

**Recenzja rozprawy doktorskiej  
mgra inż. Artura Barełkowskiego  
pt. Technologia obróbki cieplno-plastycznej odkuwek z wykorzystaniem ciepła kucia**

**1. Omówienie recenzowanej pracy**

Opracowana przez mgra inż. Artura Barełkowskiego rozprawa doktorska dotyczy obróbki cieplno-plastycznej odkuwek stalowych z wykorzystaniem ciepła kucia. Rezultaty prac badawczych osiągnięte zostały głównie na podstawie badań doświadczalnych, częściowo wykonanych w warunkach przemysłowych.

Procesy produkcji odkuwek matrycowych metodą kucia na gorąco są bardzo energochłonne z uwagi na konieczność nagrzewania wsadów przed kuciem oraz w operacjach obróbki cieplnej. Wytwarzanie odkuwek stalowych wymaga szczególnie dużych nakładów energii z uwagi na wyższe temperatury kucia i obróbki cieplnej w stosunku do większości grup materiałów metalowych. Uwzględniając bardzo wysokie ceny energii, wszelkie prace zmierzające do obniżenia jej zużycia przy wytwarzaniu odkuwek matrycowych są w pełni uzasadnione. Podjęta w rozprawie tematyka badawcza jest bez wątpienia aktualna i bardzo ważna zarówno w aspekcie naukowym, jak też użytkowym.

Praca napisana jest w języku polskim, liczy 136 stron i podzielona jest na 8 rozdziałów, uzupełnionych spisem treści, wykazem ważniejszych oznaczeń i skrótów, streszczeniem w języku polskim i angielskim oraz bibliografią.

Wprowadzenie (rozdział pierwszy) stanowi zasygnalizowanie tematyki badawczej. Autor krótko przedstawił historię rozwoju obróbki cieplno-plastycznej stali.

Rozdział drugi zawierający studium literatury podzielony jest na cztery podrozdziały. W pierwszym z nich zamieszczono opis przemian fazowych zachodzących w stalach w czasie nagrzewania i chłodzenia. Scharakteryzowano mechanizmy umocnienia stali i usuwania jego skutków poprzez zdrowienie i rekrytalizację.

W drugim podrozdziale podano charakterystykę obróbki cieplno-plastycznej. Przedstawiono podział tej obróbki na wysokotemperaturową i niskotemperaturową oraz na obróbkę TMT (Thermo-Mechanical Treatment), stosowaną dla stali przeznaczonych do obróbki cieplnej i obróbkę TMP (Thermo-Mechanical Processing) pozwalającej na uzyskanie odpowiedniej

mikrostruktury i tym samym właściwości stali. Przytoczono przykłady stosowania obróbki TMP. Na podstawie literatury opisano również inne metody obróbki cieplnej rozwijane przez różnych badaczy i zakłady, takie jak DFQ (Direct-Forge Quenching) – hartowanie bezpośrednio po kuciu, DHT (Direct Heat Treatment) – bezpośrednia obróbka cieplna, kontrolowane chłodzenie po kuciu na stanowisku BY, a także przedstawiono osiągnięcia dotyczące kontroli wielkości ziarna dla różnych gatunków stali.

W trzeciej części rozdziału przedstawiono typowy proces kucia odkuwek na prasach korbowych stosowany w Kuźni Jawor S.A. Scharakteryzowano poszczególne operacje, takie jak: cięcie wsadu, spęczanie, kucie wstępne i wykańczające, okrawanie, obróbka cieplna, śrutowanie, badanie jakości metodą magnetyczno-proszkową. Na końcu podrozdziału zaprezentowano odkuwki wybrane do analizy w ramach rozprawy doktorskiej, różniące się kształtem, gatunkiem materiału oraz rodzajem stosowanej obróbki cieplnej.

W ostatnim podrozdziale Kandydat do stopnia doktora zamieścił podsumowanie analizy zagadnienia. Stwierdził, że obróbka cieplno-plastyczna stosowana jest głównie w branży motoryzacyjnej przy produkcji wielkoseryjnej oraz w produkcji hutniczej półwyrobów walcowanych, natomiast nie jest stosowana na szeroką skalę w typowych zakładach kuźniczych.

W ocenie rozdziału należy stwierdzić, że podrozdział trzeci, w którym zamieszczono analizę procesu technologicznego kucia w Kuźni Jawor S.A. oraz dokonano wyboru odkuwek do dalszych analiz powinien znaleźć się w dalszej części rozprawy, dotyczącej pracy własnej, a nie w rozdziale dotyczącym analizy literaturowej zagadnienia. Ponadto na końcu podsumowania zabrakło powiązania opisanego w rozdziale stanu wiedzy i praktyki z uzasadnieniem podjęcia badań przedstawionych w rozprawie. Należy jednak podkreślić, że w rozdziale poruszono szereg zagadnień związanych z obróbką cieplno-plastyczną. Zawarte informacje są ciekawe i dotyczą zakresu rozprawy. Tytuły podrozdziałów korespondują z zawartą w nich treścią. Rozdział stanowi dobre wprowadzenie do tematyki pracy.

W rozdziale trzecim podano cele i tezę rozprawy. Jako główny cel przyjęto zaprojektowanie dla wytypowanych odkuwek parametrów obróbki cieplno-plastycznej zapewniających uzyskanie odpowiedniej mikrostruktury i właściwości. Celem pomocniczym było opracowanie uniwersalnego modelu chłodzenia, który można stosować dla szerszej grupy wyrobów. W tezie założono, że wykorzystując ciepło z operacji kucia do obróbki cieplnej można uzyskać taką samą mikrostrukturę i właściwości mechaniczne jak w typowych procesach kucia. Autor stwierdził niefortunnie, że teza wynika z przedstawionej pracy. W założeniu tezę stawia się na początku i na jej podstawie powstaje praca, a nie odwrotnie.

Pomijając powyższą uwagę stwierdzam, że zarówno cel, jak i teza są sformułowane w sposób zrozumiały, jasno komunikują o kierunku podjętych prac badawczych. Mają bezpośredni związek z tematem rozprawy.

W rozdziale czwartym przedstawiono metodykę badań. W sześciu krótkich podrozdziałach opisano stosowaną aparaturę badawczą i metody badań w zakresie pomiaru temperatury za pomocą kamery termowizyjnej oraz termopary, analizy strukturalnej, pomiaru twardości, badań plastometrycznych i analizy statystycznej wybranych wskaźników procesu. W opisie badań plastometrycznych, które jak stwierdził Autor wykorzystano do „porównania właściwości mechanicznych”, zabrakło informacji, jakie wskaźniki były wyznaczane w próbie skręcania i jak interpretowano wyniki. Pozostałe opisy, chociaż bardzo krótkie, w sposób wystarczający komunikują o sposobie dokonywania pomiarów.

W rozdziale piątym przedstawiono obszerne wyniki badań dotyczących odkuwki adaptera ze stali 42CrMo4. We wstępie rozdziału scharakteryzowano proces produkcji tej odkuwki. Uwzględniając wymagania techniczne wskazano na możliwość zamiany stosowanego ulepszania cieplnego na wyżarzanie izotermiczne wykorzystując temperaturę nagrzewania do kucia, co zmniejszyłoby liczbę nagrzewów z trzech do jednego. Zasygnalizowano również możliwość opracowania modelu chłodzenia odkuwek na podstawie jej masy i powierzchni, który mógłby być stosowany do innych wyrobów.

W podrozdziale pierwszym przedstawiono wyniki pomiaru temperatury materiału w czasie kolejnych operacji poczynając od nagrzewania w nagrzewnicy indukcyjnej, aż do zakończenia kucia. Autor opisał problemy występujące przy pomiarze wykonywanym termoparą i kamerą termowizyjną. W wyniku wykonanych badań uzyskał rozkład temperatury w funkcji czasu w całym procesie kucia.

W kolejnym podrozdziale przedstawiono badania laboratoryjne dotyczące chłodzenia nagranych próbek wymuszonym strumieniem powietrza. W rezultacie dla próbek o trzech różnych przekrojach wyznaczono charakterystyki chłodzenia tj. spadek temperatury w funkcji czasu dla różnych prędkości obrotowych zastosowanych wentylatorów.

W trzecim podrozdziale opisano koncepcję obliczania zmian temperatury chłodzonej stali, w tym metodę teoretyczno-doświadczalną obliczania współczynnika przejmowania ciepła. Na podstawie opracowanego modelu uwzględniającego parametry odkuwki, uzyskano dobrą zgodność obliczonych charakterystyk chłodzenia z charakterystyką doświadczalną. W końcowej części podrozdziału na podstawie rozważań dotyczących wpływu temperatury i czasu na strukturę stali określono trzy temperatury wyżarzania (560°C, 580°C, 610°C), które będą weryfikowane w następnych etapach badań.

W następnym podrozdziale przedstawiono wyniki prób zastosowania trzech wytypowanych temperatur i dwóch czasów (30 min., 60 min.) wyżarzania izotermicznego odkuwek chłodzonych swobodnie po kuciu. Opisano rezultaty obserwacji mikrostruktury oraz podano interpretację przemian fazowych zachodzących przy różnych parametrach temperaturowo-czasowych wyżarzania. Zaprezentowano również wyniki pomiaru twardości dla wszystkich badanych przypadków. Na podstawie wykonanych badań stwierdzono, że najlepszymi parametrami wyżarzania izotermicznego są: temperatura wynosząca 610 °C i czas równy 60 minut. Przy takich parametrach uzyskano jednorodną strukturę ferrytyczno-perlityczną w całej objętości odkuwki oraz twardość spełniającą warunki techniczne odbioru odkuwek. W końcowej części podrozdziału przedstawiono krzywe umocnienia wyznaczone dla próbek wyciętych z odkuwek wykonanych konwencjonalną metodą (poddanych ulepszeniu cieplnemu) oraz z odkuwek poddanych wyżarzaniu izotermicznemu; wszystkie krzywe wykazały dużą zgodność.

W ostatnim podrozdziale opisano wyniki prób w warunkach przemysłowych, wykonanych na stanowisku składającym się z linii BY do kontrolowanego chłodzenia oraz elektrycznego pieca taśmowego. Wykonano serię odkuwek według zaprojektowanej obróbki cieplno-plastycznej (z parametrami opisanymi we wcześniejszym podrozdziale) i na podstawie pomiarów stwierdzono, że mikrostruktura odkuwek jest prawidłowa (ferrytyczno-perlityczna), natomiast twardość większości z nich jest zbyt duża. Kolejną serię badań wykonano zatem dla wyższej temperatury wyżarzania wynoszącej 620°C. Korekta temperatury przyniosła oczekiwany efekt; wszystkie odkuwki spełniły wymagania odnośnie mikrostruktury oraz twardości. Wykonana analiza statystyczna potwierdziła dużą zdolność procesu w aspekcie uzyskiwania odpowiedniej twardości odkuwek.

Bogaty materiał badawczy przedstawiony w rozdziale piątym oceniam bardzo pozytywnie. Pomimo pewnych uwag podanych w dalszej części recenzji należy docenić wykonanie pewnego zakresu badań w trudnych warunkach przemysłowych. Uzyskane rezultaty dają podstawę sądzić, że opracowane parametry obróbki cieplno-plastycznej mogą zapewnić wymagane właściwości analizowanej odkuwki adaptera w warunkach produkcyjnych.

Rozdział szósty ma taki sam układ jak rozdział piąty, z tym, że dotyczy odkuwki widłaka ze stali niestopowej C45. Z tego powodu w recenzji mniej uwagi poświęcono metodyce wykonanych badań, która jest taka sama jak w przypadku poprzedniej odkuwki, natomiast omówiono głównie wyniki uzyskane dla analizowanej odkuwki.

We wstępie rozdziału podana jest charakterystyka odkuwki i procesu jej kucia. Odkuwka kuta jest na gorąco i poddawana ulepszeniu cieplnemu. Twardość gotowej odkuwki powinna

mieścić się w zakresie 171 – 252 HB. W przypadku odkuwki widłaka przyjęto, że po kuciu będzie ona chłodzona do temperatury poniżej  $A_{r1}$ , a następnie zostanie poddana ulepszeniu cieplnemu według stosowanej technologii.

W podrozdziale pierwszym przedstawiono wyniki pomiarów temperatury przy użyciu kamery termowizyjnej oraz termopary w kolejnych operacjach kucia. Z tego też powodu tytuł podrozdziału „Badania parametrów procesu ...” powinien brzmieć „Badania temperatury ...”, gdyż temperatura była jedynym badanym parametrem. Wyznaczono przebieg temperatury materiału w czasie procesu kucia i podobnie jak w przypadku odkuwki adaptera zaobserwowano, że temperatura mierzona termoparą jest większa niż rejestrowana kamerą termowizyjną.

W podrozdziale drugim opisano charakterystyki chłodzenia dla dwóch rodzajów próbek, różniących się wymiarami ( $\varnothing 35 \times 20$  mm oraz  $\varnothing 35 \times 40$  mm). Zastosowano chłodzenie wentylatorami o prędkości obrotowej w zakresie  $0 \div 1500$  obr/min, zmienianej co 150 obr/min. Na wykresach temperatury w funkcji czasu chłodzenia zaobserwowano wzrost temperatury w zakresie  $600 \div 650$  °C spowodowany przemianą fazową austenitu w ferryt i perlit.

W kolejnym podrozdziale przedstawiono budowę modelu chłodzenia oraz założenia obróbki cieplno-plastycznej. Model chłodzenia oparto na poprzednim, opracowanym dla odkuwki adaptera, jednak rozwinęto go o ciepło wydzielające się w trakcie zaobserwowanej przemiany fazowej. Weryfikacja modelu polegająca na porównaniu charakterystyk chłodzenia obliczonych na jego podstawie z danymi doświadczalnymi dla próbek walcowych wykazała bardzo dobrą zgodność. W związku z dużą różnicą przekrojów korpusu i ramion odkuwki, do dalszych analiz przyjęto wolniej stygnący korpus, jako reprezentatywny dla całej odkuwki. Uwzględniając czas trwania, temperaturę i moment rozpoczęcia przemiany fazowej sporządzono charakterystykę chłodzenia odkuwki. Na podstawie uzyskanych wyników przyjęto parametry dalszych badań, tj. prędkość obrotową wentylatorów linii chłodzącej równą 1050 obr/min, trzy różne temperatury odkuwki po chłodzeniu wynoszące 600 °C, 480 °C i 410 °C oraz na tej podstawie obliczono czasy chłodzenia i prędkość przesuwu taśmy w układzie chłodzącym.

W podrozdziale czwartym przedstawiono wyniki prób obróbki cieplno-plastycznej na stanowisku składającym się z prasy kującej, pieca laboratoryjnego, pojemnika z olejem i aparatury pomiarowej. Wykonano hartowanie próbek według trzech wariantów: i) bezpośrednio z temperatury kucia wynoszącej 1065 °C, ii) po ochłodzeniu do temperatury 860 °C, iii) po ochłodzeniu do temperatury 600 °C i nagrzaniu do temperatury 860 °C. Po

odpuszczeniu wszystkich próbek oraz porównaniu twardości i mikrostruktury do dalszych badań przyjęto wariant trzeci.

W ostatnim podrozdziale opisano rezultaty prób przemysłowych. Opisano badania kilku wariantów obróbki cieplno-plastycznej, mianowicie chłodzenie odkuwek po kuciu do temperatury 420 °C i 540°C, a następnie hartowanie z temperatury 860 °C oraz chłodzenie odkuwek bezpośrednio po kuciu w piecu do temperatury równej 860 °C, wygrzanie i hartowanie w oleju. Dodatkowo po wymienionych wariantach hartowania stosowano odpuszczanie w temperaturze 660 °C i 620 °C. Wyjaśnienia wymaga brak wariantu obróbki cieplno-plastycznej wytypowanego do badań przemysłowych w poprzednim podrozdziale, co zostanie zaznaczone w uwagach do pracy w dalszej części recenzji. Na podstawie uzyskanych wyników, stwierdzono, że odkuwki ochłodzone do temperatury poniżej  $A_{r1}$  (420 °C i 540 °C) spełniają warunki techniczne odbioru i posiadają podobną twardość i mikrostrukturę. Poza tym odpuszczanie w temperaturze 620 °C jest korzystniejsze od 660 °C z powodu mniejszego rozrzutu twardości.

W rozdziale zamieszczono dużo interesujących wyników badań. Występują jednak wspomniane wcześniej niekonsekwencje w procedurze badawczej oraz pewne niedociągnięcia, jak chociażby brak informacji o operacji okrawania w nowej technologii. Informacja końcowa sugerująca konieczność dalszych prac zmierzających do określenia optymalnej temperatury, do której należy chłodzić odkuwki stwarza wrażenie niedokończonych badań.

W rozdziale siódmym, którego układ jest podobny do dwóch poprzednich rozdziałów, przedstawiono wyniki badań procesu produkcji odkuwki kołnierza ze stali niestopowej P250GH, poddawanej po kuciu wyżarzaniu normalizującemu w temperaturze 890÷910 °C. W kolejnych podrozdziałach scharakteryzowano odkuwkę i proces jej kucia, określono przebieg temperatury w funkcji czasu w kolejnych operacjach kucia, obliczono charakterystykę chłodzenia po kuciu na podstawie wcześniej opracowanego modelu dla odkuwki widłaka, opracowano założenia do obróbki cieplno-plastycznej, wykonano wstępne próby doświadczalne oraz badania w warunkach przemysłowych. Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że zastosowanie chłodzenia po kuciu do temperatury 600 °C lub 500 °C, a następnie wyżarzania normalizującego w temperaturze 910 °C zapewnia uzyskanie odkuwek o odpowiedniej twardości i strukturze.

Zakres wykonanych badań i uzyskane wyniki zaprezentowane w rozdziale są interesujące. Szczególnie pozytywnie należy ocenić realizację badań w warunkach przemysłowych.

W ostatnim, ósmym rozdziale zatytułowanym „Podsumowanie i wnioski” zamieszczono głównie szczegółowy opis wykonanych badań i osiągniętych rezultatów. Tym samym w większości rozdział ma charakter streszczenia pracy. Dwa ostatnie, krótkie akapity mają znamiona wniosków, ale bardzo uogólnionych. Niestety Autor nie sformułował szczegółowych wniosków wynikających z uzyskanych rezultatów badań, a także nie odniósł się do celów rozprawy i tezy.

Bibliografia nie jest zbyt bogata, zawiera 92 pozycje, z których około 70% to publikacje obcojęzyczne. Tylko ok. 20% pozycji źródłowych pochodzi z ostatnich 10 lat (licząc od roku 2015). Niemniej jednak wykorzystane publikacje są ściśle związane z tematyką rozprawy i w mojej ocenie są wystarczające.

## **2. Ocena osiągnięć**

Praca ma charakter technologiczny i dotyczy obróbki cieplno-plastycznej odkuwek stalowych. Kandydat do stopnia doktora podjął się modyfikacji procesów produkcji wytypowanych trzech odkuwek, polegającej na wykorzystaniu ciepła kucia do kolejnych operacji obróbki cieplnej. Na podstawie badań określił parametry temperaturowo-czasowe chłodzenia odkuwek po kuciu i wyżarzania izotermicznego, ulepszania cieplnego oraz wyżarzania normalizującego odpowiednio dla odkuwek ze stali 42CrMo4, C45 i P250GH, zapewniające odpowiednią twardość oraz mikrostrukturę wyrobów.

Praca napisana jest poprawną polszczyzną i wykonana starannie pod względem edycyjnym. Występują w niej jednak liczne (ponad 70), choć drobne usterki redakcyjne. Zaznaczono je w tekście i zostaną przekazane Autorowi. Ponadto praca zawiera wiele fragmentów pisanych w trybie osobowym, niezalecanym do redakcji oficjalnych prac, jaką jest również rozprawa doktorska.

Przy realizacji rozprawy Kandydat do stopnia doktora wykazał się: gruntowną wiedzą teoretyczną i praktyczną z zakresu obróbki plastycznej i obróbki cieplnej, należyтым doborem metodyki badań, umiejętnością planowania i prowadzenia eksperymentu, dobrym przygotowaniem do realizacji badań metalograficznych, biegłością prowadzenia pomiarów twardości według procedur podanych w normach, umiejętnością wykorzystania obliczeń statystycznych.

W badaniach wykorzystał dobrej klasy sprzęt pomiarowy, m.in.: kamerę termowizyjną T840 firmy FLIR Systems, termoparę typu K z systemem pomiarowym UniTest, mikroskop świetlny Olympus GX51, mikroskop elektronowy skaningowy TESCAN VEGA-3, plastometr skrętny.

Sposób wykorzystania metod badawczych oraz jakość oceny i interpretacji uzyskanych wyników świadczy o Jego dobrym przygotowaniu do prowadzenia badań naukowych. Należy podkreślić, że zgromadzony materiał badawczy jest obszerny, uzyskany częściowo w warunkach przemysłowych, w których realizacja eksperymentu jest bardzo trudna.

Do najważniejszych osiągnięć Kandydata do stopnia doktora należy zaliczyć:

- opracowanie parametrów obróbki cieplno-plastycznej odkuwek ze stali 42CrMo4, C45 i P250G, zapewniających wymaganą jakość wyrobów,
- opracowanie modelu analitycznego do określania parametrów chłodzenia z uwzględnieniem ciepła przemiany fazowej, masy i powierzchni odkuwek,
- opracowanie metody i wyznaczenie współczynnika przejmowania ciepła podczas konwekcji na podstawie charakterystyk chłodzenia.

Podsumowując należy stwierdzić, że Autor rozprawy osiągnął postawione cele i dowiódł słuszności tezy, chociaż tego nie wyartykułował w rozprawie. Wykazał się wiedzą z zakresu obróbki plastycznej i cieplnej oraz umiejętnością prowadzenia eksperymentu. Potrafił sformułować i kompleksowo rozwiązać problem technologiczny, co potwierdza Jego umiejętność realizacji pracy badawczej. Rezultaty opisane w rozprawie stanowią opracowanie odrębnego zagadnienia naukowego mającego duży potencjał użytkowy, mieszczącego się w dyscyplinie budowa i eksploatacja maszyn, zawierającej się obecnie w dyscyplinie inżynieria mechaniczna.

Lektura rozprawy nasuwa również uwagi, niektóre o charakterze dyskusyjnym lub wynikające z ciekawości.

1. W pracy celowe i ciekawe byłoby wykonanie analizy porównawczej energii zużywanej do chłodzenia po kuciu i do nagrzewania odkuwek do obróbki cieplnej w konwencjonalnym procesie i po wprowadzeniu obróbki cieplno-plastycznej, tym bardziej, że wszystkie urządzenia chłodzące i grzewcze zasilane są energią elektryczną, co ułatwia obliczenie jej zużycia. Wyniki takiej analizy pozwoliłyby ocenić, jaki zysk energetyczny powoduje wykorzystanie ciepła kucia w badanych procesach technologicznych.
2. W charakterystyce warunków chłodzenia na linii BY posługiwano się prędkością obrotową wentylatorów. Nieznajomość ich budowy, odległości od chłodzonych odkuwek i innych parametrów powoduje, że wyniki badań mogą być odniesione tylko do stosowanej linii chłodzenia. Czy zdaniem Autora możliwe jest nadanie wynikom bardziej ogólnego charakteru, poprzez charakterystykę warunków chłodzenia innymi parametrami (np. wydajnością w  $m^3/h$ , ciśnieniem i temperaturą powietrza, itp.)?

3. Jaka jest „czułość” obróbki cieplno-plastycznej na zmienność temperatury odkuwki po kuciu, która zdarza się wskutek różnych czynników (niedokładności urządzeń, czynnika ludzkiego, czynników losowych), tzn. jaka może być dopuszczalna różnica temperatury odkuwki po kuciu w stosunku do temperatury nominalnej (przyjętej w modelu chłodzenia), aby po operacjach obróbki cieplnej odkuwki spełniały wymagania jakościowe?
4. Przy pomiarach temperatury kamerą termowizyjną w warunkach przemysłowych przyjęto temperaturę otoczenia równą 20 °C (s. 37). W rzeczywistości temperatura ta jest wyższa z powodu znajdującego się w pobliżu stanowiska do nagrzewania wsadu oraz emisji ciepła przez nagrzaną odkuwkę i narzędzia. Dodatkowo, kamera ustawiana była w odległości 1 m od badanego obiektu, nagrzanego do wysokiej temperatury. Jaki wpływ na dokładność pomiaru ma przyjęta, w mojej ocenie zaniżona, wartość temperatury otoczenia?
5. Jaki był cel pomiarów twardości odkuwki adaptera metodą Vickersa (rozdz. 5), jeżeli konieczne było powtórzenie ich metodą Brinella, która jako jedyna pozwalała na porównanie wyników z wymaganiami zawartymi w warunkach technicznych odbioru odkuwki?
6. W rozdziale 6. na podstawie badań półprzemysłowych Autor do badań przemysłowych wybrał wariant, w którym odkuwka widłaka jest chłodzona do temperatury 600 °C i następnie nagrzewana do temperatury hartowania wynoszącej 860 °C. W badaniach przemysłowych wybrany wariant nie był jednak poddany weryfikacji, natomiast badane były inne warianty (chłodzenie odkuwki do 420 °C, 540 °C). Co zadecydowało o zmianie koncepcji i dlaczego nie zamieszczono żadnego wyjaśnienia w tym zakresie?
7. Podobna uwaga dotyczy temperatury odpuszczania odkuwki widłaka. W badaniach półprzemysłowych stosowano temperaturę odpuszczania równą 660 °C, natomiast w badaniach przemysłowych zastosowano dodatkowo temperaturę 620 °C również nie wyjaśniając, co przemawiało za takim rozszerzeniem zakresu badań.
8. W pracy występuje kilka niekonsekwencji informacyjnych:
  - z wykresu przedstawionego na rys. 5.30 (s. 65) wynika, że czas chłodzenia odkuwki adaptera przy braku nadmuchu powietrza wynosi ok. 230 sek., natomiast w tekście podano, że wynosi 188 sek.,
  - zmierzona kamerą termowizyjną temperatura odkuwki adaptera chłodzonej swobodnie, na wyjściu z linii chłodzącej BY wynosiła 595 °C (rys. 5.48b, str. 77),

natomiast w tab. 5.4 (s. 77) podano, że chłodzenie na linii BY przebiega do temperatury 660 °C,

- szkic odkuwki przedstawiony na rys. 7.1 (s. 108) nie odpowiada (ma większą średnicę szyjki) odkuwce rzeczywistej pokazanej na rys. 7.2 (s. 109),
  - temperatura kołnierza odkuwki mierzona kamerą termowizyjną przed i po operacji kucia wstępnego przedstawiona na rys. 7.6 i 7.7 (s. 111) różni się od temperatury podanej na rys. 7.11 (str. 113); wartości są zamienione.
9. Na niektórych rysunkach (np. 2.1, 2.4, 2.12, 2.13, 2.16, 5.3) pozostawiono opisy w języku angielskim. Jeśli praca jest napisana w języku polskim, to należy albo opracować rysunki z opisami w języku polskim, albo podać po rysunku tłumaczenie na język polski opisów zamieszczonych na rysunku.
10. Operowanie w rozprawie pojęciem „właściwości mechaniczne” odnoszącym się tylko do twardości (np. s. 38, 107) jest pewnym nadużyciem.

### 3. Wniosek końcowy

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgra inż. Artura Barełkowskiego zawiera oryginalne rozwiązanie zagadnienia naukowego dotyczącego obróbki cieplno-plastycznej odkuwek stalowych z wykorzystaniem ciepła kucia. Autor wykazał należyłą wiedzę w tematyce rozprawy oraz umiejętność prowadzenia badań naukowych. Jego osiągnięcia wymienione w rozdziale 2. recenzji stanowią zauważalny wkład w rozwój dyscypliny naukowej budowa i eksploatacja maszyn, w której wszczęto przewód, zawierającej się obecnie w dyscyplinie inżynieria mechaniczna. Biorąc pod uwagę bardzo duży zakres wykonanych prac, głównie doświadczalnych, jakość wykonanych badań oraz wartość utylitarną uzyskanych wyników, pomimo podanych uwag, rozprawę uważam za wartościową i oceniam pozytywnie.

Na podstawie przedstawionej recenzji stwierdzam, że opiniowana praca mgra inż. Artura Barełkowskiego spełnia ustawowe wymogi stawiane rozprawom doktorskim. Wnioskuje o dopuszczenie jej do publicznej obrony.