

Waldemar LOGIN

Polskie Zakłady Lotnicze, Mielec

WPŁYW WYBRANYCH PARAMETRÓW PROCESU OBCIĄGANIA BLACH NA WIELKOŚĆ SPRĘŻYNOWANIA

W artykule przeanalizowano wpływ parametrów obciążania na zjawisko sprężynowania. Analizę przeprowadzono na podstawie wyników badań symulacyjnych wykorzystujących metodę elementów skończonych. Skupiono się na wpływie stopnia odkształcenia, grubości materiału oraz tarcia między wzornikiem a blachą na wielkość sprężynowania.

1. Wstęp

Proces kształtowania blach metodą obciążania jest stosowany do wytwarzania elementów o stosunkowo małej krzywiźnie i dużych wymiarach. W takich przypadkach zastosowanie zwykłego gięcia lub tłoczenia jest ekonomicznie nieopłacalne, a często wręcz niemożliwe. Metodę tę stosuje się przede wszystkim w przemyśle lotniczym do wytwarzania elementów pokryw kadłubów i skrzydeł statków powietrznych. Stawiane tam wysokie wymagania, co do kształtu części, sprawiają, że ważnym elementem procesu staje się zjawisko sprężynowania, gdyż bezpośrednio wpływa na poprawność wykonania elementu. W celu wytwarzania części w sposób powtarzalny, przy jednoczesnym obniżeniu kosztów uruchomienia produkcji nowego elementu bądź zmiany geometrii już istniejącego, oczywiste staje się jak najlepsze poznanie procesu i zjawisk mu towarzyszących.

Obecnie uruchomienie produkcji nowej części najczęściej przeprowadza się metodą prób i błędów, co bezpośrednio przekłada się na koszty związane z czasem i zużyciem materiału. Dodatkowym, ważnym czynnikiem jest powtarzalność procesu. W przypadku procesu obciążania bardzo duże znaczenie ma tu doświadczenie operatora maszyny, gdyż przede wszystkim to on metodą wzrokową ocenia poprawność jego przebiegu. Oczywiście jest to metoda subiektywna i nie zawsze skuteczna, szczególnie przy złożonej geometrii części i zastosowaniu nowego rodzaju materiału.

Poznanie charakterystyki procesu i wpływ poszczególnych parametrów na jego przebieg pozwolą na wprowadzenie koniecznych zmian już na etapie konstrukcji przyrządu, co bezpośrednio wpłynie na liczbę prób i modyfikacji jego geometrii. Dodatkowo informacje te mogą być pomocne przy wyposażeniu obciągarek w dodatkowe elementy pomiarowe (siły i przemieszczenia), co z kolei przyczyni się do zapewnienia większej powtarzalności wytwarzanych części [1]. Sprężynowanie jest szeroko badane i opisywane w literaturze, szczególnie dla procesu gięcia. Zostało opracowanych wiele metod uwzględniających zarówno wpływ parametrów procesu, jak i materiału, które można z powodzeniem wykorzystać przy opracowywaniu geometrii oprzyrządowania [2]. Proces obciągania jest bardziej złożony w stosunku do gięcia, przez co opracowanie skutecznej metody określania efektu końcowego jest trudniejsze. Dzięki wykorzystaniu metody MES do symulacji procesu można w pewnym stopniu przewidzieć jego efekt i tak go poprowadzić, aby uzyskać zamierzony kształt części bez uszkodzeń struktury materiału [3-5].

W artykule przedstawiono i przeanalizowano wpływ stopnia odkształcenia, grubości blachy oraz współczynnika tarcia między wzornikiem a częścią na efekt sprężynowania przy obciąganiu poprzecznym.

2. Przebieg badań

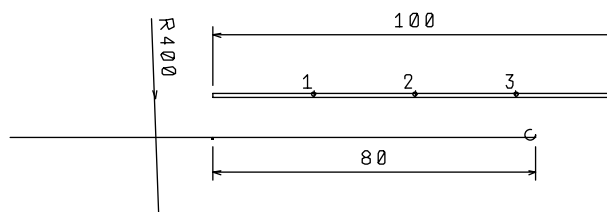
Badania symulacyjne procesu zostały przeprowadzone dla dwóch materiałów: blachy ze stopu aluminium AA5754 w stanie 0 oraz blachy stalowej gatunku 08 kategorii SB. Do opisu krzywych umocnienia zastosowano wzór Hollomona. Właściwości mechaniczne badanych materiałów, tj.: granicę plastyczności R_e , granicę wytrzymałości R_m , wydłużenia całkowite, współczynnik anizotropii normalnej oraz parametry krzywej umocnienia C i n , przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Właściwości mechaniczne materiałów

Material	R_e , MPa	R_m , MPa	A_{50}	r	C , MPa	n
AA5754 „0“	89	209	0,22	0,65	413	0,28
08 SB	162	310	0,42	1,55	554	0,21

Proces został zamodelowany jako problem płaski (ang. *plane strain*). Do modelu blachy użyto czworokątnych elementów płaskich, natomiast tłocznik zamodelowano jako ciało sztywne. Przyjęto długość próbki 100 mm, która była obciągana na wzorniku o przekroju kołowym i promieniu 140 mm (rys. 1.). Zagadnienie rozpatrywano jako symetryczne względem osi przechodzącej przez środek tłoczniaka.

Rys. 1. Wymiary modelu użytego do symulacji z zaznaczonymi punktami pomiarowymi



Proces obciągania zasymulowano następująco. Prawy koniec części został unieruchomiony, pozostawiając możliwość obrotu, natomiast na lewy koniec zostały narzucone więzy symetryczności względem osi wzornika. Proces obciągania był realizowany przez ruch wzornika w kierunku prostopadłym do wyjściowej powierzchni blachy. Wartość przemieszczenia przekładała się na odkształcenie części i wynosiła od 12,6 mm (dla 1%) do 22,2 mm (dla 5%). Dodatkowo przeprowadzono badanie wpływu grubości blachy i współczynnika tarcia między wzornikiem a częścią na wartość sprężynowania.

3. Wyniki obliczeń

W pierwszej kolejności badaniu poddano wpływ naprężeń rozciągających na wielkość sprężynowania. Obliczenia wykonano dla blachy o grubości 1,0 mm. Jako punkty do pomiaru przyjęto punkty znajdujące się w odległości $\frac{1}{4}$ długości od osi wzornika (pkt 1), w połowie długości (pkt 2) oraz $\frac{1}{4}$ długości od końca próbki (pkt 3). Uzyskane wyniki przedstawiono w tabeli 2. Odkształcenie wynosiło od 1 do 5%. Wartości z tego zakresu są podawane w literaturze jako najbardziej optymalne do przeprowadzania procesu obciągania. Zarówno dla jednego, jak i drugiego materiału wartość naprężeń rozciągających ma bezpośredni wpływ na wielkość sprężynowania.

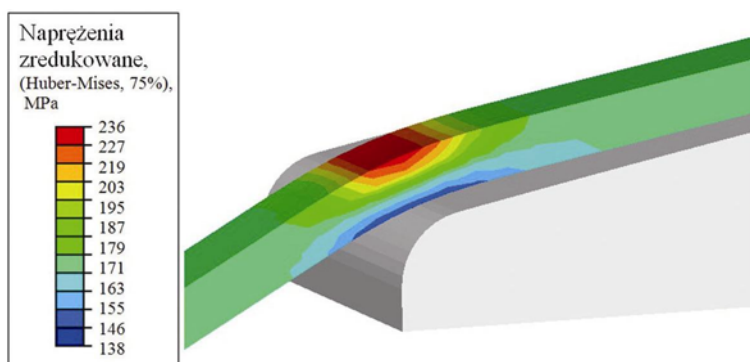
Tabela 2. Wartość sprężynowania dla różnego stopnia odkształcenia wzdłużnego próbek

Odkształcenie, %	AA5754			08		
	Sprężynowanie, mm			Sprężynowanie, mm		
	pkt 1	pkt 2	pkt 3	pkt 1	pkt 2	pkt 3
1	0,03	0,13	0,29	0,02	0,08	0,17
2	0,03	0,13	0,29	0,02	0,06	0,14
3	0,03	0,1	0,21	0,01	0,05	0,1
4	0,02	0,08	0,18	0,01	0,04	0,09
5	0,02	0,08	0,16	0,01	0,04	0,07

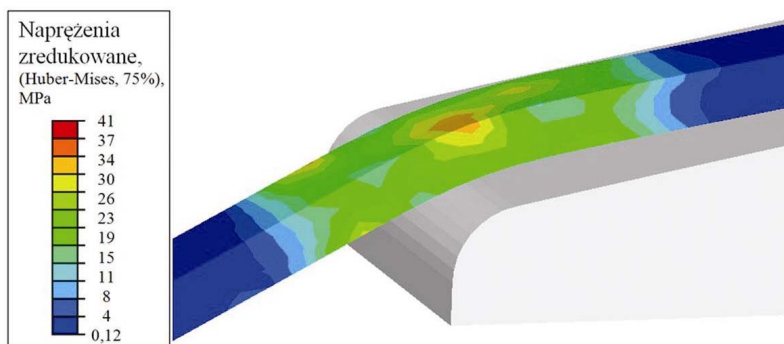
Dla stali 08 można zauważyć, że różnice w sprężynowaniu przy odkształceniu 3-5% są bardzo małe. Dlatego też należy przypuszczać, że prowadzenie procesu przy takich odkształceniach byłoby najbardziej korzystne. Większe

prowadzą do znacznej koncentracji naprężeń, szczególnie na końcu wzornika oraz w okolicach mocowania, co może prowadzić do pęknięcia materiału.

Dla materiału AA5754 również można zaobserwować spadek wartości sprężynowania wraz ze wzrostem naprężenia rozciągającego w całym badanym zakresie. W przypadku tego materiału sprężynowanie blachy jest około dwukrotnie większe. Podobnie jak poprzednio zwiększenie odkształcenia powoduje wzrost naprężeń w strefie mocowania blach i końca wzornika. W aktywnej fazie procesu obciągania, na skutek dodatkowych odkształceń gnących na krawędzi wzornika (rys. 2.) można spodziewać się rozdzielenia materiału. Mimo że obszary te leżą poza konturem części, to pęknięcie w trakcie prowadzenia procesu może skutkować brakiem możliwości właściwego ukształtowania detalu.



Rys. 2. Rozkład naprężeń na krawędzi wzornika w aktywnej fazie procesu obciągania blachy ze stopu AA5754 – wartość odkształcenia wzdłużnego 5%



Rys. 3. Rozkład naprężeń szczątkowych na krawędzi wzornika po sprężynowaniu

Po odciążeniu próbki następują powrotne odkształcenia sprężyste, następuje prawie całkowita relaksacja naprężeń (rys. 3.), jedynie w obszarze położonym

w pobliżu krawędzi wzornika pozostają naprężenia szczątkowe, o wartości dochodzącej do 30% granicy plastyczności, na całej grubości pasma.

Kolejną przeprowadzoną analizą było zbadanie wpływu grubości kształtowanej blachy na wartość sprężynowania. Obliczenia wykonano dla czterech grubości próbek: 0,5, 1,0, 1,5 i 2 mm, materiału AA5754 przy odkształceniu 2%. Wyniki obliczeń przedstawia tabela 3. Jak widać z podanych wyników, grubość obciążanego materiału praktycznie nie ma wpływu na sprężynowanie. Dzieje się tak za sprawą równomiernego rozkładu naprężeń na grubości blachy w trakcie prowadzenia procesu, szczególnie w etapie rozciągania.

Ostatnim zbadanym parametrem był współczynnik tarcia między blachą a wzornikiem. Obliczenia przeprowadzono dla 4 jego wartości: 0, 0,05, 0,1 oraz 0,2, przy odkształceniu 2% dla AA5754 i 4% dla stali 08. Wyniki przedstawia tabela 4. Analizując wyniki, widać, że tarcie między wzornikiem a blachą praktycznie nie ma wpływu na sprężynowanie. Jednakże powoduje wzrost naprężeń w trakcie prowadzenia procesu i przyczynia się do większych ich różnic na grubości blachy niż w przypadku braku tarcia. Ważne jest jednocześnie to, aby zapewnić jednorodne warunki na całym obszarze części, gdyż lokalne zmiany współczynnika tarcia mogą powodować w tych miejscach koncentracje naprężeń i w efekcie uszkodzenie części.

Tabela 3. Wpływ grubości materiału na sprężynowanie

Material: AA5754, odkształcenie 2%			
Grubość materiału, mm	sprężynowanie, mm		
	pkt 1	pkt 2	pkt 3
0,5	0,03	0,11	0,27
1	0,03	0,13	0,29
1,5	0,03	0,12	0,29
2	0,03	0,14	0,29

Tabela 4. Wpływ współczynnika tarcia na sprężynowanie

Wartość współczynnika tarcia	Material: AA5754, odkształcenie 2%			Material: 08, odkształcenie 4%		
	sprężynowanie, mm			sprężynowanie, mm		
	pkt 1	pkt 2	pkt 3	pkt 1	pkt 2	pkt 3
0	0,03	0,13	0,29	0,01	0,04	0,09
0,05	0,03	0,13	0,30	0,01	0,04	0,09
0,1	0,03	0,13	0,29	0,01	0,04	0,07
0,2	0,03	0,13	0,29	0,01	0,04	0,1

4. Podsumowanie

W przeprowadzonych symulacjach wykazano, że stopień odkształcenia części w trakcie procesu obciągania poprzecznego przekłada się bezpośrednio na wielkość sprężynowania. Jak podaje literatura, a także jak zostało to wykazane w badaniach, optymalne warunki procesu są przy odkształceniu 2-5%. Dalszy wzrost odkształcenia nie powoduje znacznego zmniejszenia sprężynowania, lecz przyczynia się do wzrostu naprężeń. Dzięki wykorzystaniu metody MES można przewidzieć wartość sprężynowania i uwzględnić je już na etapie projektowania kształtu wzornika. Ponadto, jak pokazały wyniki symulacji, na wielkość sprężynowania praktycznie nie mają wpływu grubość blachy i współczynnik tarcia między materiałem a wzornikiem.

Literatura

1. Parris A.: Precision stretch forming of metal for precision assembly. Rozprawa doktorska, Massachusetts Institute of Technology, maj 1996.
2. Esat V., Darendeliler H., Gokler M.I.: Finite element analysis of springback in bending of aluminium sheets. *Materials Design*, 23, 2002, 223-229.
3. Yan A-M., Klappka I.: Springback in stretch forming process of aeronautic panel production by finite element simulation. *Int. J. Mater. Form, Suppl* 1, 2008, 201-204.
4. Li K.P., Carden W.P., Wagoner R.H.: Simulation of springback. *Int. J. Mech. Sci.*, 44, 2002, 103-122.
5. Yoshida M., Yoshida F., Konishi H., Fukumoto K.: Fracture limits of sheet metals under stretch bending. *Int. J. Mech. Sci.*, 47, 2005, 1885-1896.

INFLUENCE OF SELECTED STRETCH FORMING PROCESS PARAMETERS ON THE SPRINGBACK EFFECT

Summary

This paper studies influence of stretch forming process parameters on the springback effect. Analysis was carried out based on results from finite element numerical simulation. Effect of the deformation degree, material thickness and friction coefficient between former and sheet specimen on the springback degree was taken into account.

Złożono w redakcji w sierpniu 2010 r.