

SPOSOBY OKREŚLANIA WŁAŚCIWOŚCI PLASTYCZNYCH BLACH

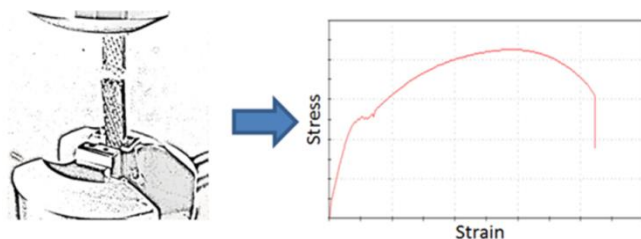
Określenie właściwości plastycznych blach poprzez wyznaczanie Krzywych Granicznych Odształcenia, dla różnych materiałów, wymaga obecnie przeprowadzenia czaso- i pracochłonnych badań eksperymentalnych. Stosowane w praktyce dwa rodzaje testów: Nakajima (out of planestreaching) i Marciniak – Kuczyński (in planestreaching), wymagają dużej ilości kształtów próbek, które trzeba poddać obciążeniu oraz cechują się trudnym do wyeliminowania tarciem wpływającym na wynik pomiaru.

Prezentowana praca jest wstępem do projektu, którego celem jest opracowanie metody określania krzywych odształceń granicznych materiałów w stanie dwukierunkowego płaskiego naprężenia. Cel ten planuje się osiągnąć poprzez optymalizację kształtu próbki poddanej dwukierunkowemu rozciąganiu.

Dzięki temu określanie Krzywych Granicznych Odształceń materiałów będzie możliwe przy zastosowaniu tylko jednego kształtu próbki. Standaryzacja tej metody będzie dużym krokiem w dziedzinie obróbki plastycznej materiałów i pozwoli na bliższe badanie zjawisk towarzyszących czystemu, płaskiemu stanowi naprężenia.

WSTĘP

Obecnie do określania właściwości materiałów wykorzystuje się próbę jednokierunkowego rozciągania (rys. 1). Wiele lat badań doprowadziło do standaryzacji metody, którą opisano normą ISO 6832-1. Otrzymane w ten sposób wyniki, nie dostarczają wystarczających danych w przypadku analizy dwukierunkowego stanu odształcenia, jakiego najczęściej podlegają elementy wytwarzane w procesie tłoczenia. Wynika to nie tylko z faktu, że blachy mają zazwyczaj inne właściwości fizyczne w zależności od kierunku walcowania, ale również z uwagi na to, że możliwości formowania arkusza blachy zależą również od rodzaju odształceń jakiego zostanie poddany.



Rys. 1. Jednokierunkowe rozciąganie.

Produkty powstałe w wyniku formowania blach można znaleźć w wielu gałęziach przemysłu (rys. 2). Przy wielkoseryjnej produkcji wytwarzanie elementów poprzez wytłaczanie jest jedną z najtańszych metod, tak więc aby jeszcze bardziej obniżyć koszty produkcji sięga się do granic możliwości materiału. W tym celu drogie badania stanowiskowe stara się zastąpić tańszymi symulacjami numerycznymi. Jednakże, optymalizacja konstrukcji elementu oraz procesu jego formowania poprzez wykorzystanie symulacji numerycznej wymaga znajomości zachowania materiału poddanego określonej obciążeniu. W tym celu tworzy się bazę danych w postaci na przykład Wykresu Odształceń Granicznych (WOG) dla danego materiału. WOG to przedstawione w kartezjańskim układzie współrzędnych punkty odpowiadające odształceniom względnym materiału tuż przed, podczas i po pęknięciu. Prowadząc linię pomiędzy odpo-

wiednimi punktami otrzymujemy Krzywą Odształceń Granicznych (KOG), która reprezentuje możliwości plastyczne materiału.

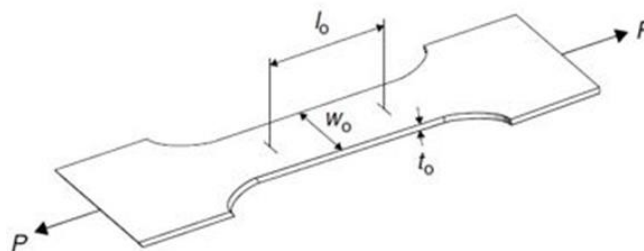


Rys. 2. Produkty powstałe w procesie wytłaczania.

1. METODY BADAŃ

1.1. Próba jednokierunkowego rozciągania

Statyczna próba jednokierunkowego rozciągania jest podstawową próbą badań własności mechanicznych materiałów. Próba ta wywołuje w materiale próbki stan naprężenia, jaki powstaje przy prostym rozciąganiu. Badanie polega na osiowym rozciąganiu, odpowiednio ukształtowanej próbki, na maszynie wytrzymałościowej zwanej zrywarką. Podłączony siłomierz wskazuje aktualną wartość siły rozciągającej próbkę, zaś tensometry i czujniki mogą określić wydłużenie próbki. Na rysunku 3 przedstawiono przykładowy kształt próbki, którą wykorzystuje się do badań.



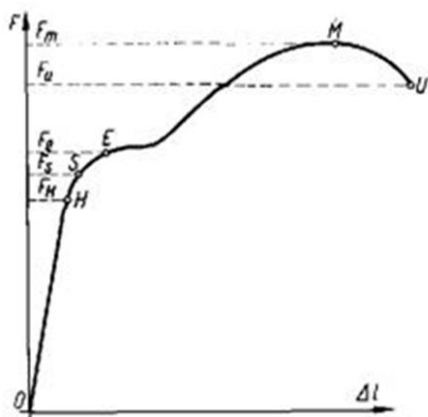
Rys. 3. Typowy kształt próbki wykorzystywanej do próby rozciągania jednokierunkowego [8].

Na rysunku 4 ukazano wykres rozciągania, który rozpoczyna się od odcinka linii prostej OH. W tych granicach wydłużenie badanego materiału jest proporcjonalne do obciążenia. Po przekroczeniu wartości siły FH, która odpowiada punktowi H proporcjonalność ta kończy się, a w materiale następują nieodwracalne zmiany struktury [5].

Zakres, który przedstawiają punkty H i E nie jest linią prostą, co oznacza, że wydłużenie wzrasta szybciej niż obciążenie. Mówi się, że próbka „pływie” przy uzyskaniu równowartości siły Fe (punkt E). Jej wydłużenie wzrasta bez znacznego wzrostu siły rozciągającej. Granicą plastyczności jest w tym przypadku punkt E.

Krzywa ograniczona punktami E i M obrazuje zjawisko, umacniania się materiału podczas rozciągania. Oznacza to, że pomimo przekroczenia odkształceń plastycznych próbka będzie się wydłużała tylko przy wzrastającym obciążeniu. Po przekroczeniu wartości siły Fm, która odpowiada punktowi M, próbka ulegnie zerwaniu, ponieważ jest to granica wytrzymałości na rozciąganie.

Charakter odkształcenia zmienia się po przekroczeniu punktu M, ponieważ dotychczas odkształcała się cała próbka, natomiast teraz tworzy się przewężenie, czyli „szyjka”. Ponieważ mniejsze jest pole przekroju próbki, wydłużenie zachodzi przy coraz mniejszej sile, aż wreszcie w punkcie U przy sile Fu następuje zerwanie.



Rys. 4. Wykres rozciągania [7].

Formowanie powierzchniowe blach to złożony proces odkształcenia, który uwzględnia kilka kierunków plastycznego płynięcia materiału, dlatego próba rozciągania tylko wzdłuż jednej osi elementu jest niewystarczająca. Zapotrzebowanie przemysłu na więcej danych dotyczących zachowania się materiału podczas procesu tłoczenia spowodowało potrzebę opracowania innych metod pomiarowych.

1.2. Próby dwukierunkowego rozciągania blach

Do przeprowadzenia tego typu eksperymentu wykorzystuje się różnego rodzaju urządzenia i próbki. Techniki te można podzielić na dwie grupy [6]:

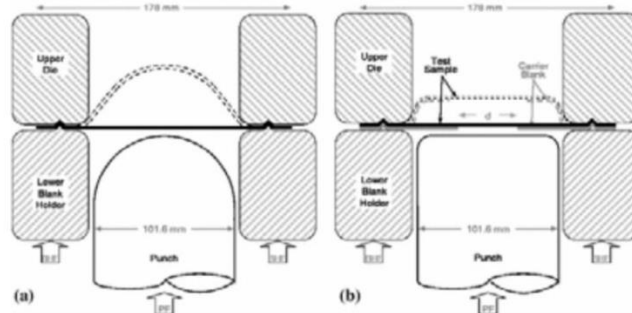
- badania przy wykorzystaniu jednego elementu wykonawczego,
- badania przy wykorzystaniu dwóch lub więcej niezależnych elementów wykonawczych.

W urządzeniach należących do pierwszej kategorii, rozkład naprężenia zależy od kształtu próbki lub sposobu jej zamocowania, zaś w drugiej kategorii od sposobu przyłożenia obciążenia.

Badania przy wykorzystaniu jednego elementu wykonawczego

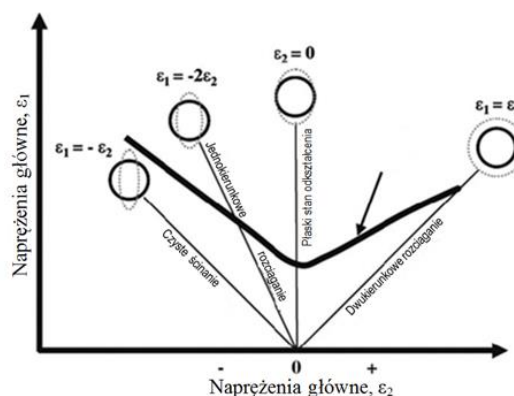
Obecnie najczęściej stosowane metody do określania Krzywej Odkształceń Granicznych (KOG) dla arkuszy metalu to metoda Nakazima oraz Marciniaka-Kuczyńskiego. Oparte są one na zasadzie deformowania arkuszy metalowych półwyrobów o różnych geometriach, przy użyciu stempła, aż do wystąpienia pęknięcia

próbki. W metodzie Nakazima próbka ulega zakrzywieniu przyjmując kształt kulistego tłoka. Natomiast w metodzie Marciniaka-Kuczyńskiego poprzez zastosowanie specjalnego kształtu tłoka obszar pomiarowy próbki pozostaje płaski. Obie metody umożliwiają zmianę szerokości, warunków rozciągania oraz stosowanie różnej głębokości zarysów blachy. Porównanie metod przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5. Próba Nakazima (a) oraz Marciniaka (b) – deformacja arkusza [6].

Wynikiem tych pomiarów jest wykres odkształceń granicznych (WOG, rys. 6) przedstawiający, w kartezjańskim układzie współrzędnych (na osiach zaznaczono względne odkształcenia główne), punkty odpowiadające odkształceniom względnym materiału „tuż przed”, „podczas” i „po pęknięciu”. Prowadząc linię pomiędzy punktami tymi punktami otrzymujemy KOG, która reprezentuje możliwości plastyczne materiału [11].

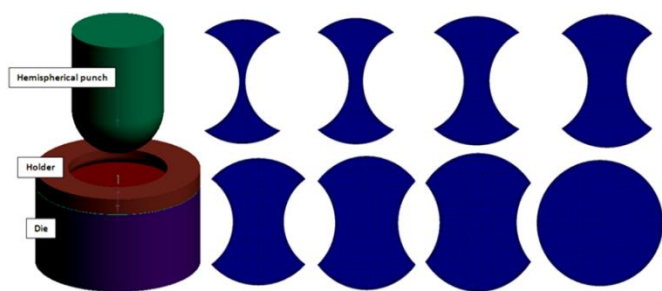


Rys. 6. Krzywa odkształceń granicznych (Hsu et al., 2008).

WOG razem z KOG dostarczają danych dla określenia ograniczeń w procesie formowania blach i są używane do oszacowania charakterystyki tłoczenia arkusza metalowych blach. Zazwyczaj WOG wykorzystywany jest do zoptymalizowania geometrii stempła oraz matryc. Porównanie deformacji tłoczonych arkuszy blach z WOG prowadzi do oceny bezpieczeństwa procesu tłoczenia. Analiza formowania i porównanie danych z KOG zapewnia wiarygodną ocenę poprawności przeprowadzenia tego procesu.

Ważnym obszarem zastosowania dla WOG są numeryczne symulacje procesów przemiany. Wykres KOG, dla użytego materiału, reprezentuje charakterystyczne dane identyfikacyjne materiału dla symulacji formowania.

Wadą wymienionych metod jest przede wszystkim mnogość kształtów próbek, które trzeba poddać badaniu (rys. 7) oraz trudne do wyeliminowania zjawisko tarcia, wpływające na wynik pomiaru.

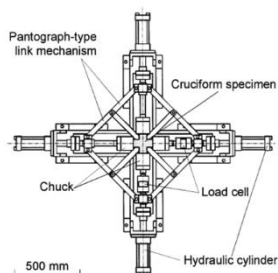


Rys. 7. Próbkę do metody Nakazima.

Ponadto odkształcenia płyty we wzajemnie prostopadłych kierunkach wywołane naciskiem tłoka są ze sobą geometrycznie powiązane. Powoduje to duże zainteresowanie badaczy drugą grupą urządzeń wykorzystujących dwa lub więcej niezależnych elementów wykonawczych.

Badania przy wykorzystaniu dwóch lub więcej niezależnych elementów wykonawczych

Do przeprowadzenia tego rodzaju badań służą urządzenia pozwalające na rozciąganie próbki w dwóch prostopadłych osiach jednocześnie. Na rysunku 8 przedstawiono dwa typy takich urządzeń. Pierwsze urządzenie (rys. 8, z lewej strony) zaprojektowano i wykonano w Tokyo University of Agriculture and Technology. Podobne rozwiązanie zrealizowane na Free University of Brussels, ukazano na rysunku 8 z prawej strony.



Rys. 8. Stanowiska pozwalające na rozciąganie próbki w dwóch prostopadłych osiach jednocześnie [5].

Główną różnicą między tymi stanowiskami jest to, że urządzenie z Tokyo wyposażone zostało w pantograf, który to wiąże geometrycznie przesunięcia końców próbki.

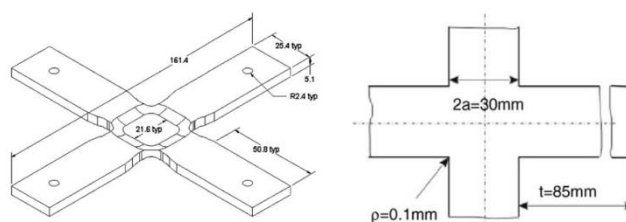
Wadą tej metody jest trudność w osiągnięciu dużych odkształceń plastycznych w badanym obszarze próbki. Największe naprężenia występują w przekroju pojedynczego ramienia, a nie w obszarze pomiarowym, co przedstawiono na rys. 9.



Rys. 9. Próbkę do dwukierunkowego rozciągania blachy [4].

Okazuje się, że w metodzie tej najistotniejszy jest kształt próbki krzyżowej. Obecnie próbka krzyżowa jest klasyfikowana w dwóch typach: A i B [1,2,3]. Typ A, który jest przedstawiony na rysunku 10 po lewej stronie, ma zredukowaną grubość w obszarze pomiaro-

wym, podczas, gdy typ B – rysunek 11 po prawej stronie, ma taką samą grubość na całym obszarze.

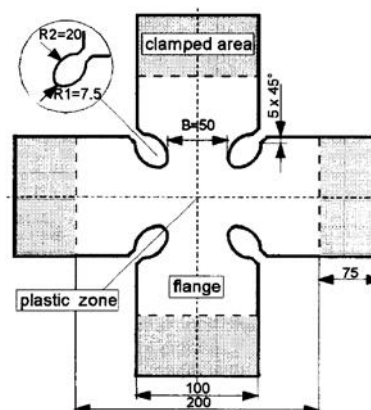


Rys. 10. Kształt próbki [1]. Po lewej: typu A, Po prawej: typu B.

Ponieważ próbka typu A wymaga procesu maszynowego lub zastosowania kształtu „kanapki” dla zredukowania grubości strefy pomiarowej, trudno jest dokładnie określić dwukierunkowe naprężenia w tej strefie.

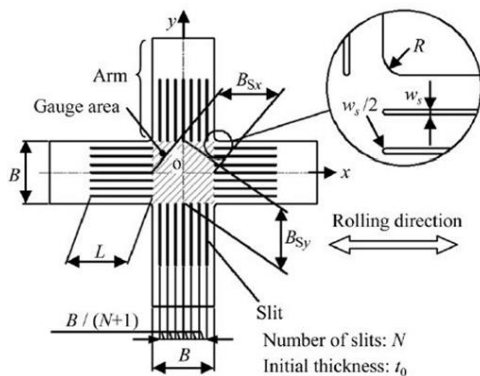
Typ B próbki jest łatwy do wytworzenia z płaskiego arkusza blachy metodą cięcia laserowego albo strumieniem wody, dlatego jest też tańszy.

Kilku naukowców korzystało z tego rodzaju próbek. Muller i Pöhlandt [9] zoptymalizowali geometrię krzyża korzystając jednocześnie z metody elementów skończonych oraz testu fotoelastycznego, gdzie granica plastyczności była określona bezpośrednio przez pomiar temperatury za pomocą pirometru (rys. 11). Jednak napotkali oni trudności w zdefiniowaniu powierzchni przekroju poprzecznego próbki krzyżowej.



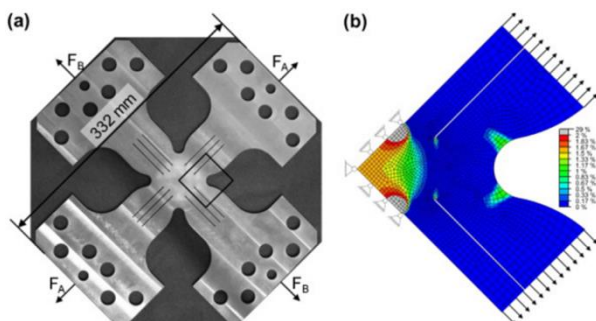
Rys. 11. Kształt próbki krzyżowej zaproponowany przez Muller'a.

Kubawara [5] wykonał badania na próbkach krzyżowych wyciętych z zimno walcowanej, niskowęglowej blachy z siedmioma szczelinami wyciętymi na każdym ramieniu (rys. 12). Dowiedziono, że kierunek mierzonych odkształceń plastycznych jest zgodny z zamierzonym (wraz z zewnętrznymi wektorami normalnymi) do zarysów plastycznego płynięcia w głównym obszarze naprężeń oraz, że kryterium Hilla szacuje naprężenia plastyczne w pobliżu dwuosiowych odkształceń.



Rys. 12. Kształt próbki zaprezentowany przez Kubawarę [5].

Kulawiński [10] zastosował metodę częściowego obciążenia próbki do pomiarów zachowania staliwa, używając elementu krzyżowego z 3 szczelinami na każdym ramieniu. Kształt widoczny jest na rys. 13.



Rys. 13. Próbką Kulawińskiego [10].

Obecnie nie istnieje standardowa geometria próbki [6]. Zaproponowane przez badaczy kształty nie dały zadowalających wyników. Uzyskano odkształcenia plastyczne sięgające zaledwie pojedynczych procentów. Praca nad udoskonaleniem metody daje nadzieje na dalsze powiększenie zakresu uzyskiwanych odkształceń plastycznych.

PODSUMOWANIE

Obecnie najintensywniej rozwijającym kierunkiem badania próbek poddawanych dwu-kierunkowemu rozciąganiu wydaje się być metoda wykorzystująca niezależne elementy wykonawcze. Wielu autorów proponuje różne kształty próbek, lecz osiągnięte odkształcenia sięgają pojedynczych procentów. Głównym problemem jest fakt, iż najslabszą częścią krzyżowej próbki są jej ramiona. Jednakże, w związku z występującym zjawiskiem plastycznego wzmocnienia się materiału w zdeformowanym obszarze [11], możliwe jest zwiększenie granicy plastyczności w wybranym obszarze próbki. Oznacza to, że istnieje możliwość takiej zmiany właściwości lokalnych właściwości materiału, aby ramiona próbki nie były jej najslabszą częścią.

BIBLIOGRAFIA

1. Boehler J.P., Demmerle S., Koss S., *A new direct biaxial testing machine for anisotropic materials*, Experimental Mechanics 1994 1-9
2. Yong Yu, Min Wan, Xiang-Dong Wu, Xian-Bin Zhou, *Design of cruciform biaxial tensile specimen for limit strain analysis by FEM*, "Journal of materials processing technology", nr123, 2002, 67-70

3. Leotoing L., Guines D., Zidanel., Ragneau E., *Cruciform shape benefits for experimental and numerical evaluation of sheet metal formability*, "Journal of Materials Processing Technology", nr 213, 2013, 856-863
4. Smits A., Van Hemelrijck D., Philippidis T.P., Cardon A., *Design of cruciform specimen for biaxial testing of fibre reinforced composite laminates*, "Composites Science and Technology", nr66, 2006, 964-975
5. Kuwabara T., Ikeda S., Kuroda K., *Measurement and analysis of differential work hardening in cold-rolled steel sheet under biaxial tension*, "Journal of Materials Processing Technology", nr80-81, 1998, 517-523
6. Hannon A., Tiernan P., *A review of planar biaxial tensile test systems for sheet metal*, "Journal of materials processing technology", nr198, 2008, 1-13
7. [online] [dostęp: 4-02-2015], <http://www.e-spawalnik.pl/?proba-rozciągania>, 162
8. Marciniak Z., Duncan J.L., Hu S.J., *Mechanics of Sheet Metal Forming*, "Second edition published by Butterworth-Heinemann", 2002, XIII-XX, 1-2
9. Muller W., Pohland K., *New experiments for determining yield loci of sheet metal*, "Journal of materials processing technology", nr 60, 1996, 643-648
10. Kulawinski D., Nagel K., Henkel S., Hübner P., Fischer H., Kuna M., Biermann H., *Characterization of stress-strain behavior of a cast TRIP steel under different biaxial planar load ratios*, "Engineering Fracture Mechanics", Volume 78, Issue 8, May 2011, 1684-1695
11. Gawęcka A., *Mechanika materiałów i konstrukcji prętowych*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 1998, 140-154

Methods for determining the properties of plastic plates

Determining the plastic properties of the sheets by defining the Forming Limit Curves FLC, for different materials, currently requires to carry out time-consuming and labor-intensive experimental research. In practice, two types of tests are used: out of plane stretching (Nakazima (1968), Hecker (1975)) and in plane stretching (Marciniak – Kuczyński (1967)). Both of them requires a multitude of sample shapes that need to be load and difficult to eliminate friction which has an influence on the result.

The presented article is an introduction to the project, which goal is to develop a method for determining the Forming Limit Curves of materials under the biaxial stress state. This target is planned to be achieved by optimizing the shape of the sample subjected to a biaxial-stretching.

Thereby determining the Forming Limit Curves for material deformation will be possible by using only one shape of the sample. The standardization of this method will be a significant step in the sheet metal forming and will allow for closer study of the plane stress state phenomenon.

Autorzy:

dr inż. **Grzegorz Mitkiewicz** – Politechnika Łódzka, Wydział Mechaniczny, Katedra Pojazdów i Podstaw Budowy Maszyn, e-mail: grzegorz.mitkiewicz@p.lodz.pl

mgr inż. **Krzysztof Macikowski** – Politechnika Łódzka, Wydział Mechaniczny, Katedra Pojazdów i Podstaw Budowy Maszyn, e-mail: Krzysztof.macikowski@p.lodz.pl