

OPROGRAMOWANIE WSPOMAGAJĄCE OBLICZENIA KONSTRUKCYJNE POŁĄCZEŃ KSZTAŁTOWYCH

Mariusz Łoboda, Zbigniew Dworecki, Adam Krysztofiak, Krystian Kryger
Instytut Inżynierii Biosystemów, Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu

Streszczenie. Celem pracy było wytworzenie „przyjaznej” aplikacji, wspomagającej pracę inżyniera w zakresie projektowania połączeń kształtowych. Aplikacja powinna dotyczyć szerokiego spektrum połączeń kształtowych. Zgodnie z zasadami inżynierii oprogramowania sformułowano wymagania funkcjonalne i niefunkcjonalne oraz przeprowadzono modelowanie obiektowe (w notacji UML), budując stosowne diagramy. Aplikację wykonano w środowisku *Visual Studio.NET*. Zbudowany system umożliwia zaprojektowanie połączenia nitowego, wpustowego, wielowypustowego i kołkowego z kołkami poprzecznymi i wzdłużnymi. Wytworzona aplikacja spełnia postawione zadania – jest programem wspomagającym pracę konstruktora przy projektowaniu połączeń kształtowych, a równocześnie (poprzez wbudowane bazy danych, rysunki poglądowe i system rozbudowanych odpowiedzi) dobrze spełnia funkcję edukacyjną w zakresie tej problematyki. Obsługa programu wymaga od użytkownika posiadania podstawowej wiedzy z zakresu konstrukcji mechanicznych.

Słowa kluczowe: połączenie kształtowe, połączenie nitowe, połączenie wpustowe, połączenie wielowypustowe, połączenie kołkowe, obliczenia inżynierskie, program komputerowy

Wprowadzenie

We wszystkich praktycznie konstrukcjach (w tym oczywiście w maszynach i urządzeniach rolniczych) stosowane są różnego rodzaju połączenia poszczególnych elementów, podzespołów i zespołów. Wśród nich występują połączenia kształtowe, w których przeniesienie obciążeń realizowane jest poprzez wzajemne oddziaływanie współpracujących powierzchni tego połączenia. Konstruktor, w zależności od wymagań montażowo-eksploatacyjnych, wybiera rodzaj połączenia kształtowego rozłącznego lub nierozłącznego. W większości przypadków wybór dokonywany jest spośród następujących możliwych rozwiązań:

- dla połączeń kształtowych rozłącznych: połączenia wpustowe, wielowypustowe, kołkowe, klinowe, śrubowe pasowane,
- dla połączeń kształtowych nierozłącznych: połączenia nitowe.

Połączenia nitowe można zaliczyć do połączeń kształtowych z powodu sposobu ich obliczania, pomimo że obciążenia są przenoszone również siłami tarcia.

Inżynier po dokonaniu wyboru sposobu połączenia elementów staje przed zadaniem określenia optymalnych parametrów tego połączenia. Ten etap projektowania wiąże się z koniecznością przeprowadzania stosownych obliczeń wytrzymałościowych [Branowski 2007; Osiński 2002; Skoć, Spalek 2006], w których dokonuje się dopasowania wymiarowego i materiałowego elementów połączenia do narzuconych wymagań i ograniczeń. Uzyskanie finalnego rozwiązania wiąże się często z kilkukrotnym powtarzaniem procedury obliczeniowej [Chomczyk 2008]. Algorytm obliczeń zależy od rodzaju przyjętego rozwiązania oraz dostępnych danych.

Powtarzalność procedury obliczeniowej i niejednokrotnie jej skomplikowanie sugeruje celowość oprogramowania tych algorytmów. Wykorzystanie techniki komputerowej pozwala na znaczne skrócenie czasu i zmniejszenie kosztów związanych z zaprojektowaniem danego połączenia. W Instytucie Inżynierii Biosystemów Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu zbudowano i przetestowano już kilka takich aplikacji komputerowych wspomagających projektowanie wybranych podzespołów maszyn rolniczych. Oprogramowania te dotyczą obliczeń konstrukcyjnych m. in. belek, kratownic, wałów i osi, sprężyn, przegubów oraz różnych typów połączeń – np. Łoboda i in. [2007, 2008b, 2011].

W firmach z rozbudowanym działem projektowym wykorzystuje się dostępne na rynku obszerne programy komercyjne profilowane dla określonego odbiorcy. Dominującymi dostawcami w zakresie konstrukcji mechanicznych są firmy *Autodesk* z produktami *AutoCAD Mechanical* i *Inventor Professional* [www.autodesk.pl] oraz *Dassault Systemes* [www.3ds.com] z aplikacją *SolidWorks* [www.solidworks.com]. Programy te dedykowane są głównie do geometrycznego modelowania obiektów technicznych oraz – w oparciu o kreatory elementów i obliczeń wytrzymałościowych – do efektywnego wymiarowania [Sempruch, Piątkowski 2006]. Oprócz niewątpliwych zalet tych programów (uniwersalność, budowa modułowa, aktualizacje, itp.) stawiają one przed użytkownikami przede wszystkim wymóg posiadania profesjonalnej wiedzy przedmiotowej oraz – by efektywnie wykorzystać możliwości systemu – pracowitego wdrożenia w obsługę interfejsów. Rozważając korzystanie z tego typu oprogramowania, nie można też pominąć kosztów pozyskania, szkoleń i utrzymywania systemu.

Mając na uwadze powyższe, autorzy zdefiniowali użytkownika swojego produktu jako inżyniera-konstruktora (lub studenta wykonującego projekt), którego pracę można wspomóc stosunkowo nieskomplikowanym narzędziem: nie wymagającym wielogodzinnego wdrażania, o intuicyjnym interfejsie i nie generującym znacznych nakładów inwestycyjnych.

Cel pracy

Celem niniejszej pracy było wytworzenie „przyjaznej” aplikacji, wspomagającej pracę inżyniera w zakresie projektowania połączeń kształtowych. Aplikacja powinna dotyczyć szerokiego spektrum połączeń kształtowych. Oprogramowanie to równocześnie powinno spełniać kryteria pomocy dydaktycznej, aby mogło być wykorzystane na zajęciach uniwersyteckich przy nauczaniu przedmiotu „Podstawy konstrukcji maszyn”. W opracowaniu

pominięto połączenia śrubowe pasowane, jako uwzględnione w oprogramowaniu dotyczącym połączeń gwintowych [Łoboda i in. 2008a], oraz połączenia klinowe, często zaliczane do połączeń kształtowych, ale przenoszące obciążenia poprzez tarcie i różniące się zasadami obliczania.

Założenia do budowy projektowanego systemu

Rodzaj zastosowanego połączenia kształtowego zależy od funkcji spełnianej przez łączone elementy w danej konstrukcji oraz od możliwości technologicznych. Posiadając tę wiedzę użytkownik oprogramowania winien określić, jakie elementy będą łączone.

Jeżeli przedmiotem rozważań są blachy, kształtowniki, itp., a ograniczenia technologiczne wykluczają połączenie spójnościowe, można zastosować szew nitowy. Wówczas, dla wybranego rodzaju szwu (zakładkowy, nakładkowy jednostronny i nakładkowy obustronny) oraz układu wielkości znanych, przeliczeniu podlega głównie warunek na ścinanie szyjek nitów. Na tej podstawie wyznacza się najczęściej liczbę nitów lub graniczne obciążenie szwu. Pozostałe warunki wytrzymałościowe, jak naciski powierzchniowe i rozrywanie blach w osłabionych przekrojach, pełnią rolę uzupełniającą.

W przypadku osadzania piast kół na czopach wału, spośród połączeń kształtowych najczęściej stosuje się wpusty, wielowypusty oraz kołki poprzeczne i wzdłużne.

Stosując wpusty (pryzmatyczne lub czółenkowe), dobiera się do danej średnicy czopa wymiary poprzeczne wpustu, a jego długość wyznaczają warunki na naciski i na ścinanie. Najczęściej warunek na ścinanie wpustu pełni rolę sprawdzającą. Przy rozważaniu nacisków na powierzchni bocznej wpustu, wstępnie można przyjąć ich rozkład jako równomierny. Jednak przy dokładniejszych obliczeniach wskazane jest uwzględnienie oddziaływań bliższych rzeczywistym, np. poprzez założenie liniowo zmiennego rozkładu nacisków – jako bardziej prawdopodobnego.

Połączenia z wykorzystaniem wielowypustów przelicza się tylko na naciski. Zakłada się, że ich rozkład na powierzchni bocznej wypustów jest równomierny. Średnica wału i warunki współpracy determinują parametry przekroju poprzecznego wielowypustu, a jego długość jest wyliczana.

Kołki poprzeczne muszą spełniać warunki wytrzymałościowe na ścinanie oraz na naciski z piastą i czopem. W tym ostatnim przypadku, podobnie jak dla wpustów, przyjmuje się trójkątny rozkład nacisków.

Kołki wzdłużne przelicza się na naciski i na ścinanie. Dla typowych materiałów konstrukcyjnych kryterium nacisków jest dominujące.

Wymienione powyżej wymagania są tylko podstawowymi wymaganiami, które musi uwzględniać budowany system obliczeniowy. Dodatkowo musi on być uzupełniony niezbędnymi bazami danych wymiarowych i materiałowych.

Metodyka tworzenia programu

Zgodnie z zasadami inżynierii oprogramowania sformułowano wymagania funkcjonalne w postaci szeregu formularzy opisujących poszczególne działania systemu. Określono też wymogi нефunkcjonalne zarówno dla systemu jak i użytkownika. Następnie przeprowadzono modelowanie obiektowe (w notacji UML), budując stosowne diagramy: przypadków użycia, klas, czynności, harmonogramowania i komponentów. Na ich podstawie zbu-

dowano algorytm, który został oprogramowany w środowisku *Visual Studio.NET* [Randolph, Gardnem 2008; <http://www.microsoft.com/visualstudio>].

Opis działania wytworzonej aplikacji

Po uruchomieniu programu pojawia się okno startowe (rys. 1), w którym aktywowanie przycisku *Dalej* powoduje przejście do formularza wyboru typu łączonych elementów (blachy lub piasta koła z czopem wału).



Rys. 1. Okno startowe aplikacji

Fig. 1. Launch window of the application

Wybierając elementy łączone typu „blachy” program w kolejnym formularzu proponuje zastosowanie nitów (rys. 2).

Dla tego połączenia użytkownik w pierwszej kolejności powinien wybrać rodzaj szwu nitowego, następnie zaznaczyć układ wielkości, które są dane oraz wielkość wyliczaną. Program umożliwia wyznaczenie liczby nitów w szwie, średnicy nitu (gdy nie wynika to bezpośrednio z grubości blach w ścisku), maksymalnego obciążenia oraz dobór materiału nitu ze względu na granicę plastyczności i przyjęty współczynnik bezpieczeństwa.

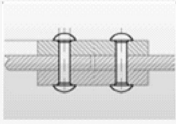
W przypadku zaznaczenia, że łączone kształtowo mają być czop wału z piastą koła, pojawia się formularz wyboru rodzaju połączenia: wpust, wielowypust, kołek (poprzeczny i wzdłużny).

Opcja połączenia wpustowego (rys. 3) umożliwia użytkownikowi wyliczenie minimalnej długości wpustu ze względu na wybrany warunek wytrzymałościowy. Wstawiając wartości parametrów połączenia, można skorzystać z załączonej bazy danych wymiarów b x h w funkcji średnicy wału. Z kolei wynik obliczeń (długość wpustu l) można skonfrontować z bazą zalecanych nominalnych długości wpustów

Połączenie kształtowe blach - połączenie nitowe

Wybierz rodzaj szwu nitowego:

zakładkowy
 nakładkowy jednostronny
 nakładkowy obustronny



Tego typu połączenia przeliczamy przede wszystkim na ścianie nitów:

$$\tau_t = \frac{P}{\frac{\pi \cdot d_n^2}{4} \cdot n \cdot i} \leq k_t$$

i - oznaczenie symboli

Poza tym połączenia nitowe można przeliczać pod kątem:

- nacisków między szyjką nitu a wewnętrzną powierzchnią otworu
- wytrzymałość łączonych blach w miejscu osłabionym otworami

Wybierz układ wielkości znanych i wyliczanych

Dane			
P	d	P	P
d	n	n	n
i	i	i	i
kt	kt	kt	kt
Wyliczane			
n	P	dn	Qt
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>

Parametry połączenia:

P kN

dn mm

n *i*

Qt MPa

x

m

dn = mm

Qt granica plastyczności na ściananie dla materiału nitu

oznaczenie	Qt [MPa]
St3	135
St4	145
St5	170
St6	195

Rys. 2. Formularz obliczeniowy połączenia nitowego
 Fig. 2. Calculation form of riveted joint

Okno obliczeń połączenia wielowypustowego (rys. 4) pozwala na wyznaczenie efektywnej długości połączenia, a także, dla danych wymiarów wielowypustu, momentu skręcającego i nacisków powierzchniowych. Wszystkie wielkości są wyliczane z warunku na naciski na powierzchni bocznej wypustów. Podobnie jak dla wpustów formularz skojarzony jest z bazą zalecanych wymiarów poprzecznych połączenia. Dane do pól obliczeniowych są automatycznie kopiowane po zaznaczeniu wybranego rekordu. Dostępna jest również baza wartości dopuszczalnych nacisków powierzchniowych w funkcji: grupy warunków pracy, obróbki cieplnej i ewentualnych przemieszczeń powierzchni współpracujących.

Formularz obliczeniowy połączenia z kołkiem poprzecznym (rys. 5) umożliwia przeliczanie połączenia pod kątem trzech warunków wytrzymałościowych: ścinania kołka, nacisków powierzchniowych pomiędzy wałkiem a kołkiem i nacisków powierzchniowych pomiędzy kołkiem a piastą. Po aktywacji danego warunku i wyboru kombinacji wielkości danych i wyliczanych można przejść do właściwych obliczeń. Wstawiając wartości w pola edycji, użytkownik może skorzystać z wbudowanych tablic materiałowych.

Połączenie piasty koła z czopem wału za pomocą wpustu pryzmatycznego

Projektując połączenie wpustowe dla danej średnicy wału (d) dobiera się z tabeli wymiary poprzeczne wpustu (b×h) i oblicza jego długość (l).
 Połączenie będzie przeliczane z warunku na naciski pomiędzy wałem a wpustem

$$p_{wp-w} = \frac{4 \cdot M_s}{d \cdot t_1 \cdot l} \leq p_{dop}$$

Wybierz warunek wytrzymałościowy

Na naciski

naciski pomiędzy wałem a wpustem

naciski pomiędzy wpustem a piastą

Koźtają z:

obliczeń uproszczonych

obliczeń zaawansowanych

Na ścinanie

ścinanie wpustu

Parametry połączenia

Pdop 120 MPa

Ms 150 Nm

d 22 mm

t1 4,00 mm

b 8 mm

h 7 mm

kt 50 MPa

Oblicz

l = 56,82 mm

Dobór b x h wpustu dla danej średnicy wałka

średnica wałka [mm]	b wpustu [mm]	h wpustu [mm]	głębokość rowka t1 [mm]	l min [mm]	l max [mm]
10	4	4	2,50	8	45
12	5	5	3,00	10	56
17	6	6	3,50	14	70
22	8	7	4,00	18	90
30	10	8	5,00	22	110
38	12	8	5,00	28	140

Zalecane długości wpustów

długość wpustu [mm]

45

50

56

63

70

80

Powrót

Rys. 3. Formularz obliczeniowy połączenia wpustowego
 Fig. 3. Calculation form of groove joint

Połączenie wielowypustowe

Tego typu połączenia przelicza się przede wszystkim na naciski na powierzchni bocznej wypustów

$$p = \frac{8M_s}{(D-d)^2 \cdot l \cdot z \cdot \varphi} \leq p_{dop}$$

$P = \frac{M_s}{D+d} \cdot z$

Wybierz wariant obliczeniowy

Wylczeniu podlegają:

naciski

długość połączenia

moment skręcający

Parametry połączenia

D 32 mm

d 28 mm

z 6

l 30 mm

Ms 170 Nm

p MPa

Oblicz

p = 41,98 MPa

Przeglądaj parametry połączeń wielowypustowych

D [mm]	d [mm]	z	b [mm]	odmiana
26	23	6	6	lekka
30	26	6	6	lekka
32	28	6	7	lekka
36	32	8	6	lekka
40	36	8	7	lekka

Naciski dopuszczalne

powierzchnia robocza nieutwardzona

powierzchnia robocza hartowana

rodzaj połączenia	warunki pracy	p min [MPa]	p max [MPa]
spoczynkowe	I	35	50
spoczynkowe	II	60	100
spoczynkowe	III	80	120

Powrót

Rys. 4. Formularz obliczeniowy połączenia wielowypustowego
 Fig. 4. Calculation form of multi-groove joint

Połączenie z kołkiem poprzecznym

Wybierz warunek wytrzymałościowy: ścinanie kołka naciski powierzchniowe pomiędzy wałkiem a kołkiem naciski powierzchniowe pomiędzy piastą a kołkiem

Połączenie będzie przeliczane z warunku na naciski powierzchniowe pomiędzy piastą a kołkiem

$$p_{max} = \frac{4M_s}{(d_p^2 - d_w^2)d_k} \leq p_{dop}$$

Wybierz układ wielkości znanych i wyliczanych

Dane				
Ms	pdop	dk	dw	dp
dw	dp	Ms	pdop	dk
dk	dw	dp	Ms	pdop

Wyciżane			
pdop	dk	dw	dp
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>

Parametry połączenia

Ms = 270.00 Nm

pdop = 90 MPa

dw = 40 mm

dk = 6 mm

dp = 60 mm

Qt = MPa

x =

Oblicz

Przeglądaj materiały

oznaczenie	p [MPa]	Qt [MPa]
St3	135	90
St4	145	97
St5	170	109
St6	195	116
St7	215	130

Powrót

Rys. 5. Formularz obliczeniowy połączenia kołkowego z kołkiem poprzecznym
 Fig. 5. Calculation form of pin joint with a transverse pin

Połączenie z kołkiem wzdłużnym

Wybierz warunek wytrzymałościowy: ścinanie kołka naciski dopuszczalne

Połączenie będzie przeliczane z warunku na ścinanie kołka

$$\tau_t = \frac{2M_s}{d_w \cdot d_k \cdot l} \leq k_t$$

Wybierz układ wielkości znanych i wyliczanych

Dane			
Ms	Ms	Ms	dk
dk	l	dk	dw
dw	dw	dw	Qt
Qt	Qt	l	l
x	x	x	x

Wyciżane			
l	dk	Qt	Ms
<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Parametry połączenia

pdop = 90 MPa

Ms = 150 Nm

dw = 35 mm

dk = mm

l = 35 mm

Qt = 135 MPa

x = 2

Oblicz

Przeglądaj materiały

oznaczenie	p [MPa]	Qt [MPa]
St3	90	135
St4	97	145
St5	109	170
St6	116	195
St7	130	215
20	105	150

dk = 3.63 mm

Powrót

Rys. 6. Formularz obliczeniowy połączenia kołkowego z kołkiem wzdłużnym
 Fig. 6. Calculation form of pin joint with a lengthwise pin

Wybór opcji z kołkiem wzdłużnym otwiera formularz połączenia (rys. 6), w którym rozpatruje się dwa warunki wytrzymałościowe: na naciski powierzchniowe oraz na ścinanie kołka. Dla każdego z nich, po zaznaczeniu układu wielkości znanych i wyliczanych,

należy wstawić stosowne wartości. Pomocną tu może być baza danych właściwości stosowanych materiałów. W najczęściej spotykanych przypadkach wyliczeniu podlega średnica kołka i jego długość.

Podsumowanie

1. Wytworzona aplikacja spełnia postawione w celu pracy zadania – jest programem wspomagającym pracę konstruktora przy projektowaniu połączeń kształtowych, a równocześnie (poprzez wbudowane bazy danych, rysunki poglądowe i system rozbudowanych podpowiedzi) dobrze spełnia funkcję edukacyjną w zakresie tej problematyki.
2. System umożliwia zaprojektowanie połączenia nitowego, wpustowego, wielowypustowego i kołkowego z kołkami poprzecznymi i wzdłużnymi.
3. Obsługa programu wymaga od użytkownika posiadania podstawowej wiedzy z zakresu konstrukcji mechanicznych, ponieważ musi on w niektórych przypadkach wprowadzać wartości parametrów zgodne z powszechnie stosowaną praktyką inżynierską (np. przyjęcie określonej wartości współczynnika bezpieczeństwa zależy od funkcji, jaką pełni dane połączenie w konstrukcji).

Bibliografia

- Branowski B.** (red.) (2007): Podstawy konstrukcji napędów maszyn. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, ISBN 978-83-7143-347-4.
- Chomczyk W.** (2008): Podstawy konstrukcji maszyn. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, ISBN 978-83-204-3395-1.
- Łoboda M., Krysztofiak A., Dworecki Z., Przybył J.** (2007): System wspomagająco-edukacyjny projektowania połączeń wciskowych. Inżynieria Rolnicza, 2(90), 159-166.
- Łoboda M., Krysztofiak A., Dworecki Z., Konopa K.** (2008a): System wspomagający obliczenia konstrukcyjne połączeń śrubowych. Technika Rolnicza Ogrodnicza Leśna, 4, 15-17.
- Łoboda M., Krysztofiak A., Dworecki Z., Frankowski R.** (2008b): Komputerowy system wspomagający konstruowanie połączeń piast kół z wałami. Inżynieria Rolnicza, 7(105), 135-142.
- Łoboda M., Krysztofiak A., Dworecki Z., Rosa P.** (2011): Aplikacja wspomagająca proces projektowania przegubów Cardana. Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering, Vol. 56 (1), 92-95.
- Osiński Z.** (2002): Podstawy konstrukcji maszyn. PWN, Warszawa, ISBN 83-01-12806-2.
- Randolph N., Gardnem D.** (2008): Professional Visual Studio 2008. Wrox, ISBN 978-0-470-22988-0.
- Sempruch J., Piątkowski T.** (2006): Podstawy konstrukcji maszyn z CAD. PWSZ, Piła, ISBN 83-89795-17-5.
- Skoć A., Spalek J.** (2006): Podstawy konstrukcji maszyn – tom 1. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, ISBN 83-204-3133-6.
- Autodesk – strona główna firmy (on-line), [dostęp 12-10-2012]. Dostępny w Internecie: <http://www.autodesk.pl>
- Dassault Systemes – strona główna firmy (on-line), [dostęp 12-10-2012]. Dostępny w Internecie: <http://www.3ds.com>
- Program Visual Studio (on-line), [dostęp 12-10-2012]. Dostępny w Internecie: <http://www.microsoft.com/visualstudio>.
- SolidWorks – o programie (on-line), [dostęp 12-10-2012]. Dostępny w Internecie: <http://www.solidworks.com/>

SUPPORT SOFTWARE FOR CONSTRUCTION CALCULATIONS OF SHAPE CONNECTIONS

Abstract. The purpose of the work was to create a "friendly" software supporting the work of an engineer within the scope of designing shape connections. The software should concern a wide spectrum of shape connections. According to the principles of software engineering, functional and non-functional requirements and object modelling, which were carried out (in UML notation system), were formulated forming appropriate diagrams. The software was created in *Visual Studio.NET* environment. The constructed system enables designing riveted, groove, multi-groove and pin joints with a transverse pin and a lengthwise pin. The created software fulfils the duties - it is a programme supporting the constructor's work at designing shape connections and simultaneously (through building-in a data base, reference drawings and the system of extending tips) fulfils the educational function within this issue. This programme requires from the user to have a basic knowledge on mechanical constructions.

Key words: shape connection, riveted joint, groove joint, multi-groove joint, knuckle joint, engineering calculations, application software

Adres do korespondencji:

Mariusz Łoboda; e-mail: loboda@up.poznan.pl
Instytut Inżynierii Rolniczej
Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu
ul. Wojska Polskiego 28
60-637 Poznań