

**Recenzja pracy doktorskiej mgr inż. Anny Śmiglewicz**

pt. „Struktura i właściwości stali wysokomanganowej kształtowane w wyniku mechanicznego bliźniakowania indukowanego odkształceniem plastycznym”.

Promotor: dr hab. inż. Grzegorz Niewielski, prof. nzw. w Pol. Śl.

**Ocena istotności problemu naukowego**

Obecnie nadwozia samochodowe są zbudowane z cienkościennych profili wytwarzanych poprzez gięcie i wyłaczanie, które następnie są łączone przez spawanie, zgrzewanie liniowe oraz zgrzewanie punktowe. Ze względu na koszty i właściwości, koniec ubiegłego wieku to dominacja stali niskowęglowych oraz stali o podwyższonej wytrzymałości. Ostatnio w celu zmniejszenia zużycie paliwa poprzez redukcję masy pojazdów, poszukuje się nowych materiałów, które charakteryzują się wysokim stosunkiem wytrzymałości do masy (Zmniejszenie masy samochodu o 100kg pozwala zredukować zużycie paliwa o 0,3-0,6 l/100km w zależności od wielkości samochodu). Zastosowanie nowych materiałów w branży motoryzacyjnej pozwoli znacznie zredukować masę pojazdów. Stale wysokomanganowe są w tym zakresie najbardziej obiecującym materiałem. W porównaniu do zwykłych stali mikrostopowych wykazują one wyjątkowe połączenie wysokiej wytrzymałości z dobrą odkształcalnością.

W celu wykorzystania w pełni możliwości stali wysokomanganowych niezbędne są między innymi informacje o mechanizmach odkształceń plastycznych występujących w trakcie ich dynamicznej deformacji, gdyż determinuje to możliwość ich zastosowania na elementy nadwozia pochłaniające energię podczas zderzenia. Należy więc stwierdzić, że praca doktorska mgr inż. Anny Śmiglewicz jest aktualna i ważna ze względów poznawczych oraz przyszłych możliwości aplikacyjnych stali wysokomanganowych na elementy nadwozia.

## Merytoryczna ocena pracy

W pierwszej części rozprawy Autorka przedstawia szczegółowe studium literaturowe obejmujące opis:

- mechanizmów bliźniakowania,
- roli EBU w mechanizmach odkształcania ze szczególnym uwzględnieniem stali typu TWIP,
- metod wyznaczanie EBU,
- wpływu prędkości odkształcania na właściwości oraz strukturę stali wysokomanganowych.

Studium literaturowe zostało przeprowadzone bardzo kompetentnie, z krytycznym podejściem do omawianych problemów. Doktorantka pokazała, że stale wysokomanganowe z efektem TWIP są bardzo perspektywiczne ze względu na dobrą relacje wytrzymałości do ich ciągliwości. Dodatkowo wykazała, że w literaturze jest ograniczona liczba badań nad wpływem prędkości odkształcania na strukturę oraz właściwości stali wysokomanganowych. Było to punktem wyjścia do sformułowania tezy pracy: „Wysokomanganowa stal X30MnAlSi26-4-3 o niskiej energii błędu ułożenia wykazuje zdolność do absorpcji energii odkształcania plastycznego dzięki indukowanemu odkształceniu mechanicznemu bliźniakowaniu”

W następnej części pracy mgr inż. Anna Śmigiewicz przedstawia metodykę badawczą obejmującą: opis badanego materiału, metody jego wytwarzania, eksperymentalne i analityczne sposoby wyznaczania energii błędu ułożenia, opis sposobu statycznego i dynamicznego odkształcania oraz obserwacji mikrostruktury. Informacje zawarte w tej części pracy są precyzyjne i zrozumiałe. Zaproponowana metodyka jest logiczna, służąca udowodnieniu tezy pracy.

W dalszej części pracy Doktorantka przedstawia wyniki badań. W pierwszym etapie dotyczące one wyznaczenia EBU metodą analityczną wykorzystując równanie zaproponowane przez Frommeyera oraz eksperymentalnie sposobem rozciągniętych węzłów dyslokacyjnych w oparciu o teorię Browna Tholena. Wartości tych energii wyznaczonych wymienionymi metodami odpowiednio wynoszą 31 i 43  $\text{mJ/m}^2$ . Wymaga tu podkreślenia fakt, że badania, przedstawione w tej części pracy dotyczące wyznaczenia EBU eksperymentalnie, są bardzo żmudne i mają dużą wartość poznawczą. Autorka słusznie twierdzi, że wartości EBU wyznaczone metodą analityczną są obarczone dużym błędem, nasuwa to też wątpliwość o sens wyznaczania EBU tą metodą, jeżeli w pracy jest stosowana dokładniejsza metoda eksperymentalna.

W następnej części pracy Doktorantka przedstawiła wyniki uzyskane w statycznych i dynamicznych próbach rozciągania analizując również ilość absorbowanej energii przez

odkształcany materiał. Badania przeprowadzono odpowiednio na maszynie wytrzymałościowej ZWICK oraz młocie rotacyjnym. Uzyskane przebiegi naprężenia zostały połączone z analizą mikrostruktury. Autorka wykazała, że dla prędkości linowej bijaka 7,5 m/s w dynamicznej próbie, pomimo że dominuje jeszcze poślizg dyslokacyjny występują licznie bliźniaki odkształcania w postaci pojedynczych pasm lub w formie grupowych układów. W miarę wzrostu prędkości odkształcenia stwierdziła wzrost udziału mechanicznego bliźniakowania w dwóch systemach. Dalszy wzrost prędkości odkształcenia do wartości powyżej 2000 s<sup>-1</sup>, nie powoduje już zwiększenie udziału bliźniakowania, jedynie w tych warunkach zaobserwowała wybrzuszanie się granic ziaren spowodowane prawdopodobnie dużym naprężeniem generowanym podczas dynamicznej deformacji. Zaobserwowane zmiany strukturalne Doktorantka umiejętnie połączyła z wartością wskaźnika absorpcji energii odkształcenia plastycznego, który największy uzyskała przy prędkości bijaka 15 m/s. Tłumaczy to słusznie maksymalnym udziałem bliźniakowania w odkształceniu w tych warunkach odkształcaniu. Przedstawione wyniki dotyczące ewolucji mechanizmów odkształcania w próbie rozciągania, uważam za bardzo obszerne i wartościowe. Są one ważne z punktu zarówno poznawczego jak i użytecznego. Rozdział ten wymaga jednak też wyjaśnienia jak wyznaczana była prędkość odkształcenia? oraz jak należy tłumaczyć oscylacyjne przebiegi siły rozciągającej w funkcji przemieszczenia przedstawione na rys. 50 i 54-56? Na pewno wartościowym uzupełnieniem byłoby porównanie zjawisk strukturalnych zachodzących w próbach statycznych i dynamicznych. Czy zastosowanie obciążenia 1N w badaniach twardości nie powodowało uzyskiwania lokalnych wartości twardości.

Następna część pracy dotyczyła badania udarnośći analizowanej stali wysokomanganowej metodą Charpy'ego oraz w próbie dynamicznego zginania. Celem tych badań było określenie ilości energii jaką zaabsorbował materiał podczas uderzenia z dużą prędkością oraz przypisanie temu procesowi dominującego mechanizmu odkształcania plastycznego. Doktorantka, wykazała że w odkształcanym materiale występuje zarówno poślizg dyslokacyjny jak i bliźniakowania. Na tle zdefektowanej osnowy występują obszary zdominowane przez proces bliźniakowania w postaci pojedynczych pasm oraz grup pasm. Zaobserwowała liczne przecięcia bliźniaków, co świadczy o ich aktywności w różnych systemach. W rozdziale tym Doktorantka bardzo umiejętnie wykazała, że stal wysokomanganowa podczas badań udarnośćiowych posiada bardzo dobrą odkształcalność, którą należy przypisać procesowi bliźniakowania.

W ostatniej części pracy Doktorantka przedstawiła wyniki z próby ściskania w warunkach statycznych i dynamicznych badanej wysokomanganowej stali. Badania przeprowadziła dla 4 prędkości odkształcenia 0,01, 1400, 2400 3700 s<sup>-1</sup>. Poprzez umiejętne zaprojektowania

eksperymentu udało się uzyskać dynamicznie odkształcone próbki do odkształcenia 0,1, 0,22 i 0,3. Umożliwiło to przeprowadzenie bardzo dokładniejszej analizy ewolucji struktury podczas odkształcania dynamicznego. Dodatkowo przeprowadziła próby odkształcania krokowego w celu ograniczenia efektów cieplnych. Wykazała, że w zależności od zastosowanej prędkości odkształcania w próby ściskania występują inne dominujące mechanizmy odkształcania. Podczas ściskaniu dla małych prędkości występują pasma poślizgu oraz komórkowa struktura dyslokacyjna świadcząca o dominacji poślizgu dyslokacyjnego jako podstawowego mechanizmu odkształcania. Zwiększenie prędkości odkształcania do  $1400 \text{ s}^{-1}$  intensyfikuje bliźniakowania, dalsze zwiększanie prędkości odkształcania do  $2400 \text{ s}^{-1}$  powoduje, że w materiale pojawiają się liczne błędy ułożenia. Przy jeszcze większych prędkościach oprócz licznych bliźniaków odkształcania pojawiają się również adiabatyczne pasma ścinania. Przy odkształcaniu w warunkach zbliżonych do izotermicznych dla dużych prędkości odkształcania deformacja plastyczna materiału przebiega przy dużym udziale poślizgu dyslokacyjnego i mikropasm ścinania. Dodatkowo Doktorantka powiązała zmiany strukturalne ze wskaźnikiem absorpcji energii, wykazując jego wzrost wraz z podniesieniem prędkości odkształcania. Tę część pracy uważam za najciekawszą ze względu na bardzo kompleksową analizę zagadnienia oraz uwzględnienie wyników z próby dla statycznych prędkości odkształcania, czego brakowało w próbach rozciągania.

Wyjaśnieniu wymaga, sposób wyznaczania wskaźnika absorpcji energii, gdyż jeżeli założymy, że jest to pole pod krzywą naprężenie – odkształcenia to przedstawione w tabeli 16 wartości tego wskaźnika chyba nie do końca dobrze odpowiadają krzywym z rys. 110.

Opiniowana praca charakteryzuje się wysokim poziomem naukowym. Autorka swobodnie porusza się w bardzo trudnych zagadnieniach dotyczących mechanizmów odkształcania plastycznego. Praca odznacza się kompleksowym ujęciem problemu. Wymienione uwagi dyskusyjne, nie obniżają istotnie końcowej oceny pracy, którą uważam za wartościową szczególnie ze względu na bardzo dużą liczbę przeprowadzonych eksperymentów. Praca może przyczynić się do szybszego wdrażania stali wysokomanganowych w przemyśle motoryzacyjnym.

Do największych osiągnięć Pani mgr inż. Anna Śmiglewicz należy zaliczyć:

- Przeprowadzenie bardzo systematycznych badań mechanicznych stali wysokomanganowych.
- Zrealizowanie bardzo szczegółowych badań strukturalnych.
- Powiązanie zjawisk strukturalnych z właściwościami mechanicznymi badanej stali ze szczególnym uwzględnieniem jej energochłonności.

### **Wniosek końcowy**

Stwierdzam, że przedłożona mi do opinii rozprawa doktorska, pt. „Struktura i właściwości stali wysokomanganowej kształtowane w wyniku mechanicznego bliźniakowania indukowanego odkształceniem plastycznym” w której Doktorantka

- zadawalająco rozwiązała problem o ważnym znaczeniu poznawczym i technologicznym z zakresu badania właściwości mechanicznych oraz struktury stali wysokomanganowej.

- wykazała się niezbędną wiedzę z zakresu przedmiotu pracy i umiejętnością twórczego prowadzenia badań eksperymentalnych oraz ich analizy,

spełnia wymagania wynikające z „Ustawy o Stopniach i Tytule Naukowym oraz o Stopniach i Tytule Naukowym w Zakresie Sztuki”. W związku z tym wnoszą o przyjęcie rozprawy mgr inż. Anny Śmiglewicz i dopuszczenie jej Autorki do publicznej obrony.

