

Recenzja pracy doktorskiej mgr inż. **Marka Zwolaka** na temat: „Analiza wpływu parametrów geometrycznych oraz materiałowych matryc stosowanych w procesie wyciskania KOBO na efekty plastycznego odkształcenia stopów Al i Mg”
opracowana na zlecenie Rady Wydziału Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza w Rzeszowie

Znany od wielu dziesiątków lat proces wyciskania materiałów metalicznych, niezmiennie stanowi obiekt badań doświadczalnych i pogłębionych analiz dopełniających niezwykle już bogatą dokumentację naukową tego zagadnienia zawartą w licznych czasopismach specjalistycznych oraz bezpośrednio prezentowaną w ramach cyklicznych, krajowych i światowych konferencji naukowych.

Będąca w centrum zainteresowania mgr inż. Marka Zwolaka metoda KOBO, polegająca na wyciskaniu metali i stopów z równoczesnym cyklicznym ich skręcaniem, zwiększa możliwość zewnętrznego oddziaływania na proces wyciskania poprzez dwa dodatkowe parametry, a to kąt i częstotliwość obustronnych obrotów matrycy. W stosunku do konwencjonalnego wyciskania, ma wówczas miejsce intensyfikacja zlokalizowanego plastycznego płynięcia kosztem jednorodnego odkształcenia, co prowadzi do silnej dominacji mechanizmu lepkiego płynięcia i to niezależnie od temperatury procesu.

W powyższym kontekście nie dziwi fakt, że zaproponowana przed 25 laty i opatentowana w kraju i za granicą metoda KOBO, do tej pory nie została jeszcze dostatecznie poznana, tym bardziej, że dopiero w ostatnich latach poważnie zainteresowało się nią kilka krajowych i światowych ośrodków naukowych.

Recenzowaną pracę doktorską mgr inż. Marka Zwolaka cechuje oryginalność zarówno w wyborze obszaru badawczego, jego aktualności, jak i przedstawionego celu, programu i metodyki badań. W oparciu o dobrze udokumentowane studia literaturowe, a przede wszystkim uzyskane wiarygodne wyniki żmudnych badań doświadczalnych, Doktorant był w stanie finalnie przedstawić istotne wnioski zarówno o charakterze poznawczym jak i praktycznym wnosząc własny wkład w rozwój inżynierii materiałowej, oraz doskonalenie procesów technologicznych w obszarze przeróbki plastycznej materiałów metalicznych. Z drugiej jednak strony, Doktorant podczas obrony pracy, będzie musiał wyjaśnić jak w kontekście przeprowadzonych badań i analiz ukierunkowanych na optymalizację konstrukcji matryc do wyciskania, rozumiał zakres realizowanego tematu, w szczególności jego fragmenty: „parametry materiałowe matryc”, oraz „stopy Al i Mg”, które powtórzył również we „Wstępie” w zdaniu: „Szczegółnej analizie poddano zagadnienie wpływu cech geometrycznych i materiałowych matryc do wyciskania stopów aluminium i magnezu.”

Opis stanu zagadnienia otwiera rozdział „Konwencjonalne i niekonwencjonalne metody wyciskania metali” ujmujący aspekt siłowy procesów oraz identyfikację strukturalną wyrobów, w tym schematy plastycznego płynięcia i problematykę wielkości ziarn (nanoziarn) w kontekście ich wpływu na własności mechaniczne. Zwrócono przy tym uwagę, że w przypadku konwencjonalnie wyciskanego na gorąco aluminium i jego stopów, w przypowierzchniowych warstwach prasówki, pojawia się bardzo niekorzystny efekt w postaci „obwódki gruboziarnistej”.

Metody wyciskania niekonwencjonalnego wchodzące w skład tzw. metod SPD, przedstawiono w pracy głównie w aspekcie możliwości rozdrobnienia ziarn do pożądanej wielkości nanometrycznej.

Kolejne rozdziały obejmują obfity zbiór informacji na temat wyciskania metodą KOBO, prezentując zarówno podejście naukowe jak i aspekt praktyczny/przemysłowy.

Przegląd literatury kończy rozdział „Projektowanie matryc do wyciskania”, który z braku stosownych informacji odnoszących się do metody KOBO, obejmuje jedynie konwencjonalne wyciskanie, skupiając się na wielkości i położeniu paska kalibrującego matrycy w celu zapewnienia jednakowej prędkości płynięcia materiału w każdym miejscu oczka matrycy, a tym samym osiągnięcia najkorzystniejszych własności mechanicznych wyrobów. Należy pamiętać, że w procesie KOBO, matryca pracuje w ekstremalnie trudnych warunkach spowodowanych nie tylko ściskaniem ale także wielokrotnym cyklicznym skręcaniem.

Podsumowanie części teoretycznej, Doktorant zawarł w rozdziale „Krytyczna analiza stanu zagadnienia”, który poprzedza ale i uzasadnia „Cele i terę pracy”, w gruncie rzeczy sprowadzające się do jednozdaniowego sformułowania (str. 36): „Zastosowanie matrycy o konstrukcji uwzględniającej dobór szczególnej geometrii czoła dostosowanej do wyciskania w procesie KOBO materiałów metalicznych o różnej strukturze wewnętrznej wsadu pozwala na uzyskanie dobrej jakości wyrobu z zachowaniem najbardziej korzystnych energetycznie warunków realizacji procesu wyciskania KOBO na zimno.”

Badania własne podzielono na dwa etapy: - badania wstępne, oraz - badania systematyczne, te drugie „w celu weryfikacji założeń przedstawionych w celach i tezie pracy”. Obydwa obejmowały „analizę charakteru płynięcia plastycznego materiału wsadowego (wlewka) oraz dokonywanych pomiarów: siła wyciskania, właściwości mechanicznych (wytrzymałość na rozciąganie, mikrotwardość) oraz struktury wewnętrznej (makro i mikrostruktura wyciskanego wyrobu w przekroju poprzecznym i wzdłużnym).” Jak podano w dalszej części pracy: „Szczególnym elementem programu jest wykorzystanie w procesie matryc o różnej geometrii powierzchni czołowej.” Doktorant zwraca przy tym uwagę na osobiste opracowanie wszystkich projektów matryc (pełna dokumentacja 3D) oraz własnoręczne ich wykonanie!

Rzeczywiście, geometria matrycy - a precyzyjniej rzecz ujmując – czoła matrycy, ma za zadanie przeniesienie obustronnych, cyklicznych obrotów matrycy do wnętrza wyciskanego materiału w celu wywołania jego cyklicznego, obustronnego skręcania, a stąd intensywnej lokalizacji plastycznego płynięcia oraz silnej generacji ponadrównowagowych defektów punktowych (w szczególności atomów międzywęzłowych) i dominacji zjawiska lepkiego płynięcia, czyli analogicznie jak to ma miejsce w cieczy.

W kolejnym fragmencie pracy Doktorant stwierdza: „Skuteczność matrycy KOBO jest weryfikowana właściwościami uzyskanego wyrobu. Oczekiwany jest by wyrób cechował się jednorodnością struktury i właściwości na przekroju poprzecznym i wzdłużnym i siła wyciskania była możliwie najniższa (str. 39).” chociaż w różnych fragmentach pracy, wymagania stawiane procesowi KOBO, w szczególności matrycom, Doktorant formułuje już nie tak precyzyjnie. Przykładowo, na stronie 38 znajdujemy: „finalny efekt wyciskania {powinien być} oceniany pod kątem uzyskania wysokiej jakości wyciskanych wyrobów”. Z pełnym przekonaniem należy podkreślić, że zebranie i opracowanie decydujących dowodów naukowych, wymagało od Doktoranta ogromnego wysiłku badawczego, porównywalnego nawet do trudu towarzyszącego wykonaniu dwóch doktoratów. Niestety, ta benedyktyńska praca nie doprowadziła do spektakularnego, błyskotliwego, naukowego przełomu, chociaż każdy jej element pozwolił na zbliżenie się do zasadniczego celu, którym w badaniach naukowych jest poznanie prawdy.

Badania wstępne zostały przeprowadzone z wykorzystaniem 3 typów matryc ze stopu Inconel 718 posiadających zróżnicowane konfiguracje czoła matrycy (promieniowe rowki), a wsadem był tzw. materiał kompozytowy, złożony z krążków stopu aluminium 7075 w stanie T6, przełożonych krążkami (markerami) z blachy miedzianej. Z kolei, do badań systematycznych przygotowano 7 geometrycznie

różnych matryc, które Doktorant zaprojektował i wykonał z obrobionego cieplnie stopu WCL. I w tym przypadku materiałem wsadowym do wyciskania, był stop aluminium 7075 chociaż w stanie przestarzanym w wyniku przeprowadzonej przez Doktoranta obróbki cieplnej. Wsad każdorazowo posiadał średnicę 60 mm, a wyrób/prasówka 10 mm. W badaniach wstępnych zewnętrzna średnica matrycy (osadzonej w pierścieniu pośrednim) wynosiła 48 mm i oscylowała z częstotliwością 5 Hz, podczas gdy w badaniach systematycznych te dwa parametry były odpowiednio równe: 44 mm i 7 Hz. W opisach proceduralnych pracy nie podano, czy prasówka po wyjściu z matrycy była poddawana intensywnemu chłodzeniu (woda), który to fakt jest niezwykle istotny przy ocenie jej struktury i poziomu własności mechanicznych. Zresztą, problemowi chłodzenia prasówki, Doktorant poświęcił zaledwie dwie krótkie wzmianki przy okazji omawiania struktury prasówki. Pierwsza (str. 67): „...fragment końcowy {odrzucono}, z powodu możliwej zmiany jego właściwości na skutek przesylenia spowodowanego prawdopodobieństwem szybkiego schłodzenia resztkami wody pochodzącej z układu chłodzenia matrycy w momencie otwierania pojemnika prasy po zakończonym procesie wyciskania.” Druga (str. 70): „...próbki z końcowej części prasówki (i) prawdopodobnie zostały schłodzone nieco szybciej od reszty prasówki podczas otwierania pojemnika prasy po zakończeniu procesu wyciskania.”

Doktorant zamieszcza w pracy siłowe charakterystyki wyciskania kompozytu warstwowego oraz stopu aluminium 7075 z użyciem skonstruowanych przez siebie matryc oraz ogromną ilość zdjęć dokumentujących strukturę wyrobów (ich początek, środek i koniec – na przekroju wzdłużnym i poprzecznym) zarówno w skali makro jak i mikro. Zgromadził i usystematyzował również mnóstwo danych na temat własności mechanicznych wyrobów/prasówki (próby rozciągania i mikrotwardości). Budzi to wielkie uznanie szczególnie jeśli chodzi o naukową dociekliwość Doktoranta, przy czym należy w tym miejscu podkreślić wiarygodność prezentowanych wyników i ich doskonałą jakość, co w sytuacji prowadzenia bardzo trudnych prób wyciskania z wykorzystaniem prototypowej prasy o skali półtechnicznej, stanowiło dla Doktoranta prawdziwe wyzwanie.

Po logicznym i zorganizowanym zaprezentowaniu wyników badań wstępnych i systematycznych, Doktorant kolejno poddał je wszechstronnej analizie, a jej rezultat ujął w postaci 5 wniosków końcowych, z których szczególnie trzeci i piąty ściśle nawiązują do tezy pracy, chociaż sformułowane zostały jedynie w formie opisowej (bez konkretów):

Wniosek nr 3: „Zastosowanie matryc o różnych wariantach geometrii części czołowej ma bezpośredni wpływ na przebieg procesu oraz pozwala na obniżenie siły wyciskania.”

Wniosek nr 5: „Ilość i geometria rowków czołowych na narzędziu nie wpłynęła na właściwości wytrzymałościowe uzyskanej prasówki, ale ich funkcja w procesie KOBO jest decydująca w formowaniu strefy plastycznej i schematu plastycznego płynięcia przy ruchu oscylacyjnym matrycy.”

Dodatkowo, w końcowym fragmencie pracy, Doktorant sprecyzował „wytyczne do projektowania matrycy KOBO”, co należy uznać za jej poważny walor praktyczny.

Recenzowana praca nasuwa kilka istotnych spostrzeżeń. Pierwsze z nich dotyczy nie ujętej we wnioskach dobrej skuteczności matrycy płaskiej (bez promieniowych rowków), zastosowanie której pozwala na poprawną realizację metody KOBO dla stopu aluminium 7075. W pracy podano chropowatość powierzchni czołowej takiej matrycy (zresztą identyczną jak i w przypadku innych wykorzystywanych matryc), ale brak jest informacji, czy pomiar tego parametru odbył się przed czy po obróbce cieplnej. Jest to o tyle istotne, że w tabeli 13 pokazano fotografie „gotowych” matryc ze śladami powierzchniowego silnego utlenienia.

Powyższą kwestię można sprowadzić do nieco innego, przewrotnego pytania: czy promieniowe rowki na czole matryc nie należy uznać za zbędne? I czy nie warto zaakceptować trochę większą siłę

wyciskania (w pracy nie dokonywano pomiarów momentu skręcającego) dla matrycy płaskiej w porównaniu z matrycami z rowkami i właśnie taką matrycę promować, szczególnie gdy jakość prasówki okazuje się być zadowalająca?

Warta dyskusji jest także kwestia nagrzewania się wyciskanego materiału w trakcie prowadzenia procesu. W istocie, jedynie jego inicjacja rzeczywiście przebiega w temperaturze pokojowej, a na zaawansowanym etapie może ona wzrosnąć nawet o kilkaset stopni (Doktorant nie prowadził niezwykle skomplikowanego pomiaru temperatury wyciskania).

Co niezwykle ciekawe, z prac Korbla i innych wynika, że własności mechaniczne prasówki nie zależą od temperatury, lecz w dominującym stopniu od wartości siły wyciskania, przy czym utrzymywanie siły wyciskania na niezmiennym poziomie (poprzez systematyczne obniżanie częstotliwości obustronnych obrotów matrycy), pomimo samoistnie wzrastającej temperatury materiału (praca odkształcenia), gwarantuje stałość finalnych własności mechanicznych na długości prasówki.

Nasuwa się także pytanie, dlaczego pomimo faktu, że w początkowych fragmentach próbek obserwuje się przypowierzchniowe struktury warstwowe (pasmowe), a w końcowych tylko jednorodnie, drobne ziarno, posiadają one zbliżone własności mechaniczne? I jeszcze jedno, czy analogicznie do niekorzystnej „obwódki gruboziarnistej” typowej dla wyciśniętego wysokotemperaturowego, konwencjonalnego aluminium i jego stopów, występowanie obwódki warstwowej w prasówce uzyskanej w niskotemperaturowej metodzie KOBO należy także ocenić negatywnie?

W ramach swojej pracy doktorskiej, mgr inż. Marek Zwolak porównawczo zajmował się również konwencjonalnym wyciskaniem stopu aluminium 7075 przeprowadzonym w temperaturze 450°C, chociaż wcześniej - tak jak i w przypadku wszystkich wsadów do wyciskania KOBO – był on długotrwale wyżarzany w temperaturze 415°C. Dlaczego zastosowano takie (450°C i 415°C) temperatury?

Recenzentowi nie udało się odnaleźć w pracy, zapowiedzianych na jej 39 stronie, wyników wyciskania jednego z trzech rodzajów materiałów wsadowych, czyli wiórów kompaktowych (materiał typu C), ze stopu aluminium 2024. Cóż więc oznacza deklaracja zawarta na stronie 40: „Dla udokumentowania uniwersalności proponowanych matryc KOBO zaprezentowano wybrane wyniki ze zrealizowanych badań eksperymentalnych wyciskania wlewka typu B oraz C.”? Proszę o wyjaśnienie tej sytuacji.

Przy finalnym redagowaniu pracy, Doktorant zaliczył parę „wpadek”. Przykładowo:

- nagminnie używa słowa „wlewek”, zamiast „wsad”, a przecież nie badał materiałów w stanie odlanym,
- z powodu nieuwagi, między innymi w Tabeli 6, zamienił „przekrój wzdłużny” z „przekrojem poprzecznym”,
- stosuje tajemnicze oznaczenia np.: (1/1' Rys. Tabela), a także nietypowe sformułowania w rodzaju: „Wyniki trzeciej drugiej próbek...”
- nie podaje pełnych danych identyfikacyjnych przywoływanych pozycji literaturowych (np.: [42] czy [52]).

Pomimo powyżej przedstawionych uwag krytycznych, praca doktorska mgr inż. Marka Zwolaka posiada niekwestionowaną wartość naukową a jej ogromny potencjał, po niewielkich korektach i uzupełnieniach tekstu pracy, może zostać wykorzystany do zredagowania kilku poważnych, specjalistycznych artykułów z obszaru inżynierii materiałowej i przeróbki plastycznej materiałów metalicznych. Dowodzi ona nie tylko posiadania przez Doktoranta głębokiej wiedzy w tych obszarach

naukowych, ale i umiejętności korzystania z niezbędnych narzędzi badawczych, poprawnie dobranych pod kątem rozwiązywanego problemu.

Z powyżej przedstawionych powodów, należy uznać, że recenzowana Praca Doktorska mgr inż. Marka Zwolaka spełnia wymagania stawiane przez Centralną Komisję ds. Tytułu Naukowego i Stopni Naukowych zawarte w obowiązujących przepisach i wytycznych. Zatem wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony przed Radą Wydziału Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej.