

Mgr inż. Bartosz KRUCZEK  
 Mgr Mateusz DRABCZYK  
 Uniwersytet Rzeszowski  
 Wydział Matematyczno-Przyrodniczy  
 Katedra Mechaniki i Budowy Maszyn

DOI: 10.17814/mechanik.2015.7.258

## DOBÓR PARAMETRÓW I SYMULACJA EFEKTÓW NAGNIATANIA IMPULSOWEGO

*Streszczenie: W niniejszej pracy opracowano program służący do symulacji nagniatania impulsowego. Dzięki niemu, na podstawie danych obróbkowych można przewidzieć wynik nagniatania impulsowego oraz siatkę punktów, w których dokonano obróbki. Istnieje również możliwość analizy i dobrania parametrów obróbki na podstawie podanych właściwości podanej siatki punktów. Program wylicza również procentową powierzchnię poddaną obróbce oraz na podstawie znanej procentowej powierzchni podaje parametry wejściowe.*

## SELECTION OF PARAMETERS, AND SIMULATION OF EFFECTS OF IMPULSE BALL PEENING

*Abstract: In this study, the application for simulation of impulse ball peening is developed. Thanks to it, with knowing of machining data, it is possible to predict effect of burnishing, and position of burnished points. There is also possibility of analysis and match machining parameters based on known positions of burnished points. Application can also calculate the percentage area of burnishing, and inversely, by knowing of percentage machining area, it can give input burnishing parameters.*

*Słowa kluczowe: symulacja, nagniatanie impulsowe, Excel*  
*Keywords: simulation, impulse peening, Excel*

### 1. WPROWADZENIE

Nagniatanie impulsowe jest metodą, w której można dynamicznie zmieniać i na bieżąco kontrolować parametry geometryczne powierzchni. W tym rodzaju nagniatania materiał obrabiany jest wprawiany w ruch obrotowy, a narzędzie obróbkowe w postaci bijała uderza w powierzchnię obrabianą w ustalony przez operatora sposób. Dzięki temu, w materiale obrabianym powstają wgłębienia. Ich wymiary oraz rozmieszczenie zależą od parametrów obróbki i konstrukcji narzędzia obróbkowego. Nagniatanie impulsowe może być realizowane poprzez napędzaną bądź to mechanicznie, bądź hydraulicznie, bądź pneumatycznie głowicę. Takiego rodzaju urządzenie ma większe możliwości modyfikacji geometrycznych parametrów powierzchni obrabianej. Rozmieszczenie i wymiary kieszeni zależą od:

- częstotliwości uderzeń narzędzia obróbkowego,
- siły uderzenia,
- kształtu i wymiarów narzędzia obróbkowego,

- prędkości obrotowej przedmiotu obrabianego,
- posuwu.

W zależności od doboru powyższych parametrów, uzyskuje się różne efekty. Powierzchnia po takim zabiegu dobrze współpracuje podczas działania w smarowanym środowisku, w którym występuje tarcie [1].

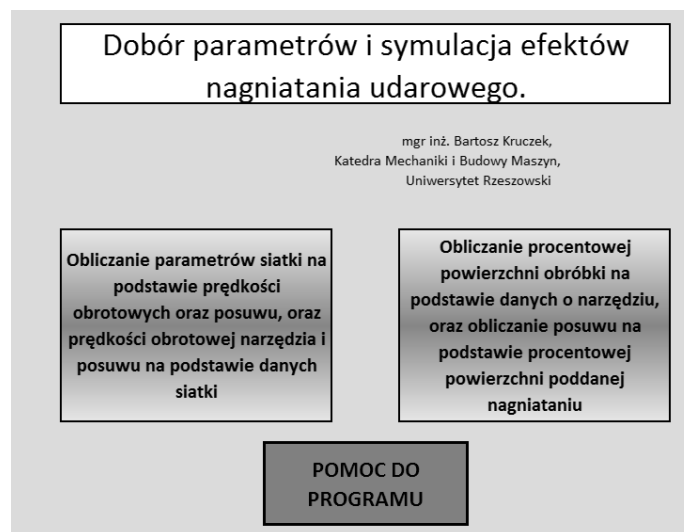
## 2. OPIS PROGRAMU

Program przeznaczony jest do odwzorowania umiejscowienia śladów styku narzędzia obróbkowego (NO) z przedmiotem obrabianym (PO) przy obróbce nagniataniem. PO ma kształt walcowy i obraca się na obrabiarce z zadaną przez operatora prędkością. Prędkość obrotowa NO również jest ustalana przez operatora. Posuw walca z umieszczonym na nim NO, w stosunku do PO także jest parametrem do modyfikacji przez operatora.

Symulacja jest realizowana w programie Excel. Strona tytułowa zawiera nazwę programu, oraz 2 odnośniki, kierujące użytkownika do odpowiednich zakładek, w których realizowane są różne obliczenia (rys. 1). Są to takie zakładki, jak:

- obliczanie parametrów siatki na podstawie prędkości obrotowych oraz posuwu,
- obliczanie prędkości obrotowej narzędzia oraz posuwu na podstawie danych siatki,
- obliczanie procentowej powierzchni pokrytej śladami obróbki,
- obliczanie posuwu na podstawie żądanej procentowej powierzchni pokrytej śladami obróbki oraz prędkości NO i PO.

Na pierwszej stronie jest też odnośnik kierujący do pliku pomocy.



Rys. 1. Strona startowa programu

### 2.1. Obliczanie parametrów siatki na podstawie prędkości obrotowej oraz posuwu

W pierwszej zakładce obliczane są parametry siatki na podstawie podanych przez użytkownika przyjętych parametrów obróbki, takich jak:

- posuw (mm/obr),
- $\omega$  PO (obr/min),
- $\omega$  narzędzia (obr/min),

- średnica PO,
- długość PO

oraz komórki, w których wyświetlają się obliczone dane, czyli:

- odległość obwodowa między miejscami styku (mm),
- odległość po linii śrubowej (mm),
- obwód PO (mm),
- kąt kolejnych uderzeń,
- stosunek  $\omega$  narzędzia do  $\omega$  PO,
- posuw w mm na obrót narzędzia.

Po prawej stronie znajdują się przyciski, dzięki którym można przejść do pomocy, wyświetlić wykres przedstawiający siatkę kontaktów NO z PO, w zależności od podanych parametrów wejściowych (rys. 2).

**Obliczanie parametrów siatki na podstawie prędkości obrotowych, oraz posuwu**

Dane wejściowe	
Posuw (mm/obr)	5
$\omega$ PO (obr/min)	15
$\omega$ narzędzia (obr/min)	74
średnica PO	100
długość PO	50

Obliczone dane	
odległość obwodowa (mm)	63,68
odległość po linii śrubowej (mm)	63,69
obwód PO (mm)	314,16
kąt kolejnych uderzeń	72,97
stosunek $\omega$ narzędzia do $\omega$ PO	4,93
posuw w mm na obrót narzędzia	1,01

POMOC DO PROGRAMU

Przejdź do wykresu

Powrót do menu głównego

Rys. 2. Widok pierwszej zakładki programu

Poszczególne dane wyjściowe są obliczane w następujący sposób:

Obwód PO:

$$\text{obwód PO} = 2 * \pi * \text{średnica PO} \quad (1)$$

Stosunek  $\omega$  NO do  $\omega$  PO:

$$\text{stos. } \omega \text{ NO do } \omega \text{ PO} = \frac{\omega \text{ NO}}{\omega \text{ PO}} \quad (2)$$

Odległość kątowa kolejnych kontaktów:

$$\text{odległość kątowa} = \frac{360}{\text{stosunek } \omega \text{ NO do } \omega \text{ PO}} \quad (3)$$

Posuw w mm na jeden obrót NO:

$$\text{posuw na 1 obrót NO} = \frac{\text{posuw} \left( \frac{\text{mm}}{\text{obr}} \right)}{\text{stosunek } \omega \text{ NO do } \omega \text{ PO}} \quad (4)$$

Odległość obwodowa śladów kontaktów NO z PO:

$$\text{odl obwodowa} = (\text{obwód PO}/360) * \text{odl kątowa} \quad (5)$$

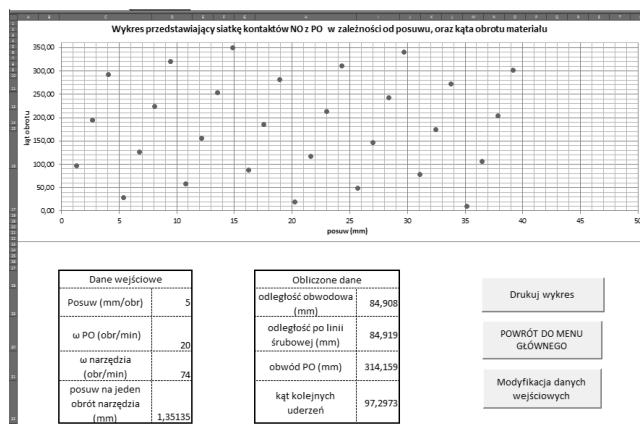
Odległość poszczególnych śladów kontaktów wzdłuż linii śrubowej:

$$\text{odległość śrubowa} = \sqrt{(\text{odległość obw.})^2 + \text{posuw na 1 obr. NO}^2} \quad (6)$$

Wprowadzenie danych wejściowych powoduje automatyczne wyświetlenie wyników w tabeli z prawej strony. Dane wejściowe mogą być wprowadzane bezpośrednio do komórek lub modyfikowane za pomocą przełączników umieszczonych z prawej ich strony.

Arkusz 1 jest chroniony przed nieuprawnioną edycją. Można w nim zmieniać tylko dane w komórkach wejścia. Pozostałe są zablokowane, aby uniemożliwić przypadkową zmianę formuł w tabeli.

Po wybraniu zadanych parametrów obróbki oraz sprawdzeniu wyników obliczeń, użytkownik ma możliwość sprawdzenia, w jaki sposób będzie wyglądać siatka ze śladami kontaktu NO z PO. W tym celu należy kliknąć w przycisk „Przejdź do wykresu”. Po kliknięciu pojawi się wykres przedstawiający punkty kontaktu NO z PO w zależności od posuwu oraz kąta obrotu materiału (rys. 3). Program jest ograniczony do 58 punktów, jednak, że jest to tak duży obszar, że pozwala to na zobrazowanie siatki śladów obróbkowych.



Rys. 3. Wykres wygenerowany na podstawie danych wejściowych

Poniżej wykresu pojawiają się tabelki z wprowadzonymi danymi wejściowymi oraz obliczonymi wartościami. Przyciski z prawej strony pozwalają na wydrukowanie wykresu, powrót do głównego menu lub przejście do zakładki z modyfikacją danych wejściowych.

## 2.2. Obliczanie prędkości obrotowej narzędzia oraz posuwu na podstawie danych siatki

W tej części programu (rys. 4), na podstawie poniższych danych wejściowych, obliczane są dwie istotne wartości parametrów obróbki. Dane wejściowe to:

- odległość liniowa miejsc styku NO z PO (mm),
- odległość obwodowa miejsc styku NO z PO (mm),
- średnica PO (mm),
- ω PO (obr/min).

Obliczone parametry wyjściowe są następujące:

- obwód PO (mm),
- odległość po obwodzie dla 1 stopnia obrotu (mm),
- odległość kątowa kolejnych uderzeń ( $^{\circ}$ ),
- stosunek ω NO do ω PO,

- $\omega$  narzędzia (obr/min),
- posuw (mm/obr).

Obliczanie parametrów obróbki, m.in. $\omega$ narzędzia na podstawie danych o wymiarach linii śrubowej oraz $\omega$ PO			
Dane wejściowe		Obliczone wyniki	
odległość liniowa (mm)	0,6	obwód PO (mm)	157,0796
odległość obwodowa (mm)	15,7	odległość po obwodzie dla 1 stopnia obrotu (mm)	0,4363
średnica PO (mm)	50	odległość kątowa kolejnych uderzeń (°)	35,9817
$\omega$ PO (obr/min)	20	stosunek $\omega$ narzędzia do $\omega$ PO	10,0051
		<b><math>\omega</math> narzędzia (obr/min)</b>	<b>200,1014</b>
		<b>posuw (mm/obr)</b>	<b>6,003</b>

Rys. 4. Obliczanie parametrów obróbki na podstawie danych o siatce kontaktów narzędzia z materiałem

Wzory do obliczeń danych wyjściowych:

Obliczenie obwodu PO:

$$\text{obwód PO} = \pi * \text{średnica PO} \quad (7)$$

Odległość obwodowa dla 1 stopnia obrotu:

$$\text{odl. obw. 1 stopnia} = \text{obwód PO} / 360 \quad (8)$$

Odległość kątowa kolejnych uderzeń:

$$\text{odległość kątowa kontaktów} = \frac{\text{odległość obwodowa}}{\text{odl. obw. 1 stopnia}} \quad (9)$$

Stosunek  $\omega$  NO do  $\omega$  PO:

$$\text{stos. } \omega \text{ NO do } \omega \text{ PO} = \frac{360}{\text{odległość kątowa kontaktów}} \quad (10)$$

$\omega$  NO:

$$\omega \text{ NO} = \omega \text{ PO} * \text{stos. } \omega \text{ NO do } \omega \text{ PO} \quad (11)$$

Posuw:

$$\text{posuw} = \text{stos. } \omega \text{ NO do } \omega \text{ PO} * \text{odległość liniowa} \quad (12)$$

Najważniejszym zadaniem dotyczącym obliczeń w tej części jest odpowiednie dobranie prędkości obrotowej narzędzia obróbkowego, w oparciu o odległość liniową poszczególnych punktów styku narzędzia z PO oraz odległości kątowej między nimi. Znając powyższe dane oraz prędkość obrotową PO, można poprawnie obliczyć prędkość obrotową narzędzia. Z poziomu tej części programu można wrócić do menu głównego lub przejść do pomocy.

Druga część arkusza również jest chroniona przed edycją, można wprowadzać tylko dane w tabeli z lewej strony. Dane wyjściowe są obliczane i wprowadzane automatycznie.

### 2.3. Obliczanie procentowej powierzchni obróbki na podstawie danych o narzędziu obróbkowym

W kolejnej części programu użytkownik ma możliwość zadania parametrów narzędzia obróbkowego, którym jest kulka o określonej średnicy, a także głębokości nagniatania (rys. 5). Na podstawie tych danych, a także podanej przez użytkownika średnicy wałka oraz obliczonego wcześniej posuwu na 1 obrót narzędzia, program jest w stanie policzyć procentową powierzchnię poddaną obróbce oraz inne pomocnicze wartości.

**Obliczanie procentowej powierzchni poddanej obróbce, na podstawie danych o narzędziu**

Dane wejściowe		Obliczone dane	
Średnica kulki (mm)	5	pole powierzchni wałka na długości 50mm (mm <sup>2</sup> )	10053,10
Głębokość nagniatania (mm)	0,1	promień śladu odcisku	0,70
średnica wałka (mm)	16	pole powierzchni śladu (mm <sup>2</sup> )	1,539
		łącznie pole powierzchni śladów nagniatania (mm <sup>2</sup> )	56,957
		liczba punktów styku na 50mm	37,00
		procentowy stopień pokrycia śladami obróbki	0,57%

Powrót do menu głównego

Rys. 5. Część trzecia programu

Obliczenie danych wejściowych odbywa się w następujący sposób:  
Pole powierzchni wałka na 50 mm długości:

$$PP \text{ wałka na } 50\text{mm} = \pi * (\text{średnica wałka}/2)^2 * 50 \quad (13)$$

Promień śladu odcisku:

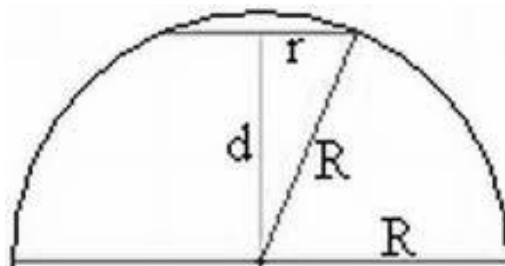
$$\text{promień śladu} = \sqrt{(\text{średnica kulki}/2)^2 - ((\text{średnica kulki}/2) - \text{głębokość nagniatania})^2} \quad (14)$$

Promień śladu odcisku jest obliczany na geometrycznej zasadzie obliczenia promienia koła małego i wielkiego (rys. 6). Niech R będzie promieniem kulki, a wymiar d różnicą pomiędzy promieniem i głębokością nagniatania. Wtedy promień nagniatania oznaczony r będzie wynosił z tw. Pitagorasa:

$$d^2 + r^2 = R^2 \quad (15)$$

Co po przekształceniu daje:

$$r = \sqrt{R^2 - d^2} \quad (16)$$



Rys. 6. Obliczanie promienia koła małego

Pole powierzchni śladu odcisku:

$$PP \text{ śladu odcisku} = \pi * (\text{promień śladu})^2 \quad (17)$$

Liczba punktów styku na 50 mm:

$$\text{liczba punktów styku} = 50 / \text{posuw na 1 obrót narzędzia} \quad (18)$$

Łączne pole powierzchni nagniatania:

$$PP \text{ nagniatania} = \text{liczba pkt styku} * PP \text{ śladu odcisku} \quad (19)$$

Procentowy stopień pokrycia śladami obróbki:

$$\% \text{ pokrycie śladami obróbki} = PP \frac{\text{nagniatania}}{PP} \text{ wałka na 50 mm} \quad (20)$$

#### 2.4. Obliczanie posuwu na podstawie procentowej powierzchni poddanej nagniataniu oraz $\omega$ PO i $\omega$ NO

W czwartej części programu, użytkownik podając za dane wejściowe takie informacje, jak (rys. 7):

- procentowa powierzchnia poddana nagniataniu,
- $\omega$  PO (obr/min),
- $\omega$  NO (obr/min),
- średnica PO (mm),
- średnica kulki nagniatającej (mm),
- głębokość nagniatania (mm),

otrzymuje wyniki następujących danych wyjściowych:

- promień nagniatania (mm),
- pole powierzchni pojedynczego kontaktu NO z PO (mm<sup>2</sup>),
- całkowita powierzchnia nagniatania (mm<sup>2</sup>),
- ilość punktów styku NO z PO,
- stosunek prędkości NO do PO,
- posuw na 1 obrót NO (mm),
- posuw (mm/obr).

Obliczanie posuwu na podstawie procentowej powierzchni poddanej nagniataniu, oraz prędkości PO i NO

Dane wejściowe	
procentowa powierzchnia nagniatania (%)	34,00%
powierzchnia 50mm wałka (mm <sup>2</sup> )	15707,96
$\omega$ PO (obr/min)	10
$\omega$ NO (obr/min)	1000
Średnica wałka (mm)	20
średnica kulki (mm)	6
głębokość nagniatania (mm)	1

Obliczone dane	
promień nagniatania (mm)	2,24
pole powierzchni pojedynczego nagniatania (mm <sup>2</sup> )	15,71
powierzchnia nagniatania (mm <sup>2</sup> )	5340,71
ilość punktów styku NO z PO	340,00
stosunek prędkości NO do PO	100
posuw na 1 obrót NO (mm)	0,15
posuw (mm/obr)	14,71

Powrót do menu głównego

Rys. 7. Obliczanie posuwu na podstawie % powierzchni nagniatania

Wzory do obliczeń wyglądają następująco:

Promień śladu nagniatania:

$$\text{promień śladu} = \frac{\sqrt{((\text{średnica kulki}/2)^2 - ((\text{średnica kulki}/2) - \text{głębokość nagniatania})^2}}{\quad} \quad (21)$$

Pole powierzchni pojedynczego śladu:

$$PP \text{ śladu} = \pi * \text{promień śladu}^2 \quad (22)$$

Łączne pole powierzchni poddanej nagniataniu:

$$PP \text{ nagniatania} = PP \text{ 50mm wałka} * \text{procentowe } PP \text{ nagniatania} \quad (23)$$

Ilość śladów styku NO z PO:

$$\text{ilość śladów} = PP \text{ nagniatania} / PP \text{ śladu} \quad (24)$$

Stosunek  $\omega$  NO do  $\omega$  PO:

$$\text{stosunek } \omega = \omega \text{ NO} / \omega \text{ PO} \quad (25)$$

Posuw na 1 obrót NO:

$$\text{posuw na 1 obrót NO} = 50 / \text{ilość śladów} \quad (26)$$

Posuw w mm/obr:

$$\text{posuw} = \text{posuw na 1 obrót NO} * \text{stosunek } \omega \quad (27)$$

### 3. WNIOSKI

Na podstawie przedstawionych powyżej informacji można stwierdzić, że opisany program może być przydatny do przeprowadzania eksperymentów z nagniataniem udarowym. Obliczenia z poziomu przekształcenia danych wejściowych na parametry siatki, jak również w przeciwną stronę, dają zadowalające wyniki. Obliczanie procentowej powierzchni poddanej obróbce także daje oczekiwane rezultaty. Oczywiście należy wziąć pod uwagę pewną dozę niedokładności związanej z częściowo ślizgowym ruchem NO po PO, przy dużych różnicach prędkości obrotowych.

\*\*\*

*Badania i analizy wykonano w Centrum Innowacyjnych Technologii Wydziału Matematyczno-Przyrodniczego Uniwersytetu Rzeszowskiego.*

### LITERATURA

- [1] Collective work edited by M. Korzyński: *Nonconventional Finishing Technologies*, PWN, Warsaw 2013, pp. 120-121.
- [2] Korzyński M.: *Nagniatanie ślizgowe*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2014.
- [3] Walkenbach J.: *Excel 2013 PL. Biblia*, Wyd. Helion, 2013.
- [4] Gonet M.: *Excel w obliczeniach naukowych i inżynierskich*, Helion, 2011.