

dr hab. inż. Tomasz Trzepieciński  
Katedra Technologii Maszyn i Inżynierii Produkcji  
Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza  
al. Powstańców Warszawy 8, 35-959 Rzeszów  
e-mail: tomtrz@prz.edu.pl

Rzeszów, 6 września 2022

### Recenzja

rozprawy doktorskiej Pana **mgr. inż. Ireneusza Usydusa** pt. **„Gięcie na zimno profili w giętarcie trójrolkowej”**

wykonanej na zlecenie Z-cy Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Lubelskiej

Postawę opracowania recenzji stanowi pismo Z-cy Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna, Pana dr. hab. inż. Jarosława Bieniasia, prof. uczelni, powołujące się na uchwałę w sprawie wyznaczenia mnie na recenzenta w przewodzie doktorskim Pana mgr. inż. Ireneusza Usydusa.

### **Zakres przedmiotowy rozprawy**

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Ireneusza Usydusa pt. „Gięcie na zimno profili w giętarcie trójrolkowej”, wykonana pod kierunkiem promotora, Pana dra hab. inż. Arkadiusza Tofila, prof. uczelni.

Metody obróbki plastycznej pozwalają nadać materiałowi odpowiednie właściwości użytkowe, które zależą od warunków technologicznych tych metod oraz od zabiegów cieplno-plastycznych przeprowadzanych w trakcie lub bezpośrednio po zakończeniu procesu kształtowania. Technologie gięcia stanowią jeden z najważniejszych segmentów sektora obróbki plastycznej. Gięcie jest metodą kształtowania wyrobów, polegającą na plastycznym odkształcaniu materiału pod wpływem działania momentu zginającego. Po zdjęciu obciążenia wyroby metalowe wykazują zjawisko sprężynowania, tj. w wyniku relaksacji części sprężystej naprężeń wewnętrznych po odciążeniu, materiał podlega odkształceniom

sprężystym w kierunku przeciwnym do kierunku przyłożonego obciążenia. Dokładność geometryczna kształtowanych plastycznie wyrobów jest zwiększana poprzez wprowadzanie innowacyjnych rozwiązań konstrukcyjnych giętarek oraz systemów sterowania, a także implementację systemów automatycznej korekty odchyłek wymiarowo-kształtowych.

Przedmiotem rozprawy jest analiza procesu gięcia na zimno profili wykonanych ze stali S235JR za pomocą giętarki trójrolkowej oraz w procesie gięcia trójpunktowego. Praca zawiera wyniki badań eksperymentalnych, analiz teoretycznych oraz symulacji numerycznych metodą elementów skończonych (MES).

### **Struktura rozprawy doktorskiej**

Rozprawa doktorska liczy 164 strony i zawiera 155 rysunków oraz 56 tabel. W rozprawie znajdują się również podziękowania, spis treści, streszczenia w językach polskim i angielskim, wstęp, część zasadnicza, podsumowanie zawierające również wnioski oraz bibliografia. Część zasadniczą rozprawy podzielono na sześć głównych rozdziałów. Poszczególne rozdziały zostały dodatkowo podzielone na podrozdziały (drugiego i trzeciego stopnia). Bibliografia obejmuje 127 pozycji uszeregowanych alfabetycznie. Tematyka cytowanych źródeł jest reprezentatywna do prezentowanych w rozprawie zagadnień naukowych.

We wstępie Autor przedstawił problemy towarzyszące procesowi gięcia i na tej podstawie uzasadnił konieczność podjęcia badań objętych rozprawą doktorską. Rozdział drugi zawiera charakterystykę najbardziej rozpowszechnionych metod gięcia wyrobów metalowych. Następstwem odkształcenia kształtowników metalowych są zmiany krzywizny oraz kształtu przekroju poprzecznego. Rodzaje wad wyrobów giętych oraz przegląd literatury związany z przyczynami i metodami eliminacji lub ograniczania tych wad są tematem rozdziału trzeciego. W kolejnym rozdziale przedstawiono rodzaje giętarek do gięcia kształtowników o różnym kształcie przekroju oraz narzędzia i oprzyrządowanie dodatkowe stosowane w giętarekach rolkowych. Rozdział piąty zawiera cel pracy, tezę oraz zakres badań konieczny do weryfikacji postawionej tezy oraz osiągnięcia celu pracy. Celem pracy, wynikającym z postawionej tezy, jest analiza procesu gięcia na zimno profili stalowych za pomocą giętarki trójrolkowej, określenie kluczowych parametrów procesu oraz ich wpływu na przebieg procesu gięcia i jakość wyrobu. W rozdziale szóstym wyszczególniono zadania stanowiące drogę do osiągnięcia celu pracy oraz przedstawiono metodykę badań wraz z charakterystyką wykorzystanych maszyn i urządzeń. Doktorant wykorzystał w badaniach

następujące wyroby hutnicze: płaskowniki, kątowniki zimnogięte i gorącowałowane, a także kształtowniki o przekroju kwadratowym i prostokątnym. Do analizy procesu gięcia wykorzystano giętarke trójrolkową, wyposażoną w dwa rodzaje rolek monolitycznych i segmentowych, oraz metodę zginania trójpunktowego realizowanego za pomocą uniwersalnej maszyny wytrzymałościowej wyposażonej w odpowiednie oprzyrządowanie. Pomiar zarysu profilu kształtowników zrealizowano za pomocą nowoczesnych metod pomiarowych stykowych (ramię Faro Arm) oraz bezdotykowych wykorzystujących technikę cyfrowej korelacji obrazu wykorzystywaną do trójwymiarowego pomiaru odkształceń wyrobów (system 3D Atos Core).

Wyniki badań zawarte są w rozdziale siódmym i obejmują w dominującym zakresie porównanie wyników badań eksperymentalnych oraz teoretycznych wpływu ugięcia wstępnego na promień gięcia wyrobu. Liczba oraz różnorodność wykonanych badań eksperymentalnych i ich wariantów jest godna uznania. Zawartość merytoryczna kolejnych podrozdziałów jest bardzo podobna, różnica w wynikach wiąże się z kształtem profilu analizowanego kształtownika oraz związanych z tym wad wyrobu. Analiza wyników charakteryzuje się wartością dodaną w postaci opracowanych zależności promienia gięcia oraz ugięcia wstępnego oraz funkcji odwrotnych pozwalających na określenie ugięcia wstępnego dla krzywizn wyrobów nie ujętych w badaniach. Uzyskane zależności deformacji przekroju półfabrykatu od ugięcia wstępnego ułatwiają dobór narzędzi oraz pozwalają wyznaczyć odchyłki wymiarowe gotowego wyrobu. Szkoda, że Autor nie umieścił na wykresach zawierających linie trendu wartości współczynnika determinacji jako ilościowej miary jakości dopasowania modelu do danych eksperymentalnych. Uzupełnieniem badań eksperymentalnych oraz analiz teoretycznych odkształceń giętych wyrobów są zamieszczone w pracy wyniki symulacji numerycznych metodą elementów skończonych. Pewne zastrzeżenia budzi sposób prezentacji odkształceń kształtowników uzyskanych za pomocą MES. Przedstawiony na rysunku 7.8 rozkład odkształceń plastycznych jest niewidoczny, może konieczne byłoby powiększenie istotnych fragmentów modelu. Podobny komentarz można przypisać do rysunku 7.20, dodatkowo wartości w legendach są niewidoczne na wydruku. W rozdziale ósmym Doktorant poprawnie sformułował ograniczenia procesu gięcia wyrobów o różnorodnym kształcie przekroju oraz zaproponował sposoby ich ograniczenia lub uniknięcia. Rozdział ten, świadczący o bogatej wiedzy praktycznej Doktoranta, oceniam bardzo wysoko.

Strukturę i zawartość rozprawy oceniam pozytywnie. Doktorant na podstawie przeglądu literatury zidentyfikował niszę badawczą a następnie zaproponował indywidualny plan

badawczy. Nie mam istotnych zastrzeżeń do sposobu przeprowadzenia badań eksperymentalnych oraz interpretacji wyników.

### **Uwagi merytoryczne**

Szczegółowa analiza wyników poszczególnych badań opisanych w pracy budzi jednak pewne wątpliwości. Moje główne, krytyczne lub dyskusyjne, uwagi są następujące:

1. Na stronie 35 Autor powiązał powstające podczas procesu gięcia naprężenia szczałkowe z wytrzymałością gotowych wyrobów. Szkoda, że w kontekście tego akapitu (oraz całej pracy) Autor nie wspomina o wpływie naprężeń własnych na warunki pracy giętych wyrobów. W czasie pracy, za korzystny uznaje się przypadek, gdy wygięta część jest obciążona momentem tak samo skierowanym jak działanie momentu w procesie gięcia (Erbel S., Kuczyński K., Marciniak Z. Obróbka plastyczna na zimno. PWN, Warszawa 1975).
2. Do zmniejszenia tarcia podczas obróbki kątownika gorącowalcowanego za pomocą giętarki trójrolkowej zastosowano smarowanie olejem. Wobec występowania na rynku wielu gatunków olejów oraz ich kompozycji konieczne jest uzasadnienie wyboru oleju oraz podanie jego gatunku.
3. Pomimo, że jak stwierdza sam Autor, proces gięcia przebiega na zimno i zjawiska cieplne nie mają znaczącego wpływu na jego przebieg, w modelu numerycznym ambitnie uwzględniono parametry pozwalające na uwzględnienie efektu zamiany pracy odkształcenia plastycznego na ciepło, generowanie ciepła w wyniku tarcia oraz wymianę ciepła odkształcanego materiału z otoczeniem i narzędziami (str. 72). Niestety w pracy nie przedstawiono ani nie skomentowano wyników symulacyjnych dotyczących wyżej wymienionych zjawisk.
4. Tarcie jest jednym z najbardziej trudnych do opisu ilościowego zjawisk pojawiających się podczas obróbki plastycznej. Na jakiej podstawie przyjęto wartość współczynnika tarcia  $\mu = 0,5$  dla narzędzi o ryflowanej powierzchni?
5. W rozdziale 7 przedstawiono wykresy zależności kątów  $\alpha$  i  $\beta$  od ugięcia wstępnego dla kształtowników o różnym kształcie przekroju. Według jakiego kryterium dobierano rodzaj linii trendu oraz ewentualnie stopień wielomianu? Na rysunku 7.27 zastosowano wielomian trzeciego stopnia do aproksymacji czterech punktów ( $R^2 = 1$ ), tymczasem na pozostałych rysunkach nie stosowano tak wysokiego stopnia dopasowania.

Przedstawione powyżej uwagi nie wpływają znacząco na ogólną wysoką ocenę naukową rozprawy doktorskiej. Recenzent ma nadzieję, że zostaną one uwzględnione przez Doktoranta podczas opracowywania i analizy wyników przyszłych prac badawczych.

### **Uwagi o charakterze redakcyjnym**

W treści pracy doktorskiej, poza nielicznymi wyjątkami związanymi z oczywistymi błędami interpunkcyjnymi i stylistycznymi, zastosowano poprawne słownictwo techniczne, a styl literacki pisania pracy jest na akceptowalnym poziomie. Chociaż przedstawioną do recenzji pracę oceniam bardzo wysoko, jej lektura skłoniła mnie jednak do wypunktowania kilku uwag:

1. Co oznacza, że „gięcia naprzemienne są mocne” (str. 13)?
2. Autor używa terminu "sprężynowanie powrotne", które z natury rzeczy jest powrotne; sugeruję używanie określenia "sprężynowanie" (ang. springback).
3. W wielu miejscach pracy poświęconych przeglądowi stanu wiedzy zastosowano zbyt lakoniczny sposób prezentacji wyników zaczerpniętych z literatury, np. nie wiadomo na czym polega „nowe podejście do analizy analitycznej procesu gięcia” (str. 20) przedstawione w pracy [81]. Podobnie nie określono na czym polega, cyt. „rozluźnienie” założeń symulacji numerycznej, której wyniki przedstawiono w pracy [24] (str. 36).
4. Brak wyjaśnienia na czym polega, cyt. „kurczenie materiału” po osiągnięciu punktu krytycznego (str. 23).
5. Wydaje się, że w obliczu zjawiska sprężynowania, promień gięcia (str. 39) oraz uzyskany promień (str. 38), obydwa oznaczone w pracy symbolem  $R$ , nie są tymi samymi parametrami geometrycznymi.

### **Wnioski końcowe**

Opracowana przez Pana mgr. inż. Ireneusza Usydusa rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, a także dowodzi umiejętności prowadzenia przez Niego samodzielnej pracy naukowej. Autor rozprawy prawidłowo zaplanował eksperymenty badawcze wykazując się przy tym wysoką umiejętnością analizy i przetwarzania danych pomiarowych. Sposób prezentowania wyników badań i ich

omówienie świadczą o bardzo dobrej znajomości Autora zagadnień związanych z projektowaniem procesu technologicznego gięcia kształtowników.

Pewne niedociągnięcia redakcyjne zawarte w treści pracy doktorskiej oraz przedstawione w recenzji uwagi merytoryczne nie umniejszają istotnie wysokiej wartości naukowej otrzymanych wyników. Uważam, że opiniowana praca stanowi oryginalne rozwiązanie istotnych problemów towarzyszących gięciu kształtowników o różnym przekroju, zarówno pod względem poznawczym, jak i praktycznym. Efekt aplikacyjny uzyskanych wyników badań został potwierdzony we wnioskach zawierających sposoby ograniczenia lub eliminacji podstawowych wad występujących podczas gięcia kształtowników o typowych kształtach przekroju.

Doktorant wykazał się dobrym opanowaniem warsztatu badawczego, znajomością literatury przedmiotu oraz umiejętnością poprawnego wnioskowania. Całościowa pozytywna ocena rozprawy doktorskiej upoważnia mnie do postawienia wniosku o dopuszczenie Pana mgr. inż. Ireneusza Usydusa do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

