

Doświadczalne wyznaczanie parametrów modelu materiałowego do symulacji tłoczenia blach na zimno

Experimental determinig of parameters of material model for simulation of cold sheet-metal forming

JACEK STADNICKI
IRENEUSZ WRÓBEL *

Materiały z XX SKWPIE, Jurata 2016 r.
DOI: 10.17814/mechanik.2016.7.191

Model materiałowy do symulowania tłoczenia blach metodą elementów skończonych wymaga podania odpowiednich parametrów, które wyznacza się doświadczalnie. W artykule wyznaczono te parametry dla próbek wyciętych na frezarce i elektrodźżarce oraz wykrojnikiem. Na podstawie porównania wyników doświadczeń i symulacji komputerowej próby jednoosiowego rozciągania dokonano oceny adekwatności przyjętego modelu materiałowego do rzeczywistości oraz poprawności wyznaczonych wartości parametrów modelu.

SŁOWA KLUCZOWE: tłoczenie blach, symulacja MES, model materiałowy

Material model to simulate sheet-metal forming using finite elements method needs assuming their proper parameters, which are determined experimentally. The parameters for specimens cut out by means of milling machine, spark machine and blanking die have been determined in the paper. Based on comparison of the results of experiments and computer simulation of uniaxial tensile test adequateness of the assumed material model to reality, correctness of values of its parameters.
KEYWORDS: sheet-metal forming, FEM simulation, material model

Samonośne nadwozia współczesnych samochodów osobowych są wykonywane z dużym udziałem wyłoczek kształtowanych na zimno z blach ze stali o superwysokiej wytrzymałości (*Advanced High Strength Steel*). Przy projektowaniu narzędzi do ich wytwarzania – tłoczników – wykorzystuje się specjalizowane programy do symulowania procesów tłoczenia, które bazują na metodzie elementów skończonych – MES (np. PamStamp, AutoForm, DynaForm). Z doświadczeń autorów wynika, że rezultaty symulacji wykazują dobrą zgodność z rzeczywistością, pod warunkiem przyjęcia odpowiednich modeli materiałowych blach i poprawnych wartości parametrów tych modeli. Nawet niewielki rozrzut parametrów modeli materiałowych skutkuje powstawaniem braków w produkcji, mimo że dla nominalnych wartości tych parametrów (analizowana w artykule stal S420MC ma wg normy $Re > 420$ MPa, $Rm = 480\div 580$ MPa, $Ag < 23\%$, a wg certyfikatu dostawy $Re = 462$ MPa, $Rm = 522$ MPa, $Ag = 22,2\%$) jakość wyłoczek jest dobra. Jednym ze sposobów przeciwdziałania powstawaniu braków jest wyznaczenie parametrów modelu materiałowego dla konkretnej partii blachy na podstawie badań doświadczalnych i przeprowadzenie symulacji tłoczenia, aby wyeliminować z produkcji partię materiału, która z dużym prawdopodobieństwem spowoduje powstawanie braków.

Doświadczalne badania wytrzymałościowe

Warunki i sposób przeprowadzania statycznej próby jednoosiowego rozciągania określa norma PN-EN ISO 6892-1. Próbki do badań mogą być wycinane z blachy różnymi sposobami. Najczęściej wycina się je na frezarkach, elektrodźżarkach drutowych – drutówkach – lub z wykorzystaniem

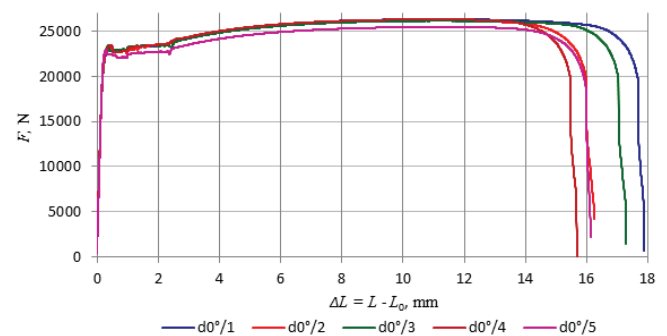
* Prof. dr hab. inż. Jacek Stadnicki (jstadnicki@ath.bielsko.pl); dr inż. Ireneusz Wróbel (iwrobel@ath.bielsko.pl) – Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej

prasy i wykrojnika. Sposób wycięcia próbki wpływa na dokładność jej wymiarów, lecz może również powodować zmiany struktury materiału w pobliżu krawędzi, co z kolei może mieć wpływ na wyniki próby rozciągania. Aby to zbadać, wykonano każdym ze sposobów po pięć próbek wyciętych pod kątami 0°, 45° i 90° do kierunku walcowania blachy. Dla zidentyfikowania poszczególnych próbek każdej z nich przypisano odpowiedni kod. Przykładowo d45°/4 oznacza próbkę o numerze 4 wyciętą na drutówce pod kątem 45° do kierunku walcowania. Próby rozciągania statycznego przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej z dwoma ekstensometrami do pomiaru wydłużenia A i przewężenia Z . Przykładowe charakterystyki pokazano na rys. 1.

Dla każdej z serii pomiarów z otrzymanych charakterystyk wyznaczono średnie wartości granicy plastyczności Re , wytrzymałości Rm oraz wydłużenia ekstensometrycznego plastycznego przy największej sile Ag . W tabl. I zestawiono średnie wartości dla poszczególnych sposobów wycinania próbek wraz z obliczonymi dla nich przedziałami ufności (\pm) dla poziomu istotności 0,05, przy założeniu rozkładu t-Studenta.

Modele materiałowe blach do tłoczenia na zimno wymagają podania współczynników anizotropii plastycznej (współczynnika Lankforda). Sposób ich doświadczalnego wyznaczania na podstawie próby jednoosiowego rozciągania opisuje norma PN-ISO 10113.

Wartości współczynników wyznacza się dla próbek wyciętych pod kątami 0°, 45° i 90° do kierunku walcowania.



Rys. 1. Charakterystyki rozciągania $F(\Delta L)$ próbek wyciętych na drutówce równoległe do kierunku walcowania

TABLICA I. Wartości średnie i przedziały ufności parametrów modeli materiałowych dla próbek wyciętych różnymi sposobami

Sposób wycięcia próbki	Kąt wycięcia próbki, °	Re , MPa	Rm , MPa	Ag , %	r_{an}	K , MPa	n
frezarka	0	459 ±8,92	522 ±4,97	20,89 ±1,25	0,361 ±0,02	774 ±9,00	0,132 ±0,0011
	45	470 ±2,29	518 ±2,73	19,71 ±0,28	0,514 ±0,02	760 ±4,77	0,125 ±0,0013
	90	482 ±2,58	529 ±2,81	17,58 ±0,41	0,429 ±0,06	773 ±3,10	0,122 ±0,0036
drutówka	0	458 ±6,05	519 ±6,18	20,76 ±0,99	0,391 ±0,01	774 ±9,68	0,134 ±0,0017
	45	463 ±3,01	515 ±0,48	20,41 ±0,73	0,446 ±0,02	759 ±1,45	0,127 ±0,0004
	90	484 ±2,40	533 ±0,57	16,67 ±1,00	0,445 ±0,02	775 ±4,58	0,123 ±0,0024
wykrojnik	0	471 ±7,02	524 ±7,72	19,49 ±0,54	0,339 ±0,01	756 ±12,47	0,120 ±0,0014
	45	488 ±1,47	529 ±0,88	17,42 ±0,81	0,506 ±0,03	741 ±1,06	0,112 ±0,0008
	90	495 ±6,86	537 ±2,94	15,46 ±1,76	0,449 ±0,48	751 ±64,60	0,106 ±0,0283

Wartości średnie współczynników i pozostałych parametrów wyznaczone doświadczalnie w próbie jednoosiowego rozciągania dla poszczególnych próbek wraz z przedziałami ufnosci podano w tabl. I.

Dla dwuosowego stanu naprężenia, jaki panuje w blasze podczas tłoczenia, uplastycznienie materiału następuje po tym, jak naprężenie przekroczy krzywą graniczną. Dysponując współczynnikami anizotropii plastycznej r_{xx} wyznaczonymi z próby jednoosiowego rozciągania, można wyznaczyć krzywą graniczną uplastycznienia, np. wg modelu Hilla [1]:

$$\bar{\sigma}^2 = \sigma_{xx}^2 - \frac{2r_0}{1+r_0} \sigma_{xx} \sigma_{yy} + \frac{r_0(1+r_{90})}{r_{90}(1+r_0)} \sigma_{yy}^2 + \frac{r_0+r_{90}}{r_{90}(1+r_0)} (2r_{45} + 1) \sigma_{xy}^2 \quad (1)$$

gdzie: r_0, r_{45}, r_{90} – współczynniki anizotropii plastycznej, σ_{xx}, σ_{yy} – naprężenia główne, σ_{xy} – naprężenie styczne.

Po uplastycznieniu materiał blachy wyłoczeki umacnia się, a stan ten opisuje odpowiednia reguła umocnienia. Programy MES do symulowania tłoczenia najczęściej korzystają z następujących reguł umocnienia:

$$\text{Hollomona [2]} \quad \sigma = K \varepsilon^n \text{ dla } \varepsilon > \varepsilon_0 \quad (2)$$

$$\text{Krupkowskiego [3]} \quad \sigma = K (\varepsilon_0 + \varepsilon_p)^n \quad (3)$$

$$\text{siły [3]} \quad \sigma = a + b \varepsilon_p^n \quad (4)$$

gdzie: ε_0 – odkształcenie wstępne; ε_p – odkształcenie plastyczne; K, n, a, b – parametry wyznaczone z aproksymacji części charakterystyki doświadczalnej $\sigma(\varepsilon)$ funkcjami (2), (3) lub (4).

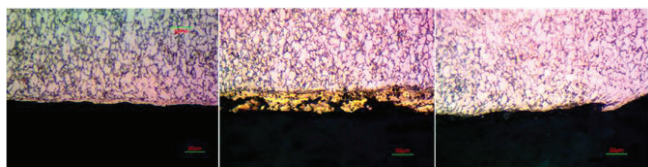
Jeśli w funkcji (3) za odkształcenie wstępne ε_0 przyjąć odkształcenie odpowiadające granicy plastyczności R_e , to otrzyma się równanie (2). Parametry K, n wyznacza się, aproksymując wyniki próby jednoosiowego rozciągania w przedziale odkształcenia od początku umocnienia plastycznego do granicy wytrzymałości wg normy PN-ISO 10275. Wartości K i n , które obliczono w wyniku aproksymacji charakterystyki eksperymentalnej $\sigma(\varepsilon)$ i aproksymującej dla badanych próbek podano w tabl. I. Warto podkreślić, że aproksymację przeprowadza się dla eksperymentalnej charakterystyki rzeczywistego naprężenia w funkcji rzeczywistego odkształcenia.

Badania metalograficzne

Aby ocenić wpływ sposobu wycinania próbki na zmiany struktury blachy i prawdopodobne zmiany własności mechanicznych, z próbek pobrano wycinki w miejscach, w których blacha była nieznacznie odkształcona, a następnie wykonano zgłady. Ocena struktury przeprowadzona, badając powiększenia zgładów pod mikroskopem. Na rys. 2 pokazano zgłady w widoku na krawędź blachy:

- **próbka frezowana** – na obrabianej powierzchni widać dodatkową warstwę o grubości od 5 μm – pozostałość chłodziwa, pod nią warstwę mniejszych ziaren równoległych do powierzchni o grubości ok. 5 μm . Nie obserwuje się nieciągłości osnowy metalowej, zewnętrzna powierzchnia jest relatywnie gładka, brak miejsc inicjacji mikropęknięć mogących osłabić wytrzymałość próbki;

- **próbka wycięta na drutówce** – na powierzchni próbki widać warstwę zgorzeliny, pod nią osnowa metalowa jest równomierna bez nieciągłości, a kształt i wielkość ziaren pozostały niezmiennione, brak miejsc inicjacji mikropęknięć mogących osłabić wytrzymałość próbki.



Rys. 2. Zgłady próbek (pow. 500x) w widoku na krawędź blachy dla różnych sposobów wycinania

- **próbka wycięta wykrojnikiem** – na powierzchni próbki widoczne znaczne nierówności o wymiarach ok. 5 μm , ziarna przy powierzchni na głębokości 15+25 μm zniekształcone i ukierunkowane pod kątem ok. 60° do powierzchni, co wskazuje na utwardzenie zgniotem, które może mieć wpływ na zwiększenie wytrzymałości próbki.

Symulacje rozciągania

Dla zbadania zgodności wyników prób doświadczalnych rozciągania jednoosiowego próbek z blachy S420MC wyciętych różnymi sposobami z wynikami symulacji komputerowych przeprowadzono obliczenia z wykorzystaniem metody elementów skończonych w programie PamStamp. Parametry modelu materiałowego (graniczna krzywa uplastycznienia Hilla i reguła umocnienia Krupkowskiego), tj. $R_e, R_n, \varepsilon_0, r_0, r_{45}, r_{90}, K, n$ przyjęto z tabl. I.

Korelacja charakterystyk doświadczalnych i obliczeniowej w zakresie naprężenia $\sigma < R_m$ jest bardzo dobra. Średnia wartość kwadratu współczynnika korelacji wzajemnej Pearsona dla pięciu próbek wynosi R^2 (frezarka) = 0,9814. Dowodzi to poprawności zastosowanych modeli materiałowych i celowości przyjmowania parametrów tych modeli na podstawie wyników doświadczalnej próby jednoosiowego rozciągania.

Dla próbek wyciętych innymi sposobami otrzymano równie wysokie wartości współczynnika korelacji wzajemnej wyników doświadczalnych i symulacji komputerowej. Wyniosły one odpowiednio R^2 (drutówka) = 0,9484 i R^2 (wykrojnik) = 0,9826.

Podsumowanie

Przeprowadzone badania doświadczalne jednoosiowego rozciągania próbek wycinanych z blachy do tłoczenia na zimno ze stali S420MC prowadzą do następujących wniosków:

- dobrą zgodność wyników symulacji komputerowych tłoczenia na zimno z rzeczywistością zapewnia model materiałowy będący połączeniem krzywej granicznej uplastycznienia wg Hilla i reguły umocnienia plastycznego Krupkowskiego.
- w symulacjach komputerowych tłoczenia, zwłaszcza tych wyłoczek, w których wyteżenie materiału jest bliskie wytrzymałości, zaleca się przyjmowanie wartości parametrów modeli materiałowych na podstawie badań doświadczalnych próbek konkretnej partii blachy.

W tabl. II zestawiono wartości parametrów modeli materiałowych i ich przedziałów ufnosci uśrednione dla próbek wyciętych pod kątami 0°, 45° i 90° do kierunku walcowania blachy, które wyznaczono na podstawie badań doświadczalnych próbek wykonanych różnymi sposobami.

TABLICA II. Uśrednione dla różnych kierunków wycięcia próbek stałe materiałowe

Sposób wycięcia próbki	$R_{e, sr}$, MPa	$R_{m, sr}$, MPa	$A_{g, sr}$, %	K_{sr} , MPa	n_{sr}
frezarka	470 ±4,60	523 ±3,44	19,39 ±0,65	769 ±5,26	0,126 ±0,0020
drutówka	468 ±3,82	522 ±2,41	19,82 ±0,91	769 ±5,24	0,128 ±0,0015
wykrojnik	485 ±5,12	530 ±3,85	17,46 ±1,04	749 ±26,04	0,113 ±0,0101

Z tabl. II wynika, że wartości parametrów materiałowych wyznaczonych dla próbek wyciętych na frezarce i drutówce są bardzo zbliżone. Podobne wartości mają również przedziały ufnosci tych parametrów. Natomiast próbki wycięte wykrojnikiem dają wartości $R_{e, sr}$ o ok. 3,5%, $R_{m, sr}$ o ok. 1,5% większe a $A_{g, sr}$ o ok. 10,9%, K_{sr} o ok. 2,6%, n_{sr} o ok. 3,1% mniejsze. Stąd wniosek, że:

- odpowiednimi sposobami wykonywania próbek do przeprowadzania prób jednoosiowego rozciągania są frezowanie lub wycinanie na elektrodrażarce (drutówce).

LITERATURA

1. Hill R.A. „A theory of the fielding and plastic flow of anisotropic metals”. *Proceedings Royal Societies of London* 1948/A193: pp. 85+145.
2. Hollomon J.H. „Tensile deformation”. *Transactions of AIME* 162 (1945), pp. 268+290.
3. PamStamp user's guide.