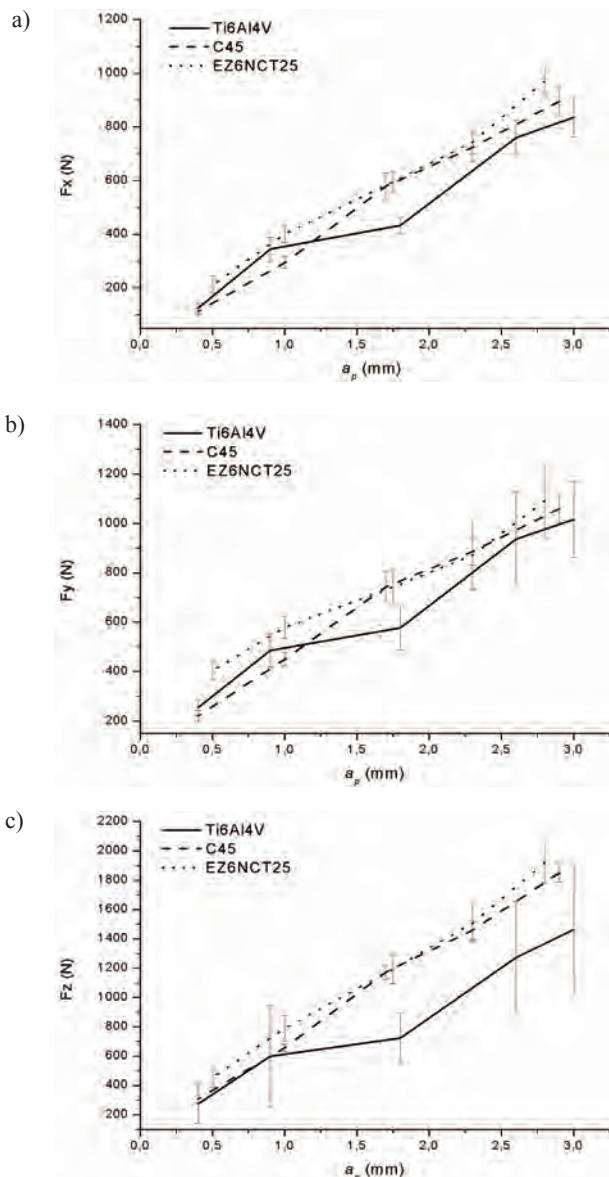


Fig. 2. Cutting forces versus cutting depth during machining titanium alloy Ti6Al4V, stainless steel EZ6NCT25 and constructional steel C45; a) feed force, b) thrust force, c) cutting force

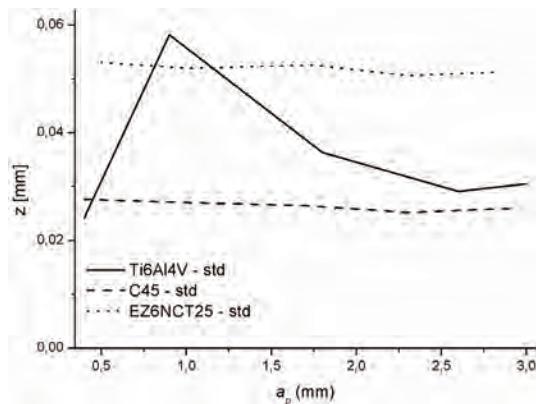


Fig. 3. Standard deviation (std) of displacement in  $z$  direction versus cutting depth

cially for the cutting depth about 0.8mm. The second reason of a rapid vibration increasing can be related to the forces jump visible in fig. 2. To sum up, very little cutting depth or bigger than some critical one can be considered as a proper cutting depth of titanium alloy. This behaviour does not exist in other materials compared.

### 3. Results of analysis

The outcomes of measurements recorded as time series can be analysed with many different procedures dedicated for nonlinear phenomena. Here, two methods are applied. The first, called the method of delays, is proposed in order to obtain attractors directly from time series. The second, that is a recurrence plot bases on time series as well but let us look at cutting dynamics under different angle.

The reconstruction of attractors is made with the help of Tisean package by Hegger, Kantz and Schreiber [11]. The first step in this investigation is the state space reconstruction by delay coordinates [14, 17]. A measured time series can be presented as a vector in a new space in the form:

$$x(t) = [S(t), S(t + \tau_1), \dots, S(t + (w-1)\tau_1)] \quad (1)$$

The new space is called the embedding space, the number  $w$  denotes the embedding dimension, the time  $\tau_1$  is generally referred to the time delay or lag. The time delay is taken as an integer multiple of the sampling time and is computed using the average mutual information [7], given by

$$J(\tau_1) = \sum_{S(t), S(t+\tau_1)} P(S(t), S(t+\tau_1)) \log_2 \frac{P(S(t), S(t+\tau_1))}{P(S(t))P(S(t+\tau_1))} \quad (2)$$

where  $P(S(t))$  is the probability of a measurement  $S(t)$  and  $P(S(t), S(t+\tau_1))$  is the joint probability of measurements  $S(t)$  and  $S(t+\tau_1)$ . The average mutual information is plotted versus the time lag and the chosen value corresponds to the first local minimum. This procedure is an equivalent of an autocorrelation function for a linear case. The embedding dimension  $w$  is obtained by the method of false neighbours based on searching  $w$ -dimensional state space in which there are no false crossing of the trajectories in the reconstructed space. Fig. 4-9 present phase space with reconstructed attractors obtained on the basis of force  $F_z$  and displacement  $z$  signals. The graphs concerning the force of titanium alloy (fig. 4) exhibit that attractors are very similar. Their shape is the same, like a set of points concentrated together but the size of attractors changes depth of cut. Considerably change is noticeable looking at fig. 5a and 5b where the attractors are reconstructed from displacement. For  $a_{po} = 0.4$  mm the attractor is regular that means motion is subharmonic with period 2. As far as constructional steel C45 is considered, fig. 6 and 7 show regular motion with period 1 whereas attractors in fig. 8 and 9 differ from each other. Analysing the force only regular attractors exist but taking displacement into consideration the motion seems to be quasiperiodic for all cases.

The method of recurrence plot, used here, has been invented by Eckmann et al. [5] and is used for identification of nonlinear systems with various behaviour. Such plots are constructed by spatial proximity analysis of time series  $x_i$ . For arbitrary  $i$  and  $j$  from the interval  $[0, N]$ , where  $N$  is the total number of points in given time series, a black dot is plotted on the graph if the following condition is fulfilled:

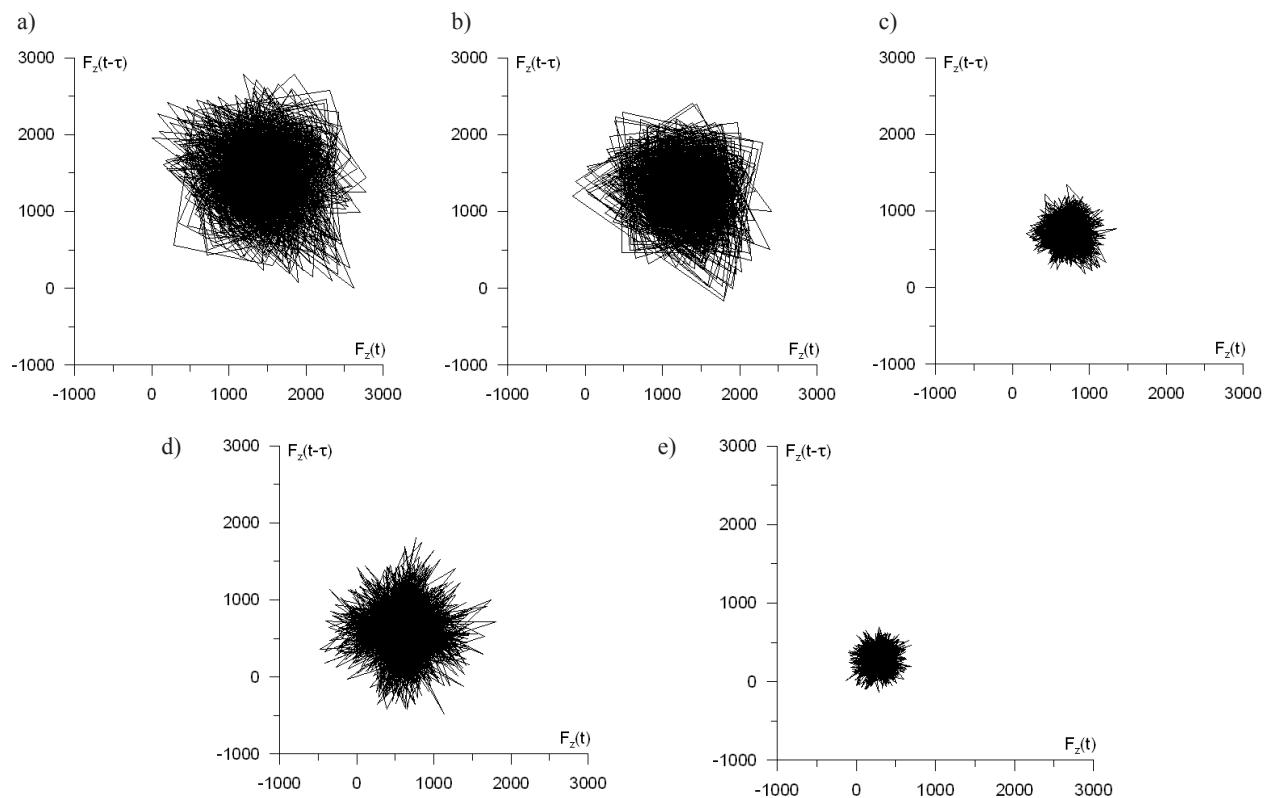


Fig. 4. Reconstructed Phase Space for Ti6Al4V from  $F_z$  signal a)  $a_p = 3\text{mm}$ , b)  $a_p = 2.6\text{mm}$ , c)  $a_p = 1.8\text{mm}$ , d)  $a_p = 0.9\text{mm}$ , e)  $a_p = 0.4\text{mm}$

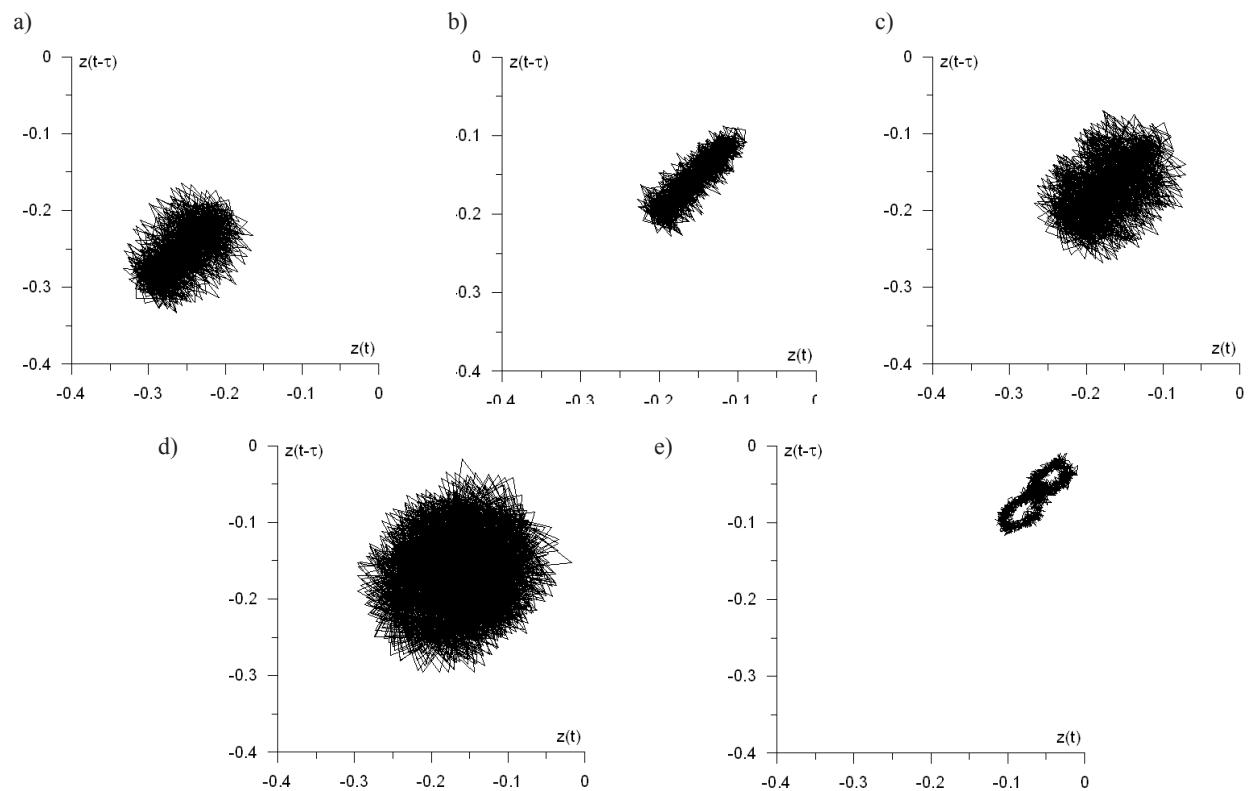


Fig. 5. Reconstructed Phase Space for Ti6Al4V from  $z$  signal a)  $a_p = 3\text{mm}$ , b)  $a_p = 2.6\text{mm}$ , c)  $a_p = 1.8\text{mm}$ , d)  $a_p = 0.9\text{mm}$ , e)  $a_p = 0.4\text{mm}$

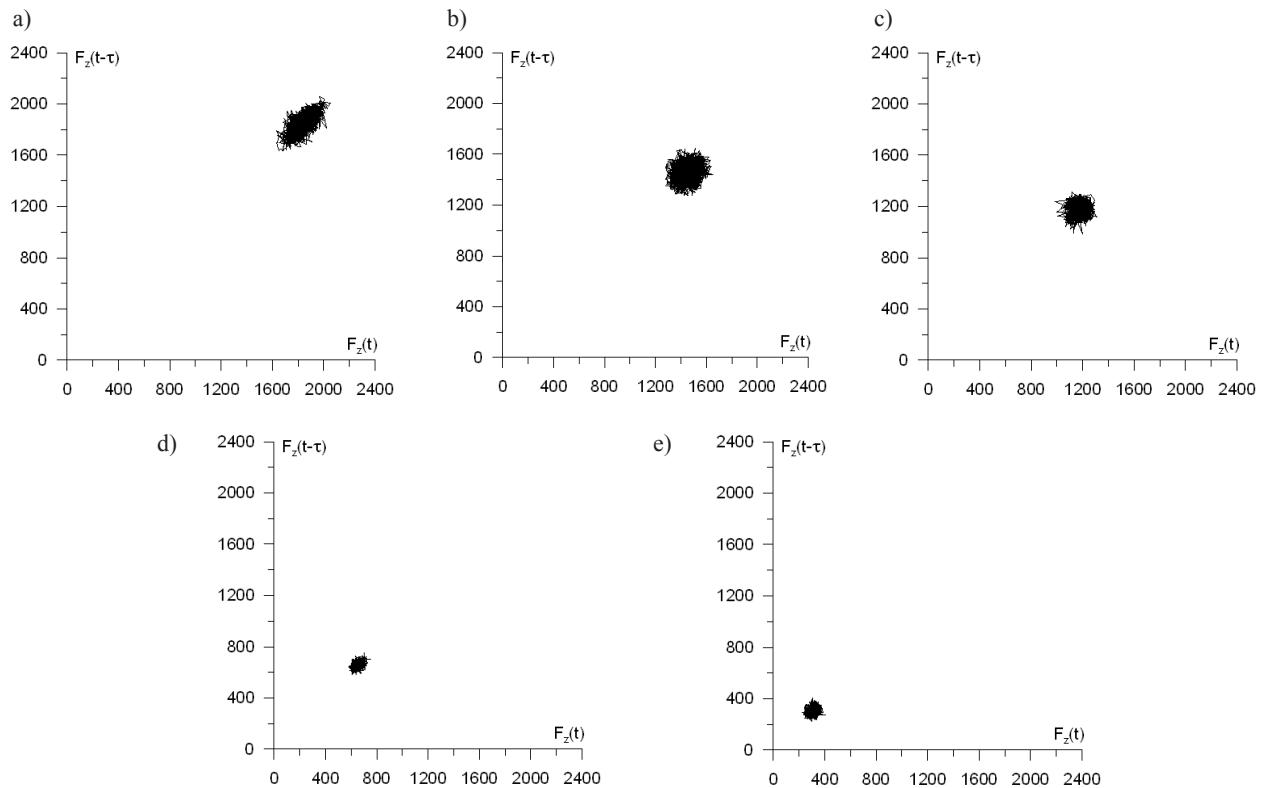


Fig. 6. Reconstructed Phase Space for steel C45 from  $F_z$  signal a)  $a_p=2.9\text{mm}$ , b)  $a_p=2.3\text{mm}$ , c)  $a_p=1.7\text{mm}$ , d)  $a_p=1\text{mm}$ , e)  $a_p=0.4\text{mm}$

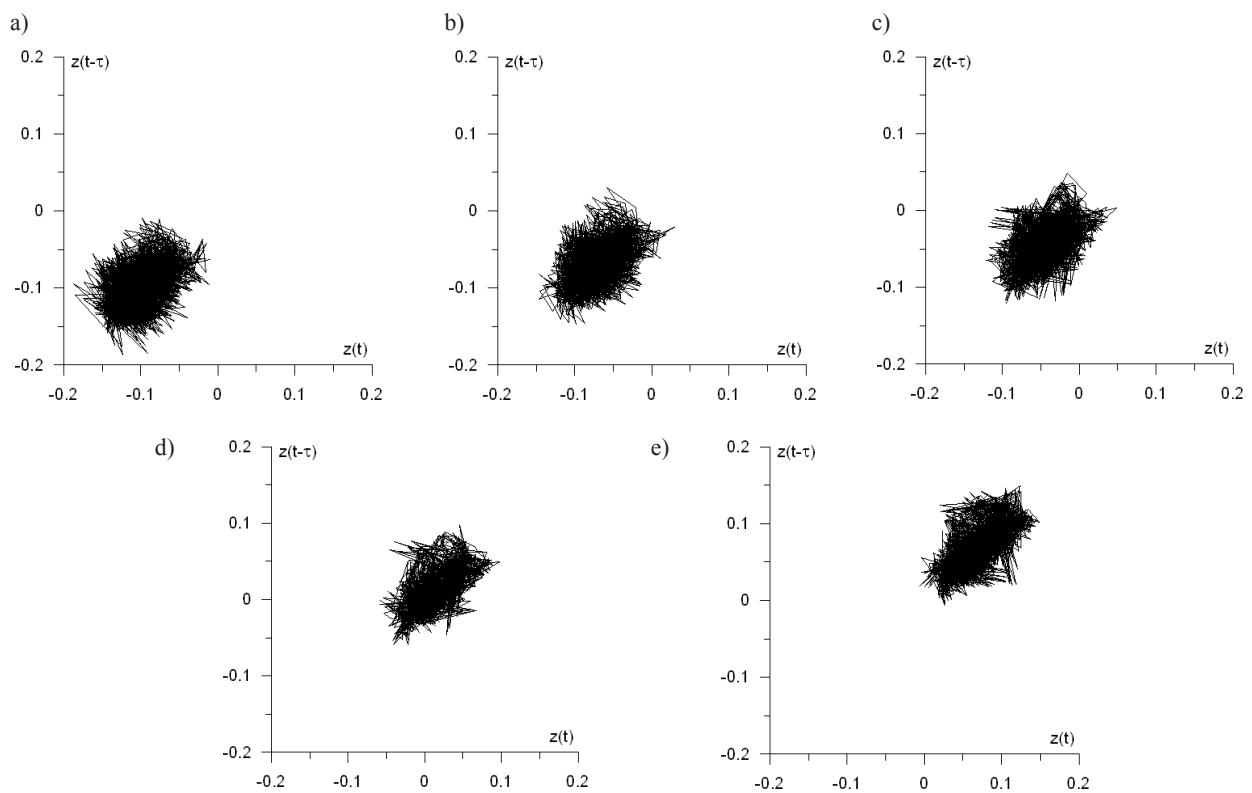


Fig. 7. Reconstructed Phase Space for steel C45 from  $z$  signal a)  $a_p=2.9\text{mm}$ , b)  $a_p=2.3\text{mm}$ , c)  $a_p=1.7\text{mm}$ , d)  $a_p=1\text{mm}$ , e)  $a_p=0.4\text{mm}$

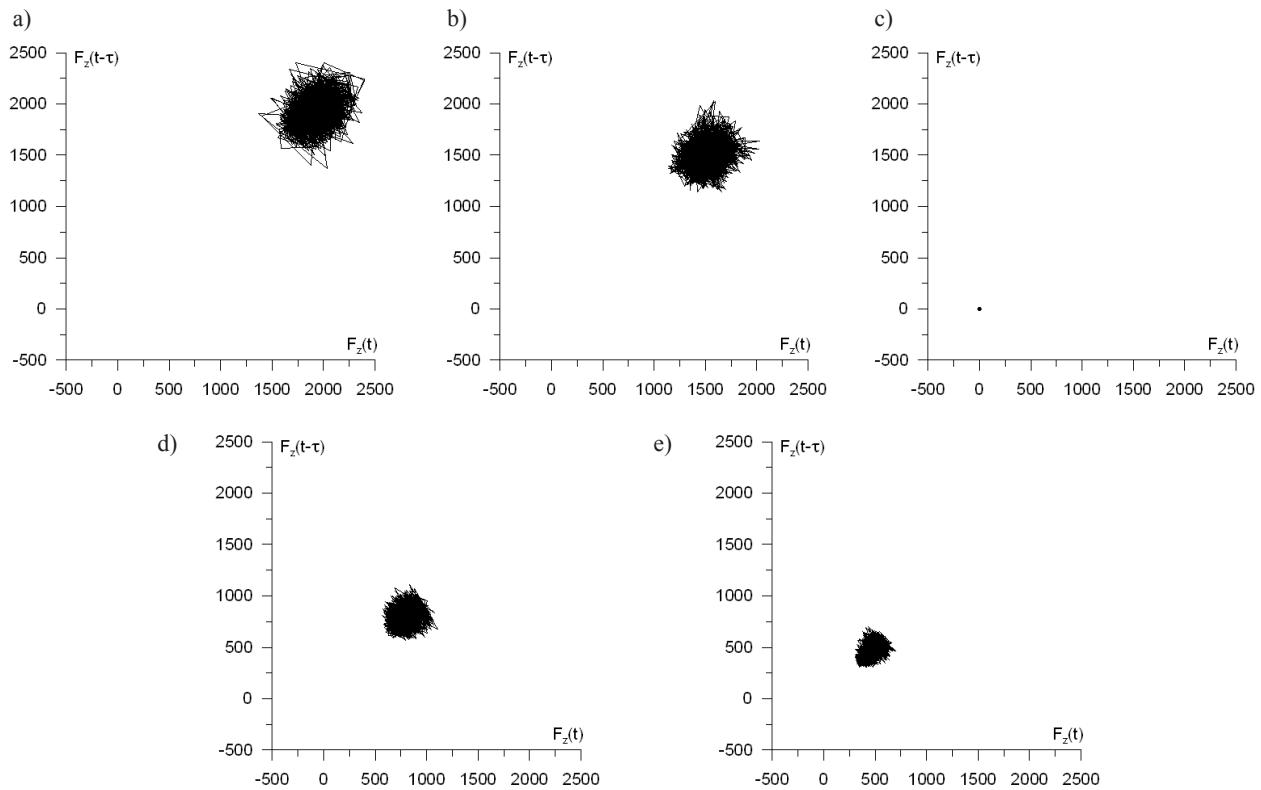


Fig. 8. Reconstructed Phase Space for EZ6NCT25 from  $F_z$  signal a)  $a_p=2.8\text{mm}$ , b)  $a_p=2.3\text{mm}$ , c)  $a_p=1.7\text{mm}$ , d)  $a_p=1\text{mm}$ , e)  $a_p=0.5\text{mm}$

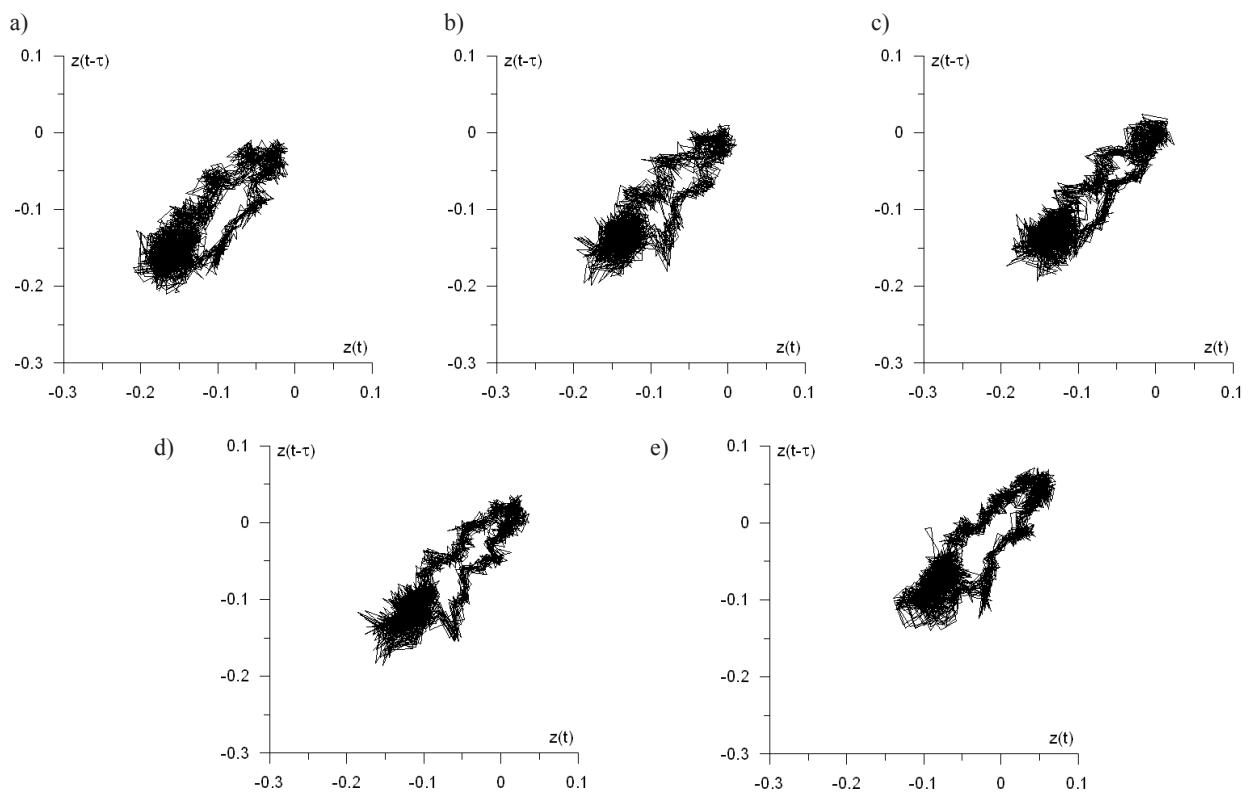


Fig. 9. Reconstructed Phase Space for EZ6NCT25 from  $z$  signal a)  $a_p=2.8\text{mm}$ , b)  $a_p=2.3\text{mm}$ , c)  $a_p=1.7\text{mm}$ , d)  $a_p=1\text{mm}$ , e)  $a_p=0.5\text{mm}$

$$|x_i - x_j| < \varepsilon \quad (3)$$

Note,  $\varepsilon$  is a small threshold number adjusted for each time series case separately in such a way to get a good contrast in diagram. In fact by using the above qualitative method for deterministic systems it is possible to classify the dynamics of a examined system by its characteristic patterns showing diagonal, vertical or horizontal structure of lines and stripes. The method allows to distinguish kind of motion e.g. chaotic from purely stochastic or regular behaviour. Generally, a pattern for a stochastic system is based on uniform distribution of points in the recurrence plot while a chaotic system possesses structure of lines with finite lengths [13].

Figures 10, 11 and 12 represent recurrence plots which are received from the time series of displacement. Plots for titanium alloy (fig. 10) suggest that in the case of 3mm depth of cut the process is similar to regular but with rather strong stochastic component. While for  $a_{po} = 0.4\text{mm}$  the motion is regular. The pattern connected with cutting of the constructional steel C45 (fig. 11) has strong stochastic background however some symptoms of regularity also exist. Considering fig. 12 which represents high level of ordering one can conclude that work-piece vibrations are regular although, main period of vibrations, which is represented by long diagonal lines, is mixed with very short period which is illustrated as black dot.

Insight in dynamics of cutting process, done together on the basis of reconstructed attractors and recurrence plots, demonstrate the kind of vibrations which is dependent on cutting depth. Thus, introducing these method of signal analysis let us look deeper on the problem of vibrations during cutting process.

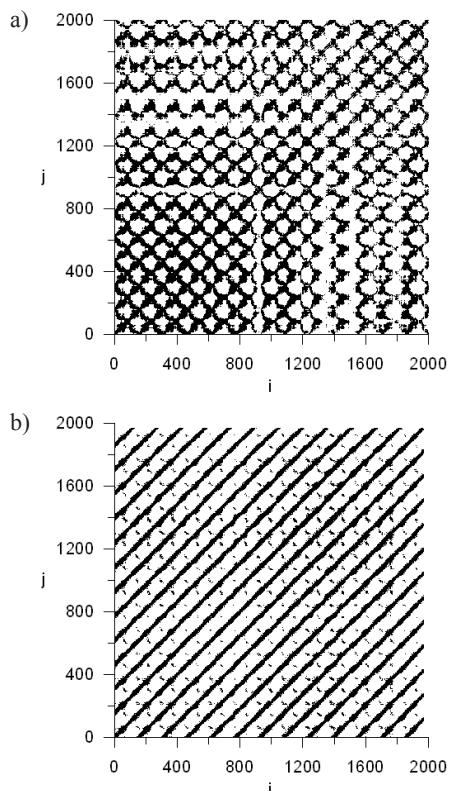


Fig. 10. Recurrence plots for titanium alloy Ti6Al4V; a) depth of cut  $a_p = 3\text{mm}$ , b)  $a_p = 0.4\text{mm}$

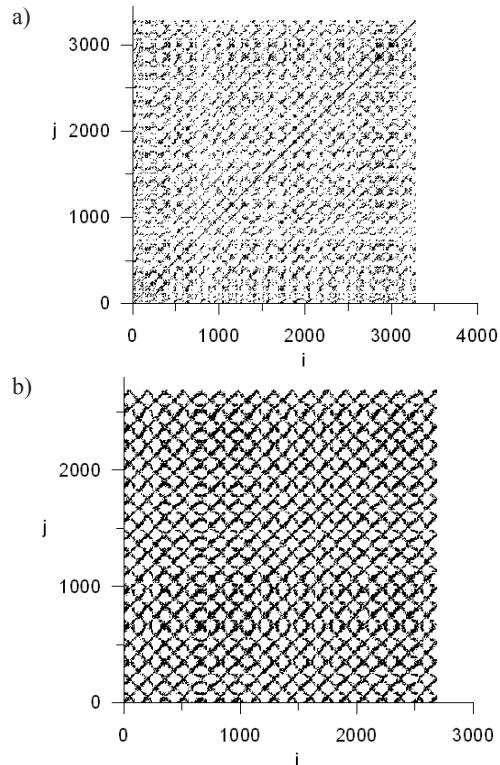


Fig. 11. Recurrence plots for constructional steel C45; a) depth of cut  $a_p = 2.9\text{mm}$ , b)  $a_p = 0.4\text{mm}$

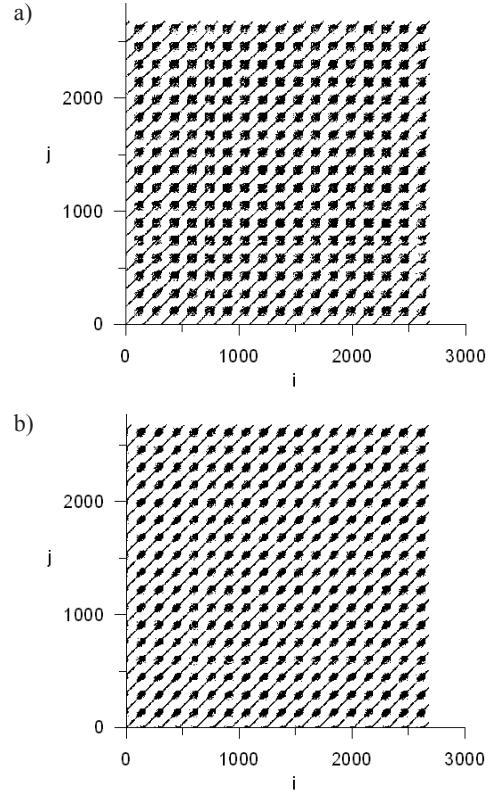


Fig. 12. Recurrence plots for stainless steel EZ6NCT25; a) depth of cut  $a_p = 2.8\text{mm}$ , b)  $a_p = 0.5\text{mm}$

## 4. Conclusions

Cutting of titanium alloy is compared with others constructional materials. This comparison demonstrates differences between cutting forces during titanium alloy, stainless and constructional steel machining. Basically, the cutting forces grows when depth of cut increases. The level of vibrations, measured as a standard deviation of displacement is the biggest for the depth of cut 0.8mm. Noticeable jump of vibrations for titanium alloy is probably caused by friction phenomenon and low

Young's modulus compared to steel. The join analysis of reconstructed attractors and recurrence plots point out at considerable influence of stochastic component specially in the signals of force. Therefore, better results are received when time series of displacement is analyzed because of smaller stochastic component. Generally, machining at small cutting depth characterizes regular vibrations that is proved by the patterns of recurrence plots. What is more, regularity is written in the nature of stainless steel cutting

\*\*\*\*\*  
*Financial support of Structural Funds in the Operational Programme - Innovative Economy (IE OP) financed from the European Regional Development Fund - Project No POIG.0101.02-00-015/08 is gratefully acknowledged.*

*Partially, the work was carried out under the project NR 65/6 PR UE/2005/7 and ToK MTKD-CT-2004-014058*

\*\*\*\*\*

## 5. References

1. Abele E., Frochlich B.: High Speed Milling of Titanium Alloys. *Advances in Production Engineering & Management* 2008; 3: 131-140.
2. Arrazola P.-J., Garay A., Iriarte L.-M., Armendia M., Marya S., Maître F. Le: Machinability of titanium alloys (Ti6Al4V and Ti555.3). *Journal of Materials Processing Technology* 2009, 209: 2223-2230.
3. Berkmanns J., Faerber M.: Laser Cutting. [www.linde-gas.com](http://www.linde-gas.com)
4. Biris C., Deac C., Tera M: Considerations On The Choice Of The Cutting Method And Technique Employed For The Cutting Of Parts Made Of Titanium Alloys . *Metal* 2008.
5. Eckmann J.P., Kamphorst S.O., Ruelle D.: Recurrence plots of dynamical systems. *Europhys Lett.* 1987 5: 973-977.
6. Ezugwu E.O., Wang Z.M.: Titanium Alloys and Their Machinability - a review. *Journal of Materials Processing Technology*. 1997, 68: 262-274.
7. Fraser A.M.: Reconstructing Attractors From Scalar Time Series: A Comparision of SingularSystem and Redundancy Criteria. *Phisica D* 1989, 34(3):391-404.
8. Ginta T.L., Amin A.K.M.N., Radzi H.C.D.M., Lajis M.A.: Tool Life Prediction by Response Surface Methodology in End Milling Titanium Alloy Ti-6Al-4V Using Uncoated WC-Co Inserts. *European Journal of Scientific Research* 2009, 28(4):533-541.
9. Haron C.H.C., Ginting A., Arshad H.: Performance of alloyed uncoated and CVD-coated carbide tools in dry milling of titanium alloy Ti-6242S. *Journal of Materials Processing Technology* 2007, 185:77-82.
10. Haron C.H.C. , Jawaid A.: The effect of machining on surface integrity of titanium alloy Ti-6% Al-4% V. *Journal of Materials Processing Technology* 2005, 166:188-192.
11. Hegger R., Kantz H., Schreiber T.: Practical implementation of nonlinear time series methods: The TISEAN package. *Chaos* 1999, 9(2): 413-435.
12. Hoffmeister H-W., Wittmer R., Schnell C.: High Speed Cutting of Superalloys. *Journal of Machine Engineering* 2009, 9(1): 18-28.
13. Litak G, Kaminski T., Rusinek R., Czarnigowski J., Wendeker M.: Patterns in the combustion process in a spark ignition engine. *Chaos Solitons and Fractals* 2008, 35: 578–585.
14. Packard N.H. , Crutvhfield J.P., Farmer J.D., Shaw R.S.: Geometry from a Time Series. *Physical Review Letters* 1980, 45(9): 712-716.
15. Rusinek R., Szabelski K., Warmiński J.: Vibration analysis of two-dimensional model of metal turning process. W: Cartmell M.P. (ed.) *Modern Practice in Stress and Vibration Analysis*, vol. 440-441, Glasgow, 9.IX.2003-11.IX.2003. Trans Tech Publications, Zurich-Uetikon, 2003, 520-526.
16. Rusinek R., Szabelski K., Warmiński J.: Influence of the workpiece profile on the self-excited vibrations in a metal turning process. W: Radoms G., Neugebauer R., (ed.) *Nonlinear Dynamics of Production Systems*. Weinheim, Wiley-VCH, 2004, 153-167.
17. Takens F.: Detecting Strange Attractors in Turbulence. *Lecture Notes in Mathematics* 1981, 898: 366-381.
18. Tanabe I., Hoang T.B., Iyama T.: Development of Diamond Tool with Forced Cooling System for High Speed Cutting of Aeronautic and Astronautic Parts. *Journal of Machine Engineering* 2009, 9(1):58-65.

---

**Rafał RUSINEK PhD eng.**

Department of Applied Mechanics  
Lublin University of Technology  
Nadbystrzycka 36, 20-816 Lublin, Poland  
e-mail: r.rusinek@pollub.pl

---

## ZASTOSOWANIE METODY BROWNA DO PROGNOZOWANIA ZNISZCZENIA KOMPOZYTU WARSTWOWEGO

### APPLYING THE BROWN METHOD TO FORECAST THE FAILURE OF A LAMINATE COMPOSITE

Przeprowadzono badania wytrzymałościowe polegające na rozciąganiu ze stałą prędkością aż do momentu zniszczenia trzydziestu próbek kompozytu warstwowego wzmacnionego włóknem szklanym, formowanego metodą RTM. Dane empiryczne charakteryzowały się dużym rozrzutem, co wymagało wykonania analizy statystycznej. Dla uzyskanych danych zaproponowano metodę umożliwiającą wyznaczenie prognozy naprężzeń niszczących próbki. Prognoza powstaje w oparciu o analizę relacji empirycznej pomiędzy odkształceniem a naprężeniem w stanach poprzedzających zniszczenie próbki z zastosowaniem metody Browna.

**Słowa kluczowe:** kompozyt warstwowy, zniszczenie, modelowanie, metoda Browna.

A fiberglass-reinforced laminate composite material formed by resin transfer molding (RTM) was tested for tensile strength. Thirty samples were stretched with a constant velocity until they failed. As there was a large scatter of empirical data, a statistical analysis was performed. The data were used to forecast stresses that lead to the material failure. The forecast was based on the stress-strain relationship immediately before failure. The forecasting involved simple exponential smoothing using the Brown method.

**Keywords:** laminate composite, failure, modeling, the Brown method.

#### 1. Wprowadzenie

Kompozyty złożone z włókien wzmacniających i matrycy polimerowej wymagają coraz większej informacji o ich własnościach mechanicznych zaspokajających wymagania przemysłu w zakresie jakości i powtarzalności produkowanych wyrobów [8]. Mechanika kompozytów rozwijała się w stworzeniu teorii deformacji i zniszczenia na bazie strukturalnych rozważań [1]. Przy tworzeniu modeli obliczeniowych dążymy do związania charakterystyk komponentów kompozytu z wytrzymałością wyrobu.

Do opisania wpływu wszystkich dostępnych, fizycznych charakterystyk konieczne są związki pomiędzy właściwościami włókna kompozytu jednokierunkowego czy kompozytu warstwowego [10, 13-14].

W przypadku kompozytów polimerowych zniszczeniu ulegają komponenty kompozytowe poprzez pęknięcia w matrycy, delaminację, zniszczenie wzmacnienia, pojawienie się mikropęknięcia i jego rozwoju aż do zniszczenia [15, 19]. Potrzeba określenia trwałości statycznej, czy zmęczeniowej elementów konstrukcji z materiałów na osnowie polimerowej, wymusza na nas poszukiwanie innych niż opartych na czystym opisie fizycznym, sposobów oceny trwałości. Do nich zaliczyć można przede wszystkim te, które oparte są na mniej lub bardziej fizycznie uzasadnionych, fenomenologicznych hipotezach kumulacji uszkodzeń.

Poza hipotezami fenomenologicznymi spotkać także można hipotezy statystyczne oparte na związkach statystycznych pomiędzy wynikami badań uzyskanymi w warunkach stałych obciążeń, a wynikami dla obciążeń eksploatacyjnych czy im odpowiadających [5, 12].

Statystyczne teorie wytrzymałości rozwijały się w pracach Danielsa [9], Bolotina [3], Rozena [16], Tamuza, Teterca [11],

#### 1. Introduction

It is essential that the properties of laminate composites be thoroughly investigated because of the increasing requirements of industry for high quality and repeatable products [8]. The theory of deformation and failure developed according to the mechanics of composites involves meso- and nano-scale structure modeling [1]. Calculation models need to take into account the properties of composites, the adhesion phenomena and the fiber orientation. The literature on the subject [10, 13-14] describes numerous concepts of such models based on the relationships between the characteristics of the particular constituents and the overall strength. The failure taking place in polymer-based composites is a multi-stage phenomenon starting with matrix cracking followed by delamination and failure of reinforcement, then microcrack initiation and propagation, and finally overall failure [15, 19]. It is necessary that the durability of structural polymer-composite elements subjected to static or fatigue loads be determined using methods other than those based on purely physical description. The alternative methods are based on more or less physically justifiable phenomenological hypotheses of damage accumulation.

Apart from the phenomenological hypotheses, there exist statistical hypotheses based on the relationships between experimental results obtained under constant and variable load conditions, with the latter simulating real service conditions [5, 12].

The statistical theory of strength has been discussed, for instance, by Daniels [9], Bolotin [3], Rozen [16], Tamuz and Teterek [11] Kleinhof [7], and Tai [17]. These works deal with the strength of fibers in laminate composites established at different loads acting on the matrix and the interface. Adhesive strength was also considered. There was a considerable scatter

Kleinhoffa [7], Tai [17] i innych. Ogólnie mówiąc badano wytrzymałość włókna w kompozycie przy różnych dopuszcniach pracy matrycy i pograniczej warstwy miedzy komponentami kompozytu (wytrzymałość adhezyjna).

Niniejsza praca jest próbą przedstawienia wybranego fragmentu zachowania się komponentów kompozytu na osnowie polimerowej uwzględniając wpływ parametrów technologii na starzenie.

## 2. Metodyka i przebieg badań

Materiałem badanym jest kompozyt warstwowy wzmacniony włóknem szklanym wykonany metodą RTM (ang. Resin Transfer Moulding) w Centrum Kompozytów w firmie „BELLA”, którego parametry technologiczne ilustruje tabela 1 [1, 4].

Tab. 1. Parametry technologiczne formowanego techniką RTM kompozytu  
Tab. 1. Technological parameters of the composite produced with the RTM method.

Kompozyt Composite	Współczynnik wzmacnienia [%] (objętościowy) Strength coefficient, % (volumetric) Syncoglass 5375/k500/375	Zywica Resin	Utwardzacz Stiffener Peroxan M50L [ml]	Ciśnienie wtrysku Pressure [atm]	Czas utwardzania Additional hardening [min]	Czas odformowania Deforming time [min]
A	41,0	Polimal 109-32K	40	1,0	15	95

Z uzyskanej płyty laminatu (z żywicy Polimal 109-32K i wzmacnienia w postaci maty szklanej Syncoglass 5375/k500/375) o grubość ok. 1,8÷2,0 mm wycięto próbki według normy PN – EN 10002 – 1 +AC1, 1997, które poddano statycznej próbie rozciągania.

Statyczna próba rozciągania została przeprowadzona na maszynie wytrzymałościowej INSTRON 4502 w Laboratorium Wytrzymałości Materiałów – Centrum Laserowych Technologii Metalu Politechniki Świętokrzyskiej.

Technologia wykonania polegała na ułożeniu dwóch warstw maty szklanej pomiędzy górną i dolną częścią formy, a następnie po szczelnym zamknięciu formy wtłoczono ciekłą mieszkę żywicy pod ciśnieniem ok. 100 kPa (1 atm), którą pozostawiono do utwardzenia.

Jednym z celów tworzenia kompozytów warstwowych jest hamowanie procesów powstawania i propagacji szczelin w materiale. Odporność kompozytu na pękanie jest tym większa im więcej warstw włókna szklanego zawiera kompozyt, którego mikrostrukturę ilustruje rysunek 1.

Kierunek ułożenia włókien szklanych jest typu 2D. Udział włókien w przenoszeniu obciążzeń jest zależny od procentowej objętości włókien  $V_f$  w materiale, od stosunku modułów odkształcalności włókien i matrycy  $E_f/E_m$ , oraz od wytrzymałości adhezyjnej pomiędzy komponentami. Z badań własnych [6] wynika, że wytrzymałość kompozytu zależy także od niedotrzymania parametrów technologicznych i tzw. efektów krawędziowych.

Przyjmuje się, że w statycznej próbie rozciągania kompozytu warstwowego zachodzi trzy etapowy proces zniszczenia. W pierwszym etapie zniszczeniu ulega matryca, w której można zaobserwować liczne mikropęknięcia w całej objętości materiału (rys. 2).

of results; the calculation data did not coincide with the results of the laboratory tests. It is vital that the new models take account of the forecast theory from the point of view of mathematical statistics.

## 2. Material

The material under analysis was a fiberglass-reinforced laminate composite produced by resin transfer molding (RTM) at the BELLA Composite Centre with the following composition [1, 4]:

From the produced laminate plate (with Polimal 109-32K epoxy and reinforced with the glass mat Syncoglass 5375/k500/375) of height ca. 1,8÷2,0 mm samples were cut according to PN-EN 10002-1+AC1, which underwent static tensile strength tests.

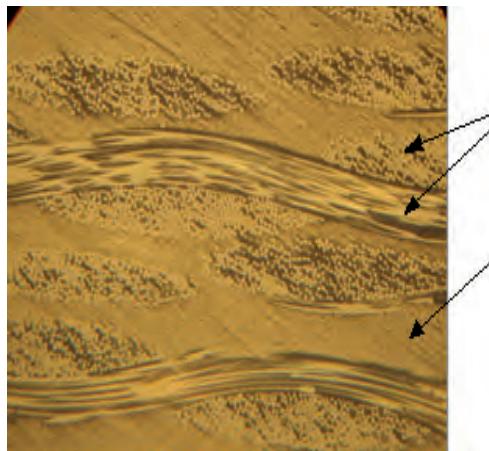
Static tensile strength tests underwent on the strength machinery INSTRON 4502 in the laboratory of Material Strength the Centre for Laser Technologies of Metals a unit of the Kielce University of Technology.

The composite was produced by placing two layers of glass mat in a mold, one on the upper part and the other on the bottom. After the mold was closed, a vacuum was created by allowing the air to escape. A liquid resin mixture was injected into the mold at a pressure of approximately 100 kPa (1 atm) and left to harden.

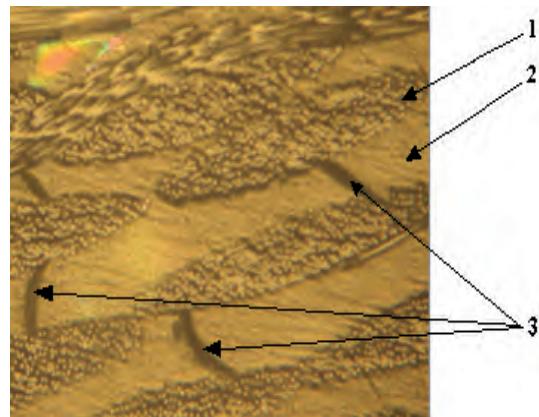
A major advantage of laminate composites is that the processes of crack formation and propagation can be prevented. The fracture toughness of this composite can be improved by increasing the number of fiberglass plies. The composite microstructure is presented in fig. 1.

A two-dimensional orientation of the fiber axes was used. The load that the fibers can transfer is dependent on the fiber volume fraction  $V_f$ , the fiber-to-matrix ratio  $E_f/E_m$ , and the adhesive strength between the components. The experiment results presented in [6] show that the composite failure is due to non-optimal technological parameters and the so-called edge effects.

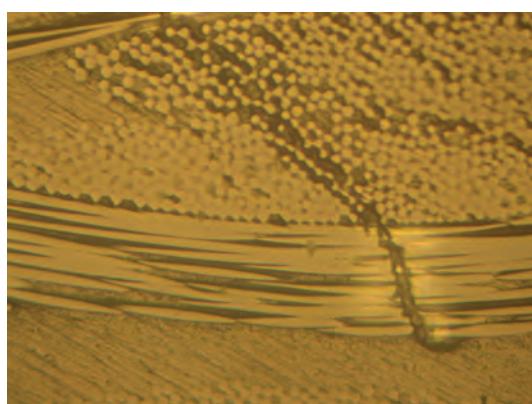
It is assumed that there are three modes of static tensile failure of the laminate composite material. First, the matrix failure is observed. There are numerous microcracks in the whole volume of the sample (fig. 2).



Rys. 1. Struktura kompozytu warstwowego: 1 – włókna, 2 – osnowa  
Fig. 1. Structure of the laminate composite: 1 – fibers, 2 – matrix



Rys. 2. Struktura z mikropęknięciami w osnowie kompozytu: 1 – włókna, 2 – osnowa, 3 – mikropęknięcie  
Fig. 2. Structure with microcracks in the composite matrix: 1 – fibers, 2 – matrix, 3 – microcracks



Rys. 3. Mikrostruktura z lokalnym zniszczeniem matrycy i włókna szklanego  
Fig. 3. Microstructure with local failures of the matrix and the fibers.

Wykruszenie matrycy powoduje przeniesienie naprężeń na włókna. Zrywanie kolejnych włókien kompozytu tworzy drugi etap zniszczenia. Na rysunku 3 ukazano lokalne zniszczenie osnowy i włókna. Powstanie szczeliny we włóknie może wywołać przegrupowanie stycznych naprężeń w otoczeniu włókna. Dalszy wzrost naprężeń uruchamia lawinowe pękanie kompozytu.

Trzeci etap zniszczenia tworzą zjawiska wywołane dalszym narastającym odkształcением próbki. Rozpoczyna się proces oddzielenia włókien od osnowy i ich wyciąganie. Zjawiska te są opisywane w teorii wytrzymałości adhezyjnej [6].

Z badań [7, 8] wynika, że zniszczenie kompozytu może przebiegać zarówno w trzy etapowym procesie lub z pominięciem etapu drugiego. Taka interpretacja zjawisk wskazuje, że dla tego materiału nie zachodzi czyste ściśnianie, zaś właściwości wytrzymałościowe kompozytu w dużej mierze zależą od wartości i rozkładu sił adhezji między komponentami kompozytu oraz od wytrzymałości zastosowanej żywicy. Przebieg zjawiska dekohezji - jako jednej z przyczyn zniszczenia kompozytu - zależy także od sposobu obciążania próbki.

The cracking causes stress transfer from the matrix to the fibers. Then, gradual rupture of fibers takes place (mode two). Figure 3 shows local failure of the matrix and the fibers. Fiber cracking may lead to changes in the tangential stresses. An increase in the stresses results in avalanche-like failure processes. In the third mode of failure, more deformations are observed. The process of the fiber-matrix separation is followed by the fiber elongation. The phenomena are described in the theory of adhesive strength [6].

It has been found that the failure [7, 8] of a composite material may also occur in two stages, instead of three, with the second stage missing. This interpretation shows that no pure shear occurs, and that the composite properties depend on the distribution of adhesive forces in the components as well as the resin strength. The decohesion process, which is one of the causes of the composite failure, is governed by the sample loading.

### 3. Przebieg badań i wyniki

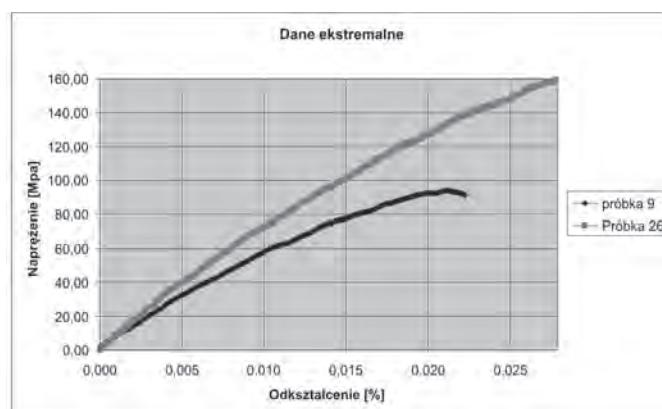
Z otrzymanego kompozytu w postaci płyty o grubości 0,003 m wycięto 30 próbek do statycznej próby rozciągania według normy PN – EN 10002 – 1 +AC1, 1997. Badania wytrzymałościowe przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej Serii IX firmy „INSTRON 8501” w Centrum Laserowych Technologii Metalu Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach. Próby rozciągania próbek przeprowadzano aż do momentu zniszczenia ze stałą prędkością wynoszącą 0,18 m/h (3 mm/min). Określono empiryczną zależność naprężeń rozciągających  $\sigma$  [MPa] od względnych odkształceń liniowych  $\varepsilon$  [%] dla każdej próbki. Na rysunku 4 przedstawiono wykres badanej zależności dla dwóch próbek o ekstremalnych wartościach naprężeń niszczących:

$$\begin{aligned}\sigma_{max} &= 94,5 \text{ MPa dla } \varepsilon_{max} = 0,0214\%, \\ \sigma_{max} &= 159,5 \text{ MPa dla } \varepsilon_{max} = 0,0278\%.\end{aligned}$$

### 3. Experiment and results

Thirty samples were cut from a composite plate with a thickness of 0.003 m to study the material tensile strength according to the PN-EN 10002-1+AC1: 1997 standard. The tensile properties of the laminate composite material were tested at the Centre for Laser Metal Technologies of the Kielce University of Technology using an INSTRON 8501 materials testing machine equipped with Seria IX software. The testing was performed at a constant velocity of 0.18 m/h (3 mm/min). The empirical relationship was determined between the tensile stress  $\sigma$  [MPa] and the relative linear strain  $\varepsilon$  [%] for each sample. Figure 4 shows the stress-strain curve for two samples with extreme breaking stresses:

$$\begin{aligned}\sigma_{max} &= 94,5 \text{ MPa dla } \varepsilon_{max} = 0,0214\%, \\ \sigma_{max} &= 159,5 \text{ MPa dla } \varepsilon_{max} = 0,0278\%.\end{aligned}$$



Rys. 4. Dane empiryczne statycznej próby rozciągania kompozytu warstwowego dla próbek o ekstremalnych naprężeniach niszczących  
Fig. 4. Empirical data concerning the static tensile strength of the laminate composite samples with extreme tensile stresses

Wartości naprężeń i odkształceń niszczących dla pozostałych dwudziestu ośmiu próbek zawierają się w przedziałach wyznaczonych przez dane dla próbek prezentowanych na rysunku 4. Rozstęp wartości odkształceń maksymalnych dla tych próbek wynosi 0,0064 %, zaś przyrost względny liczony jako stosunek rozstępu do wartości minimalnej wynosi 0,299 [-]. Dla naprężeń ekstremalnych rozstęp i przyrost względny dla tych samych próbek wynoszą odpowiednio: 65 MPa i 0,688 [-]. Wyniki badań pozostałych dwudziestu ośmiu próbek charakteryzowały się dość dużym rozrzutem, co wymagało wykonania analizy statystycznej otrzymanych wyników.

Stosując statystykę opisową [2] wyróżniono następujące dane o naprężeniach niszczących, które dzielą zbiór w szeregu uporządkowanym rosnącym na cztery części:

- kwartyl dolny (25-ty percentile) wynosi 109,7 MPa,
- mediana (50-ty percentile) wynosi 114,1 MPa,
- kwartyl górny (75-ty percentile) wynosi 128,5 MPa.

Dla danych empirycznych odstęp międzykwartylowy wynosi 18,8 MPa, co oznacza, że jest to wartość rozstępu naprężeń niszczących dla 50% ilości próbek o wartościach naprężzeń skupionych wokół wartości medialnej.

Wyznaczono także następujące miary tendencji centralnej zbioru naprężeń niszczących:

- wartość modalna (dominanta) wynosi 113 [MPa],
- średnia w próbie wynosi 119,5 [MPa].

The values of breaking stresses and strains for the other twenty eight samples were determined on the basis of the data presented in fig. 4. The difference in maximum strains was 0.0064 %, while the relative growth rate calculated as the ratio of the difference and the minimum value was 0.299 [-]. In the case of extreme stresses, the range and the relative growth rate for the same samples were 65 MPa and 0.688, respectively [-]. Due to a large scatter of results, it was necessary to conduct a statistical analysis for the other twenty eight samples.

Using descriptive statistics [2], we distinguish the following data concerning breaking stresses, which divide the set in the series of ascending order into four parts:

- lower quartile (25-th percentile): 109.7 MPa,
- median (50-th percentile): 114.1 MPa,
- upper quartile (75-th percentile): 128.5 MPa.

For the empirical data, the interquartile range is 18.8 MPa, which means that it is the difference in breaking stresses for 50% of samples with stress values concentrated around the median.

The measures of the central tendency of the set of breaking stresses are:

- the modal value (a dominant): 113 [MPa],
- the sample mean: 119.5 [MPa].

J. W. Tukey [18] proponuje przeprowadzenie wstępnej analizy danych (ang. *exploratory data analysis*) z zastosowaniem metody stem-leaves („łodyga–liście”), którą przeprowadzono dla naprężeń i odkształceń niszczących (tab. 2). Metoda przypomina przedstawienie danych za pomocą histogramu, lecz posiada przewagę na uniknięciu utraty informacji, która w histogramie wynika z agregowania danych w podprzedziały. Metoda pozwala uzyskać wgląd do wszystkich danych oraz pozwala wstępnie oszacować rozkład.

W zestawieniu łodyga – liście, łodygą jest liczba, która powstała przez opuszczenie ostatniej cyfry – liścia. Liczba „łodyga” pisana jest z lewej strony pionowej kreski, zaś z prawej kolejne liczby „liście”. W tabeli 2 przedstawiono dwa zestawienia danych. W zestawieniu dla maksymalnych naprężeń użyto 30 wartości po zaokrągleniu ich do wartości całkowitych. W pierwszym wierszu jest zapisana wartość najmniejsza naprężenia niszczącego wynosząca 94 (przed zaokrągleniem 94,5), dla której „łodygą” jest liczba 9, a „liściem” 4. W drugim wierszu zapisano wartości sześciu kolejnych naprężeń. Dla przedstawienia odkształceń zaokrąglono je do czwartego miejsca po przecinku.

Tab. 2. Zestawienie łodyga – liście dla danych eksperymentalnych  
Tab. 2. Stemplot for the experimental data

Naprężenia niszczące Breaking stresses	Odkształcenia niszczące Breaking strains
9 4	0,021 0 1 4 4 9
10 2 6 6 7 8 9	0,022 4 6 7 9
11 0 2 3 3 3 3 4 4 4 7 9	0,023 4 4 4 4 6 6
12 0 1 2 7	0,024 0 1 1 9
13 2 3 5 8	0,025 3 6 9
14 5 9	0,026 3 4 5 8 9
15 9	0,027 4 8
	0,028 9

Z zestawienia danych eksperymentalnych w tabeli 2 wynika, że rozkład naprężeń niszczących jest nieznacznie prawoskóny (wartość średnia jest większa od mediany), spiczasty (lepkokurtyczny), ale zbliżony do normalnego, zaś rozkład odkształceń niszczących jest spłaszczony (platokurtyczny). Pełne zestawienie par danych naprężenie-odkształcenie niszczące przedstawiono na wykresie (rys. 5). Stosując metodę najmniejszych kwadratów wyprowadzono równanie linii regresji w postaci:

$$\hat{Y} = b_0 + b_1 X \quad (1)$$

gdzie:  $\hat{Y}$  – wielkość reprezentująca naprężenia niszczące  $\sigma$  w populacji, o wartościach obliczonych z równania regresji dla danych odkształceń  $X=\varepsilon [\%]$ ,  $b_0$ ,  $b_1$  – estymatory parametrów regresji o wartościach:  $b_0 = 9,89$  i  $b_1 = 4520,3$

W dalszej części przedstawiono model statystyczny, który ma umożliwić wykonanie oszacowań dla populacji danych eksperymentalnych dla próbek kompozytu warstwowego o tym samym składzie i wykonanych identyczną technologią RTM. W tym celu niezbędne jest wykonanie czterech następujących założeń:

- 1) błędy losowe w modelu mają rozkład normalny,
- 2) średnia błędów losowych równa jest 0,
- 3) wartości błędów losowych są wzajemnie niezależne (brak korelacji),
- 4) wariancja błędów losowych ma wartość stałą.

J. W. Tukey [18] proposes that the exploratory data analysis be conducted using stem-and-leaf plots. In our study, we analyze the breaking stresses and strains (table 2). The data are presented in a graphical format, similar to a histogram. In stem-and-leaf plots, the original data are retained, while in histograms, the data are aggregated into subintervals. Stemplots are useful for displaying the data and giving a quick overview of distribution.

In a stemplot, the stem is the number obtained by leaving the last digit – the leaf. The stems are listed to the left of the vertical line, while the leaves, i.e. the next digits, to the right. Table 2 shows two stem-and-leaf plots. The stemplot presenting the maximum stresses was constructed using 30 values rounded to integers. In the first row, we write the lowest value of the breaking stress, which is 94 (94.5 before rounding). The stem is number 9, and the leaf is number 4. In the second row, the next six values of the stresses are given. The values of the strains were rounded to four decimal places.

As can be seen from table 2, the distribution of breaking stresses is right-skewed (the average value is higher than the median), and has positive excess kurtosis (leptokurtic distri-

bution), which makes it similar to a normal distribution. The distribution of breaking strains, on the other hand, has negative excess kurtosis (platykurtic distribution). All the data pairs for the breaking stress-breaking strain relationship are displayed in fig. 5.

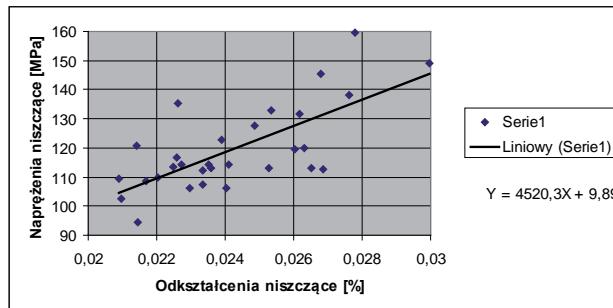
The method of least squares was applied to derive the equation of the regression line:

$$\hat{Y} = b_0 + b_1 X \quad (1)$$

where:  $\hat{Y}$  – quantity representing the breaking stresses  $\sigma$  in the population, with values calculated from the regression equation for known values of strains  $X=\varepsilon$ ,  $b_0$ ,  $b_1$  – estimators of the regression parameters:  $b_0 = 9,89$  and  $b_1 = 4520,3$ .

The regression equation was derived basing on the experimental data for laminate composite samples produced with the RTM method that had the same composition. A statistical model was then applied to make estimations for the population of the experimental data. The following four assumptions were made:

- 1) model random errors are normally distributed,
- 2) the mean of the random errors is equal to 0,
- 3) random errors are not correlated,
- 4) random error variance is constant.



Rys. 5. Dane empiryczne naprężzeń i odkształceń niszczących próbki kompozytu warstwowego  
Fig. 5. Empirical data of the breaking stresses and strains for a laminate composite sample

Pierwsze założenie umożliwia korzystanie z rozkładu  $t$  oraz  $F$ . Znajomość krytycznej wartości w rozkładzie  $t$  pozwala na wyznaczenie przedziałów ufności dla parametrów  $\beta_0$  i  $\beta_1$  równania regresji w populacji  $Y = \beta_0 + \beta_1 X$ . Wzory na  $(1-\alpha)100\%$  przedziału ufności mają postać:

$$\text{dla parametru } \beta_0 b_0 \pm t_{(\alpha/2, n-2)} s(b_0) \quad (2)$$

$$\text{dla parametru } \beta_1 b_1 \pm t_{(\alpha/2, n-2)} s(b_1) \quad (3)$$

gdzie:  $t_{(\alpha/2, n-2)}$  - krytyczna wartość w rozkładzie  $t$  dla zakładanego poziomu istotności  $\alpha$  i  $n$  licznej próby,  $s(b_0)$  – ocena standardowego błędu estymatora  $b_0$  wyznaczana według wzoru (4),  $s(b_1)$  – ocena standardowego błędu estymatora  $b_1$  wyznaczana według wzoru (6).

$$s(b_0) = (s(\sum X^2)^{1/2}) / (nSS_x)^{1/2} \quad (4)$$

gdzie:  $X$  – odkształcenia niszczące [%],  $n$  – liczność próby,  $SS_x$  – suma kwadratów odchyлеń zaobserwowanych  $X$  od wartości średniej,  $s$  – standardowy błąd szacunku wyznaczany według wzoru (5)

$$s = SSE / (n-2) \quad (5)$$

gdzie:  $SSE$  – suma kwadratów odchyłeń zaobserwowanych wartości naprężeń niszczących  $Y$  od ich wartości teoretycznych  $\hat{Y}$ , wyznaczonych za pomocą równania regresji,  $n$  – liczność próby.

Ocenę standardowego błędu estymatora  $b_1$  wyznaczono według poniższego wzoru:

$$s(b_1) = s / (SS_x)^{1/2} \quad (6)$$

gdzie:  $s$ ,  $SS_x$  – wielkości objaśnione powyżej.

Za pomocą przedstawionego powyżej modelu statystycznego utworzonego na podstawie powyższych założeń i wzorów (1, .., 6) obliczono 95 % przedział ufności dla parametrów regresji:

$$\beta_0 = [-32,6; 52,4], \beta_1 = [2776; 6264]$$

Powyższe dane interpretuje się następująco - można mieć 95 % pewność, że punkt przecięcia z osią rzędnych linii regresji dla populacji zawiera się w przedziale  $[-32,6; 52,4]$  i analogicznie, że współczynnik kierunkowy linii regresji dla populacji mieści się pomiędzy wartościami z przedziału  $[2776; 6264]$ . Na rysunku 6 przedstawiono linie regresji dla parametrów  $\beta_0$ ,  $\beta_1$  w populacji przy założeniu, że  $\beta_0 = b_0 = 9,89$ , zaś parametr  $\beta_1$  przyjmuje najmniejszą i największą wartość z wyznaczonego przedziału ufności. Do oceny jak silny jest związek liniowy pomiędzy odkształceniami a naprężeniami niszczącymi, świadczący równocześnie o dopasowaniu linii regresji do danych – używany jest współczynnik determinacji  $R^2$ .

From the first assumption it follows that we can use the distribution of  $t$  and  $F$ . Knowing the critical value in the distribution of  $t$ , we are able to determine the confidence intervals for parameters  $\beta_0$  and  $\beta_1$  of the regression equation in the population  $Y = \beta_0 + \beta_1 X$ . The formula for the  $(1-\alpha)100\%$  confidence intervals are:

$$\text{dla parametru } \beta_0 b_0 \pm t_{(\alpha/2, n-2)} s(b_0) \quad (2)$$

$$\text{dla parametru } \beta_1 b_1 \pm t_{(\alpha/2, n-2)} s(b_1) \quad (3)$$

where:  $t_{(\alpha/2, n-2)}$  – critical value in the distribution of  $t$  for the predetermined level of relevance  $\alpha$  and number of samples,  $n$ ,  $s(b_0)$  – standard error of the estimator  $b_0$  estimated using formula (4),  $s(b_1)$  – standard error of the estimator  $b_1$  estimated using formula (6).

$$s(b_0) = (s(\sum X^2)^{1/2}) / (nSS_x)^{1/2} \quad (4)$$

where:  $X$  – breaking strains,  $n$  – number of samples,  $SS_x$  – sum of squared deviations of the observed breaking strains  $X$  from the mean,  $s$  – standard error of estimation calculated using formula (5)

$$s = SSE / (n-2) \quad (5)$$

where:  $SSE$  – sum of squared deviations of the observed breaking stresses  $Y$  from their theoretical values  $\hat{Y}$ , calculated using the regression equation,  $n$  – number of samples.

The standard error of the estimator  $b_1$  was estimated using the following formula:

$$s(b_1) = s / (SS_x)^{1/2} \quad (6)$$

where:  $s$ ,  $SS_x$  – same as above.

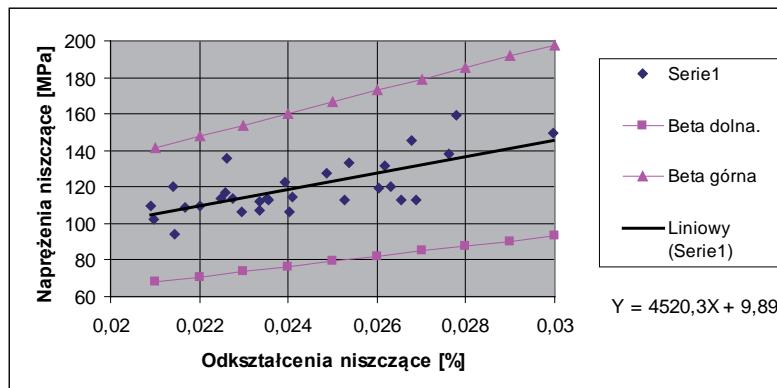
By applying the statistical model based on the above assumptions and formulae (1, .., 6), it was possible to calculate a 95 % confidence interval for the regression parameters:

$$\beta_0 = [-32,6; 52,4], \beta_1 = [2776; 6264]$$

The above data can be interpreted as follows: there is 95 % certainty that the point of intersection of the ordinate axis and the regression line for the population is in the interval  $[-32,6; 52,4]$ . By analogy, the direction coefficient of the regression line for the population is in the interval  $[2776; 6264]$ . Figure 6 presents the regression lines for parameters  $\beta_0$  and  $\beta_1$  in the population assuming that  $\beta_0 = b_0 = 9,89$ , while parameter  $\beta_1$  represents the lowest and highest value in the confidence interval. The coefficient of determination  $R^2$  was used to estimate how strong the linear relationship between breaking strains and stresses is.

Współczynnik ten dla prezentowanych danych wynosi  $R^2=0,5$ , co znaczy, że równanie regresji wyjaśnia około 50% zmienności naprężeń niszczących, zaś pozostałe stanowią tzw. nie wyjaśnione odchylenia wartości empirycznych od wartości teoretycznych wyznaczonych równaniem regresji. Ważnym zagadnieniem w analizie badań niszczących jest analiza danych poprzedzających moment zniszczenia. Dla zobrazowania zmienności naprężzeń zestawiono dane trzydziestu próbek dla wybranych czterech następujących odkształceń  $\varepsilon_{max} = \{0,005; 0,010; 0,015; 0,020\}$  [%] (tab. 3).

The stress-strain relationship showed that the regression lines were well fitted to the data. As the coefficient  $R^2$  was 0.5, the regression equation explained approximately 50 % of the variance of breaking stresses. The rest is the unexplained deviations of the empirical data from the theoretical data calculated by means of the regression equation. Analyzing breaking stresses in a material, we need to focus on the stresses occurring immediately before failure. To illustrate the variance of stresses, we used data for thirty samples. Four values of strain were selected:  $\varepsilon_{max} = \{0.005; 0.010; 0.015; 0.020\}$  [%] (table 3).



Rys. 6. Dane empiryczne naprężzeń i odkształceń niszczących próbki kompozytu warstwowego (oznaczone jako „Serie 1”) oraz trzy następujące linie regresji: dla parametru w populacji  $\beta_1 = 2776$  (oznaczone jako „Beta dolna”), dla parametru w próbie  $b_1 = 4520$  (oznaczone jako „Liniowy”), dla parametru w populacji  $\beta_1 = 6264$  (oznaczone jako „Beta góra”)

Fig. 6. Empirical data of the breaking stresses and strains for a laminate composite sample (defined as “empirical data”) and three regression lines: for the parameter in the population  $\beta_1 = 2776$  (defined as “lower beta”), for the parameter in the sample  $b_1 = 4520$ , for the parameter in the population  $\beta_1 = 6264$  (defined as “upper beta”)

Tab. 3. Naprężenia w próbie rozciągania trzydziestu próbek dla wybranych czterech  $\varepsilon$   
Tab. 3. Tensile stresses for thirty samples for four selected values of strain

$\varepsilon=0,005\%$	$\varepsilon=0,010\%$	$\varepsilon=0,015\%$	$\varepsilon=0,020\%$
30 5 8	56 7 8	76 9	92 5
31 1 2 3 4 6 9	57 1 4 5	77	...
32 0 3 3 4 7 7 8	58 4 6 6 8 9	78 9	96 1 8
33 1 2 6 8 8	59 1	79 0 2	97 7
34 1 5	60 3	80 4 9	98 0 4 4
35 5 5 5	61 0 2 9 9	81	99 9
36	62 2 3 7 9	82 2 6 8	...
37 0 4 6 8	63 5 6	83 3	102 5 8
38	64	84 0 5	103 0 8
39 2	65 7 7	85 1 7 9	104 1 9 9
	66 3	86 0 9	105 3
	67 6 6	87 8	106 9 107 1
	68	88	...
	69 8 8	89 3 3	110 2 4 9
	70	90 2 8	...
	71 6	91 2 5	113 7 8
		92	114 3
		93 88 8 9	115
		...	116 2 2
		96 9	117
		...	118 1
		99 7	...
		100	122 3
		101 2	...
			124 9
			...
			126 9

W analizie zastosowano opisaną wcześniej metodę „łodyga – liście”, gdzie część całkowita naprężenia jest przed kreską, zaś za kreską jest część ułamkowa po zaokrągleniu do pierwszego miejsca po przecinku.

Z zestawienia danych eksperymentalnych w tabeli 3 wynika, że w miarę wzrostu odkształceń następuje coraz większe spłaszczenie rozkładów naprężen (platykurtyczność), wskutek narastającej losowości kierunku i skupień lokalnych zniszczeń osnowy kompozytu.

Po analizie wykresów wszystkich próbek, postawiono hipotezę o możliwości prognozowania wartości naprężen niszczących na podstawie danych o naprężeniach uzyskanych z pomiarów dla odkształceń  $\varepsilon=0,010\%$ , które dalej nazywane są danymi wejściowymi dla modelu prognostycznego. Zaproponowano przekształcenie danych wejściowych za pomocą prognostycznej metody Browna.

#### 4. Proponowana metodyka

Metoda prognostyczny Browna [2] oparty jest na metodzie prostego wygładzenia wykładniczego. Istota metody polega na wyznaczaniu wartości prognozowanej tylko dla okresu lub momentu czasu  $t+1$ , tylko o jeden okres do przodu. Metoda została wybrana spośród wielu metod prognostycznych w dziedzinach zarządzania i ekonomii z uwagi na zalecenia stosowania jej w szeregach nie posiadających wyraźnego trendu i wahania sezonowych. Model Browna pozwala na wygładzenie szeregu w sposób, że rośnie wpływ ostatnich wartości szeregu na prognozę, w porównaniu do wartości przeszłych. Prognoza oparta jest na obliczeniach średniej ważonej dla aktualnej i poprzednich danych, tak aby wagę zmniejszały się geometrycznie w marę cofania się na osi czasu, co zapisać można w następującej postaci:

$$\check{Z}_{t+1} = wZ_t + w(1-w)Z_{t-1} + w(1-w)^2Z_{t-2} + \dots + w(1-w)^nZ_{t-n} \quad (7)$$

gdzie:  $\check{Z}_{t+1}$  – prognoza dla chwili czasu  $t+1$ ,  $w$  – waga,  $Z_t, Z_{t-1}, Z_{t-2}$  – dane wartości szeregu dla chwil czasu:  $t, t-1, t-2$ .

Dla ułatwienia wykonania obliczeń model wygładzenia wykładniczego zapisuje się w postaci następujących równań rekurencyjnych:

$$\begin{aligned} \check{Z}_2 &= wZ_1 + (1-w)\check{Z}_1 \\ \check{Z}_3 &= wZ_2 + (1-w)\check{Z}_2 \\ \check{Z}_4 &= wZ_3 + (1-w)\check{Z}_3 \\ \dots & \\ \check{Z}_n &= wZ_{n-1} + (1-w)\check{Z}_{n-1} \end{aligned} \quad (8)$$

W proponowanej metodyce zastosowano wygładzenie wykładnicze naprężeń dla odkształceń w zakresie  $\varepsilon=0 \div 0,01\%$ , dla których przypisano wartości czasu. Wartość wagi  $w=0,7$  wyznaczono eksperymentalnie. Na rysunku 7 przedstawiono efekt wygładzenia dla wybranej próbki, gdzie dla krzywej wygładzenia wyznaczono równanie trendu  $y_B=4754,5x$  z założeniem, że linia trendu przecina oś rzędnych w punkcie 0.

Powyższy schemat obliczeń został zastosowany dla wszystkich trzydziestu próbek. Uzyskane równania linii trendu dla każdej próbki wykorzystano do wyznaczenia prognozowanych w ten sposób teoretycznych wartości naprężzeń odpowiadających zakładanemu odkształceniu  $\varepsilon=0,02\%$ . Wartość ta została wybrana bowiem jest najmniejszą wartością odkształcenia nisz-

The analysis was performed using the stemplot method. Below the line, we listed the integral part of stress, and above, the fractional part rounded to one decimal place. From the data presented in table 3 it follows that an increase in the strain rate causes that the stress distributions have negative excess kurtosis (platykurtic distribution) due to an increasing randomness of fiber orientation and local failure of the matrix.

After analyzing the stress-strain curves for all the samples, we proposed a hypothesis that the breaking stresses could be forecast basing on the data of stresses obtained from measurements of strains,  $\varepsilon=0.010\%$ , which will be hereafter referred to as the input data for the prediction model. It was proposed that the input data should be transformed using the Brown method.

#### 4. Methodology

The Brown model [2] is based on the method of simple exponential smoothing. The forecast value is determined only for a period or moment of time  $t+1$ , only one period ahead. The Brown method is one of the methods used for forecasting in management and economics. It is suitable for series with no clear tendency and seasonal fluctuations. By smoothing a series, it is possible to increase the effect of the last values of the series on the forecast, compared to the previous values. The forecast requires calculating the weighed average for the actual and previous data, i.e. decreasing weights geometrically and moving backwards along the time axis, which can be written as:

$$\check{Z}_{t+1} = wZ_t + w(1-w)Z_{t-1} + w(1-w)^2Z_{t-2} + \dots + w(1-w)^nZ_{t-n} \quad (7)$$

where:  $\check{Z}_{t+1}$  – forecast for a moment of time  $t+1$ ,  $w$  – weight,  $Z_t, Z_{t-1}, Z_{t-2}$  – known values of the series for the moments of time:  $t, t-1, t-2$ .

The calculations were simplified by writing the model of exponential smoothing in the form of recurrent equations:

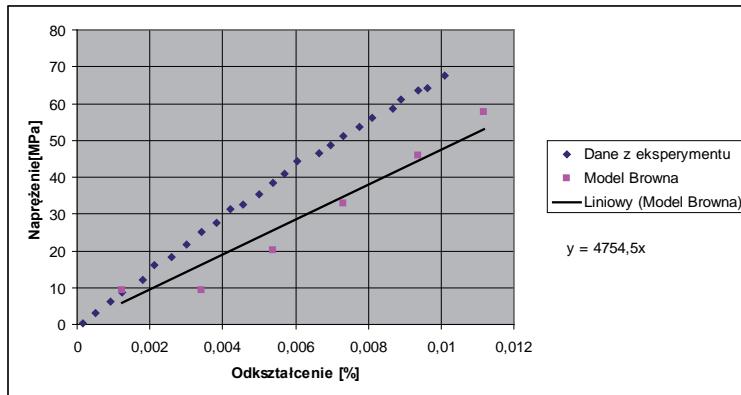
$$\begin{aligned} \check{Z}_2 &= wZ_1 + (1-w)\check{Z}_1 \\ \check{Z}_3 &= wZ_2 + (1-w)\check{Z}_2 \\ \check{Z}_4 &= wZ_3 + (1-w)\check{Z}_3 \\ \dots & \\ \check{Z}_n &= wZ_{n-1} + (1-w)\check{Z}_{n-1} \end{aligned} \quad (8)$$

The Brown model was employed to smooth the empirical data of tensile stresses for strains in the range  $\varepsilon=0 \div 0,01\%$ . The weight was determined experimentally:  $w=0,7$ . Figure 7 shows the effect of data smoothing for a selected sample, where the tendency equation,  $y_B=4754,5x$  for the smoothing curve was determined assuming that the tendency line crosses the ordinate axis at point 0.

The above calculation procedure was used for all the thirty samples. The equations of the tendency line were used for each sample to determine the forecast theoretical values of stresses corresponding to the assumed strain  $\varepsilon=0,02\%$ . This value was the lowest value of breaking strain in the set of experimental

czącego w zbiorze danych eksperymentalnych. Wyznaczone naprężenia nazwano *prognozą wstępna naprężen niszczących*.

Wartości prognoz wstępnych połączono w pary z danymi z eksperymentu dla wylosowanych 18 prób. Dla każdej próbki uzyskano inny błąd prognozy, co przedstawiono na wykresie poniżej (rys. 8). W równaniu regresji  $y_p = 1,3465x_p - 43,701$  należy przyjąć, że  $y_p$  oznacza teoretyczne wartości naprężen zaś  $x_p$  przyjmuje wartości prognoz wstępnych. Do oceny jak silny jest związek liniowy regresji pomiędzy prognozowanymi wstępnie naprężeniami niszczącymi a danymi empirycznymi wyznaczono *współczynnik determinacji R<sup>2</sup>*.



Rys. 7. Przykład danych empirycznych z próby rozciągania oraz danych prognozowanych metodą Browna z prostoliniowym trendem

Fig. 7. Example of the empirical data from the tensile strength test and the data forecast with the Brown method with a rectilinear tendency

Współczynnik ten dla prezentowanych danych wynosi  $R^2=0,6$ . Można przyjąć interpretację, że uzyskane równanie regresji wyjaśnia około 60 % zmienności empirycznych naprężen niszczących, zaś pozostałe ok. 40 % stanowią tzw. nie wyjaśnione odchylenia wartości empirycznych od wartości teoretycznych wyznaczonych równaniem regresji.

W przypadku użycia równania regresji do prognozowania naprężenia niszczącego, według Aczel-a [2] należy liczyć się z możliwością popełnienia dużych błędów. Przyjmuje się, że wartość  $R^2>0,8$  pozwala uzyskać prognozy dobre, zaś  $R^2>0,6$  prognozy, które mogą być zadawalające w niektórych zastosowaniach.

Dlatego w analizowanym przypadku wydaje się stosowne zastosowanie prognozy przedziałowej. W tym celu należy wyznaczyć przedział predykcji dla teoretycznych wartości  $y$  wyznaczonych równaniem regresji, który określony jest następującym wzorem:

$$Y_p \pm t_{\alpha/2} s \{1 + (1/n) + (x_p - \bar{s})^2 / (SS_x)\}^{1/2} \quad (9)$$

gdzie:  $x$  – wartości prognoz wstępnych naprężen niszczących,  $\bar{s}$  – średnia dla wartości  $x_p$ , pozostałe oznaczenia jak we wzorach (3, 4, 5).

Dla wyznaczenia 95 % przedziału predykcji użyto następujących wartości:

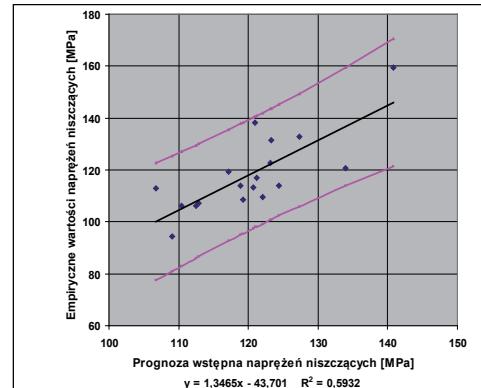
- krytyczna wartość w rozkładzie t przy 16 stopniach swobody wynosi  $t_{0,025}=2,12$ ;
- standardowy błąd szacunku wynosi  $s=9,78$ ;
- liczność próby wynosi  $n=18$ ;

data. The obtained stresses were called the preliminary forecast of *breaking stresses*.

The values of the preliminary forecasts were combined in pairs with the experimental data for the randomly selected samples. Different forecast errors were obtained for each sample, which is illustrated in fig. 8.

In the regression equation  $y_p = 1,3465x_p - 43,701$  it should be assumed that  $y_p$  represents the theoretical values, while  $x_p$  represents the values of the preliminary forecasts.

The coefficient of determination  $R^2$  was calculated to assess the linear relationship of regression between the preliminarily



Rys. 8. Zestawienie wstępnych prognoz z empirycznymi danymi o naprężeniach niszczących oraz prognoza przedziałowa

Fig. 8. Comparing the preliminary forecasts with the empirical data of breaking stresses and the interval forecast

forecast of breaking stresses and the empirical data. The coefficient was  $R^2=0,6$ . It can be assumed that the derived regression equation explains about 60 % of variance of the empirical breaking stresses, while the other 40 % is the so-called unexplained deviations of the empirical data from the theoretical values determined by means of the regression equation. Aczel suggests [2] that if the regression equation is used to forecast breaking stresses, the errors may be large. It is assumed that if  $R^2>0,8$ , the forecasts are good, while if  $R^2>0,6$  the forecasts can be satisfactory in certain applications.

It seemed advisable to apply an interval forecast. The forecast interval for the theoretical values of  $y$  calculated by means of the regression equation was determined by the following formula:

$$Y_p \pm t_{\alpha/2} s \{1 + (1/n) + (x_p - \bar{s})^2 / (SS_x)\}^{1/2} \quad (9)$$

where:  $x$  – values of preliminary forecasts of breaking stresses,  $\bar{s}$  – the mean of  $x_p$ , the other designations like in formulae (3, 4, 5).

The following values were used to calculate a 95 % prediction interval:

- the critical value in the distribution of t at 16 degrees of freedom:  $t_{0,025}=2,12$ ;
- the standard error of the estimate:  $s=9,78$ ;
- the number of samples:  $n=18$ ;

- średnia dla wartości prognoz wstępnych  $x$  wynosi  $\bar{x}=120,27$  [MPa];
- suma kwadratów odchyлеń prognoz wstępnych  $x$  od średniej  $\bar{x}$  wynosi  $SS_x=1230,2$ .

Przyjęcie liczności próby  $n=18$  o wartościach wylosowanych pozwala na sprawdzenie dokładności prognozy przedziałowej po wykorzystaniu pozostałych 12 danych o wartościach wcześniej tzw „zakrytych”, które tworzą podzbiór kontrolny. Po uwzględnieniu danych z podzbioru kontrolnego stwierdzono zgodność prognozy przedziałowej.

## 5. Wnioski końcowe

Na podstawie badań wytrzymałościowych rozciągania ze stałą prędkością aż do momentu zniszczenia trzydziestu próbek kompozytu warstwowego wzmacnionego włóknem szklanym, zaproponowano metodę prognozowania naprężeń niszczących. Metoda wymaga posiadania danych eksperymentalnych naprężeń w funkcji odkształceń dla zakresu odkształceń  $\epsilon=0\div0,01\%$ . W metodzie można wyróżnić następujące etapy:

- 1) korzystając z metody Browna dokonać wygładzenia wykładowego danych empirycznych o wartościach naprężeń dla zakresu odkształceń od 0 do 40 % odkształcenia niszczącego;
- 2) dla wygładzonej funkcji empirycznej wyznaczyć metodą najmniejszych kwadratów estymatory parametrów regresji tak zmodyfikowaną, aby prosta przecinała oś rzędnych w punkcie 0;
- 3) wstępna prognozę naprężeń niszczących uzyskuje się po podstawieniu w równaniu regresji wartości odkształcenia równej minimalnemu odkształceniu niszczącemu w próbie;
- 4) prognozę końcową uzyskuje się z prognozy przedziałowej po wyznaczeniu przedziału predykcji, w zestawieniu wstępnych prognoz z danymi empirycznymi.

Powyżej prezentowana metoda wymaga dalszych prac weryfikacyjnych.

## 6. Preferences

1. Aboudi J. Micromechanical characterization of the non-linear viscoelastic behavior of resin matrix composites. Composites Science & Technology 1990; 38: 371-386.
2. Amir D. Aczel. Complete Business Statistics. Second Edition: Irwin, Burr Ridge Illinois, Boston, Sydney: Australia, © Richard D. Irwin, Inc, 1989 and 1993.
3. Болотин В.В. Объединенная модель разрушения композитных материалов при длительно действующих нагрузках. Механика композитных материалов 1981; 3: 405-420.
4. Chatys R. Modeling the Effect of the Mechanical and Laser Processing on Strength and the Quality of Composite Materials. Interanational Conference 13-17.02.2006; Moscow. Russia: 45-46.
5. Chatys R., Chatys I., Kleinhofs M. Modelling the Effect of the Service Conditions on the Strength of Fiber Glass-Reinforced Polymer-Matrix Composite Materials. XI Seminar „Plastics in machine design” 2006; Cracow. Poland: 123-126.
6. Chatys R., Darska J., Opala M. The Effect of the Technological Parameters on the Quality of Composite Materials Produced with the RTM Method. Mechanics 2005; 83: 22-28.
7. Chatys R., Kleinhofs M. Statystyczne aspekty przy określaniu własności mechanicznych kompozytu polimerowego. X Seminarium „Plastics in Machine Design” 2003; Cracow. Poland: 83-88.
8. Chatys R. Modeling of Mechanical Properties with the Increasing Demands in the Range of Qualities and Repeatability of Polymers Composites Elements. Monograph „Polymers and Constructional Composites” 2008; 36-47. (ISSN 978-83-7335-541-5).
9. Daniel I.M., Ishai O. Engineering mechanics of composite materials. New York, Oxford: Oxford Univ. Press, 1994.
10. Kamiński M. Homogenized properties of n-component composite materials. J. Engng Sci. 2000; 38 (4): 405-427.
11. Маймейстер А.К., Тамуж В.П., Тетерс Г.А. „Сопротивление полимерных и композитных материалов”. Рига: Зинатне, 1980.

- the mean for the preliminary forecasts  $x$ :  $\bar{x}=120.27$  [MPa];
- the sum of squared deviations of the preliminary forecasts  $x$  from the mean  $\bar{x}$ :  $SS_x=1230.2$ .

The accuracy of the interval forecast was checked assuming that the number of samples,  $n$  was 18, and the samples had randomly selected values. The other twelve samples with previously covered values constitute a control subset. The data from the control subset demonstrate the consistency of the interval forecast.

## 5. Conclusions

The results of the static tensile strength tests conducted for thirty samples made of a fiberglass-reinforced laminate composite were used as the experimental data to forecast breaking stresses. The forecasting method was based on the relationship between breaking stresses and breaking strains in a given range of strains,  $\epsilon=0\div0.01\%$ . The process of forecasting the breaking stresses for the material under analysis involved:

- 1) exponential smoothing of the empirical data using the Brown method; the analysis of breaking stresses was limited to the range of 0-40% of breaking strains;
- 2) determining the estimates of the regression parameters for the smoothed empirical function by means of the method of least squares; the function was modified so that the straight line crossed the ordinate axis at point 0;
- 3) preparing a preliminary forecast of breaking stresses by using the minimum value of breaking strain in the regression equation to represent the strain in a sample.
- 4) preparing the final forecast from the interval forecast after calculating the forecast interval.

The method described above requires further verification.

12. Парамонов Ю.М. Методы математической статистики в задачах связанных с оценкой и обеспечением усталостной долговечности авиационных конструкции. Рига: РКИИГА, 1992.
13. Pipes R.B., Dally J.W. On the birefringent-coating method of stress analysis for fibre – reinforced laminated composites. *Experimental Mechanics*. 1972; 28: 272-277.
14. Rabotnov J.N. Elements of viscoelastic mechanics of solids. Moscow: Nauka Press, 1977.
15. Роботнов Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела. Moscow: Наука, 1988.
16. Розен Б. Механика упрочнения композиций. В кн. Волокнистые композиционные материалы. Moscow: Мир, 1967.
17. Tsai S.W. and Hahn H.T. *Introduction to Composite Materials*. Lancaster: Technomic Publ. Co., Inc, 1980.
18. Tukey J.W. *Exploratory Data Analysis*. Addison-Wesley, Reading, Mass. 1977.
19. Wilczyński A., Lewiński J. Predicting the properties of unidirectional fibrous composite with monotropic reinforcement. *Composite Science and Technology* 1995; 55: 139-143.

---

**Dr inż. Rafał CHATYS**

Katedra Metaloznawstwa i Technologii Materiałów  
Politechnika Świętokrzyska w Kielcach  
Al. 1000-lecia P.P.7, 25-314 KIELCE  
e-mail: chatys@tu.kielce.pl

**Dr inż. Zbigniew SKROBACKI**

Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn  
Politechnika Świętokrzyska w Kielcach  
Al. 1000-lecia P.P.7, 25-314 KIELCE  
e-mail: zbiggs@tu.kielce.pl

---

## LABORATORYJNA METODA OCENY WPŁYWU WYSOKICH TEMPERATUR NA PARAMETRY EKSPLOATACYJNE SYSTEMÓW POŁĄCZEŃ ŻELBETOWYCH

## LABORATORY METHOD OF EVALUATION OF INFLUENCE HIGH TEMPERATURES ON MAINTENANCE PARAMETERS OF THE REINFORCED CONCRETE SYSTEMS COMPOUNDS

Artykuł prezentuje wyniki badań wpływu temperatur występujących podczas pożaru na przyczepność stali do betonu oraz oszacowanie tego wpływu na spadek przyczepności pomiędzy stalą zbrojeniową i betonem, w warunkach pożaru oraz po przebytym pożarze. W pracy przedstawiono wyniki badań przyczepności stali gładkiej St3S oraz żebrowanej 18G2 do betonu C16/20 i C40/50 w warunkach popożarowych oraz w trakcie trwania pożaru. We wszystkich przebadanych przypadkach stwierdzono znaczący spadek przyczepności betonu do stali zbrojeniowej na skutek oddziaływanego temperatur pożarowych. Przebadano również wpływ wytrzymałości betonu oraz gatunku stali (gładka, żebrowana) na spadek przyczepności w temperaturach pożarowych. Udowodniono, że występują istotne różnice przy badaniu przyczepności po pożarze oraz podczas trwania pożaru, które świadczą o częściowym nawrocie przyczepności. Przedmiot badań jest ściśle związany z bezpieczeństwem konstrukcji budowlanych w czasie trwania pożaru, jak i z oceną ich dalszego użytkowania po przebytym pożarze.

**Slowa kluczowe:** badanie przyczepności, beton zbrojony, spadek przyczepności w warunkach temperatur pożarowych.

The paper presents results from the research on fire temperature influence on steel-concrete bond and on the bond reduction for both in-fire status and after-fire status. In the paper has been described bond test and results for materials St3S (smooth), 18G2 (ribbed) reinforcement steel and C16/20, C40/50 concrete, both for in the fire and after-fire conditions. A significant reduction of steel-concrete bond was found as the result of fire temperature. Influence of concrete strength and of rebar type (smooth, ribbed) on the bond reduction in fire temperatures was tested. It was proven that significant bond property differences exist between in-fire tests and after-fire tests, which evidence that the bond is regained partially after the fire exposure. The research subject is closely related to the in-fire construction structures safety as well as with the after-fire construction structures usability evalution.

**Keywords:** bond test, reinforced concrete, bond reduction in fire temperature.

### 1. Wstęp

Celem pracy badawczej, której wyniki przedstawiamy w artykule, było określenie charakteru i wielkości spadku przyczepności stali zbrojeniowej do betonu w warunkach termicznych występujących w czasie pożarów normowych opisanych krzywą „temperatura-czas”,

$$T = 20 + 345 \cdot \log(8 \cdot t + 1) \quad (1)$$

gdzie:  $T$  - temperatura [ $^{\circ}\text{C}$ ],  $t$  - czas [min].

oraz krzywą zbliżoną do rozkładu temperatur na powierzchni płyt żelbetowych. Badania przeprowadzono na dwóch grupach próbek w celu porównania otrzymanych wyników.

Badania wykonane w trakcie grzania próbek odpowiadają warunkom występującym w czasie pożaru. W dalszej części artykułu będziemy określić ten rodzaj badań jako badania „na gorąco”. Badania po wstępnej obróbce termicznej w podobnych jak w badaniach „na gorąco” warunkach termicznych przeprowadzono po ostygnięciu próbek w temperaturach pokojowych

### 1. Introduction

The objective of the research work, the results of which are presented in the article, was to determine the character and size of the bond reduction of reinforced steel – concrete in the thermal conditions occurring during norm fires described by “temperature – time” curve,

$$T = 20 + 345 \cdot \log(8 \cdot t + 1) \quad (1)$$

where:  $T$  - temperature [ $^{\circ}\text{C}$ ],  $t$  - time [mins].

and the curve close to the distribution of temperatures on the surface of reinforced concrete plates. The tests were carried out in the two groups of samples in order to compare the obtained results.

The tests carried out during heating of the samples correspond with the conditions present during the fire. In the foregoing part of the article we will refer to this type of tests as “hot tests”. The tests after introductory thermal treatment in the thermal conditions similar to those of in “hot tests” were performed after cooling down of the samples in ambient temperatures of about  $20^{\circ}\text{C}$ . These tests are further referred to as “cold tests”.

około 20°C. Badania te w dalszej części pracy będą określane jako badania "na zimno".

Celem porównania wyników badań tych dwóch grup próbek było wyjaśnienie, czy wyniki badań spadku przyczepności na skutek oddziaływanego wysokich temperatur wykonane w temperaturach pokojowych są miarodajne dla oceny zachowania się konstrukcji żelbetowych w czasie pożaru. Jest to dość ważny czynnik związany z wytrzymałością konstrukcji żelbetowych w czasie pożaru oraz z bezpieczeństwem ratowników. Zauważono, bowiem w czasie akcji ratowniczo-gaśniczych odpadanie otuliny stropów żelbetowych w czasie krótszym niż wskazywałaby na to ich odporność ogniska.

Należy odnotować interesujące wyniki uzyskane przez badaczy zajmujących się zagadnieniem przyczepności. W badaniach przeprowadzonych przez [5] zastosowano próbki z betonu C50/60. W każdej próbce zatopiono dwa pręty zbrojeniowe ø 3mm, przy czym długość osadzenia wynosiła odpowiednio 6 i 8 cm. Następnie został zaprogramowany trójfazowy proces ogrzewania w zakresie temperatur od 240 do 550°C. Autor badań stwierdza, że w miarę wzrostu temperatury ogrzewania próbki przyczepność stali do betonu maleje. Można to już zauważać dla temperatury 240°C. P. D. Morley, R. Royles [12, 13] wykazali, że dla prętów żebrowanych o średnicy ø 16 mm w badaniach popożarowych przyczepność po ogrzaniu próbek w temperaturze 100°C wynosi 80%, a przy temperaturze 200°C ponownie rośnie i wynosi 92% w odniesieniu do przyczepności w temperaturze normalnej (20°C). W badaniach wykonanych przez [8, 9] wykorzystano próbki o wymiarach 100x100x400 mm które zostały wykonane z różnych betonów. Próbki były zbrojone prętami żebrowanymi ø 10mm oraz ø 20mm a także prętem gładkim ø 8mm. Następnie elementy były ogrzewane w zakresie temperatur od 350 do 700°C. Dla wszystkich przebadanych przypadków autorzy stwierdzili istotny spadek przyczepności który w temperaturze 700°C wahał się w zakresie od 60 do 80% w odniesieniu do przyczepności w temperaturze normalnej. W badaniach przedstawionych przez [7, 10, 11] wykazano, że spadek siły przyczepności może wynosić nawet 60% przy oddziaływaniu temperatury powyżej 500°C.

Podsumowując aktualny stan wiedzy na podstawie dostępnej literatury dotyczącej przyczepności stali do betonu możemy stwierdzić, że:

- Wszyscy autorzy badań wskazują na spadek przyczepności na skutek oddziaływania wysokich temperatur.
- Stwierdzają, że z powodu zastosowania różnych metod badawczych wyniki badań przyczepności nie dają się w prosty sposób porównać. Jest to również spowodowane rodzajem użytych do badań próbek oraz składem betonu, rodzajem zbrojenia i obróbką jego powierzchni.
- Większość badaczy wskazuje na to, że na spadek przyczepności prętów żebrowanych do betonu na skutek oddziaływania wysokich temperatur wpływa wytrzymałość betonu.

## 2. Metoda badawcza

Do wykonania próbek wykorzystano beton klasy C16/20 i C40/50 [14]. Wytrzymałość charakterystyczną na ściskanie w 28 dniu określono zgodnie z normą PN-EN 12350-1 [15]. Do zbrojenia zastosowano pręty ze stali St3S gładkiej klasy A-I oraz stali 18G2 żebrowanej klasy A-II o średnicy ø 10 mm.

Celem zastosowania do wykonania próbek stali gładkiej oraz żebrowanej było zbadanie wpływu żeber na spadek przy-

The main objective of comparing the results for the two samples was to explain whether the tests results indicating the bond reduction resulting from exposure to high temperatures carried out in ambient temperatures are able to produce relevant outcome sufficient to evaluate the behavior of reinforced concrete constructions during a fire. It is a considerably significant factor connected with the resistance of reinforced constructions in fire conditions as well as with rescuers safety. As it was observed that in the course of rescue and extinguishing actions, cleaving of reinforced concrete floors came off at a shorter time than it is suggested by their fire resistance.

It is necessary to note interesting results obtained by the researchers dealing with the issue of adherence. In the research conducted by [5] the samples of C50/50 concrete were used. In each sample, the two reinforcement bars of 3 mm diameters were drowned, where the length of seating amounted to 6 and 8 cm respectively. Next, the three-stage process of heating was programmed in the temperature range from 240 to 550°C. The author of this research concludes that adherence of steel to concrete decreases with the increase of the temperature of heating. It is easy to notice this process in the temperature as low as 240°C. P.D. Morley, R. Royles [12, 13] showed that in the case of ribbed bars with the diameter of 16 mm in post-fire tests, the bond after heating of the samples in the temperature of 100°C amounts to 80%, and in the temperature of 200°C it again rises and equals 92% in relation to the bond in normal temperature of 20°C. In the research carried out by [8, 9] the samples sized 100x100x400 mm prepared from various types of concrete were used. The samples were reinforced with ribbed bars with diameter of 10 mm and 20 mm as well as with a smooth bar with diameter of 8 mm. Next, the components were heated in the temperature range from 350 to 700°C. In all studied cases, the authors observed a significant increase in adherence, which in the temperature of 700°C oscillated within the range from 60 to 80% in relation to the adherence in normal temperature. In the tests presented by [7, 10, 11] it was revealed that the drop of bond force may be even equal 60% in the temperature exposure of over 500°C.

Summarizing current state of knowledge on the basis of available literature concerning steel-concrete bond it may be stated that:

- All authors point out to the decrease of the bond being the result of exposure to high temperatures.
- The authors state that because of the application of various research methods, the results of bond tests cannot be easily compared. It is also caused by the type of samples used in the tests as well as the composition of concrete, the type of reinforcement and the treatment of its surface.
- Majority of researchers point out to the fact that the reduction of bond of ribbed bars to concrete is affected by concrete resistance.

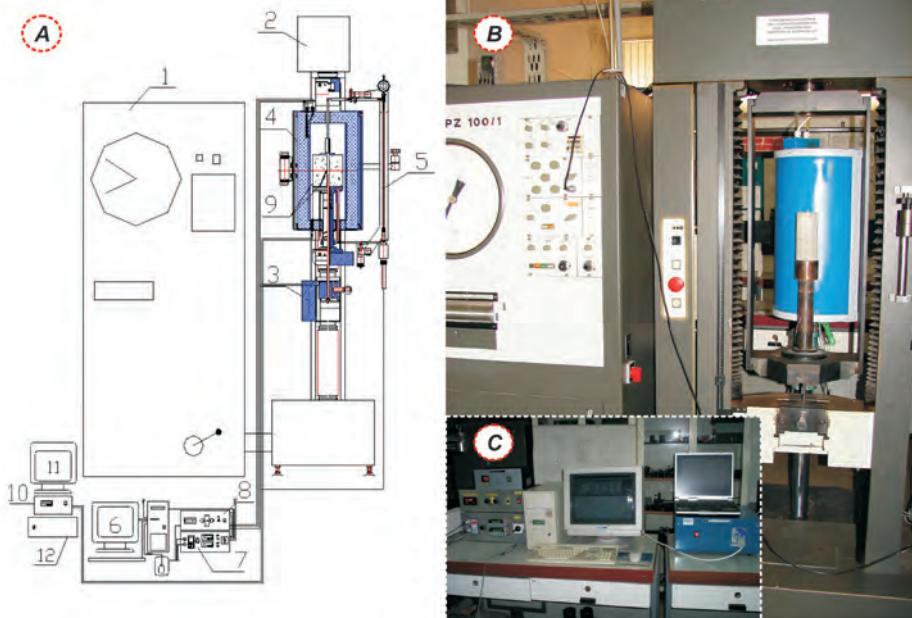
## 2. Method

Concrete of C16/20 grade and C40/50 grade was used for manufacturing the samples [14]. The characteristic compressive strength on day 28 was determined according to PN-EN 12350-1 [15]. The reinforcement was made of A-I class smooth steel bars St3S and A-II class ribbed steel bars 18G2 both of 10 mm diameter.

The purpose of using both smooth bars and ribbed bars was testing the impact of ribs on the bond reduction under high fire

czepności w temperaturach wysokich pożaru oraz wyjaśnienie mechanizmów tego zjawiska. Próbki wykonano w pracowni Instytutu Konstrukcji Budowlanych Politechniki Warszawskiej.

Na wyposażenie stanowiska badawczego składa się: piec do wygrzewania próbek wraz ze sterownikiem, maszyna wytrzymałościowa, układ pomiarowy temperatury oraz układ rejestracyjny. Schemat blokowy stanowiska zostało przedstawiony na rys. 1A.



Rys. 1. Schemat blokowy stanowiska do badań „na gorąco” : A) 1 - Szafa sterująca, 2 - Maszyna wytrzymałościowa, 3 - Rama nośna, 4 - Piec, 5 - Układ pomiaru przesunięcia, 6 - Komputer sterujący, 7 - Miernik temperatur, 8 - Sterownik mocą pieca, miernik wydłużzeń, 9 - Termopary, 10 - Sterownik pieca typu PSP 1, 11 - Komputer pomiarowy, 12 - Generator mocy; B) Maszyna wytrzymałościowa z piecem; C) Układ sterowania i pomiaru

Fig. 1. The test stand for ‘hot experiments’: A) 1. Steering box , 2. Testing machine, 3. Carrying frame, 4. Furnace, 5. Transposition measurement system, 6. Computer, 7. Measuring machine, 8. Driver of furnace power, extension meter, 9. Thermoelements, 10. Furnace’s driver type PSP 1, 11. Measuring computer, 12. Power oscillator; B) Strength machine with the furnace; C) Control and measurement system

Wykorzystywany w badaniach „na gorąco” piec oznaczony symbolem P1000 został zainstalowany na wysięgniku maszyny wytrzymałościowej FPZ 100/1 (rys.1). Część roboczą pieca tzw. muflę stanowi komora cylindryczna wykonana ze stali żaroodpornej. W celu ustabilizowania pracy pieca i możliwości jego rozgrzewania do temperatury 1000°C w układzie sterującym został zainstalowany generator mocy. Podstawowym elementem pozwalającym sterować mocą pieca jest Programator PSP 1 wraz z komputerem pomiarowym i oprogramowaniem ThermoPro. Rejestracja mierzonych wartości odbywa się za pomocą komputera klasy PC z kartą pomiarową PCL818HG firmy Advantech.

W skład stanowiska do badań „na zimno” zalicza się średnio-temperaturowy piec komorowy typu PK 1100/5. Szkielet pieca wykonany jest z rur kwadratowych i nierdzewnej stalowej blachy. Warstwę izolacyjną stanowią kształtki i mata z włókien ceramicznych. Elementy grzejne pieca wykonane zostały z drutu oporowego KANTHAL A1 w kształcie spiral. Układ sterowniczy pieca został wykonany w dwóch szafach połączonych z ramą nośną pieca. Realizują one regulację temperatury oraz transmisję sygnałów termoelektrycznych z trzech czujników pomiarowych. Cały układ pomiarowy połączony jest do komputerem PC wyposażonego w program GENIE. Do bada-

temperatures as well as explaining this phenomenon. Samples were made at The Institute for Construction Structures of the Warsaw Technical University.

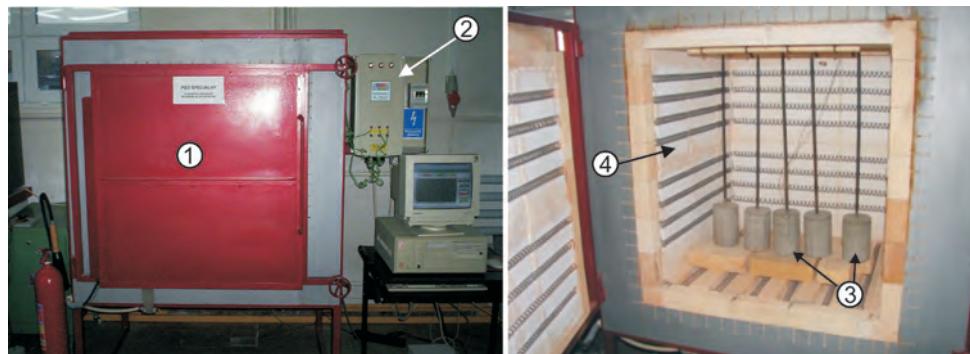
The station consists of few elements: furnace, used to heat samples, with a programmer, strength machine, temperature measurement system and recording system. Block scheme of the station has been presented on fig. 1A.



Furnace, used in “hot tests”, marked with a symbol P1000, has been installed on the extension arm of FPZ 100/1 strength machine (fig. 1). Working element of the furnace, so called muffle, is a cylindrical chamber, made of heat resisting steel. In order to stabilize work of the furnace, and to heat the furnace, up to the temperature 1000°C, power generator has been installed in the programming system. The main element, which allow to control the power of the furnace, is PSP 1 Programmer, together with measuring computer, and ThermoPro software. Registration of measured values is done by the means of PC computer which has been equipped with measuring card PCL818HG made by Advantech.

The main part of the station, used to carry out „cold tests”, is an average-temperature chamber furnace type PK 1100/5. Framework of the furnace was made of square pipes and stainless steel metal sheets. Insulation coat was made of moulders and ceramic fiber mate. Heating elements were made of resistance wire KANTHAL A1 with a spiral shape.

Furnace steering system has been made of two boxes, connected with the carrying frame of the furnace. The boxes realize the temperature regulation and transmission of thermo-electrical signals (out of three measurements sensors). The whole system is connected to a PC computer equipped with GENIE



Rys. 2. Widok pieca PK 1100/5 wraz z umieszczonymi w środku próbkami do badań: 1 - Piec, 2 - Sterownik temperatury, 3 - Elementy grzejne, 4 - Próbki

Fig. 2. View of the PK 1100/5 furnace with samples placed inside: 1 - Furnace, 2 – Temperature controller; 3 – Heating elements, 4 – Samples

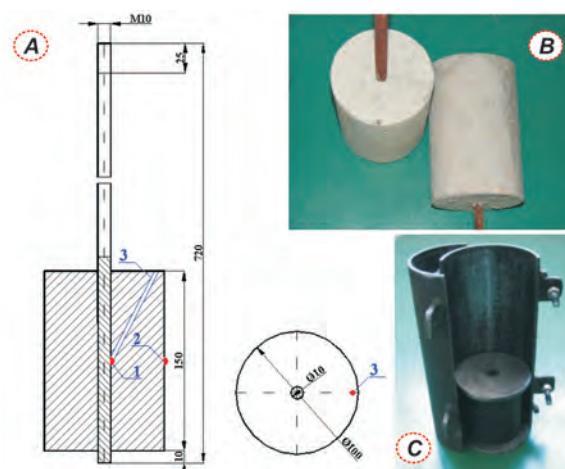
nia przyczepności użyto uniwersalną zrywarkę typu FPZ100/1. Daje ona możliwość wprowadzenia siły rozciągającej i utrzymania jej na stałym poziomie podczas badania. Maszyna posiada cztery zakresy prędkości przesuwu oraz cztery zakresy zadawanych sił rozciągających.

### 2.1. Badania wykonane „na zimno”

Próbki do badań „na zimno” wykonano w formie walca o średnicy 100 mm i wysokości 150 mm (rys. 3). W środkowej części próbki na styku pręta stalowego i betonu oraz na zewnętrznej powierzchni próbki rozmieszczone termopary. Cienki kanalik do wprowadzania termopary wykonano w próbce w czasie betonowania [1, 2, 3].

Obróbkę termiczną próbek przeprowadzono w piecu z programatorem i sterownikiem temperatur w oparciu o przyjęty rozkład „temperatura - czas”. W badaniach przyjęto rozkład temperatur w płycie betonowej na głębokości 15 mm od powierzchni ogrzewanej podczas normowego pożaru opisanego wzorem (1).

Po osiągnięciu założonej temperatury na przyjętym rozkładzie utrzymywano ją na stałym poziomie przez okres 30 minut (rys. 4). W tym czasie występuło wyrównanie temperatury na powierzchni próbki oraz na styku stali i betonu (rys. 5). Po procesie wygrzewania próbki schładzano przez 24 godziny do osiągnięcia temperatury pokojowej. Badania przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej stosując metodę wyciągania pręta z próbki (pull-out bond test). W badaniu wyznaczono maksymalną siłę niezbędną do przesunięcia pręta w betonie.



Rys. 3. Próbki do badań „na zimno”

Fig. 3. Samples in “cold experiments”

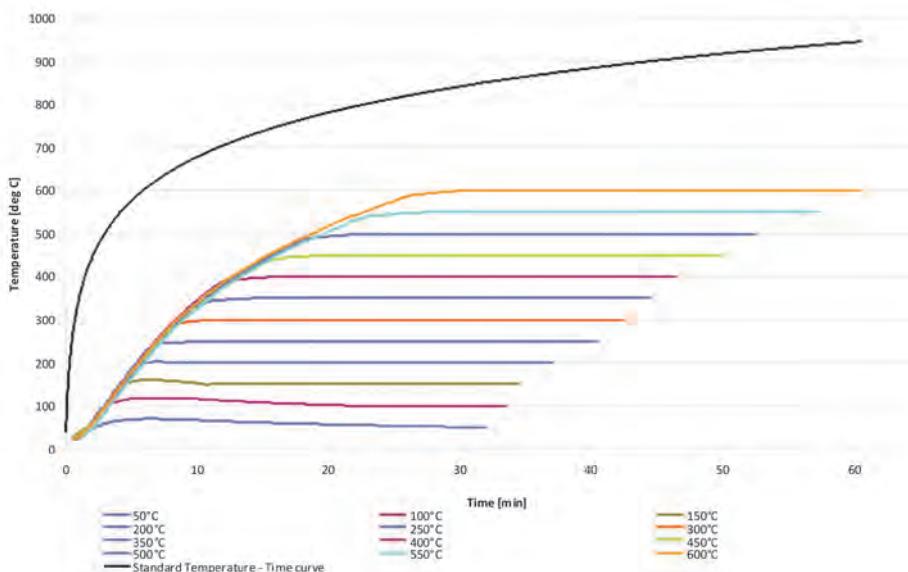
program. For the bond test, an universal ripper type FPZ100/1 has been used. It gives possibility to introduce a stretching force and to keep it on the constant level during the test time. The machine has four transposition speed range and four range of distension forces.

### 2.1. Cold tests

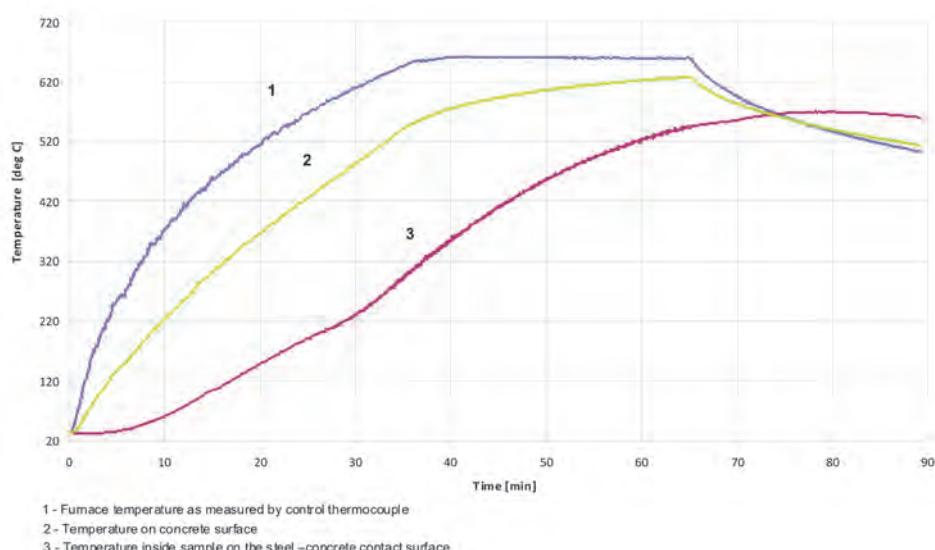
Cold tests were made as rollers of 100 mm diameter and 150 mm height (fig 3). Thermocouples were located in the sample middle where concrete contacts the rebar as well as on the sample surface. A small-diameter channel for the thermocouple was made in the course of pouring the concrete [1, 2, 3].

The thermal treatment was carried out in a furnace fitted with a programmer and temperature controller using the temperature - time curve as adopted for tests. The temperature distribution at 15 mm depth from the heated surface inside concrete was assumed as in standard fire according to the formula (1).

After the required temperature had been reached, samples were kept constant at constant temperature for 30 minutes (fig. 4). At the same time, temperatures equalized on the sample surface and on the rebar-concrete contact surface (fig. 5). After the heating, samples were cooled for 24 hours to reach the room temperature. Pull-out bond tests were made using a strength testing machine. The test was used to determine the maximum force required to move the rebar inside concrete.



Rys. 4. Założony w badaniach „na zimno” rozkład temperatur z oznaczonym czasem osiągnięcia temperatury zadanej  
Fig 4. Temperature distribution as assumed for cold tests with reach times for different set temperatures



Rys. 5. Rozkład temperatur uzyskany w testach

Fig 5. Temperature curves obtained in tests

## 2.2. Badania wykonane w czasie grzania – „na gorąco”

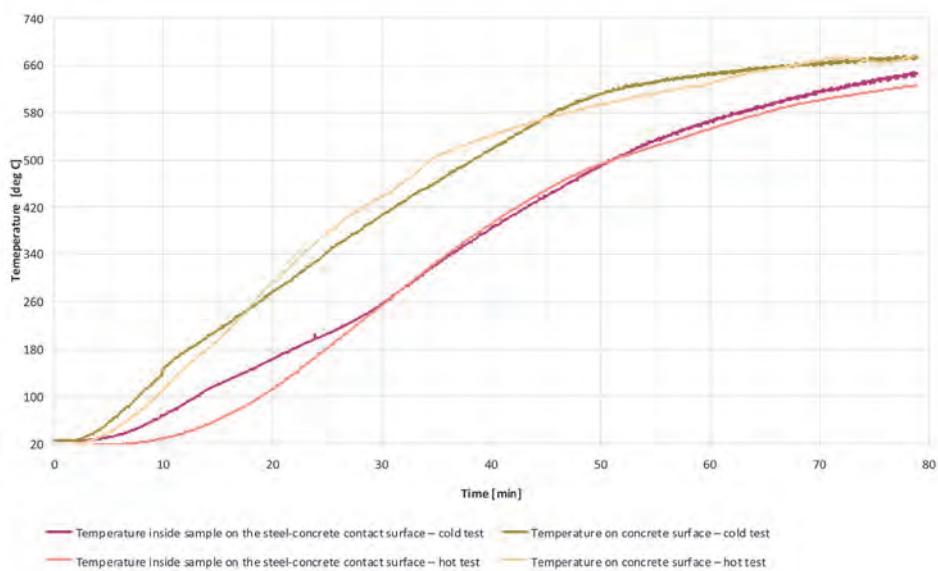
W celu porównania spadku przyczepności w badaniach „na gorąco” oraz „na zimno” w jednakowych warunkach termicznych ustalono, że podstawowym rozkładem temperatur będzie rozkład występujący na styku pręta zbrojeniowego oraz betonu w środkowej części próbki [3, 4, 6].

Dążenie do ujednolicenia rozkładu temperatur na styku stali i betonu doprowadziło do zmniejszenia średnicy próbek w badaniach „na gorąco”. Średnicę zmniejszono o 30 mm zachowując wysokość próbki. Dzięki temu uzyskano bardzo zbliżone rozkłady temperatur uwidocznione na rys.6.

## 2.2. Hot test

It was decided, that the temperature distribution on the steel-concrete contact surface in the sample middle will be the basic temperature distribution for comparing the bond reduction in hot tests and in cold tests in the same thermal conditions [3, 4, 6].

The trend to equalize the temperature distribution on the steel-concrete contact surface has led to smaller sample diameters for hot tests. The diameter was reduced by 30 mm, the height remained unmodified. This modification allows to obtain temperature distribution curves being very similar to one another as seen in fig. 6.



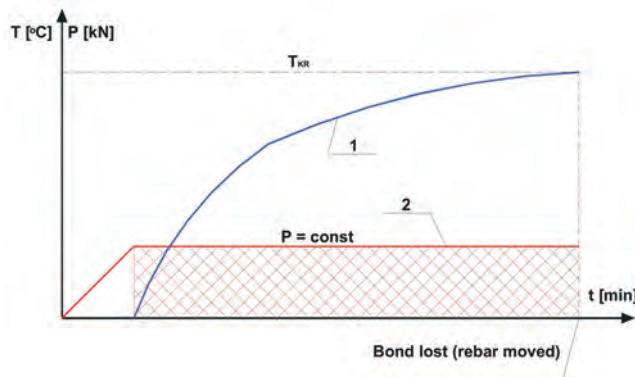
Rys. 6. Porównanie rzeczywistych rozkładów temperatury w obydwiu rodzajach wykonanych badań  
Fig. 6. Actual temperature distributions compared for both test types

Badania przyczepności „na gorąco” wykonano zgodnie ze schematem przedstawionym na rys. 7. W czasie badania próbki były obciążone stałą siłą utrzymywana w czasie próby. Jednocześnie ogrzewano próbkę zgodnie z przyjętym rozkładem „temperatura - czas” mierząc temperaturę na zewnętrznej powierzchni oraz na styku pręta i betonu.

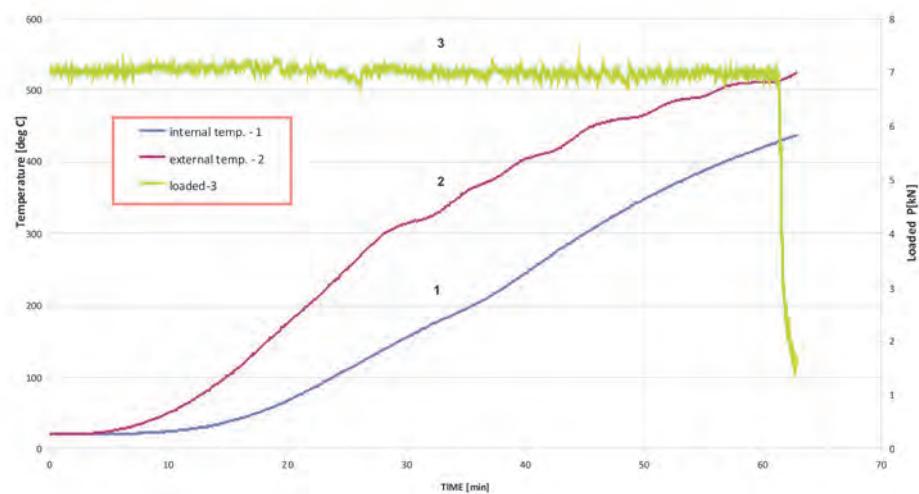
Celem badania było ustalenie temperatury krytycznej  $T_{kr}$ , przy której następowała utrata siły przyczepności odpowiadająca stałej sile obciążającej próbkę. Przykładowy przebieg badania przedstawiono na rys. 8. Za moment utraty przyczepności uznawano przesunięcie pręta w stosunku do betonu, które powodowało nagły spadek siły.

The hot tests were made according to the curve as in fig. 7. Samples were loaded with a constant force over the test time. At the same time, samples were heated according to the temperature - time curve as adopted with the temperature being measured on the sample surface and on the steel-concrete contact surface.

The test objective was to determine the critical temperature,  $T_{kr}$ , where the bond force reduction is equal to the sample load. The test example is seen in fig. 8. The bond loss event was defined as the rebar movement with relation to the concrete, which results in a sudden force reduction.



Rys. 7. Schemat przebiegu badania „na gorąco”. Określenia temperatury krytycznej (spadku przyczepności) gdzie: 1 – Rozkład temperatury w miejscu styku betonu z prętem stalowym, 2 – Wykres siły przyłożonej do próbki (wyciągającej pręt z betonu)  
Fig. 7. Hot test diagram. Determination of critical temperature for (bond reduction) whereas: 1 – Temperature on the steel-concrete contact surface, 2 – Force applied to the sample (pulling the rebar from the sample)



Rys. 8. Przykładowy przebieg badania „na gorąco”: 1 – Temperatura na styku pręta z betonem, 2 – Temperatura na powierzchni próbki betonowej, 3 – Obciążenie

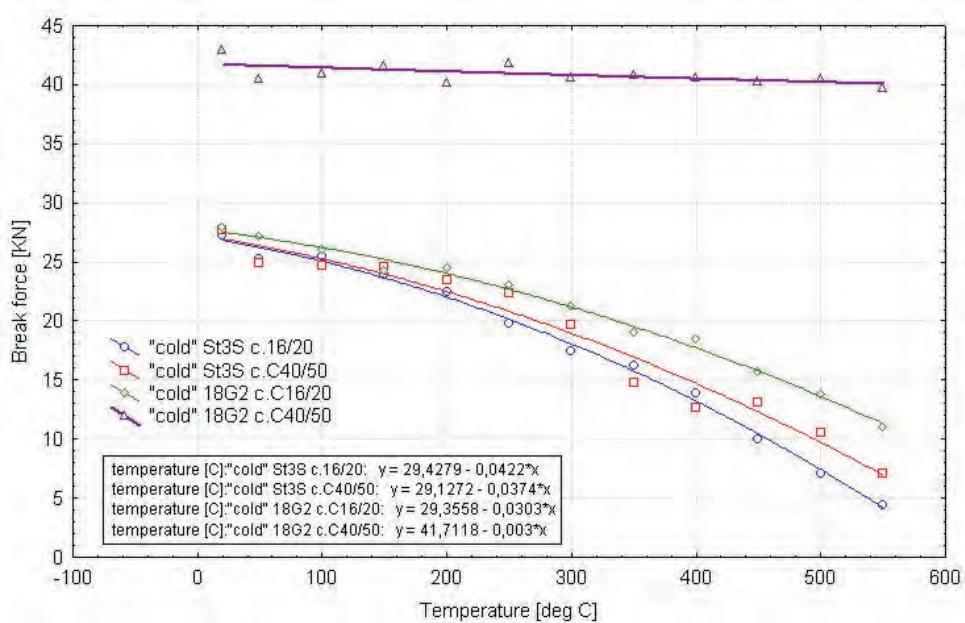
Fig. 8. Hot test example: 1 – Temperature on the steel-concrete contact surface, 2 – Temperature on the sample surface, 3 – Loaded

### 3. Wyniki badań

Wyniki badań przyczepności „na zimno” oraz „na gorąco” opracowano w postaci wykresów w celu pokazania zależności temperatury krytycznej do utraty przyczepności dla przyjętych w badaniu zmiennych stałych (klasa betonu, gatunek stali). Na rys. 9 przedstawiono wyniki badań uzyskane w teście „na zimno”, natomiast na rys. 10 wyniki badań uzyskane w teście „na gorąco”.

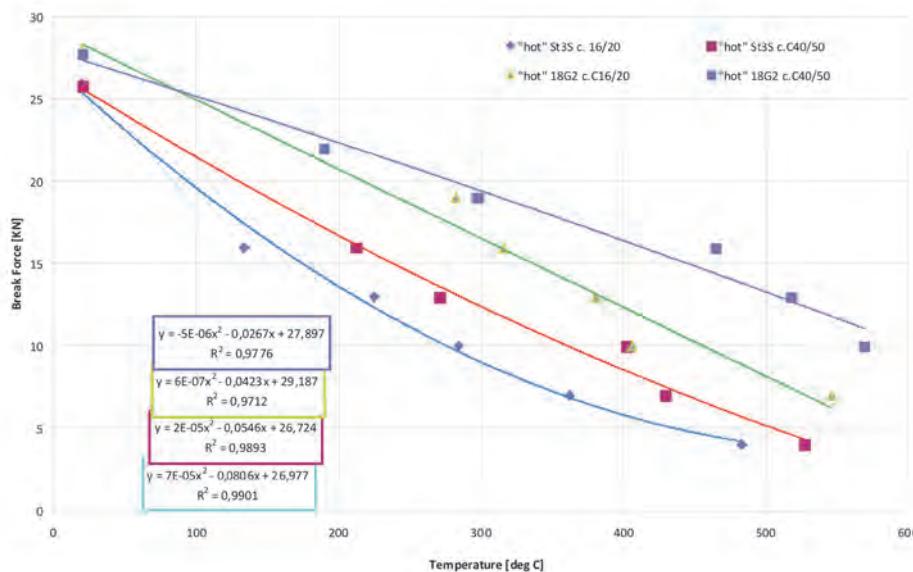
### 3. The results

The bond “hot” and “cold” tests results were analyzed in the form of charts in order to show the relation between critical temperature and the loss of bond for accepted constant variables (concrete class, type of steel). Illustration 9 shows the tests results obtained in the cold test while illustration 10 presents the results observed in hot test.



Rys. 9. Spadek przyczepności stali do betonu w zależności od temperatury i systemu żelbetowego (test „na zimno”)

Fig. 9. Decrease of steel-concrete bond in relation to temperature and reinforced concrete system (“cold test”)



Rys. 10. Spadek przyczepności stali do betonu w zależności od temperatury i systemu żelbetowego (test „na gorąco”)  
Fig. 10. Decrease of steel-concrete bond in relation to temperature and reinforced concrete system (“hot test”)

W tabeli 1 przedstawiono parametry statystyczne wyników wytrzymałości dla wszystkich systemów żelbetowych w kolejnych przedziałach temperatury.

Uzyskane wyniki badań zostały poddane analizie. Dokonano statystycznej oceny różnic średnimi rozkładem *t Studenta*. Celem analizy było wykazania różnic w dynamice spadku przyczepności resztowej stali do betonu.

Podawany w wynikach testu *t* poziom *p* reprezentuje prawdopodobieństwo błędu związanego z przyjęciem hipotezy o istnieniu różnic między średnimi. Inaczej jest to prawdopodobieństwo popełnienia błędu polegającego na odrzuceniu hipotezy o braku różnicy między średnimi w dwóch badanych kategoriach obserwacji należących do populacji generalnej (reprezentowanych przez badane grupy) w sytuacji, gdy stan faktyczny w populacji jest taki, iż hipoteza ta jest prawdziwa [16]. Założono, że wartość *p* ≤ 0,05 wskazuje na istotną różnicę między średnimi, przy większych wartościach istotności *p* hipotezę należy odrzucić.

Znak funkcji *t*, podobnie jak w przypadku zmiennej standaryzowanej wskazuje na ujemne lub dodatnie odchylenie od średniej [18].

W identyfikowanych grupach użyto kodów grupujących charakteryzujących system żelbetowy poprzez gatunek stali i betonu.

W pierwszym teście badano różnice między systemami badanymi „na zimno” dla różnych poziomów obciążenia termicznego. Dla tej populacji użyto testu *t* dla zmiennych zależnych. W tabeli 2 przedstawiono wyniki tego testu.

W tabeli 3 przedstawiono wyniki oceny różnic między średnimi zagregowanych wyników badanych systemów żelbetowych w teście „na zimno”.

W celu porównania wyników uzyskanych w testach „na zimno” i „na gorąco” użyto testu *t-Studenta* dla prób niezależnych. Jest to spowodowane wykorzystaniem różnych próbek w odmiennych interwałach obciążenia [17].

Test *t-Studenta* dla dwóch niezależnych prób, jest wykorzystywany do testowania hipotezy odnoszącej się do oceny istot-

Table 1 shows statistical parameters of the test results of all reinforced concrete systems in subsequent temperature ranges.

The obtained test results were analyzed. Statistical evaluation of differences between mean values was made by means of *t-Student* test. The aim of the analysis was to show differences in dynamics of decrease of residual bond between steel and concrete.

Presented in test *t* results level *p*, represents probability of an error, relevant to the assumption of hypothesis about existence of differences between the averages. In another way, it is a probability of making a mistake, based upon rejection of hypothesis about lack of differences between the averages, in both examined categories of observation, which belong to general population (represented by examined groups) in situation, where the actual state in the population cause that the hypothesis is true [16]. It has been assumed that the value of (*p* ≤ 0,05) indicates substantial difference between the averages. Hypothesis has to be rejected if the value of *p* importance is greater.

Mark of *t* function, similar like in case of standardize variable, indicates negative and positive deviation from the average [18].

Grouping codes characterizing reinforced concrete system through a type of steel and concrete were used in identified groups.

In the first test the differences between cold tested systems were studied for various levels of thermal load. In this population *t* test was used for dependent variables. Table 2 presents the results of this test.

Table 3 presents the results of evaluation of differences between mean values of the collected results for the studied reinforced concrete systems in “cold test”.

In order to compare differences, between average bond values of steel and concrete, obtained in cold and hot tests, in the second test a *t-Student* test for independent trials was used. It was caused by a usage of different samples in other load intervals [17]. The *t* test for two independent samples, which is employed in a hypothesis testing situation involving two inde-

Tab. 1. Parametry wyników badań  
Tab. 1. Parameters of test results

System	Valid N	Mean BF[KN]	Minimum BF[KN]	Maximum BF[KN]	Std.Dev.	Temperature [deg C]
St3S concrete C16/20	5	27,26	26,90	28,30	0,59	20
St3S concrete C16/20	5	25,24	23,40	27,00	1,40	50
St3S concrete C16/20	5	25,46	23,60	27,90	1,67	100
St3S concrete C16/20	5	23,84	22,50	24,60	0,94	150
St3S concrete C16/20	5	22,42	20,00	26,00	2,38	200
St3S concrete C16/20	5	19,78	16,00	24,00	3,09	250
St3S concrete C16/20	5	17,40	14,00	20,20	2,66	300
St3S concrete C16/20	5	16,16	13,60	18,40	2,20	350
St3S concrete C16/20	5	13,82	10,30	16,20	2,21	400
St3S concrete C16/20	5	9,98	5,40	15,20	4,10	450
St3S concrete C16/20	5	9,98	5,40	15,20	4,10	500
St3S concrete C16/20	5	4,46	2,60	6,60	1,54	550
St3S concrete C40/50	5	27,70	26,00	29,60	1,40	20
St3S concrete C40/50	5	24,86	22,80	26,60	1,36	50
St3S concrete C40/50	5	24,72	19,80	26,60	2,85	100
St3S concrete C40/50	5	24,58	22,60	26,00	1,35	150
St3S concrete C40/50	5	23,42	21,90	26,40	1,77	200
St3S concrete C40/50	5	22,36	20,60	24,40	1,47	250
St3S concrete C40/50	5	19,70	15,40	23,40	2,91	300
St3S concrete C40/50	5	14,76	12,80	16,60	1,41	350
St3S concrete C40/50	5	12,60	9,80	15,20	2,38	400
St3S concrete C40/50	5	13,04	10,80	14,20	1,37	450
St3S concrete C40/50	5	10,56	9,00	12,80	1,45	500
St3S concrete C40/50	5	7,06	6,60	7,60	0,38	550
18G2 concrete C16/20	5	27,90	26,80	29,00	0,84	20
18G2 concrete C16/20	5	27,16	26,70	27,60	0,36	50
18G2 concrete C16/20	5	25,96	25,40	26,30	0,38	100
18G2 concrete C16/20	5	24,22	22,50	25,60	1,34	150
18G2 concrete C16/20	5	24,44	22,40	25,90	1,32	200
18G2 concrete C16/20	5	22,96	22,00	24,00	0,77	250
18G2 concrete C16/20	5	21,24	19,90	22,00	0,92	300
18G2 concrete C16/20	5	19,02	18,10	20,30	0,89	350
18G2 concrete C16/20	5	18,46	16,90	20,40	1,44	400
18G2 concrete C16/20	5	15,60	13,40	17,30	1,45	450
18G2 concrete C16/20	5	13,80	12,20	15,40	1,23	500
18G2 concrete C16/20	5	10,98	9,00	12,50	1,52	550
18G2 concrete C40/50	5	42,90	41,00	45,00	1,63	20
18G2 concrete C40/50	5	40,52	38,50	43,50	2,04	50
18G2 concrete C40/50	5	40,90	38,50	44,50	2,25	100
18G2 concrete C40/50	5	41,62	40,50	42,50	0,89	150
18G2 concrete C40/50	5	40,18	39,00	41,10	0,77	200
18G2 concrete C40/50	5	41,78	39,60	44,10	1,86	250
18G2 concrete C40/50	5	40,58	37,50	43,50	2,41	300
18G2 concrete C40/50	5	40,84	39,50	42,50	1,34	350
18G2 concrete C40/50	5	40,62	38,50	43,00	1,76	400
18G2 concrete C40/50	5	40,32	38,60	42,20	1,40	450
18G2 concrete C40/50	5	40,48	38,50	43,10	1,98	500
18G2 concrete C40/50	5	39,70	38,50	41,50	1,30	550

ności różnic między niezależnymi zmiennymi. Test ten bazuje na rozkładzie  $t$ . Służy on do porównywania średnich rozkładów wyników pochodzących z dwóch różnych populacji [17]. Wyniki testu przedstawiono w tabeli 4.

pendent samples, is one of a number of inferential statistical test, that are based on the  $t$  distribution. In conducting  $t$  test for two independent samples, the two samples means are employed to estimate the values of the means of the populations from which the samples are derived [17]. Table 4 presents results of the test.

Tab. 2. Porównanie wartości średnich przyczepności stali do betonu w kolejnych poziomach obciążenia (test „na zimno”)  
 Tab. 2. Comparison of mean values of steel concrete bond in subsequent levels of load (“cold test”)

Temperatura [C]	system 1 vs. system 2												
	St3S c.16/20 vs. 18G2 c.C16/20		St3S c.16/20 vs. St3S c. C40/50		St3S c.16/20 vs. 18G2 c.C40/50		18G2 c.C16/20 vs. 18G2 c.C40/50		St3S c.C40/50 vs. 18G2 c.C40/50		18G2 c. C16/20 vs. St3S c.C40/50		
	t-value	p	t-value	p	t-value	p	t-value	p	t-value	p	t-value	p	
20	-1,39	0,2	-0,65	0,53	-20,16	0	-18,28	0	-15,84	0	0,27	0,79	8
50	-2,98	0,02	0,44	0,67	-13,81	0	-14,4	0	-14,25	0	3,65	0,01	8
100	-0,65	0,53	0,5	0,63	-12,34	0	-14,67	0	-9,97	0	0,97	0,36	8
150	-0,52	0,62	-1	0,34	-30,67	0	-24,2	0	-23,5	0	-0,42	0,68	8
200	-1,66	0,14	-0,75	0,47	-15,85	0	-23,06	0	-19,38	0	1,03	0,33	8
250	-2,24	0,06	-1,69	0,13	-13,65	0	-20,9	0	-18,29	0	0,81	0,44	8
300	-3,05	0,02	-1,3	0,23	-14,43	0	-16,76	0	-12,36	0	1,13	0,29	8
350	-2,7	0,03	1,2	0,26	-21,46	0	-30,38	0	-29,99	0	5,72	0	8
400	-3,94	0	0,84	0,42	-21,24	0	-21,79	0	-21,17	0	4,71	0	8
450	-2,89	0,02	-1,58	0,15	-15,67	0	-27,43	0	-31,23	0	2,87	0,02	8
500	-4,21	0	-2,12	0,07	-19,26	0	-25,54	0	-27,21	0	3,8	0,01	8
550	-6,74	0	-3,66	0,01	-39,02	0	-32,1	0	-53,69	0	5,6	0	8

Tab. 3. Porównanie wartości średnich przyczepności stali do betonu badanych systemów żelbetowych („na zimno”)  
 Tab. 3. Comparison of mean values of steel-concrete bond in the studied reinforced concrete systems (“cold test”)

System	Mean	Std.Dv.	t-value	df	p
„cold” St3S c.16/20	17,745	7,610348			
„cold” St3S c.C40/50	18,78	6,828257	-2,0722	11	0,06
„cold” St3S c.16/20	17,745	7,610348			
„cold” 18G2 c.C16/20	20,97833	5,460812	-4,9464	11	0,00
„cold” St3S c.16/20	17,745	7,610348			
„cold” 18G2 c.C40/50	40,87	0,857162	-11,2802	11	0
„cold” St3S c.C40/50	18,78	6,828257			
„cold” 18G2 c.C16/20	20,97833	5,460812	-4,1145	11	0,01
„cold” St3S c.C40/50	18,78	6,828257			
„cold” 18G2 c.C40/50	40,87	0,857162	-12,1423	11	0
„cold” 18G2 c.C16/20	20,97833	5,460812			
„cold” 18G2 c.C40/50	40,87	0,857162	-13,8519	11	0
„cold” 18G2 c.C16/20	20,97833	5,460812	13,8519	11	0

Tab. 4. Ocena różnic między średnimi uzyskanymi w próbach „na zimno” i „na gorąco”  
 Tab. 4. Independent variables t Test (“hot” vs. “cold”)

No	system 1 vs. system 2	t-value	p	df
1.	„hot” St3S c. 16/20 vs. „cold” St3S c.16/20	-2,08989	0,05	15
2.	„hot” St3S c.C40/50 vs. „cold” St3S c.C40/50	-2,14672	0,05	16
3.	„hot” 18G2 c.C16/20 vs. „cold” 18G2 c.C16/20	-2,83928	0,01	15
4.	„hot” 18G2 c.C40/50 vs. „cold” 18G2 c.C40/50	-6,42555	0,00	20

#### 4. Wnioski

Na podstawie wyników badań należy stwierdzić, że występujące w czasie pożarów wysokie temperatury powodują znaczny spadek przyczepności pomiędzy prętami zbrojenia a betonem. Z analizy wyników badań można wnioskować, że spadek przyczepności pręta stalowego do betonu w badaniach „na zimno” (badania stanu przyczepności po przebytym po-

#### 4. Conclusions

It should be stated based on test results that high fire temperatures are the reason for a significant reduction of steel-concrete bond. A conclusion can be drawn from the result analysis that: the bond reduction in cold tests (the bond tested after fire) and in hot tests (the bond tested in fire) are different over the entire temperature range up to 800°C. The bond reduction in

żarze) oraz „na gorąco” (w czasie pożaru) jest zróżnicowany w całym zakresie temperatur (do 800°C) przyjętym w badaniach. Spadek przyczepności „na gorąco” jest zawsze większy niż w badaniach „na zimno”. Świadczy to o częściowym nawrocie przyczepności po ostygnięciu próbki prawdopodobnie w części spowodowanej tarciem.

Bardzo istotny wpływ na przyczepność stali do betonu nie tylko w temperaturze normalnej, co jest faktem powszechnie znany, ale również w temperaturach pożarowych ma rodzaj stali (żebrowana, gładka), co jest związane ze zróżnicowaniem powierzchni styku stali i betonu oraz sposobem przekazywania obciążen z pręta na beton.

Wpływ wytrzymałości betonu na przyczepność stali do betonu w temperaturach pożarowych jest zróżnicowany, związany z rodzajem stali: w przypadku przyczepności stali gładkiej do betonu ma niewielki wpływ, natomiast w przypadku stali żebrowanej ma istotne znaczenie. Na podstawie badań stwierdzono, że w przypadku stali gładkiej po zniszczeniu przyczepności pręta w temperaturach podwyższonych i wysokich „wyśluje” się z betonu nie uszkadzając w istotny sposób otaczającego betonu. Natomiast w przypadku stali żebrowanej przed przesunięciem pręta występuje zniszczenie betonu w otoczeniu żeber oraz rysy w betonie poprzeczne lub ukośne do pręta.

W przypadku przyczepności prętów żebrowanych betony o wyższej wytrzymałości niebezpieczne parametry przyczepności w wyższych temperaturach. W badaniach popożarowych spadek przyczepności stali żebrowanej 18G2 do betonu klasy C40/50 może być praktycznie niezauważalny w zakresie temperatur nie przekraczających 500°C.

## 5. Podsumowanie

W badaniach popożarowych, analizując przydatność konstrukcji żelbetowych do dalszej pracy należy brać pod uwagę spadek przyczepności pomiędzy stalą a betonem.

Przy określaniu temperatury krytycznej wpływającej na utratę odporności ognowej elementów żelbetowych, w szczególności stropów żelbetowych, należy brać pod uwagę możliwość odpadania otulin betonowych na skutek utraty przyczepności oraz znaczny wzrost temperatury nieosłoniętego zbrojenia.

Wyniki badań spadku przyczepności w temperaturze pokojowej uzyskane na ochłodzonych po obciążeniach termicznych próbках nie są miarodajne do oceny spadku przyczepności w czasie pożaru, co wykazano w analizie statystycznej zamieszczonej w artykule.

## 6. References

1. Bednarek Z, Ogorodnik P. Testing steel-concrete bond In fire conditions. IX International Conference. Modern Building Materials Structures and Techniques. Vilnius, Lithuania 2007.
2. Bednarek Z, Ogorodnik P. Study of the influence of fire temperatures on the fall of the bond between steel and concrete. IV International conference. Safety of Fire Building, Częstochowa 2002.
3. Bednarek Z, Ogorodnik P. Study of the influence of thermal conditions during fire on the bond between steel and concrete. Contemporary problems of fire safety in buildings and environmental engineering, Koszalin – Łazy 2004.
4. Bednarek Z, Ogorodnik P. Study of the influence of high temperatures of the bond between ribbed steel and concrete C40/50. XIX Conference scientifically – technical. Concrete and Prefabrication, Jadwisin 2004.
5. Chih-Hung C, Cho-Liang T. Time – temperature analysis of bond strength of a rebar after fire exposure. Cement and Concrete Research 2003; 33: 1651-1654.
6. Czerski Z. Mechanical action of the bond in prestressed reinforced concrete. Engineering and Biulding 1987; 7.

the hot status is in all cases bigger than in the cold status. This fact is the evidence of a partial return of the bond after the sample was cooled; friction is probably in part responsible for that phenomenon.

The rebar type (smooth or ribbed) has a very significant impact on steel-concrete bond features not only at normal temperatures (room temperatures) – this being a well-known fact, but also at fire temperatures. This is related to the different types of contact surfaces and to the load transfer method from rebars to the concrete.

The concrete strength impact on the steel-concrete bond at fire temperatures is differentiated and related to the steel surface: the impact is small for smooth rebars, whereas it's significant for ribbed rebars. It was determined for smooth rebars based on tests that: after the bond was reduced to zero at higher and high temperatures, rebars “slip out” from concrete without any significant damage to the concrete. For ribbed rebars: before the rebar could be moved, concrete is destroyed around the ribs, and lateral or slant cracks (in relation to the rebar centreline) are created.

For ribbed rebars: high-strength concrete grades tend to increase the bond reduction temperature threshold. In cold tests, the bond reduction for 18G2 ribbed steel – C40/50 concrete is in practice insignificant over the temperature range up to 500°C.

## 5. Summary

In cold tests, while analysing the applicability of RC structures for further use, a reduction of rebar – concrete bond strength must be considered.

While determining the critical temperature that impacts the fire resistance of RC components (in particular: RC ceilings), the possibility of concrete chipping due to the bond reduction as well as a significantly increased temperature of uncovered rebars should be considered.

The bond reduction tests made at room temperature on samples cooled after fire treatment are not reliable enough to evaluate the bond reduction as caused by fire.

7. Fellinger J H H., Jołop A, Uijl D. Bond of pretensioned strands in fire exposed concrete. *Bond in concrete – from research to standards*. Budapest, 2002.
8. Haddad R H, Al-Saleh R J, Al-Akhras N M. Effect of elevated temperature on bond between steel reinforcement and fiber reinforced concrete. *Fire Safety Journal* 2008; 43: 334-343.
9. Haddad R H, Shannis L. Post-fire behavior of bond between high strength pozzolanic concrete and reinforcing steel, *Construction and Building Materials* 2004; 18: 425-435.
10. Jianzhuang X, König G. Study on concrete at high temperature in China—an overview. *Fire Safety Journal* 2004; 39: 89-103.
11. Moetaz M, El-Hawary A, Sameer A H. Bond shear modulus of reinforced concrete at high temperatures. *Engineering Fracture Mechanics* 1996; 55: 991-999.
12. Morley P D, Royles R. The influence of high temperature on the bond in reinforced concrete. *Fire Safety Journal* 1980; 2: 243-255.
13. Morley P D, Royles R. Response of the bond in reinforcing at normal and high temperature. *Magazine of Concrete Research* 1983; 123: 67-74.
14. PN-EN 206-1:2003. Concrete. Part I: Requirements, properties production and compatibility (Beton cz.1: wymagania, właściwości, produkcja i zgodność).
15. PN-EN 12350-1: Study of concrete mix. Part 1. Drawing of samples (Badanie mieszanki betonowej. Część 1. Pobieranie próbek).
16. Hill T, Lewicki P. Statistics: methods and applications: a comprehensive reference for science, industry and data mining. StatSoft, 2006.
17. Sheskin D. Parametric and nonparametric statistical procedures. Boca Raton: CRC Press, 1997.
18. Volk W. Statystyka stosowana dla inżynierów. Warszawa: WNT, 1973.

---

**Dr hab. inż. Zofia BEDNAREK, prof. SGSP**

**Dr inż. Paweł OGRODNIK**

**Dr inż. Daniel PIENIAK**

Szkoła Główna Służby Pożarniczej  
w Warszawie

Katedra Techniki Pożarniczej  
Zakład Mechaniki Stosowanej  
ul. Słowackiego 52/54, 01-629 Warszawa  
e-mail: mechanika@sgsp.edu.pl

---

## NIEZAWODNOŚĆ SZEREGOWYCH UKŁADÓW F: TYPU "K Z N" PRZY USZKODZONYCH ELEMENTACH SKŁADOWYCH

### RELIABILITY OF CONSECUTIVE K OUT N:F SYSTEMS WITH FAILED COMPONENTS

W artykule opracowano model analizy niezawodności szeregowych układów F: typu „k z n” uwarunkowany identyfikacją kilku uszkodzonych elementów w systemie. W przedstawionym modelu, system zostaje podzielony na kilka podsystemów według granic wyznaczanych przez następujące po sobie uszkodzone elementy składowe. Najpierw formułuje się niezawodność podsystemów, a model niezawodności systemu otrzymuje się analizując relację pomiędzy podsystemami a systemem jako całością. W artykule rozważono przypadki układów liniowych i kołowych. Zastosowanie proponowanego modelu zilustrowano przykładem.

**Słowa kluczowe:** szeregowy układ F: typu „k z n”, niezawodność układu, uszkodzenie.

In this paper, a model is developed for analysing the reliability of consecutive k out n:F systems under the condition that several failed components are identified in the system. The system then is partitioned into a number of subsystems by the consecutive failed components. The subsystem reliability is evaluated first and the model of system reliability is obtained by analysing the relationship between the subsystems and the system. An example is given to illustrate the operation of the proposed model.

**Keywords:** consecutive k out of n F: system, system reliability, failure.

#### Notation:

$C(m,l,r,k)$	subsystem consisting of a number of components, in which there are $m(m \geq 1)$ consecutive functional components in the middle, and $l(l \geq 0)$ and $r(r \geq 0)$ consecutively defective components at its left and right ends, respectively, at time $t$
$p$	reliability of a component at time $t+\tau$ under the condition that it is working at time $t$
$q$	$1-p$
$r(t)$	reliability of a subsystem at time $t$
$H(j,x,z)$	the number of ways in which $j$ identical balls can be placed in $x$ distinct urns subject to the requirement that at most $z$ balls are placed in any one urn.
$l_i$	number of consecutively failed components at left end of subsystem $i$ at time $t$ , where $0 \leq l_i \leq k-1$ .
$r_i$	number of consecutively failed components at right end of subsystem $i$ at time $t$ , where $0 \leq r_i \leq k-1$ and $r_i = l_{i+1}$ for $i=1,2,\dots,s-1$
$v_i$	$\min(k-1, m_i)$
$R(m,l,r,k)$	reliability of the subsystem $C(m,l,r,k)$
$R_{SL}(\tau, k t)$	reliability of a linearly consecutive k out n:F system at time $t+\tau$ under the condition that it is reliable at time $t$ and contains several failed components
$A_j(l,r)$	event that the subsystem $C(m,l,r,k)$ works when $j$ components fail out of the $m$ components in the middle during $[t, t+\tau]$
$B_j(l,r)$	event that the subsystem $C(m,0,0,k)$ works but $C(m,l,r,k)$ fails when there are $j$ components fail out of $m$ components in the middle during $[t, t+\tau]$ , in which $C(m,0,0,k)$ and $C(m,l,r,k)$ share the same $m$ components

$n_{ij}$	$\equiv \sum_{x=i}^j (l_x + m_x) + r_j$ , for $i \leq j$ ; $\equiv r_i$ , for $i > j$
$E_{sys}$	event of the system being working
$E_i$	event of the $i$ th subsystem being working
$S_{ij}$	$\equiv \{i, i+1, \dots, j\}$ for $i > j$ , which is the set of subsystems involved in $D_{ij}$ and is also referred to as the assembly $S_{ij}$
$S_{i,j}^0$	$\equiv \{i+1, \dots, j-1\}$ , which is the set of all the subsystems in $S_{ij}$ except the first and the last ones
$D_{ij}$	event that all the subsystems in the system are working separately but there are at least $k$ consecutive components failing in the assembly $S_{ij}$ , and the number of consecutive failed components is less than $k$ in any assembly $S_{x,y}$ where $S_{x,y} \subset S_{i,j}$ . $D_{ij}$ is also referred to as the $D$ event.
$a_i, b_i$	number of consecutive components failing in the $i$ th subsystem during $[t, t+\tau]$ next to the left bound and right bound of the subsystem, respectively
$R_i(a_i, b_i)$	reliability of the $i$ th subsystem with at least $a_i(0 \leq a_i \leq m_i)$ and exactly $b_i(0 \leq b_i \leq m_i)$ as defined earlier
$R_l(a_i), R_r(b_i)$	reliability of the $i$ th subsystem with at least $a_i(1 \leq a_i \leq m_i)$ , and exactly $b_i(1 \leq b_i \leq m_i)$ as defined earlier, respectively
$l_{bi}, u_{bi}$	minimum and maximum of $b_i$ for $D_{ij}$
$l_{aj}, u_{aj}$	minimum and maximum of $a_j$ for $D_{ij}$
$d_i$	binary variable where $d_i=1$ if all the components in subsystem $i$ fail; otherwise, $d_i=0$
$w(b_i, a_j)$	$= b_i + a_j + n_{i+1,j-1} + d_{l_i} + d_{r_j}$

## 1. Introduction

A consecutive- $k$ -out-of- $n$ :F system consists of  $n$  linearly or circularly ordered components where the system fails if and only if at least  $k$  consecutive components fail. It was first investigated by Kontoleon [5]. One speciality of the system is its tolerance to the dispersive failures of components. Thus, when several components have already failed in the operation of the system, one important issue for asset management is to know whether the system will work reliably for an additional period of time. If not, then maintenance work should be conducted to meet the requirement of reliability. For example, railway sleepers can be treated as a consecutive- $k$ -out-of- $n$ :F system in view of their reliable operation. Usually, sleepers are inspected periodically in order to identify the defects for the purpose of reliable and safe operation. After the inspection, what an asset manager needs to do is evaluating the reliability of components within a period of time. Then, based on the analysis of reliability one can make a choice between an immediate intervention and a deferred one.

In the area of consecutive  $k$ -out-of- $n$ :F systems, comprehensive studies have been done on the reliability of the system (e.g. ref [1~9]). These include the subjects such as exact reliability models, approximate evaluation and bounds, lifetime distribution and statistic characteristics, importance of components, optimization of systems and maintenance [1]. However, not much work has been done in the analysis of a consecutive  $k$ -out-of- $n$ :F system under the condition of several failed components being identified in it.

In this paper, we study the reliability of consecutive  $k$  out of  $n$ :F systems with several failed components. A model is developed based on the analysis of reliability of subsystems. In addition, an approximate model is also presented for the case that the reliability of components is high. Finally, an example is given to illustrate the operation of the proposed model.

## 2. Development of reliability model

Consider a linear consecutive  $k$  out of  $n$ :F system, which consists of  $n$  linearly arranged components. The system fails if and only if at least  $k$  consecutive components fail in it. A component may either be good (working) or failed (defective), and failures of components are distributed identically and independently. Suppose at time  $t$ , the system works and there are several failed components in it. The failures of components can be identified as soon as they occur. In this situation, the system can be divided into a number of subsystems by failed components, as shown in figure 1. Each subsystem contains at least one functional component in the middle, and has a number of consecutively defective components at its one or two ends. The subsystem is denoted as  $C(m, l, r, k)$ , and the consecutive defective components are referred to as left and right bounds of the subsystem. It should be noted that the bound between two adjacent subsystems belongs to both of the two subsystems.

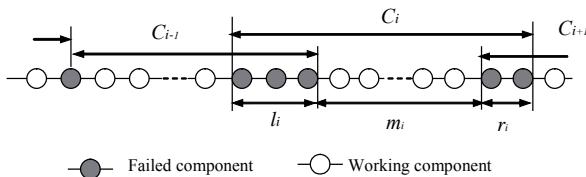


Fig. 1. Illustration of division of subsystems

The problem here is to evaluate the system reliability at time  $t+\tau$ . In the following sections, the reliability of a subsystem will be modelled first; and then an analysis is done in system reliability; at last, a discussion is given for a special case.

### 2.1. Reliability of a subsystem

Consider the  $i$ th subsystem  $C(m_p, l_p, r_p, k)$  in the system. The subsystem fails if and only if at least  $k$  consecutive components fail in it. Obviously, if  $n_{i,i} < k$ , the subsystem will never fail. In the case that there is no failed component at its two ends, i.e.  $l_p=0$ ,  $r_p=0$ , the number of ways of component failures for the event  $A_j(0,0)$  is  $H(j, m_p - j + 1, k - 1)$  [2]. If writing  $x = m_p - j + 1$ , then we can calculate  $H(j, x, z)$  recursively from  $z=1$  to  $z=k-1$ . That is:

$$H(j, x, 1) = \begin{cases} \binom{x}{j}, & 0 \leq j \leq x \\ 0, & j > x \text{ or } j < 0 \end{cases} \quad (1a)$$

$$H(j, x, z) = \sum_{i=0}^x \binom{x}{i} H(j - zi, x - i, z - 1), \quad z \geq 2 \quad (1b)$$

where  $\binom{x}{j} = 1$ , for  $x=0$ .

It should be noted that we add a limitation to the original definition of  $H(j, x, 1)$  [2] in that when  $j < 0$  it equals zero. This is necessary to enable the recursive calculation for all possible values of parameters  $j$ ,  $x$  and  $z$ . For example, to obtain  $H(2, 3, 2)$  from equation (1b),  $H(-2, 1, 1)$  (for  $i=2$ ) and  $H(-4, 0, 1)$  (for  $i=3$ ) are needed.

Hence, the probability of the event  $A_j(0,0)$  is

$$\Pr\{A_j(0,0)\} = H(j, m_p - j + 1, k - 1) p^{m_p - j} q^j \quad (2)$$

If there are  $l_p$  and  $r_p$  ( $l_p, r_p > 0$ ) failed components at its left and right end respectively, the number of ways in the event  $A_j(l_p, r_p)$  will be less than that of  $A_j(0,0)$ . The difference is caused by the event  $B_j(l_p, r_p)$ . It can be seen that

$$B_j(l_p, r_p) = B_j(l_p, 0) \bigcup B_j(0, r_p) \quad (3)$$

Thus, we can first consider  $B_j(l_p, 0)$  and  $B_j(0, r_p)$  separately. For the case that the total number of components in  $C(m_p, l_p, 0, k)$  is less than  $k$ ,  $B_j(l_p, 0)$  will not occur. That is,

$$\Pr\{B_j(l_p, 0)\} = 0 \text{ for } m_p + l_p < k \quad (4a)$$

Otherwise for the case of  $m_p + l_p \geq k$ , when  $B_j(l_p, 0)$  happens, the possible number of consecutive components,  $i_p$ , failing during  $[t, t+\tau]$  next to the left bound will satisfy  $k - l_p \leq i_p \leq r_p$ . For any  $i_p$  meeting this condition, since the one adjacent to the rightmost component in the left bound is functional, the possible ways for  $B_j(l_p, 0)$  to occur is that the rest  $j - i_p$  ( $j - i_p > 0$ ) failed components lie in the rest  $m_p - i_p - 1$  ( $m_p - i_p - 1 > 0$ ) positions with no more than  $k$  consecutively defective components in the subsystem. Therefore,

$$\Pr\{B_j(l_p, 0)\} = \sum_{i_p=k-l_p}^{r_p} H(j - i_p, m_p - j, k - 1) p^{m_p - j} q^j \quad (4b)$$

$$\text{for } m_p + l_p \geq k$$

If  $j = i_p$ , then  $j < k$  as  $i_p < k$ . Thus,  $B_j(l_p, 0)$  will occur with probability  $q^j$ . When  $m_p - i_p - 1 < 0$ , i.e.  $i_p = m_p$ , then  $j = i_p = m_p$  as  $j \geq i_p$ , and then  $B_j(l_p, 0)$  will happen with probability  $q^{m_p}$ . When  $j > i_p$  and  $m_p - i_p - 1 = 0$ , then  $j = m_p$ . In this case, if  $m_p < k$ ,  $B_j(l_p, 0)$  will occur with probability  $q^j$ ; and if  $m_p = k$ , the probability of  $B_j(l_p, 0)$  is zero. By

examining the above three scenarios, it can be seen that Eq.(4b) is still valid for the cases of  $j-i_r=0$  and  $m_i-i_r-1\leq 0$ .

For the event  $B_j(0, r_i)$ , there could be  $i_r(k-r_i \leq j \leq u_i)$  consecutive components next to the right end failing during  $[t, t+\tau]$ . Similar to the analysis for the event  $B_j(l_i, 0)$ , we have

$$\Pr(B_j(0, r_i)) = \sum_{i_r=k-n_i}^{v_i} H(j-i_r, m_i - j, k-1) p^{m_i-j} q^j$$

for  $m_i + r_i \geq k$  (5a)

$$\Pr\{B_j(0, r_i)\} = 0 \quad \text{for } m_i + r_i < k \quad (5b)$$

From the definition of  $A_j(l_i, r_i)$  and  $B_j(l_i, r_i)$ , it follows that

$$\Pr\{A_j(l_i, r_i)\} = \Pr\{A_j(0, 0)\} - \Pr\{B_j(l_i, 0) \cap B_j(0, r_i)\} \quad (6)$$

Then we can deduce that

$$\begin{aligned} \Pr\{A_j(l_i, r_i)\} &= \Pr\{A_j(0, 0)\} - [\Pr\{B_j(l_i, 0)\} + \Pr\{B_j(0, r_i)\}] \\ &\quad - \Pr\{B_j(l_i, 0) \cap B_j(0, r_i)\} \end{aligned} \quad (7)$$

The possible ways of  $B_j(l_i, 0) \cap B_j(0, r_i)$  include that in the interval  $[t, t+\tau]$ , the rightmost and the leftmost one of the  $m_i-i_r$  components in the middle of the subsystem are functional and the rest  $j-i_r$  failed components occupy the rest  $m_i-i_r-2$  positions with no more than  $k$  ones lying consecutively. Therefore, we have

$$\begin{aligned} \Pr\{B_j(l_i, 0) \cap B_j(0, r_i)\} &= \\ &= \sum_{i_r=k-l_i}^{v_i} \sum_{i_r=k-n_i}^{v_i} H(j-i_r-i_r, m_i - j - 1, k - 1) p^{m_i-j} q^j \\ &\quad \text{for } m_i + l_i + r_i > 2k \end{aligned} \quad (8a)$$

$$\Pr\{B_j(l_i, 0) \cap B_j(0, r_i)\} = 0 \quad \text{for } m_i + l_i + r_i \leq 2k \quad (8b)$$

It is noted that the case  $j=m_i$  will not be considered for the event  $B_j(l_i, 0) \cap B_j(0, r_i)$ . This is because if  $m_i < k$  then the case has been considered in  $B_j(l_i, 0)$  or  $B_j(0, r_i)$ ; if  $m_i \geq k$ , then  $C(m_i, 0, k)$  fails for  $j=m_i$  and the event is impossible to happen.

From Eqs. (2)-(8), the reliability of the subsystem is given by

$$\begin{aligned} R(m_i, l_i, r_i, k) &= \sum_{j=0}^{m_i} \Pr\{A_j(l_i, r_i)\} \\ &= \sum_{j=0}^{m_i} [\Pr\{A_j(0, 0)\} - \Pr\{B_j(l_i, 0)\} - \Pr\{B_j(0, r_i)\}] \\ &\quad + \sum_{j=0}^{m_i-1} \Pr\{B_j(l_i, 0) \cap B_j(0, r_i)\} \end{aligned} \quad (9)$$

From the previous definitions of  $p$  and  $q$ , we know that they are conditional probabilities and can be given by

$$p = r(t+\tau)/r(t) \quad (10)$$

$$q = [r(t) - r(t+\tau)]/r(t) \quad (11)$$

## 2.2. System reliability

Although all the subsystems work, the system may fail. This can be seen by simply considering the  $i$ th and  $(i+1)$ th subsystems where  $b_i$  ( $b_i \geq 1$ ) additional consecutive components fail adjacent to the right end of the  $i$ th subsystem and  $a_{i+1}$  ( $a_{i+1} \geq 1$ ) additional consecutive components fail adjacent to the left bound of the  $(i+1)$ th subsystem within  $[t, t+\tau]$ . As shown in fig.2(a), when

the two subsystems work, at the same time the whole system could be down if  $b_i+r_i+a_{i+1} \geq k$ . A more complex case is that the event  $D_{ij}$  may happen when  $n_{i+1,j-1} \leq k-2$ , as shown in fig.2(b).

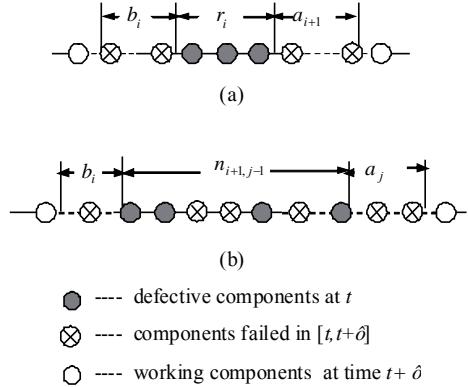


Fig. 2. Scenarios for the occurrence of event  $D_{ij}$

Consider a system consisting of  $s$  subsystems. If the reliabilities of subsystems are considered separately, then  $\bigcap_{i=1}^s E_i$  gives the event of system being reliable. The difference between  $E_{sys}$  and  $\bigcap_{i=1}^s E_i$  is the sum of all  $D_{ij}$ . That is

$$E_{sys} = \bigcap_{i=1}^s E_i - \bigcup_{(i,j) \in \psi} D_{i,j} \quad (13)$$

where  $\psi$  denotes the set of pairs  $(i, j)$  for which  $D_{ij}$  is a possible event.

Hence,

$$\Pr(E_{sys}) = \Pr\{\bigcap_{i=1}^s E_i\} - \Pr\{\bigcup_{(i,j) \in \psi} D_{i,j}\} \quad (14)$$

From the previous definitions of events, it follows that

$$\Pr\{E_i\} = R(m_i, l_i, r_i, k) \quad (15)$$

$$\Pr\{E_{sys}\} = R_{SL}(t, k | t) \quad (16)$$

From the assumption of independent components, it follows that  $E_i$  and  $E_j$  ( $i \neq j$ ) are independent. Therefore,

$$\Pr\{\bigcap_{i=1}^s E_i\} = \prod_{i=1}^s \Pr\{E_i\} \quad (17)$$

Substituting (15)~(17) into (14) yields

$$R_{SL}(\tau, k | t) = \prod_{i=1}^s R(m_i, l_i, r_i, k) - \Pr\{\bigcup_{(i,j) \in \psi} D_{i,j}\} \quad (18)$$

where

$$\begin{aligned} \Pr\{\bigcup_{(i,j) \in \psi} D_{i,j}\} &= \sum_{(i,j) \in \psi} \Pr\{D_{i,j}\} - \\ &\quad - \sum_{\substack{i < x, (i,j) \subset \psi \\ (x,y) \subset \psi}} \Pr\{D_{i,j} \cap D_{x,y}\} + \dots + (-1)^{z+1} \Pr\{\bigcap_{(i,j) \subset \psi} D_{i,j}\} \end{aligned} \quad (19)$$

Since the reliability of a subsystem can be evaluated using Eq. (9), then a focus is given on the calculation of  $\Pr\{\bigcup_{(i,j) \subset \psi} D_{i,j}\}$ .

**A. Calculation of  $\Pr\{D_{ij}\}$** 

Consider the subsystems in assembly  $S_{ij}$ , where  $(i,j) \in \psi$ , and at time  $t+\tau$  there are exactly  $b_i$  and at least  $a_j$  consecutive components failing to the right bound of the  $i$ th subsystem and the left of the  $j$ th subsystem respectively.

For the  $i$ th subsystem, the component adjacent to the  $b_i$  failed ones in the left should be working with probability  $p$ , if  $b_i \leq m_i - 1$ . Thus, these  $b_i + 1$  components have no effect on the subsystem reliability if  $b_i + r_i \leq k - 1$ . Consequently, the subsystem is equivalent to that of  $C(m_i - b_i - 1, l_i, 0, k)$  with respect to reliability, i.e.

$$R_r(b_i) = pR(m_i - b_i - 1, l_i, 0, k) \\ \text{for } b_i \leq \min(k - r_i - 1, m_i - 1) \quad (20a)$$

If  $n_{ij} < k$ , the  $i$ th subsystem will never fail. Hence,

$$R_r(b_i) = 1 \text{ for } b_i = m_i \text{ and } n_{ij} < k \quad (20b)$$

Similarly, the reliability of the  $j$ th subsystem is equivalent to  $C(m_j - a_j, l_j + a_j, r_j, k)$ . Therefore

$$R_l(a_j) = R(m_j - a_j, l_j + a_j, r_j, k) \quad (21)$$

For the  $x$ th subsystem in  $S_{i,j}^0$ , since  $n_{xx}$  must be less than  $k$  in order for  $D_{ij}$  to occur, then its reliability will be 100%. In addition, all the components in it will fail at time  $t+\tau$ , and the total number of components failing during  $[t, t+\tau]$  in the subsystem is:  $b_i + a_j + \sum_{x=i+1}^{j-1} m_x$ .

Denote  $\xi_{ij}$  as the set of pairs  $(b_i, a_j)$ , where  $(i, j) \in \psi$  and  $b_i, a_j$  satisfy

$$w(b_i, a_j) = k \text{ for } b_i < m_i \text{ or } a_j < m_j \quad (22a)$$

$$w(b_i, a_j) \geq k \text{ for } b_i = m_i \text{ and } a_j = m_j \quad (22b)$$

$$1 \leq b_i \leq \min(k - r_i - 1, m_i) \quad (22c)$$

It is seen that  $\xi_{ij}$  provides all the minimum of  $a_j$  given each  $b_i$  in order for  $D_{ij}$  to occur. Then,  $\Pr\{D_{ij}\}$  can be expressed as:

$$\Pr\{D_{ij}\} = \sum_{(b_i, a_j) \in \xi_{ij}} R_r(b_i) R_l(a_j) q^{b_i + a_j + \sum_{x=i+1}^{j-1} m_x} \prod_{x \notin S_{i,j}} R_x \quad (23)$$

where  $R_x$  is the reliability of the  $x$ th subsystem, i.e.,

$$R_x = R(m_x, l_x, r_x, k) \quad (24)$$

It is noted that using exactly  $b_i$  consecutively defective components in the analysis is to avoid duplicate count of the events.

**B. Probability of the intersection of a number of D events**

First, we consider the probability of  $D_{i,j} \cap D_{x,y}$  ( $i \leq x$ ). There are four cases in terms of the relationship between assemblies  $S_{ij}$  and  $S_{xy}$ , as illustrated in figure 3.

- (1)  $S_{i,j} \cap S_{x,y} = \emptyset$ . Since  $D_{i,j} \cap D_{x,y}$  means that there are at least  $k$  components failing in  $S_{ij}$  and  $S_{xy}$ , but all the subsystems in the system are working and because the assemblies  $S_{ij}$  and  $S_{xy}$  are independent, then

$$\Pr\{D_{i,j} \cap D_{x,y}\} = f_{i,j} f_{x,y} \prod_{z \notin S_{i,j}, S_{x,y}} R_z \quad (25a)$$

where

$$f_{i,j} = \sum_{(b_i, a_i) \in \xi_{i,j}} R_r(b_i) R_l(a_i) q^{b_i + a_i + \sum_{x=i+1}^{j-1} m_x}$$

which is given similarly to the derivation for Eq. (23).

- (2)  $j \in S_{x,y}^0$  and  $x \in S_{i,j}^0$ . In this case, all the components involved in  $S_{ij}$  and  $S_{xy}$  except subsystems  $i$  and  $y$  will fail at time  $t+\tau$ . Thus, the probability of the intersection depends only on the  $i$ th and the  $y$ th subsystems, then

$$\Pr\{D_{i,j} \cap D_{x,y}\} = R_r(b_i) R_l(a_y) q^{b_i + a_y + \sum_{z=i+1}^{y-1} m_z} \prod_{z \notin S_{i,j}, S_{x,y}} R_z \quad (25b)$$

where  $b_i, a_y$  can be determined using conditions (22a), (22b) and (22c) for pairs  $(b_i, a_j)$  and  $(b_x, a_y)$  respectively given  $a_j = m_j$  and  $b_x = m_x$ .

- (3)  $j \in S_{x,y}^0$  and  $i=x$ . Since range of  $b_i$  for the intersection of  $D_{ij}$  and  $D_{xy}$  will be  $\max(l_{bi}, l_{bx}) \leq b_i \leq \min(u_{bi}, u_{bx})$ , then

$$\Pr\{D_{i,j} \cap D_{x,y}\} = \sum_{\substack{b_i = \max(l_{bi}, l_{bx}) \\ b_i = \min(u_{bi}, u_{bx})}}^{m_{bi}, m_{bx}} R_r(b_i) R_l(a_y) q^{b_i + a_y + \sum_{x=i+1}^{y-1} m_x} \prod_{x \notin S_{i,j}, S_{x,y}} R_x \quad (25c)$$

- (4)  $S_{i,j} \cap S_{x,y} = j = x$ . A focus is given on the subsystems  $i, j$  or  $x$ , and  $y$ , as the reliabilities of all the other subsystems involved in  $S_{ij}$  and  $S_{xy}$  equal to 1. In addition, since  $j = x$ , then  $a_j + b_j \leq m_j$ . Similar to the previous analysis,

$$\Pr\{D_{i,j} \cap D_{x,y}\} = \sum_{\substack{(b_i, a_j) \in \xi_{i,j} \\ a_j + b_j \leq m_j}} R_r(b_i) \\ R_j(a_j, b_j) R_l(a_y) q^{b_i + a_j + a_y + \sum_{z=j+1}^{y-1} m_z} \prod_{z \notin S_{i,j}, S_{x,y}} R_z \quad (25d)$$

where  $R_j(a_j, b_j)$  is obtained in a way similar to the derivation of Eq.(20a), i.e.,

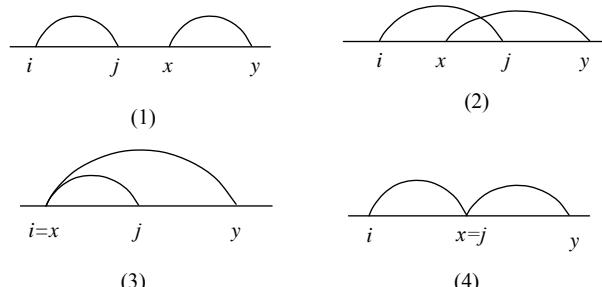


Fig. 3. Illustration of possible relationships between  $S_{ij}$  and  $S_{xy}$

$$R_j(a_j, b_j) = pR(m_j - a_j - b_j - 1, l_j + a_j, 0, k) \quad \text{for } a_j + b_j < m_j \quad (26a)$$

$$R_j(a_j, b_j) = 1 \quad \text{for } a_j + b_j = m_j, \text{ and } n_{i,i} < k \quad (26b)$$

Now, based on the above analysis, a general situation is considered for the intersection of any number of  $D$  events, i.e.,  $D_{i_1, j_1} \cap D_{i_2, j_2} \cdots \cap D_{i_z, j_z}$ . If  $S_{i_x, j_x} \cap S_{i_y, j_y} \neq \emptyset$ , we say that the two events are connected. Hence, the subsystems involved can be partitioned into a number of disjoint sets,  $V_i$  ( $i=1, 2, \dots, z_d$ ), where each subsystem in a set must connect with at least one other subsystem in the set, or there is only one subsystem in the set which doesn't connect with any other subsystems involved in the intersection, as illustrated in fig. 4.

Denote  $J_i$  as the set of the subsystems  $j$  involved in  $V_i$ , where  $S_{i_x, j_x} \cap S_{i_y, j_y} = j = j_x = i_y$  and  $j \notin S_{i_n, j_n}^0$  ( $n=1, 2, \dots$ ), and including the first and last subsystems of  $V_i$ . From the previous analysis, the probability of the intersection of these  $D_{i,j}$  events depends only on the subsystems in  $J_i$ . For example, in fig. 4,  $n_4 \in J_i$ , and then a focus should be given on subsystems  $n_1, n_4$  and  $n_8$ . For any of such subsystem, say  $x$ , suppose it belongs to  $S_{i_n, j_n}$  ( $n=1, 2, \dots$ ), where  $x=i_n$  or  $x=j_n$ .

Denote  $\theta_x$  as the set of pairs  $(a_x, b_x)$  for subsystem  $x$  where  $x \in J_i$  such that  $(b_x, a_{j_n}) \in S_{i_n, j_n}$ ,  $(b_{j_m}, a_x) \in S_{i_m, j_m}$ , and  $l_{a_{\max}} \leq a_x \leq u_{a_{\max}}, l_{b_{\max}} \leq b_x \leq u_{b_{\max}}, b_x + a_x \leq m_x$  where  $l_{a_{\max}} = \max(l_{a_n}), u_{a_{\max}} = \min(u_{a_n}),$  and  $l_{b_{\max}} = \max(l_{b_m}), u_{b_{\max}} = \min(u_{b_m})$ . Similar to the analysis for  $D_{i,j} \cap D_{x,y}$  (case (4) discussed earlier), it can be seen that  $\theta_x$  gives all the possible values of pairs  $(a_x, b_x)$ . If letting  $g_i$  denote the probability of the intersection of these  $D$  events involved in  $V_i$ , then

$$g_i = \sum_{(b_1, a_1) \in \theta_1} R_i(b_1) \left\{ \prod_{x=2}^{h-1} \sum_{(a_x, b_x) \in \theta_x} R_x(a_x, b_x) R_r(a_h) q^{\sum_{j=1}^{h-1} (a_j + b_j) + \sum_{j=h+1}^{m_x}} \right\} \quad (27)$$

where  $a_1=0$  and  $h$  is the number of subsystems in  $J_i$

Let  $V_s = \bigcup_{i=1}^{z_d} V_i$ , and similar to the derivation of Eq.(25a) we have

$$P(D_{i_1, j_1} \cap D_{i_2, j_2} \cdots \cap D_{i_z, j_z}) = \prod_{i=1}^{z_d} g_i \prod_{y \notin V_s} R_y \quad (28)$$

Hence, the probability of the intersection of a number of  $D$  events can be calculated from Eqs. (27) and (28), and then system reliability can be evaluated using Eq.(18), and Eq.(19).

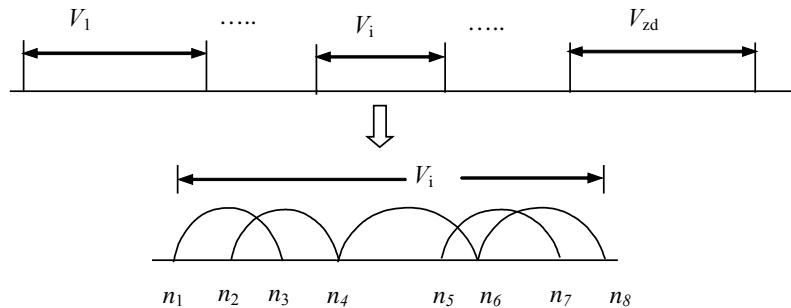


Fig. 4. Partition of subsystems for the intersection of several  $D$  events

Since the reliability of a subsystem or a component is never greater than 1, it follows from Eq.(27) and Eq.(28) that the probability of intersection of  $D$  events has the form of  $\lambda_1 q^{a_1} + \lambda_2 q^{a_2} + \dots$ , where  $\lambda_1 \leq 1, \lambda_2 \leq 1, \dots$ . If the allowed error of the analysis is set at  $\varepsilon$ , and let  $n_e$  be the number of items with magnitude order higher than  $q^\varepsilon$ , then

$$\varepsilon \leq n_e q^\varepsilon \quad (29a)$$

or

$$e \geq \frac{\ln(\varepsilon / n_e)}{\ln q} \quad (29b)$$

Thereby, all the items with  $O(q^\varepsilon)$  can be neglected to guarantee the maximum error of  $\varepsilon$ .

### 3. Example

A linear consecutive 6 out of 24 system is considered. At time  $t_0$ , 7 defective components have been identified by inspection with sequence numbers of 5, 8, 12, 13, 19, 20 and 21. The conditional reliability of component at  $t_0 + \tau$  is  $p=0.9$ . Then, the system reliability can be predicted using the proposed model.

In this case, the system can be partitioned by defective components into 5 subsystems, and their parameters are shown in table 1.

Tab. 1. Parameters and reliabilities of subsystems

Subsystem No	$m$	$I$	$r$	$R$
1	4	0	1	1.0
2	2	1	1	1.0
3	2	1	2	1.0
4	6	2	3	0.998901
5	3	3	0	0.999

Tab. 2. Parameters and probabilities of  $D$  events

$D_{ij}$	$(b_i, a_j) \in S_{i,j}$	$Pr\{D_{ij}\}$
$D_{1,2}$	(2,2), (4,1)	$1.09 \times 10^{-4}$
$D_{1,3}$	(1,1)	$9.98 \times 10^{-5}$
$D_{2,3}$	(1,2), (2,2)	$9.98 \times 10^{-4}$
$D_{3,4}$	(1,3), (2,1)	$1.078 \times 10^{-3}$
$D_{4,5}$	(1,2), (2,1)	$1.701 \times 10^{-3}$

The reliabilities of subsystems with defective boundary components are calculated using Eq. (9), as shown in table 1.

Then, an analysis of the intersection of the  $D$  events is conducted. For all the  $D$  events,  $(b_i, a_j)$  values can be obtained according to conditions (22a), (22b) and (22c), as shown in table 2. Thereby,  $\Pr\{D_{i,j}\}$  can be calculated using Eq.(23). Taking  $D_{3,4}$  as an example, we have

$$\Pr(D_{3,4}) = \{R_3(0,2)R_4(1,0)q^3 + R_3(0,1)R_4(3,0)q^4\}R_1R_2R_5$$

Since  $R_1 = R_2 = R_3 = 1$ ,  $R_5 = 0.999$ ,  $R_3(0,2) = 1$ ,  $R_3(0,1) = 0.9$ ,  $R_4(1,0) = 0.998001$  and  $R_4(3,0) = 0.9$ , then it follows that,  $\Pr(D_{3,4}) = 1.078 \times 10^{-5}$ .

As an example of intersection of two  $D$  events,  $\Pr(D_{2,3} \cap D_{3,4})$  can be obtained using Eq. (25d) by

$$\begin{aligned} \Pr(D_{2,3} \cap D_{3,4}) &= \sum_{b_2=1}^2 R_2(0, b_2) R_4(1,0) q^{b_2+3} R_5 \\ &= R_4(1,0)(pq^4 + q^5)R_5 = 9.97 \times 10^{-5} \end{aligned}$$

Finally, the system reliability is obtained using the proposed approach, i.e.

$$R_{SL}(\tau, k | t) = 0.99404$$

## 5. References

1. Chao MT, Fu JC and Koutras MV. Survey of reliability studies of consecutive-k-out-of-n:F & related systems. IEEE T-Rel. R-44, 1995: 120-127.
2. Derman C. On the consecutive -k-out -of -n:F system. IEEE T-Rel. R-31, 1982: 57-63.
3. Dudewicz, E J. Introduction to Statistics and Probability. Holt, Rinehart and Winston. 1976. New York.
4. Flynn J, Chung C. A heuristic algorithm for determining replacement policies in consecutive k-out-of-n systems, Computers & Operations Research, 2004; 31(8): 1335-1348.
5. Kontoleon JM. Optimum allocation of components in a special 2-port network. IEEE T-Rel. R-27, 1978: 112-115.
6. Kuo W, Zuo M J. Optimal reliability modeling: principles and applications. John Wiley and Sons. New York, 2003.
7. Lambiris M and Papastavridis S. Exact reliability formulas for linear & circular consecutive-k-out-of-n: F system. IEEE T-Rel. R-34, 1985: 124-126.
8. Xiao D, Li Z and Li T. Ependability estimation for non-Markov consecutive-k-out-of-n: F repairable systems by fast simulation. Reliability Engineering & System Safety, 2007; 92(3): 293-299.
9. Zhao J., Chan AHC, Burrow MP. Reliability Analysis and Maintenance Decision for Railway Sleepers using track condition information. Journal of Operational Research Society, 2007; 8: 1047-1055.

In fact, in this example, the probabilities of  $D_{1,2} \cap D_{1,3}$ ,  $D_{3,4} \cap D_{4,5}$  and all the intersection of more than two  $D$  events have orders of magnitude higher than  $q^6$ . The number of these items is:  $2 + \binom{3}{2} + \binom{4}{3} + \binom{5}{4} = 18$ . If neglecting all these items, then the system reliability is estimated at 0.99403, and using Eq.(29a) the error is:  $\varepsilon \leq 18 \times q^6 = 1.8 \times 10^{-5}$ .

## 4. Concluding remarks

This paper analyses the reliability of consecutive  $k$  out  $n$ : F systems with several failed components. The system reliability is modelled through analysing the relationship between the system and subsystems. The approach is valid for both linear and circular systems. To analyse the system reliability using the proposed model, considerable effort is needed to calculate the probabilities of the intersections of  $D$  event. However, the amount of the work can be reduced by neglecting the higher order terms.

As a further work of the study, the authors intend to apply the model to analyse a section of railway sleepers which form a consecutive  $k$  out of  $n$  system with respect to reliability.

---

### Prof. Jianmin ZHAO

Department of Management  
Mechanical Engineering College  
Shijiazhuang, 050003, P R China  
Email: jm\_zhao@hotmail.com

### Prof. Ming J. ZUO

Department of Mechanical Engineering  
University of Alberta, Alberta  
T6G 2G8, Canada  
Email: Ming.zuo@alberta.ca

---

# PRÓBA ADAPTACJI SZEREGOWYCH STRUKTUR NIEZAWODNOŚCIOWYCH DO ANALIZY I OCENY RYZYKA SYSTEMÓW PRODUKCYJNYCH

## AN ATTEMPT TO ADAPT SERIAL RELIABILITY STRUCTURES FOR THE NEEDS OF ANALYSES AND ASSESSMENTS OF THE RISK IN PRODUCTION SYSTEMS

Rzyko towarzyszy każdej działalności gospodarczej. Wielkość zakłóceń przebiegu procesu produkcyjnego, spowodowanych występowaniem czynników ryzyka, bardzo mocno wpływa na parametry i całkowite wyniki systemów produkcyjnych. Niestety bardzo rzadko dokonuje się analizy i oceny ryzyka procesu produkcyjnego na poziomie operacyjnym. Być może spowodowane jest to niezbyt przydatnymi w rzeczywistości produkcyjnej metodami ilościowymi proponowanymi przez literaturę. W odpowiedzi na ten stan rzeczy w pracy zdefiniowano system produkcyjny zgodnie z teorią systemów, natomiast ryzyko jako synonim zawodności. Artykuł prezentuje metodę wyznaczania ryzyka dla systemu produkcyjnego o strukturze szeregowej, która została zweryfikowana na przykładzie praktycznym

**Slowa kluczowe:** ryzyko, system produkcyjny, niezawodność, struktura niezawodnościowa.

*Each business activity is accompanied by a risk. The extent of the production process disturbances caused by the presence of risk factors strongly affects the parameters and overall performance of production systems. Unfortunately, analyses and assessments of the risk in production processes are carried out very rarely at the operational level. This may be caused by the fact that quantitative methods proposed by the literature are not very useful in production practice. In response to this state of affairs, the concept of production system was defined in this study in accordance with the theory of systems, while the risk was treated as a synonym of unreliability. This paper presents a method of determining the risk for a production system with a serial structure, which was verified on a practical example.*

**Keywords:** risk, production system, reliability, reliability structure.

### 1. Charakterystyka pojęcia ryzyka i metody jego oceny

Wieloznaczość pojęcia oraz brak sprecyzowanej definicji spowodowała, iż w literaturze spotkać można różne podejścia do tematu ryzyka. Najbardziej rozpowszechnionymi podejściami są: podejście niemieckie, amerykańskie i badawcze. Podejście niemieckie ogranicza treść pojęcia ryzyka do osiągnięcia negatywnego skutku w wyniku podjętej decyzji, podejście amerykańskie traktuje ryzyko nie tylko w kategorii możliwości poniesienia straty, ale również osiągnięcia zysku [7], natomiast podejście badawcze definiuje ryzyko jako „(...) sytuację, w której przyszłych warunków gospodarowania nie można przewidzieć z całą pewnością, znany jest natomiast rozkład prawdopodobieństwa wystąpienia tych warunków” [1].

Chcąc dokonać klasyfikacji ryzyka można posłużyć się wieloma kryteriami [4]. Analizując sposoby klasyfikacji ryzyka prezentowane w literaturze można stwierdzić, że ich mnogość wynika z wielości dziedzin, w których występuje pojęcie ryzyka oraz z odmiennego sposobu jego traktowania - jako rozbieżności pomiędzy rzeczywistością a założeniami lub jako relacją między odpowiedzialnością a skutkiem

W literaturze można spotkać wiele podejść jak również wiele metod analizy i oceny ryzyka w przedsiębiorstwie. Autorzy publikacji [1, 4, 8, 12] różnie klasyfikują i nazwывают poszczególne metody jednak najczęściej wymieniane są dwie klasy metod:

1. Klasa metod opisowych, pozwalająca na poznanie natury występującego ryzyka w organizacji.

### 1. Characteristics of the concept of risk and the methods of risk assessment

The ambiguity of this concept and the lack of a precise definition resulted in different approaches to the subject of risk in the literature. The most common approaches include: the German approach, American approach, and research approach. The German approach limits the content of the concept of risk to achievement of a negative effect as a result of the decision taken, the American approach treats the risk not only in the category of possible loss, but also a profit [7], while the research approach defines risk as “ (...) a situation in which future economic conditions cannot be predicted with full certainty, but the distribution of probability of occurrence of these conditions is known” [1].

In order to classify the risk, many criteria can be used [4]. When analysing the risk classification methods presented in literature, it can be found that their multitude is caused by the multiplicity of areas, in which the concept of risk occurs, and from a different way of treating it - as a divergence between the reality and assumptions, or as a relationship between the responsibility and effect.

In the literature, there are many approaches as well as many methods of analysis and assessment of the risk in an enterprise. Authors of the publications [1, 4, 8, 12] classify and name individual methods differently, however two classes of methods are mentioned most frequently:

1. The class of descriptive methods, which allows identifying the nature of the risk occurring in the organization.

2. Klasa metod mierzalnych (ilościowych), pozwalająca na oszacowanie wielkości ryzyka.

Ponieważ zarządzanie procesem produkcyjnym ma charakter operacyjny, a sterowanie nim wymaga wykorzystywania szczegółowych danych liczbowych na temat jego przebiegu, do oceny ryzyka systemów produkcyjnych można wykorzystać jedynie klasę metod ilościowych. Do klasy metod ilościowych zalicza się grupy metod badań operacyjnych, statystycznych, strategicznych i finansowych.

Z uwagi na to iż procesy produkcyjne charakteryzują się dużą zmiennością i dynamiką najczęściej analizuje się je na poziomie operacyjnym i taktycznym. Stąd grupa strategicznych metod oceny ryzyka wydaje się nieprzydatna. Podobnie nie przydatne wydają się grupy metod finansowych, gdyż specyfika produkcji wymaga odmiennego podejścia do ryzyka. W finansach większe ryzyko inwestycji wiąże się zazwyczaj z możliwością uzyskania większych zysków. Z powodu ograniczeń technicznych i technologicznych, w obszarze produkcji nie można spodziewać się efektów większych od możliwych do uzyskania przy danej technologii lub organizacji pracy [12]. Znacznie właściwszym wydaje się traktowanie ryzyka w kontekście prawdopodobieństwa niezrealizowanych celów produkcyjnych.

W celu oceny możliwości wykorzystania metod statystycznych i badań operacyjnych do wyznaczania wielkości ryzyka w systemach produkcyjnych, dokonano ich analizy i porównania. Kryteria porównawcze wybrane tak aby pokazać ich przydatność w rozwiązywaniu problemów praktycznych. Wyniki przedstawiono w tab. 1.

Po analizie metod proponowanych przez literaturę i przedstawionych w tabeli 1 można stwierdzić iż odnoszą się one do pojedynczych zagadnień, zakładając wystąpienie odpowiednich czynników i warunków oraz narzucając liczne ograniczenia. Dodatkowo aby ocenić ryzyko procesu produkcyjnego w jego rzeczywistym otoczeniu, należy zagadnienie tak uproszczyć, aby możliwe było zastosowanie metody. Biorąc pod uwagę złożoność dzisiejszych systemów produkcyjnych oraz oddziałujących na nie liczbę losowych czynników zewnętrznych, podejście to nie wydaje się właściwe, gdyż wyniki uzyskane z takiej analizy mogą być obarczone zbyt dużym błędem.

## 2. Związek niezawodności i ryzyka

Proponowane w literaturze metody wymagają dostosowania problemu do ich możliwości, ograniczeń i wymagań. Również klasyczne definicje ryzyka nie oddają w pełni specyfiki ryzyka produkcyjnego. Rozwiązaniem tych problemów może być przedstawienie systemu produkcyjnego w ujęciu teorii systemów i zastosowanie w ocenie ryzyka ogólnej teorii niezawodności.

W myśl teorii systemów [2] „*System jest pewną całością, w której współdziałają wyodrębnione części składowe. Funkcjonowanie systemu zależy od funkcji części składowych i związków między nimi. Powiązania części składowych określają strukturę systemu. O systemach mówimy tylko wtedy, gdy całość została zorganizowana i ma realizować określony cel rozłożony na podcele dla poszczególnych części.*” Części składowe nazywane są często komponentami, elementami, obiekktami, podsystemami lub członami. Każdy system można zdefiniować za pomocą modelu [11]. Z kolei teoria niezawodności to „dziedzina nauki stosowanej, zajmująca się badaniem

2. The class of measurable (quantitative) methods, which allows estimating the extent of the risk.

Since management of a production process is of operating character, and controlling it requires the use of detailed numeric data concerning its course, only the class of quantitative methods can be used for assessment of the risk in production systems. The class of quantitative methods includes the groups of operational, statistical, strategic and financial research methods.

Considering the fact that production processes are characterized by high variability and dynamics, they are generally analysed at operational and tactical levels. Hence, the group of strategic methods of risk assessment seems to be useless. Similarly, the groups of financial methods seem to be useless, because the specificity of production requires a different approach to the risk. In finances, a higher risk of investments is usually associated with the possibility of obtaining higher profits. Due to technical and technological constraints, in the area of production one cannot expect effects that are bigger than those achievable at a given technology or at a given work organization [12]. Treating the risk in the context of the probability of unachieved production targets seems to be more appropriate.

In order to assess the possibility of using statistical methods and operational researches to determine the extent of the risk in production systems, they were analysed and compared. Comparison criteria were selected to show their usability for solving practical problems. The results are shown in table 1.

After having analysed the methods proposed by the literature and presented in table 1, it can be stated that they relate to individual problems, assuming occurrence of relevant factors and conditions and imposing numerous restrictions. In addition, to evaluate the risk of a production process in its actual environment, the problem should be simplified so that it would be possible to apply a given method. Bearing in mind the complexity of today's production systems and the number of random external factors affecting them, this approach does not seem to be appropriate, since the results obtained from such an analysis may be burdened with a too large error.

## 2. Relation between the reliability and the risk

The methods proposed in the literature require that a problem is adapted to their capabilities, restrictions and requirements. Also classical definitions of risk do not fully reflect the peculiarity of the production risk. Presenting the production system in terms of the systems theory and applying the general reliability theory in risk evaluation may provide a solution to these problems.

According to the systems theory [2] “*A system is a certain entirety, in which separate components are interacting. The functioning of a system depends on the functions of components and relationships between them. Relationships between components determine the structure of the system. We say “systems” only then, when an entirety was organized and is to realize a specific goal divided into sub-goals for individual parts.*” Parts of a system are often called components, elements, objects, subsystems or members. Each system can be defined with the use of a model [11]. In turn, the theory of reliability is “a field of applied science dealing with studying and designing of ob-

Tab. 1. Porównanie metod ilościowych analizy i oceny ryzyka  
 Tab. 1. Comparison of quantitative methods of the risk analysis and assessment

METODA METHOD	ZNAJOMOŚĆ ROZKŁADU KNOWLEDGE OF DISTRIBUTION	LICZBA DANYCH WEJŚCIOWYCH NUMBER OF INPUT DATA	SEKWENCYJNOŚĆ SEQUENTIALITY	CZY METODA GRAFICZNA? GRAPHICAL METHOD?	SKOMPLIKO- WANOSC COMPLEXITY
<b>METODY STATYSTYCZNE / STATISTICAL METHODS</b>					
Analityczna / analytical	○	○	○	●	○
analizy prawdopodobieństwa analyses of probability	○	●	○	●	○
funkcji rozkładu normalnego normal distribution function	●	○	○	●	○
zmiennej standaryzowanej standardized variable	●	○	○	●	○
Bayesa / Bayes	○	●	○	○	●
analizy odchylenia standardowego (Fl) analysis of standard deviation (Fl)	○	●	○	○	○
analizy przyrostów analysis of increments	○	●	○	●	●
histogramów częstości frequency histograms	○	○	○	●	○
analizy korelacji correlation analysis	○	●	○	●	●
analizy wrażliwości sensitivity analysis	○	○	○	○	○
testu dla wartości średniej populacji test for the average population	●	○	○	●	●
<b>METODY BADAŃ OPERACYJNYCH / OPERATIONAL TEST METHODS</b>					
algorytm simpleks / simplex algorithm	○	●	●	○	●
drzewa decyzyjnego / decision tree	○	●	●	●	○
Monte Carlo	●	●	●	○	●
GERT	●	●	●	●	●
PERT	●	●	●	●	●
teorii kolejek / queuing theory	○	○	○	○	●
<b>LEGENDA / LEGEND</b>					
● - dużo / tak high / yes	● - średnio / trochę average / a little			○ - mało / nie low / no	

i projektowaniem obiektów (elementów, systemów) z punktu widzenia spełniania przez nie zadanych wymagań (w ciągu danego czasu, w określonych warunkach)" [10]. Przeniesienie użytych w definicji pojęć „obiekt”, „element”, „system” oraz „spełnienie wymagań” na grunt systemów produkcyjnych daje nowe możliwości w zastosowaniu teorii niezawodności do planowania i oceny ryzyka realizacji procesów produkcyjnych. Celem istnienia każdego systemu gospodarczego, w tym również produkcyjnego, jest spełnianie zadanych wymagań (celów, funkcji), a wówczas ryzyko systemu produkcyjnego można potraktować jako zawodność w „spełnieniu wymagań”, czyli odwrotność niezawodności.

Przeniesienie ogólnej teorii niezawodności na grunt systemów produkcyjnych może się odbyć poprzez potraktowanie zawodności ( $Z$ ) - przeciwnieństwa niezawodności - jako synonimu ryzyka ( $R$ ) [1]:

jects (components, systems) from the viewpoint of meeting the requirements set forth by these objects (during a given time, under specified conditions)" [10]. Transposition of the terms used in the definitions of concepts such as "object", "element", "system" and "meeting the requirements" to the sphere of production systems offers new possibilities for applying the reliability theory to the planning and assessing the risk of realization of production processes. The goal of existence of each economic system, including a production system, is to meet the set requirements (objectives, functions), and then the risk of a production system can be considered as a failure in "fulfilment of the requirements", i.e. the opposite of reliability.

Transposition of the general reliability theory to the sphere of the production systems can take place by treating unreliability ( $Z$ ) - the opposite of reliability - as a synonym of risk ( $R$ ) [1]:

$$R = Z \quad (1)$$

Tak zinterpretowane ryzyko (zawodność) systemu (np. produkcyjnego) będzie prawdopodobieństwem tego, że system nie będzie spełniał funkcji, dla których został zaprojektowany lub będzie oznaczać prawdopodobieństwo wystąpienia strat w tym systemie. Dla takiej interpretacji powinno być prawdziwe równanie:

$$N + Z = 1 \quad (2)$$

Równanie to oznacza, że prawdopodobieństwo tego, że system jest w stanie niezawodności lub zawodności wynosi 1. Wobec powyższego prawdziwe jest również:

$$N + R = 1 \quad (3)$$

a stąd

$$R = 1 - N \quad (4)$$

Analiza i ocena ryzyka pozwoli więc na określenie niezawodności funkcjonowania systemu i odwrotnie. Podejście niezawodnościowe w planowaniu i ocenie ryzyka, pomimo że daje więcej możliwości, to nie lokalizuje czynników ryzyka w systemie. Rozwiązaniem tego może być analiza struktury systemu produkcyjnego w kontekście jego struktury niezawodnościowej [3].

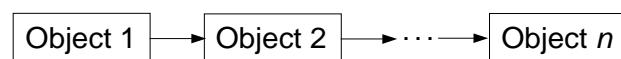
### 3. Struktura niezawodnościowa systemów

Na zawodność (ryzyko) lub na niezawodność systemu wpływa jego struktura, określająca związek stanu niezawodności systemu ze stanem niezawodności jego obiektów [1]. Analiza struktury niezawodnościowej systemu powinna być poprzedzona podziałem systemu na poszczególne części składowe – dekompozycja systemu, odzwierciedlające powiązania logiczne w systemie tak, aby poszczególne jego części były niezależne statystycznie i możliwie jak największe.

W niniejszym artykule zostanie zaprezentowana jedynie metoda wyznaczania wielkości ryzyka dla systemów produkcyjnych o strukturze szeregowej. Struktury równolegle zostały opisane m.in. w pracach [5, 6].

#### 3.1. Metoda wyznaczania wielkości ryzyka dla systemów o strukturze szeregowej

System ma strukturę szeregową (rys. 1), jeśli do jego działania wymagane jest działanie wszystkich obiektów/ podsystemów. Oznacza to, że system funkcjonuje poprawnie, jeśli wszystkie jego składowe również funkcjonują poprawnie, natomiast z chwilą uszkodzenia któregośkolwiek obiektu/ podsystemu uszkodzeniu ulega cały system [10]. W strukturze szeregowej sprzężenie dwóch obiektów/ podsystemów polega na przekształceniu wektora wyjścia jednego obiektu/ podsystemu na wektor wejścia drugiego obiektu/ podsystemu, jednak nie jest konieczne, aby wszystkie składowe wektora wyjściowego jednego systemu stały się składowymi wektora wejściowego drugiego systemu.



Rys. 1. Schemat struktury szeregowej systemu o n obszarach

Fig. 1. Diagram presenting a serial structure of a system with n areas

$$R = Z \quad (1)$$

So interpreted risk (unreliability) of a system (e.g. production system) will constitute a probability that the system will not perform the functions, for which it has been designed, or it will mean the probability of occurring losses in this system. For this interpretation, the following equation should be true:

$$N + Z = 1 \quad (2)$$

This equation means that the probability that the system is in the state of reliability or unreliability is 1. In the face of the above, the following is also true:

$$N + R = 1 \quad (3)$$

and hence

$$R = 1 - N \quad (4)$$

So the analysis and evaluation of the risk will allow determining the reliability of system functioning and vice versa. Despite the fact that the reliability approach in risk planning and evaluation offers more possibilities, it does not locate the risk factors in the system. Analysing the structure of a production system in the context of its reliability structure may be a solution to this problem [3].

### 3. Reliability structure of systems

The unreliability (risk) or the reliability of a system is affected by its structure, which determines the relationship between the state of system reliability and the state of reliability of its objects [1]. The analysis of the reliability structure of a system should be preceded by dividing the system into individual components - the system decomposition, which reflect logical connections in the system in such a way that its individual parts are statistically independent and possibly the biggest.

This paper will present only a method of determining the risk for production systems with a serial structure. Parallel structures are described, inter alia, in [5, 6].

#### 3.1. A method for determining the risk for systems with a serial structure

A system has a serial structure (fig. 1), if its operation requires the operation of all objects / subsystems. This means that the system is functioning correctly, if all its components are also functioning correctly, while upon a failure of any object / subsystem, the whole system fails [10]. In a serial structure, coupling two objects / subsystems consists in transformation of the output vector of one object / subsystem into the input vector of another object / subsystem, but it is not necessary that all components of the output vector of one system became the components of the input vector of another system.

Struktura szeregową jest najczęstszym rodzajem struktury w systemach i procesach produkcyjnych [9]. Przykładowo, uszkodzenie jednej maszyny w procesie wytwórczym powoduje nieprawidłowe funkcjonowanie lub brak funkcjonowania całego systemu produkcyjnego.

Przy tego typu układach niezawodność systemu jest iloczynem niezawodności jego obiektów, stąd wraz ze wzrostem liczby obiektów w systemie jego niezawodność maleje. Niezawodność systemu ( $N_s$ ) o strukturze szeregowej będzie określana wzorem [10]:

$$N_s = N_1 N_2 \dots N_n, \quad (5)$$

gdzie  $N_1, N_2, N_n$  - niezawodność poszczególnych obiektów/ podsystemów systemu.

Korzystając ze wzorów (3) i (4) ryzyko całkowite ( $R_c$ ) tego systemu będzie wynosić:

$$R_c = 1 - [(1 - R_1)(1 - R_2) \dots (1 - R_n)] \quad (6)$$

gdzie  $R_1, R_2, R_n$  - ryzyko występujące w poszczególnych obiektach/ podsystemach systemu.

Dla poszczególnych obszarów wielkości ryzyka  $R_i$  oblicza się w następujący sposób:

$$R_1 = \frac{S_1}{W_{teoret}} \quad (7)$$

$$R_2 = \frac{S_2}{W_{teoret} - S_1} \quad (8)$$

$$R_n = \frac{S_n}{W_{teoret} - S_1 - \dots - S_{n-1}} \quad (9)$$

gdzie  $S_i$  - oznacza stratę w  $i$ -tym obszarze spowodowaną występowaniem w tym obszarze czynników ryzyka  $r_i$ ,  $W_{teoret}$  - oznacza analizowany w systemie produkcyjnym wskaźnik (np. produktywności) teoretycznie możliwy do uzyskania przez system produkcyjny.

Straty  $S_i$  w poszczególnych obszarach zależą są od strat czasów spowodowanych wydłużeniem czasu trwania procesu produkcyjnego z uwagi na występujące w tych obszarach czynniki ryzyka. Inaczej mówiąc, system produkcyjny zrealizuje postawiony cel, lecz będzie potrzebował na jego realizację więcej czasu. Wówczas straty na celu mierzalnym systemu produkcyjnego, spowodowane czynnikami ryzyka w poszczególnych obszarach, będą przedstawiać się następująco:

$$S_1 = W_{teoret} \frac{\Delta t_1}{T} \quad (10)$$

$$S_2 = W_{teoret} \frac{\Delta t_2}{T} \quad (11)$$

$$S_n = W_{teoret} \frac{\Delta t_n}{T} \quad (12)$$

gdzie:  $\Delta t_i$  - straty czasu w poszczególnych obszarach spowodowane czynnikami ryzyka,  $T$  - oznacza jednostkę czasu lub okres, dla którego wyznaczono osiągnięcie celu przez system produkcyjny i jest okresem reprezentatywnym.

Zatem ryzyko całkowite  $R_c$  dla systemu o  $n$  obszarach i strukturze szeregowej będzie wynosić:

$$R_c = 1 - [(1 - \frac{\Delta t_1}{T})(1 - \frac{\Delta t_2}{T - \Delta t_1}) \dots (1 - \frac{\Delta t_n}{T - \Delta t_1 - \dots - \Delta t_{n-1}})] \quad (13)$$

The serial structure is the most common type of structure in production systems and processes [9]. For example, a failure of one machine in a manufacturing process results in malfunction or failure of the entire production system.

At this type of arrangements, the reliability of a system is the product of the reliability of its objects, and hence along with an increase in the number of objects in the system, its reliability keeps decreasing. Reliability of a system ( $N_s$ ) with a serial structure will be determined by the formula [10]:

$$N_s = N_1 N_2 \dots N_n, \quad (5)$$

where  $N_1, N_2, N_n$  - reliability of individual objects/subsystems of the system.

Using the formulas (3) and (4), the total risk ( $R_c$ ) of this system will be as follows:

$$R_c = 1 - [(1 - R_1)(1 - R_2) \dots (1 - R_n)] \quad (6)$$

where  $R_1, R_2, R_n$  - the risk occurring in individual objects/subsystems of the system.

For individual areas, the risk  $R_i$  is calculated as follows:

$$R_1 = \frac{S_1}{W_{teoret}} \quad (7)$$

$$R_2 = \frac{S_2}{W_{teoret} - S_1} \quad (8)$$

$$R_n = \frac{S_n}{W_{teoret} - S_1 - \dots - S_{n-1}} \quad (9)$$

where  $S_i$  - means a loss in the  $i$ -th area caused by occurrence of the risk factors  $r_i$  in this area,  $W_{teoret}$  - means an indicator (e.g. productivity indicator) analysed in a production system, which is theoretically achievable by the production system.

Losses  $S_i$  in individual areas depend on the time losses caused by extension of the duration of the production process resulting from the risk factors occurring in these areas. In other words, a production system will realize a defined goal, but it will need more time to realize it. Then, the losses on a measurable goal of a production system caused by risk factors in individual areas, will be as follows:

$$S_1 = W_{teoret} \frac{\Delta t_1}{T} \quad (10)$$

$$S_2 = W_{teoret} \frac{\Delta t_2}{T} \quad (11)$$

$$S_n = W_{teoret} \frac{\Delta t_n}{T} \quad (12)$$

where:  $\Delta t_i$  - time losses in individual areas caused by risk factors,  $T$  - means a time unit or a period set for achievement of a goal by the production system and which is a representative period.

So, the total risk  $R_c$  for a system with  $n$  areas and a serial structure will be as follows:

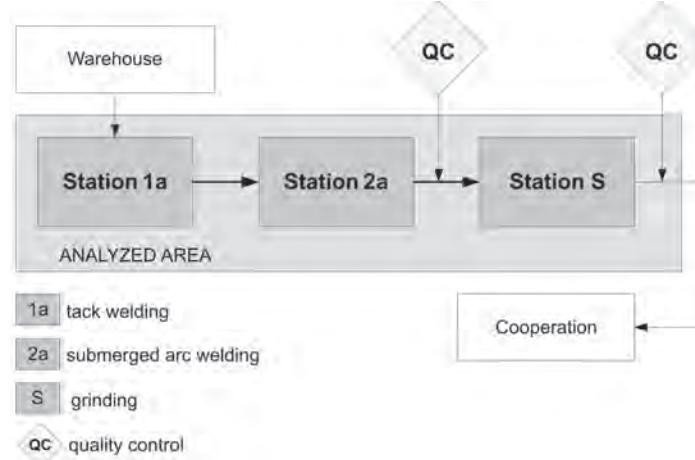
$$R_c = 1 - [(1 - \frac{\Delta t_1}{T})(1 - \frac{\Delta t_2}{T - \Delta t_1}) \dots (1 - \frac{\Delta t_n}{T - \Delta t_1 - \dots - \Delta t_{n-1}})] \quad (13)$$

#### 4. Weryfikacja metody na wybranym przykładzie

W celu zaprezentowania praktycznych możliwości zastosowania opracowanej metody do planowania i oceny ryzyka realizacji procesów produkcyjnych, poniżej zostanie przeprowadzona ocena ryzyka procesu produkcyjnego korpusu belki bujakowej.

##### 4.1. Charakterystyka procesu produkcyjnego korpusu belki bujakowej

Korpus belki bujakowej wchodzi w skład wyrobu finalnego jakim jest rama wózka. Produkcja korpusu odbywa się na wydzielonym obszarze linii produkcyjnej ramy wózka MD 523 i została schematycznie przedstawiona na rys. 2.



Rys. 2. Schemat procesu produkcyjnego korpusu belki bujakowej  
Fig. 2. Diagram of the production process of the bolster beam body

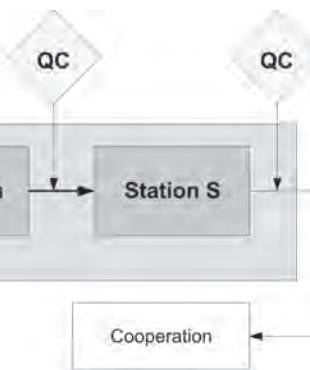
Proces produkcyjny rozpoczyna się od dostarczenia przez poddostawców elementów do magazynu. Elementy z magazynu trafiają na halę produkcyjną, a po zakończeniu procesu produkcji wywożone są do kooperacji na operacje toczenia i frezowania. Na proces produkcyjny składają się operacje szepiania, spawania i szlifowania spoin. Na stanowiskach 2a i S, po zakończeniu operacji odbywa się kontrola jakości. W razie wykrycia nieprawidłowości element nie przechodzi na kolejne stanowisko tylko jest złomowany lub naprawiany na stanowisku na którym błąd został wykryty. Transport elementów odbywa się na zewnątrz hali produkcyjnej przy pomocy wózków, a poza nią za pomocą suwnic. Czasy transportu, załadunku oraz kontroli jakości na stanowiskach zostały wliczone do czasów technologicznych. Poszczególne operacje technologiczne i ich czasy, z podziałem na stanowiska, zamieszczono w tab. 2.

#### 4. Verification of the method on a selected example

In order to demonstrate practical applicability of the developed method for planning and assessing the risk of realization of production processes, the following assessment of the risk in the production process of a bolster beam body will be performed.

##### 4.1. Characteristics of the production process of a bolster beam body

Bolster beam body is a part of the final product - a bogie frame. Production of the body takes place in a separate area of the production line of the MD 523 bogie frame and is schematically shown in figure 2.



The production process starts with delivery of elements to the warehouse by sub-suppliers. The elements from the warehouse get to the production hall, and after completion of the production process, they are taken away to cooperating plants for turning and milling operations. The production process includes tacking, welding and weld grinding operations. After completion of the operations, there takes place quality control at the stations 2a and S. If any irregularities are detected, an element is not transferred to another station, but is scrapped or repaired at the station at which the fault was detected. Transport of elements takes place outside the production hall with the use of industrial trucks, and with the use of overhead cranes. Times of transport, loading and quality control at the stations were included in the production times. Individual operations and their times per station are given in tab. 2.

Tab. 2 Czasy technologiczne operacji na stanowiskach  
Tab. 2 Times of operations at the stations

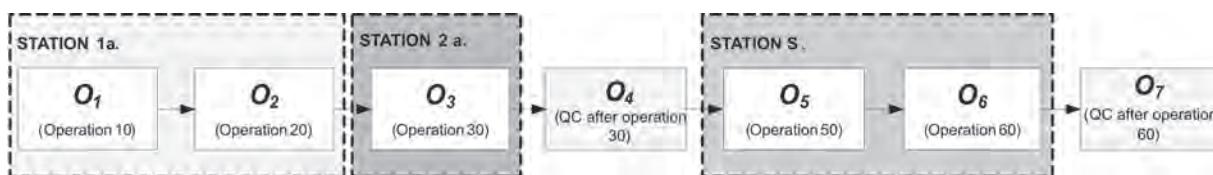
Nazwa stanowiska Name of station	numer operacji number of operation	czas technologiczny [min] theoretical time [min]
1a. Szepianie do spawania / Tack welding	10	41
	20	30
2a. Spawanie łukiem krytym / Submerged arc welding	30	210
	50	25
S. Szlifowanie spoin / Weld grinding	60	33

#### 4.2. Obszary analizy i charakterystyka czynników ryzyka

Za poziom analizy przyjęto najwyższy poziom struktury produkcyjnej KPA<sup>0</sup>, czyli poziom stanowiska roboczego. Analizą objęto jedynie obszar procesu odbywającego się na hali produkcyjnej, pomijając obszar dostaw, magazynu i kooperacji.

Za cel procesu produkcyjnego przyjęto jego wydajność teoretyczną  $W_{teoret} = 650$  szt./rok. Wielkość ta ograniczona jest jedynie możliwościami technologicznymi linii produkcyjnej. Przy jej wyznaczaniu uwzględniono czasy technologiczne i transportu, pełną niezawodności systemu i dostępność zasobów produkcyjnych.

Dekompozycji analizowanego procesu produkcyjnego korpusu dokonano na poszczególne operacje technologiczne i kontroli jakości. Dla wyznaczonych obszarów, biorąc pod uwagę specyfikę przebiegu procesu, ustalono że system będzie miał strukturę szeregową przedstawioną na rys. 3.



Rys. 3. Szeregową strukturę analizowanego procesu wraz z wyróżnionymi obszarami  
Fig. 3. The serial structure of the analysed process together with the distinguished areas

Na podstawie obserwacji bezpośrednich procesu produkcyjnego, analizy dokumentacji technologicznej oraz pomiarów czasów trwania poszczególnych operacji wyróżniono dwa czynniki ryzyka:

- $r_1$  – dłuższy czas wykonywania operacji w stosunku do czasów z kart technologicznych,
- $r_2$  – ryzyko napraw lub złomowania braków wykrytych podczas operacji kontroli jakości.

Ponieważ analizowany jest jedynie ograniczony fragment systemu produkcyjnego, a poszczególne obszary występują w ścisłej, zależności, czynnik  $r_1$  będzie w dalszej części analizowany w obszarach  $O_1, O_2, O_3, O_5$  i  $O_6$ , natomiast czynnik  $r_2$  zostanie przypisany do obszarów  $O_4, O_7$ .

W celu wyznaczenia wielkości, częstotliwości pojawiania się oraz charakterystyk wyróżnionych czynników ryzyka w okresie styczeń – marzec (12 tygodni), przeprowadzono bezpośrednią obserwację i pomiar czasów technologicznych procesu produkcyjnego. Ponieważ liczbę dokonanych w ten sposób pomiarów można uznać za próbę reprezentatywną, to również okres przyjęto za reprezentatywny, czyli  $T = 12$  tygodni.

Dla tak wyznaczonego okresu wydajność teoretyczna (przyjęty cel systemu) będzie wynosić  $W_{teoret} = 168$  sztuk/ 12 tygodni.

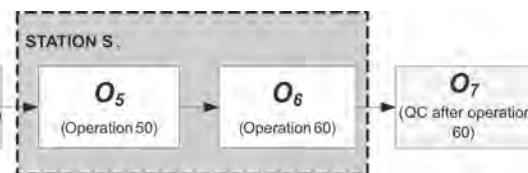
Analiza czynnika ryzyka  $r_1$ , czyli różnic czasów technologicznych i rzeczywistych wykonania operacji wykazała, że jest on spowodowany wadliwością przyrządów do składania (mocowania elementów) oraz złą jakością elementów dostarczanych przez poddostawców. Różnicę czasów powoduje konieczność ustawiania przyrządów oraz naprawy elementów. Dla przeprowadzonych pomiarów czasu rzeczywistego wyznaczono wielkości średnie i przedstawiono je w tab.3.

#### 4.2. Areas of the analysis and characteristics of risk factors

The lowest level of the production structure - KPA<sup>0</sup>, i.e. the workstation level, was taken as the level to be analysed. The analysis covered only the area of the process that takes place in the production hall, excluding the area of deliveries, warehouse and cooperation.

The theoretical capacity  $W_{teoret} = 650$  pcs/year was set as the target of the production process. This volume is limited only by manufacturing capabilities of the production line. When determining this volume, operation and transport times, full system reliability of the system and availability of production resources were taken into account.

The analysed production process of the body was decomposed into individual manufacturing process and quality control operations. For the designated areas, taking into account the specificity of the process, it was found that the system would have a serial structure shown in figure 3.



Based on direct observation of the production process, analysis of manufacturing documentation and measurements of times of individual operations, two risk factors were distinguished:

- $r_1$  - longer time of operations in relation to the times from operation sheets,
- $r_2$  - risk of repairing or scrapping the faulty elements detected during quality control operations.

As only a limited fragment of the production system is analysed and individual areas strictly depend on each other, the factor  $r_1$  will be analysed later in the areas  $O_1, O_2, O_3, O_5$  and  $O_6$ , while the factor  $r_2$  will be assigned to the areas  $O_4, O_7$ .

In order to determine the values, frequencies of appearance and basic characteristics of the distinguished risk factors in the period of twelve weeks (January-March), direct observations and measurements of operation times of the production process were performed. Since the number of the measurements carried out in this way can be regarded as representative sample, also the period  $T = 12$  weeks was assumed as a representative period.

For the period determined in this way, the theoretical capacity (the target of the system) will be  $W_{teoret} = 168$  pcs / 12 weeks.

The analysis of the risk factor  $r_1$ , that is the analysis of differences in theoretical and actual operation times shown that it is caused by faultiness of the devices for assembling/mounting the elements and poor quality of components supplied by sub-suppliers. The difference in the times makes it necessary to adjust the instruments and repair the elements. For the actual time measurements, mean values were determined and presented in tab.3.

Tab. 3. Zestawienie różnic pomiędzy czasami technologicznymi a rzeczywistymi

Tab. 3. Differences between theoretical and the actual times

Stanowisko Workstation	Obszar Area	Nr operacji Number of operation	Czas technologiczny Theoretical time [min]	Średni czas rzeczywisty Mean actual time [min]	Różnica czasów Difference of times [min]
1a. Szczepianie do spawania 1a. Tack welding	$O_1$	10	41	41	0
	$O_2$	20	30	30	0
2a. Spawanie łukiem krytym 2a. Submerged arc welding	$O_3$	30	210	480	270
	$O_5$	50	25	25	0
Stanowisko S Station S	$O_6$	60	33	33	0

Z kolei, analiza procesu produkcyjnego pod kątem czynnika ryzyka  $r_2$  wykazała, że 10% produkcji stanowią korpusy wadliwe. 7% z nich jest naprawiane na stanowisku na którym podczas kontroli jakości wykryto usterkę, natomiast 3% jest złomowanych. Złomowanie i naprawa wypływały negatywnie na postawiony cel systemu produkcyjnego, gdyż wydłużają czas produkcji. Czas naprawy nieprawidłowego elementu waha się od 10 min. do rzeczywistego czasu trwania operacji. Ponieważ czas ten nie jest stały, to w dalszej analizie przyjęto, że ma rozkład normalny.

Tab. 4. Zestawienie czasów korekt w procesie produkcji korpusów belki bujakowej  
Tab. 4. Summary of the correction times in the production of bolster beam bodies

Nazwa obszaru Area name	Oznaczenie obszaru Area designation	Czas rzeczywisty operacji poprzedzającej KJ Actual time of the operation preceding QC [min]	Średni czas korekty Average time of correction [min]	Odchylenie standarde Standard deviation [min]
KJ po operacji 30 QC after the operation 30	$O_4$	480	235	332,34
KJ po operacji 60 QC after the operation 60	$O_7$	58	24	33,94

Tab. 4 zawiera zestawienie czasów korekt w procesie produkcji.

W celu analizy i wyznaczenia wielkości strat w poszczególnych obszarach, spowodowanych występowaniem w nich czynników ryzyka, zdecydowano się na budowę modeli symulacyjnych i symulację wariantową.

#### 4.3. Budowa modeli symulacyjnych systemu produkcyjnego

Do budowy modeli symulacyjnych wykorzystano pakiet symulacyjny iGrafx Process for Six Sigma. Ponieważ analiza czynnika ryzyka  $r_1$  wykazała, że różnica czasów rzeczywistych i technologicznych w obszarach  $O_1$ ,  $O_2$ ,  $O_5$  i  $O_6$  (operacje 10, 20, 50 i 60) wynosi 0, to można stwierdzić, że w procesie produkcyjnym w tych obszarach nie będą występować straty spowodowane tym czynnikiem. W związku z tym nie ma konieczności budowania modeli i wyznaczania wielkości strat dla tych obszarów. W sumie zbudowano cztery modele symulacyjne. Cel ich nazwy, sposób i cel budowy przedstawia rys. 4.

W tab. 5 przedstawiono uzyskane w wyniku symulacji poszczególnych modeli dane na temat strat na współczynniku wydajności  $W_{teoret}$  oraz czasy potrzebne do wyprodukowania założonych 168 sztuk korpusów belki bujakowej.

Przedstawione w tab. 5 wyniki ilustruje rys.5.

On the other hand, the analysis of the production process as to the risk factor  $r_2$  showed that 10% of the production falls to defective bodies. 7% of them will be repaired at that station where the quality control detected a fault, while 3% will be scrapped. Scrapping and repairing have negative impact on the target of the production system, because they extend the production time. The time of repairing of a faulty element ranges from 10 minutes to the actual time of the operation. Since this time is not constant, it was assumed in the further analysis that it has a normal distribution.

Table 4 summarizes the correction times in the production process.

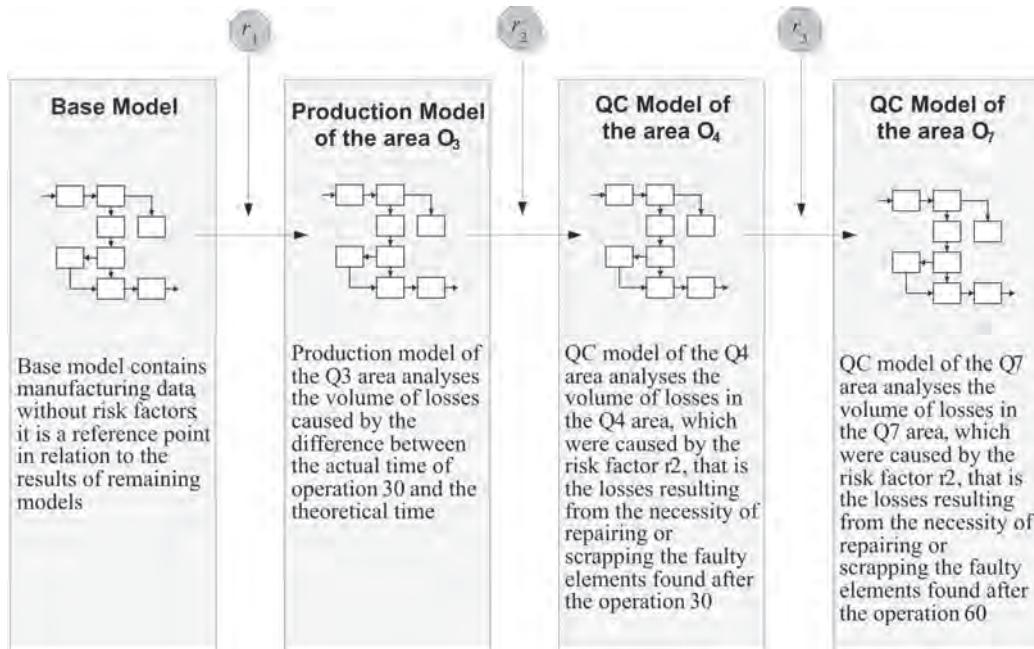
In order to analyse and determine the extent of losses in individual areas, which were caused by the occurrence of risk factors, it was decided to build simulation models and to perform variant simulation.

#### 4.3. Building simulation models of the production system

For building the simulation models, the iGrafx Process for Six Sigma simulation package was used. Because the analysis of the risk factor  $r_1$  shown that the difference between actual and theoretical times in the areas  $O_1$ ,  $O_2$ ,  $O_5$  and  $O_6$  (operations 10, 20, 50 and 60) is 0, it can be concluded that no losses caused by this factor will occur in the production process in these areas. Therefore, it is not necessary to build models and to determine losses for these areas. In total, four simulation models were built. The purpose of their names, as well as the way and aim of building them are presented in figure 4.

Table 5 shows the data, which were obtained as a result of simulation of individual models, concerning the losses on the capacity coefficient  $W_{teoret}$ , as well as the times needed to produce the assumed 168 pieces of bolster beam bodies.

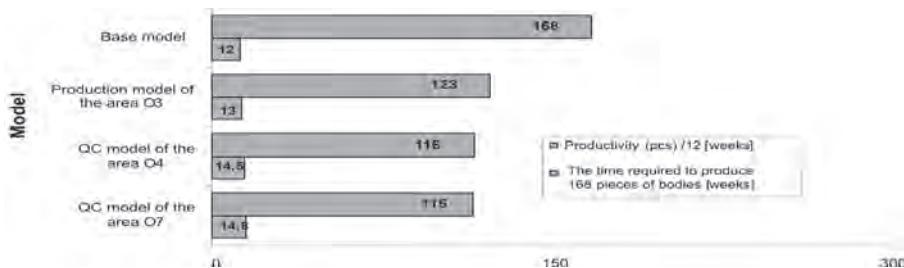
The results presented in tab. 5 are illustrated in fig.5.



Rys. 4. Modele symulacyjne zbudowane w celu oceny ryzyka korpusu belki bujakowej  
Fig. 4. Simulation models built to assess the risk for the bolster beam body

Tab 5. Wydajność i czas produkcji 168 sztuk korpusów  
Tab 5. Production capacity and time of production of 168 pcs of bodies

Model	Wydajność uzyskana w modelach dla 12 tygodni Capacity obtained in the models for 12 weeks	Czas potrzebny na wyprodukowanie 168 sztuk korpusów [tyg.] The time required to produce 168 pieces of bodies [weeks]
Bazowy / Base model	168	12,0
Produkcyjny obszaru O <sub>3</sub> Production model for the area O <sub>3</sub>	123	13,0
KJ obszaru O <sub>4</sub> QC for the area O <sub>4</sub>	116	14,5
KJ obszaru O <sub>7</sub> QC for the area O <sub>7</sub>	115	14,8



Rys. 5. Wyniki uzyskane z symulacji modeli  
Fig. 5. The results obtained from simulation models

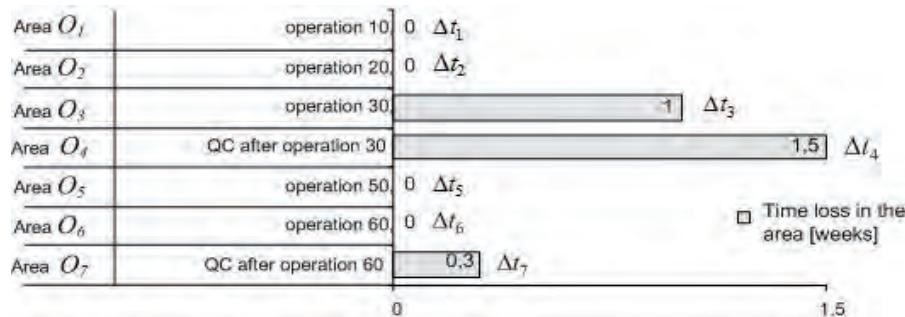
Wyniki symulacji pokazują, że wraz z wprowadzaniem kolejnych czynników ryzyka do modeli zmniejsza się wydajność oraz wydłuża się czas produkcji założonej liczby sztuk korpusów. Na tej podstawie można stwierdzić, że wzrasta prawdopodobieństwo nie osiągnięcia założonego celu systemu, czyli

The results of the simulation show that along with introduction of subsequent risk factors to the models, the efficiency decreases and the time of production of the assumed number of bodies increases. On this basis it can be stated that there increases the probability of not achieving the target assumed for

wyprodukowania 168 sztuk w analizowanym okresie  $T = 12$  tygodni.

#### 4.4. Wyznaczenie wielkości ryzyka przy pomocy proponowanej metody

Ponieważ analizowany system produkcyjny ma strukturę szeregową, do wyznaczenia ryzyka całkowitego  $R_c$  zostanie zastosowana metoda analizy i oceny ryzyka dla systemów o strukturze szeregowej. Dane, potrzebne do wyznaczenia wielkości strat w obszarach spowodowanych występowaniem czynników ryzyka, przedstawia rys. 6.



Rys. 6. Straty czasu w poszczególnych obszarach procesu produkcji korpusu  
Fig. 6. Time losses in individual areas of the production process of the body

Korzystając ze wzorów (10) do (12) można wyznaczyć wielkości strat na teoretycznym wskaźniku wydajności  $W_{teoret} = 168$  sztuk/ 12 tygodni:

$$S_1 = W_{teoret} \frac{\Delta t_1}{T} = 168 \frac{0}{12} = 0 ,$$

$$S_2 = W_{teoret} \frac{\Delta t_2}{T} = 168 \frac{0}{12} = 0 ,$$

$$S_3 = W_{teoret} \frac{\Delta t_3}{T} = 168 \frac{1}{12} = 14[\text{szt.}/12\text{tygodni}] ,$$

$$S_4 = W_{teoret} \frac{\Delta t_4}{T} = 168 \frac{1,5}{12} = 21[\text{szt.}/12\text{tygodni}] ,$$

$$S_5 = W_{teoret} \frac{\Delta t_5}{T} = 168 \frac{0}{12} = 0 ,$$

$$S_6 = W_{teoret} \frac{\Delta t_6}{T} = 168 \frac{0}{12} = 0 ,$$

$$S_7 = W_{teoret} \frac{\Delta t_7}{T} = 168 \frac{0,3}{12} = 4,2[\text{szt.}/12\text{tygodni}] .$$

Znając wielkości strat można wyznaczyć wielkości ryzyka w poszczególnych obszarach systemu produkcyjnego korzystając z wzorów (7) do (9):

$$R_1 = \frac{S_1}{W_{teoret}} = \frac{0}{168} = 0 ,$$

$$R_2 = \frac{S_2}{W_{teoret} - S_1} = \frac{0}{168 - 0} = 0 ,$$

$$R_3 = \frac{S_3}{W_{teoret} - S_1 - S_2} = \frac{14}{168 - 0 - 0} = 0,08 ,$$

the system, i.e. manufacturing 168 pieces in the analysed period of  $T = 12$  weeks.

#### 4.4. Determining the risk with the use of the proposed method

As the analysed production system has a serial structure, the method of risk analysis and assessment for systems with a serial structure will be used for determining the total risk  $R_c$ . The data needed to determine the extent of losses in the areas, which were caused by occurrence of risk factors, are presented in fig. 6.

Using formulas (10) to (12), the extent of losses can be determined on the theoretical capacity coefficient  $W_{teoret} = 168$  pieces / 12 weeks:

$$S_1 = W_{teoret} \frac{\Delta t_1}{T} = 168 \frac{0}{12} = 0 ,$$

$$S_2 = W_{teoret} \frac{\Delta t_2}{T} = 168 \frac{0}{12} = 0 ,$$

$$S_3 = W_{teoret} \frac{\Delta t_3}{T} = 168 \frac{1}{12} = 14[\text{szt.}/12\text{tygodni}] ,$$

$$S_4 = W_{teoret} \frac{\Delta t_4}{T} = 168 \frac{1,5}{12} = 21[\text{szt.}/12\text{tygodni}] ,$$

$$S_5 = W_{teoret} \frac{\Delta t_5}{T} = 168 \frac{0}{12} = 0 ,$$

$$S_6 = W_{teoret} \frac{\Delta t_6}{T} = 168 \frac{0}{12} = 0 ,$$

$$S_7 = W_{teoret} \frac{\Delta t_7}{T} = 168 \frac{0,3}{12} = 4,2[\text{szt.}/12\text{tygodni}] .$$

Knowing the extent of losses, the risk can be determined in individual areas of the production system using the formulas (7) to (9):

$$R_1 = \frac{S_1}{W_{teoret}} = \frac{0}{168} = 0 ,$$

$$R_2 = \frac{S_2}{W_{teoret} - S_1} = \frac{0}{168 - 0} = 0 ,$$

$$R_3 = \frac{S_3}{W_{teoret} - S_1 - S_2} = \frac{14}{168 - 0 - 0} = 0,08 ,$$

$$R_4 = \frac{S_4}{W_{teoret} - S_1 - S_2 - S_3} = \frac{21}{168 - 0 - 0 - 14} = 0,14 ,$$

$$R_5 = \frac{S_5}{W_{teoret} - S_1 - S_2 - S_3 - S_4} = \frac{0}{138 - 0 - 0 - 14 - 21} = 0 ,$$

$$R_6 = \frac{S_6}{W_{teoret} - S_1 - S_2 - S_3 - S_4 - S_5} = \frac{0}{138 - 0 - 0 - 14 - 21 - 0} = 0 ,$$

$$R_7 = \frac{S_7}{W_{teoret} - S_1 - S_2 - S_3 - S_4 - S_5 - S_6} = \frac{4,2}{138 - 0 - 0 - 14 - 21 - 0 - 0} = 0,04 .$$

Zatem ryzyko całkowite  $R_c$ , zgodnie za wzorem (6), będzie wynosić:

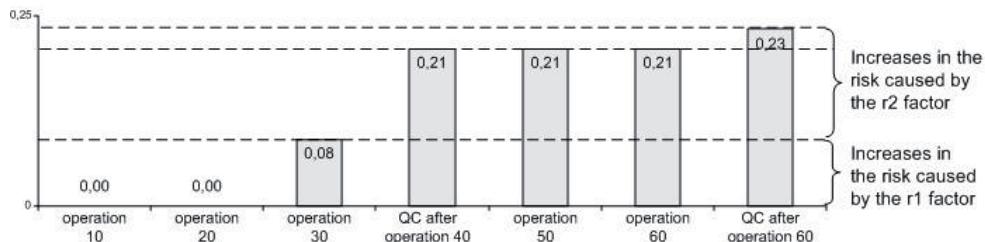
$$R_c = 1 - [(1 - R_1)(1 - R_2)(1 - R_3)(1 - R_4)(1 - R_5)(1 - R_6)(1 - R_7)] = 0,23$$

lub przy pomocy wzoru (13):

$$R_c = 1 - [(1 - \frac{\Delta t_1}{T})(1 - \frac{\Delta t_2}{T - \Delta t_1}) \dots (1 - \frac{\Delta t_7}{T - \Delta t_1 - \Delta t_2 - \Delta t_3 - \Delta t_4 - \Delta t_5 - \Delta t_6})] = 0,23$$

Otrzymana wartość ryzyka całkowitego  $R_c$  oznacza, że z prawdopodobieństwem 0,23 nie jest możliwa realizacja celu postawionego przed systemem produkcyjnym, czyli produkcja 650 sztuk korpusu belki bujakowej rocznie.

Rys. 7 przedstawia przyrosty poziomów ryzyka w poszczególnych obszarach procesu produkcyjnego korpusu belki bujakowej. Ryzyko w obszarze  $O_7$ , odpowiada ryzyku całego procesu, ponieważ zawiera wszystkie czynniki ryzyka.



Rys. 7. Przyrosty poziomów ryzyka w poszczególnych obszarach systemu spowodowane oddziaływaniem czynników  $r_1$  i  $r_2$   
Fig. 7. Increases in the risk levels in individual areas of the system are caused by operation of factors  $r_1$  and  $r_2$ .

Największy przyrost ryzyka, o 0,11, występuje w obszarze  $O_4$  (kontrola jakości po operacji 30). Chcąc obniżyć całkowite ryzyko procesu należałoby w pierwszej kolejności podjąć działania naprawcze w tym obszarze.

Jak przedstawiono w powyższym przykładzie, opracowana metoda pozwala na wyznaczenie wielkości ryzyka dla całego analizowanego systemu produkcyjnego jak i dla jego poszczególnych obszarów. Jest to jej niewątpliwa zaleta, dająca wymierne korzyści praktyczne. Wyznaczenie obszaru o najwyższym poziomie zakłóceń daje możliwość, w krótkim czasie, opracowania programu naprawczego obniżającego poziom ryzyka w całym systemie produkcyjnym. Również możliwość dowolnej dekompozycji systemu na elementy składowe, w zależności od celu prowadzonej analizy, powinna stanowić zaletę w zastosowaniach praktycznych, gdyż nie wprowadza żadnych ograniczeń metodologicznych w stosowaniu metody.

$$R_4 = \frac{S_4}{W_{teoret} - S_1 - S_2 - S_3} = \frac{21}{168 - 0 - 0 - 14} = 0,14 ,$$

$$R_5 = \frac{S_5}{W_{teoret} - S_1 - S_2 - S_3 - S_4} = \frac{0}{138 - 0 - 0 - 14 - 21} = 0 ,$$

$$R_6 = \frac{S_6}{W_{teoret} - S_1 - S_2 - S_3 - S_4 - S_5} = \frac{0}{138 - 0 - 0 - 14 - 21 - 0} = 0 ,$$

$$R_7 = \frac{S_7}{W_{teoret} - S_1 - S_2 - S_3 - S_4 - S_5 - S_6} = \frac{4,2}{138 - 0 - 0 - 14 - 21 - 0 - 0} = 0,04 .$$

Thus, the total risk  $R_c$ , according to the formula (6), will be:

$$R_c = 1 - [(1 - R_1)(1 - R_2)(1 - R_3)(1 - R_4)(1 - R_5)(1 - R_6)(1 - R_7)] = 0,23$$

or using formula (13):

$$R_c = 1 - [(1 - \frac{\Delta t_1}{T})(1 - \frac{\Delta t_2}{T - \Delta t_1}) \dots (1 - \frac{\Delta t_7}{T - \Delta t_1 - \Delta t_2 - \Delta t_3 - \Delta t_4 - \Delta t_5 - \Delta t_6})] = 0,23$$

The obtained value of the total risk  $R_c$  means that realization of the target set forth for the production system, namely production of 650 pieces of bolster beam bodies, is not possible with the probability of 0.23.

Figure 7 shows increases in the risk levels in individual areas of the production process of the bolster beam body. The risk in the area  $O_7$ , corresponds to the risk of the entire process, because it contains all the risk factors.

The biggest increase in the risk, by 0.11, occurs in the area  $O_4$  (quality control after the operation 30). To reduce the overall risk of the process, corrective actions should be taken first of all in this area.

As it is shown in the above example, the developed method allows determining the risk for the entire analysed production system and for its individual areas. It is an unquestionable advantage, which gives measurable practical benefits. Determination of the area with the highest level of disturbances allows developing, in a short time, a corrective program reducing the risk level in the entire production system. Also the possibility of making any decomposition of the system into components, depending on the purpose of analysis, should be treated an advantage in practical applications, because it does not impose any methodological restrictions in the use of the method.

## 5. References

1. Bizon – Górecka J. Inżynieria niezawodności i ryzyka w zarządzaniu przedsiębiorstwem. Bydgoszcz: Oficyna Wydawnicza Ośrodka Postępu Organizacyjnego, 2001.
2. Bubnicki Z. Podstawy informatycznych systemów zarządzania. Wrocław: Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, 1993.
3. Burduk A, Chlebus E. Methods of risk evaluation in manufacturing systems. Archives of Civil and Mechanical Engineering 2009; vol. 9, 3: 17-30.
4. Ciufudean Calin I. Risk and reliability analysis of flexible manufacturing systems. Proceedings of the 10th WSEAS International Conference on Automatic Control, Modelling & Simulation, 2008.
5. Chlebus E, Burduk A. Modelling and variant simulation in risk evaluation of starting-up production programme. Germany: 1st International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production 2005.
6. Chlebus E, Burduk A. Application of modelling and variant simulation in analysis, design and risk estimation of manufacturing system. Advances in manufacturing technology. UK: Second International Conference on Manufacturing Research ICMR2004 incorporating the Twentieth National Conference on Manufacturing Research, 2004.
7. Drucker P.F. The emergency theory of manufacturing, Harvard Business Review nr 3, 1990;
8. Farooq S, O'Birien C. Risk calculations in the manufacturing technology selection process, Journal of Manufacturing Technology Management 2010; vol. 21, 1: 28-49.
9. Kral Z. Podstawy organizacji przygotowania produkcji. Wrocław: Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, 1985.
10. Migdalski J. i Zespół. Inżynieria Niezawodności. Warszawa: Wydawnictwo ZETOM, 1992.
11. Neugebauer R, Bräunlich H, Scheffler S. Process monitoring and closed loop controlled process. Archives of Civil and Mechanical Engineering 2009; vol. 9, 2: 105-126.
12. Ritchie B., Brinley C., Armstrong N. Risk assessment and relationship management: practical approach to supply chain risk management, International Journal of Agile Systems and Management 2008; vol. 3, 3/4: 228 – 247.

---

**Dr inż. Anna BURDUK**

Instytut Technologii Maszyn i Automatyzacji  
Politechnika Wrocławskiego  
Ul. Łukasiewicza 5, 50-371 Wrocław, Polska  
e-mail: Anna.Burduk@pwr.wroc.pl

---

## INFORMATION FOR AUTHORS

### **Terms and Conditions of Publication:**

- The quarterly „Maintenance and Reliability” publishes original papers written in Polish with an English translation.
- Translation into English is done by the Authors after they have received information from the Editorial Office about the outcome of the review process and have introduced the necessary modifications in accordance with the suggestions of the referees!
- Acceptance of papers for publication is based on two independent reviews commissioned by the Editor.

### **Fees:**

- Pursuant to a resolution of the Board of PNTTE, as of 2009 the publication fee for one text is 600 zloty + VAT.
- Coloured graphical elements in the submitted text require agreement from the Editor and are charged extra.

### **Technical requirements:**

- After receiving positive reviews and after acceptance of the paper for publication, the text must be submitted in a Microsoft Word document format.
- Drawings and photos should be additionally submitted in the form of graphical files in the \*.tif, \*.jpg or \*.cdr (v. X3) formats.
- A manuscript should include (in accordance with the enclosed correct manuscript format: \*.pdf, \*.doc):
  - names of authors, title, abstract, and key words that should complement the title and abstract (in Polish and in English)
- the text in Polish and in English with a clear division into sections (please, do not divide words in the text);
- tables, drawings, graphs, and photos included in the text should have descriptive two-language captions,
- if this can be avoided, no formulae and symbols should be inserted into text paragraphs by means of a formula editor
- references (written in accordance with the required reference format)
- author data – first names and surnames along with scientific titles, affiliation, address, phone number, fax, and e-mail address
- The Editor reserves the right to abridge and adjust the manuscripts.
- All submissions should be accompanied by a submission form.

### **Editor contact info:** (Submissions should be sent to the Editor's address)

Editorial Office of „Eksplotacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability”  
Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin, Poland  
e-mail: office@ein.org.pl

## INFORMATION FOR SUBSCRIBERS

### **Fees**

Yearly subscription fee (four issues) is 100 zloty and includes delivery costs.  
Subscribers receive any additional special issues published during their year of subscription free of charge.

### **Orders**

Subscription orders along with authorization to issue a VAT invoice without receiver's signature should be sent to the Editor's address.

### **Note**

In accordance with the requirements of citation databases, proper citation of publications appearing in our Quarterly should include the full name of the journal in Polish and English without Polish diacritical marks, i.e., **Eksplotacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability**.

**No text or photograph published in „Maintenance and Reliability” can be reproduced without the Editor's written consent.**

*Wydawca:*

**Polskie Naukowo-Techniczne  
Towarzystwo Eksplotacyjne  
(Warszawa)**



*Publisher:*

**Polish Maintenance Society  
(Warsaw)**

*członek:*

**Europejskiej Federacji  
Narodowych Towarzystw  
Eksplotacyjnych**



*member of:*

**European Federation of National  
Maintenance Societies**

*patronat naukowy:*

**Polska Akademia Nauk  
Oddział Lublin**



*scientific supervision:*

**Polish Academy of Sciences  
Branch in Lublin**