

BADANIE NUMERYCZNE STANU WYŁĘŻENIA POŁĄCZENIA ŚRUBOWEGO

Streszczenie

Celem badawczym było określenie stopnia wyłężenia zachodzącego w połączeniu śrubowym po przekroczeniu granicy plastyczności materiału. Model trójwymiarowy przygotowano w oprogramowaniu CatiaV5R21, natomiast gotową geometrię zaimportowano do środowiska Abaqus 6.14, celem wykonania analizy MES. Zakres pracy obejmował analizę numeryczną w stanie ustalonym, przy odpowiednio zdefiniowanych warunkach brzegowych zgodnych ze stanem rzeczywistym połączenia. Przeprowadzona analiza miała na celu odwzorowanie rzeczywistego procesu dokręcania śruby poprzez siłę przyłożoną do klucza. Badanie numeryczne pozwoliło na dokładne określenie miejsc newralgicznych układu, przy jednoczesnej konfrontacji z dopuszczalnymi granicami wytrzymałości materiału.

WSTĘP

W obecnych czasach powszechne zagadnienie stanowią problemy wyłężeniowe występujące w połączeniach śrubowych. Połączenia te po długiej eksploatacji narażone są na zwiększoną podatność wytrzymałościową. Problemy związane z przekraczaniem dopuszczalnej granicy wytrzymałości dla danych materiałów przy tego typu połączeniach, można niwelować dzięki używaniu odpowiednich zakresów przykładanych sił/momentów. Częstość przypadkiem uszkodzeń połączeń śrubowych jest używanie zbyt wysokich wartości sił – znacząco przekraczających dopuszczalne wartości momentów, jakie może przenieść dane połączenie. Połączenia śrubowe są wrażliwe na długotrwałą eksploatację przy częstym kontakcie zachodzącym między kluczem i śrubą oraz śrubą i nakrętką. Badanie numeryczne zaprojektowanego połączenia zostało przeprowadzone w programie Abaqus 6.14 jako zagadnienie typowo statycznie nieliniowe.

Podstawowe przykłady analiz, opartych o symulacje numeryczne procesów fizycznych oraz samo podejście do sposobu modelowania komputerowych zagadnień numerycznych, zostały przedstawione w pozycjach literaturowych [4, 5].

Autorzy publikacji [2, 3] zajmowali się dogłębnym rozpatrywaniem problemów stawianych podczas modelowania złożonych zagadnień numerycznych, dających niezbędne podstawy do przeprowadzenia badania stopnia wyłężenia połączenia śrubowego.

Analiza MES pozwala na odwzorowanie dużej ilości rzeczywistych procesów fizycznych, przy odpowiednim zdefiniowaniu zagadnienia w środowisku numerycznym opartym o MES.

1. PRZEDMIOT BADAŃ

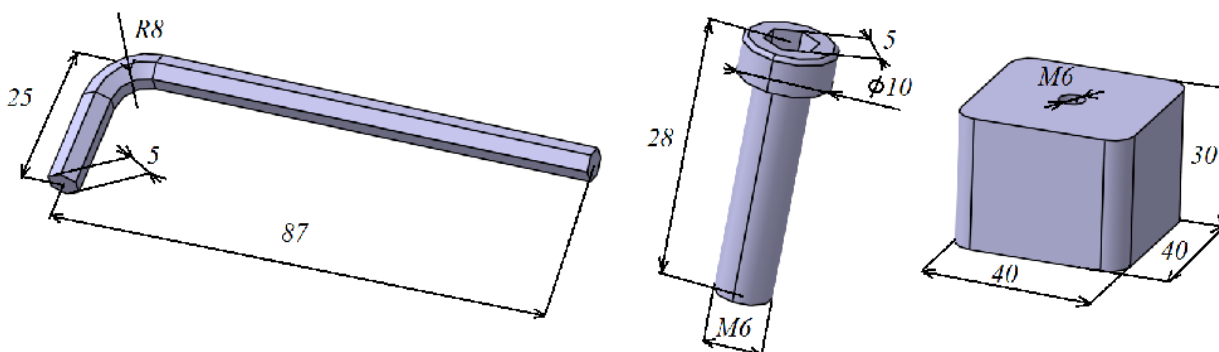
Przedmiotem badań było kompletne połączenie śrubowe składające się z klucza imbusowego 5mm, śruby pod klucz M6 i elementu nakrętki. Połączenie zostało zaprojektowane w oparciu o wymiary geometryczne w mm, dokonane na rzeczywistych podzespołach zgodnie w poniższym rysunku.

Wszystkie zaprojektowane modele posiadały wspólne cechy materiałowe, które zostały zdefiniowane w środowisku numerycznym Abaqus. Dane materiałowe dla użytych modeli charakteryzowały się cechami zgodnymi dla stali konstrukcyjnej C45 o wyższej jakości zgodnie z poniższą tabelą.

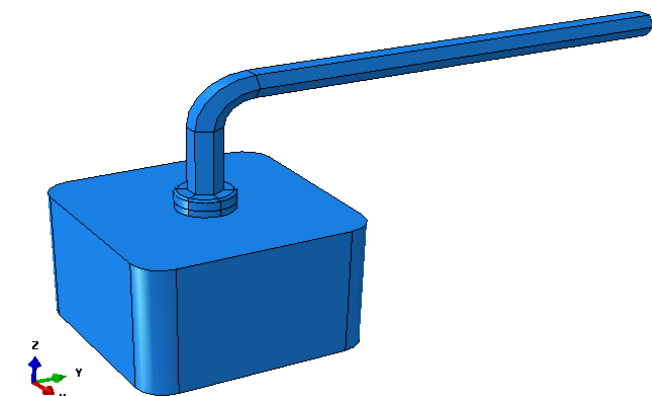
Tab. 1. Cechy materiałowe stali [1]

Materiał	Moduł Younga E [MPa]	Współczynnik Poissona ν	Granica Plastyczności R_e [MPa]	Granica Wytrzymałości R_m [MPa]	Wydłużenie procentowe [%]
Stal C45	210000	0.3	360	610	16

Odpowiednio zaprojektowany układ w formie modelu komputerowego, z przeznaczeniem do dalszych badań przedstawiono na rysunku nr 2.



Rys. 1. Wymiary geometryczne poszczególnych części

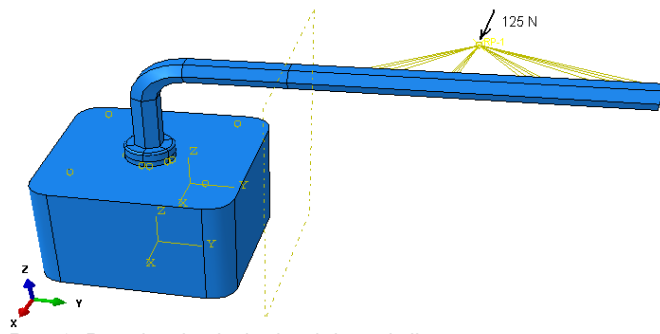


Rys. 2. Model numeryczny

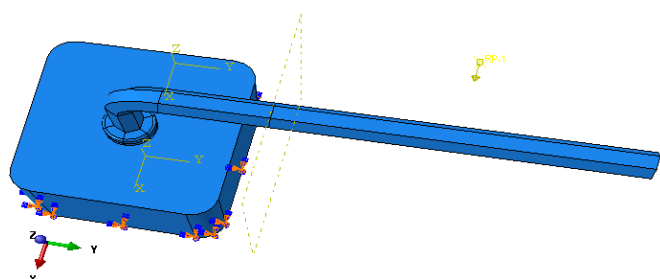
Interakcje zachodzące podczas analizy są związane z występującym i odpowiednio zdefiniowanym kontaktem (pomiędzy końcem klucza i łbem śruby w miejscu współpracy) *surface-to-surface contact*, na kierunku stycznym i normalnym między współpracującymi powierzchniami. W kontakcie między współpracującymi powierzchniami uwzględniono współczynnik tarcia dla stali, który wynosi 0,15.

Warunki brzegowe zostały zdefiniowane zgodnie w rzeczywistym procesem, gdzie nakrętka jest utwierdzona, natomiast do klucza przyłożona odpowiednia siła, wywołująca moment skręcający w połączeniu śrubowym. W przypadku badania numerycznego przypisano siłę 125 N, równomiernie rozłożoną do fragmentu powierzchni klucza, który w rzeczywistości podlega obciążeniu od siły zadanej przez użytkownika. Siłę w programie sprzężono odpowiednim więzłem z płaszczyznami podlegającymi jej równomiernemu oddziaływaniu, w danym punkcie referencyjnym, do którego przyłożono tę siłę o znanej wartości.

Przyadek zastosowanych kompletnych warunków brzegowych ukazano na poniższych rysunkach.



Rys. 3. Przypisanie niezbędnych interakcji

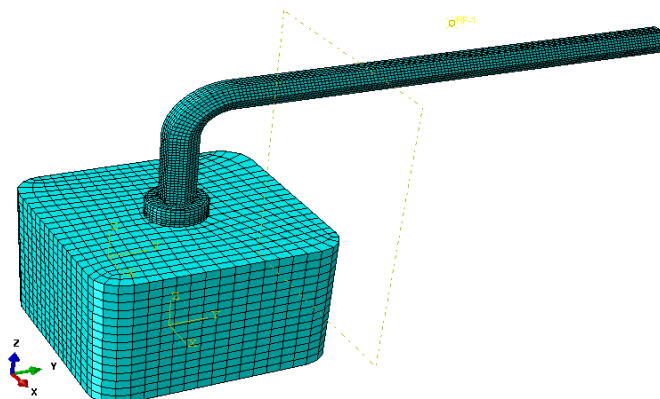


Rys. 4. Warunki brzegowe modelu numerycznego

Dyskretyzacja modelu numerycznego została przeprowadzona w module *Mesh*. Siatka elementów skończonych złożona była wyłącznie z elementów o przestrzennej strukturze heksagonalnej typu

sweep - gdzie występuje zagęszczenie siatki względem osi centralnej. Typ zastosowanego elementu budującego siatkę to C3D8R - charakteryzujący się tym, że posiada 3 stopnie swobody, 8 węzłów o zredukowanym całkowaniu [6]. Opisany typ siatki uzyskano po zastosowaniu odpowiednich partycji w obrębie modelu numerycznego.

Łączna ilość elementów siatki dla całego złożenia to 22425, natomiast ilość węzłów wynosi dokładnie 27824. Model numeryczny wraz z przypisaną siatką ukazano poniżej.



Rys. 5. Siatka MES

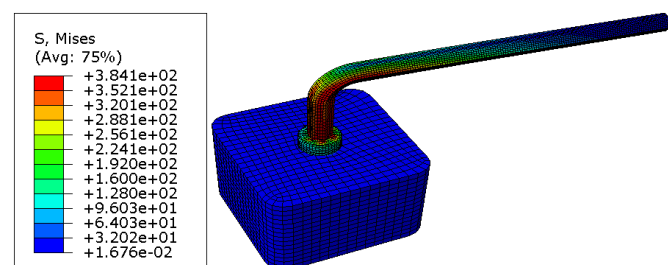
2. WYNIKI ANALIZY

Celem analizy numerycznej było przedstawienie poziomu wytężenia mechanizmu pod względem obserwacji stanu naprężeniowo-przemieszczeniowego.

Zadanie obliczeniowe polegało na obciążeniu układu zadaną siłą wygenerowaną od siły ręki użytkownika a następnie odciążeniu połączenia, celem ukazania rozkładu naprężeń, przemieszczeń oraz miejsc niewralgicznych z lokalną koncentracją naprężeń.

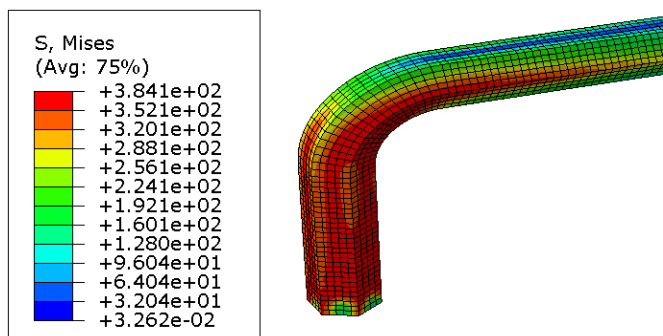
Rezultaty przeprowadzonej analizy MES przedstawiono w obrębie całego połączenia podczas współpracy, a także dla poszczególnych modeli biorących czynny udział w badaniu.

Wyniki naprężeń przy pełnym obciążeniu poprzez przyłożoną siłę, przedstawiono na poniższym rysunku.



Rys. 6. Rozkład naprężeń przy dociążeniu siłą 125 N

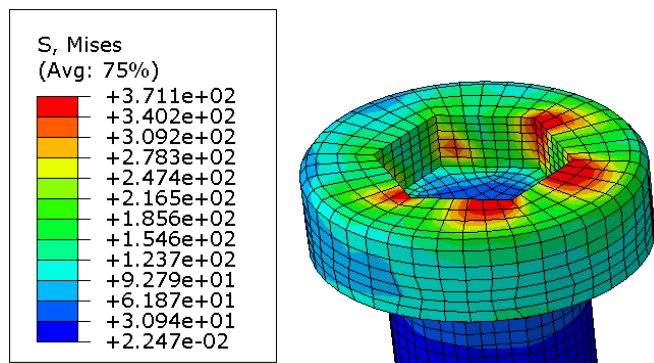
Rezultaty obliczeń MES w postaci naprężeń występujących w przypadku poszczególnych podzespołów zestawiono na poniższych rysunkach.



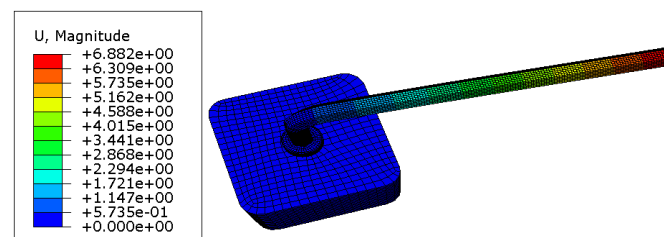
Rys. 7. Poziom naprężen maksymalnych zachodzących w kluczu

Najwyższym poziomem naprężeń charakteryzował się model numeryczny klucza w dolnej jego części, gdzie zachodzi ścisła współpraca z łbem śruby. Analiza numeryczna pozwoliła na obserwację stanu uplastycznienia materiału. Przekroczenie granicy plastyczności materiału o ponad 24 MPa w przypadku klucza i 11 MPa w przypadku śruby, spowodowało trwałe odkształcenia w obydwu elementach. Proces obciążenia układu miał na celu wyłącznie wykazanie miejsc niebezpiecznych, w których zachodzi trwałe uplastycznienie. Lokalne skoncentrowanie naprężeń w rejonach niewłaściwych połączenia śrubowego, może prowadzić do trwałych mikropęknięć, a nawet rozdzielenia włókien materiału, przy długotrwałej eksploatacji połączenia.

Przemieszczenia maksymalne zachodzące przy zadaniu wcześniej zdefiniowanej siły w warunkach brzegowych, są zobrazowane poniżej.



Rys. 8. Poziom naprężen występujących w śrubie

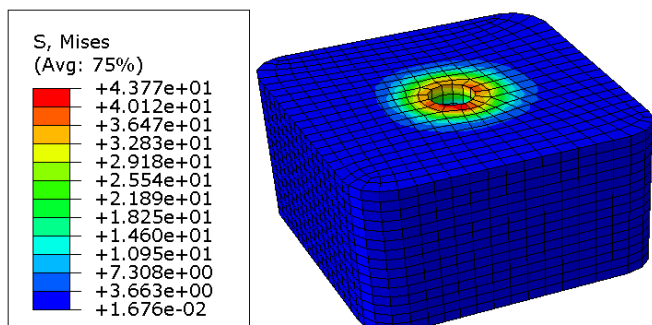


Rys. 10. Poziom przemieszczeń połączenia śrubowego przy pełnym obciążeniu

Przemieszczenia maksymalne związane są z modelem numerycznym klucza, który poprzez przyłożoną siłę wywołująca proces dokręcania, charakteryzują się równomiernym rozkładem w obrębie całego elementu.

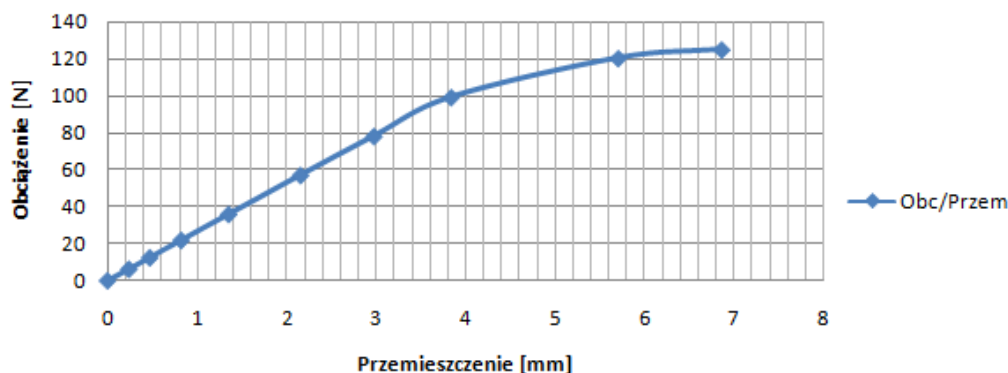
Maksymalny poziom przemieszczeń wynosi w przybliżeniu 7 mm, przy którym współpracujące elementy doznały trwałego uplastycznienia, po osiągnięciu naprężeń rzędu 384 MPa.

Charakterystyka obciążeniowo-przemieszczeniowa punktu, który wykazuje najwyższy poziom przemieszczeń podczas analizy, została ukazana na poniższym rysunku.



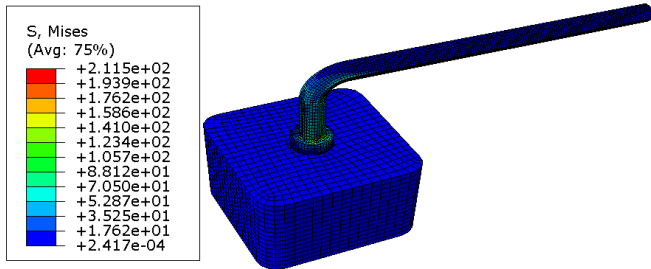
Rys. 9. Poziom naprężen w nakrętce

Charakterystyka obciążeniowo-przemieszczeniowa punktu na modelu klucza wykazującego maksymalne wartości przemieszczenia

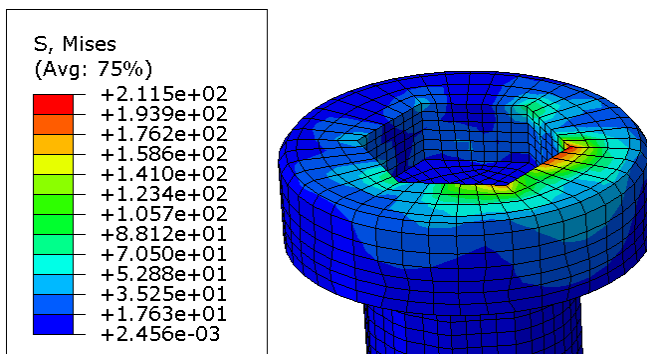


Rys. 11. Charakterystyka obciążeniowo-przemieszczeniowa

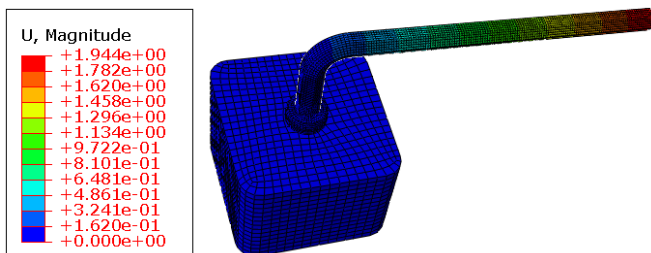
Wynik badania numerycznego związany z występującymi naprężeniami po całkowitym odciążeniu mechanizmu ukazano poniżej na rysunkach, z wyszczególnieniem elementu śruby o największym stopniu podatności na wszelkie obciążenia.



Rys. 12. Naprężenia po całkowitym odciążeniu



Rys. 13. Rozkład naprężeń w śrubie po całkowitym odciążeniu



Rys. 14. Rozkład przemieszczeń po całkowitym odciążeniu

Po odciążeniu układu widoczny jest stan uplastycznienia, który wystąpił między śrubą i kluczem. Model numeryczny klucza nie powrócił do pierwotnej pozycji, ze względu odkształceń które zaszły w połączeniu po uplastycznieniu. Najbardziej narażonym elementem przy odciążeniu okazała się śruba – wykazując najwyższy poziom lokalnie skupionych naprężeń zredukowanych.

Rozkład przemieszczeń zachodzących w obrębie modelu w procesie pełnego odciążenia, wynosi w punkcie o maksymalnym przemieszczeniu około 1,95 mm, przy naprężeniach rzędu 212 MPa.

Klucz nie powraca już do pierwotnej pozycji po przekroczeniu granicy plastyczności, co zostało wykazane w badaniu.

W symulacji MES został ukazany jedynie jeden cykl zmęczeniowy materiału (obciążeniowo-odciążeniowy), po którym zachodzą trwale odkształcenia plastyczne w elementach. Po pewnym czasie przy badaniu wytrzymałości zmęczeniowej każdego połączenia śrubowego z dużą liczbą powtarzalnych cykli, z pewnością wystąpiłyby mikropęknięcia, prowadzące w dalszej drodze do uszkodzeń połączenia.

WNIOSKI

Analizy MES dostarczają niezbędnych informacji o stanie wyężeniowym badanych mechanizmów. Środowiska do badań numerycznych stanowią potężne pakiety programowe wspomagające procesy projektowe i produkcyjne. Na podstawie przeprowadzonego badania numerycznego zostały sformułowane następujące wnioski:

– dzięki symulacjom numerycznym możliwe jest odwzorowanie w bardzo zbliżonym stopniu procesów rzeczywistych, przy jednoczesnej możliwości obserwacji stanu wytrzymałościowego projektowanych mechanizmów,

- badanie stanu wyężenia połączenia śrubowego wykazało, iż zadane obciążenie w postaci siły generowanej od ręki użytkownika wynoszącej 125 N, spowodowało trwałe uplastycznienie materiału w miejscach współpracy klucz-śruba,
- proces dociążania i odciążania przedstawiony w formie symulacji MES, ukazuje charakterystykę naprężeniowo-przemieszczeniową w postaci wizualizacji rezultatów badawczych, w najbardziej newralgicznych obszarach, w obrębie badanego połączenia śrubowego,
- dzięki charakterystykom obciążeniowo-przemieszczeniowym, możliwe jest dokładne określenie zachowania mechanizmów, przy stopniowym przyroście obciążeń,
- symulacje numeryczne dostarczają niezbędnych informacji o stanie wytrzymałościowym mechanizmów już na drodze ich projektowania w środowisku komputerowym, przed samym procesem produkcyjnym - celem możliwości wprowadzania poprawek konstrukcyjnych oraz zmniejszenia ewentualnych kosztów i zarazem czasu produkcji.

BIBLIOGRAFIA

1. Banaszek J.: Examples of calculations within machines constructions basics Part II. The University Publishing House, 1996, Pages 196-197.
2. Kąkol W., Łodygowski T.: Metoda elementów skończonych w wybranych zagadnieniach mechaniki konstrukcji inżynierskich. Politechnika Poznańska, 2003.
3. Kleiber M.: Wprowadzenie do metody elementów skończonych, Biblioteka Mechaniki Stosowanej IPPT PAN, PWN, Warszawa-Poznań, 1985.
4. Venkatesh C.: *Getting Started with Abaqus - Workbook 0: User Interface and Modeling Overview*, 2011.
5. Venkatesh C.: *Getting Started With Abaqus - Workbook 1: Linear Static Analyses and Basic Mesh Generation*, 2012.
6. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L.: *Finite Element Method (5th Edition) Volume 2 – Solid Mechanics*, 2000, Elsevier.

NUMERICAL ANALYSIS OF THE STATE OF THE EFFORT OF THE SCREW CONNECTION

Abstract

The aim of the test was to determine the effort of setting the screw connection beyond the yield strength of the material. 3D model prepared in the software CatiaV5R21, while ready geometry imported into Abaqus 6.14 environment. The scope of work included numerical analysis in steady state, when properly defined boundary conditions reflect the current real connection. The analysis was aimed at mapping the actual process of tightening by the force applied to the key.

Numerical study enabled the precise locations of critical system in addition to the confrontation with the permissible limits of material strength.

Autorzy:

Różyło Patryk, Falkowicz Katarzyna, Wysmulski Paweł - Politechnika Lubelska, Wydział Mechaniczny; ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin, telefon: 603359217, p.rozylo@pollub.pl