

Andrzej SOBAŃSKI, Antoni PIELA

Jan BOBER

## POSTĘP W BADANIACH TŁOCZNOŚCI BLACH

Streszczenie. Przedstawiono różnorodne metody oceny przydatności blach do tłoczenia: z podstawowych prób wytrzymałościowych, próby technologiczne, granicznej krzywej tłoczności oraz istotnych cech materiałowych - wykładnika umocnienia  $n$  i współczynnika anizotropii normalnej  $r$ . Krytycznie omówiono zakres ich stosowania dla oceny wstępu do różnorodnych procesów technologicznych. Przykładowo omówiono sposób doboru cech materiałowych wymaganych dla blach przeznaczonych na wanny tłoczone.

Rozwój masowego wytwarzania elementów tłoczonych stawia producentom i użytkownikom blach problem dokładnej i pełnej oceny ich własności.

Według Polskich Norm dla oceny blach głębokotłocznych i karoseryjnych przewiduje się możliwości określenia:

- 1) wytrzymałości na rozciąganie  $R_m$ , granicy plastyczności wyraźnej  $R_e$  lub umownej  $R_{0,2}$  oraz wydłużenia całkowitego  $A_{50}$  na podstawie statycznej próby rozciągania,
- 2) tłoczności  $JE_{20}$  metodą Erichsena,
- 3) twardości HRB metodą Rockwela.

W takim "klasycznym" ujęciu tym lepszy gatunek blachy im mniejsze  $R_e$  przy danym  $R_m$ , im większe  $A_{50}$ ,  $JE_{20}$  oraz im mniejsze HRB. Pomimo wieloletniej praktyki stosowania tych kryteriów ocena przydatności blach na ich podstawie jest często niewystarczająca a ostatnio często kwestionowana jako niewłaściwa. Przykładowo we własnych badaniach autorów [1] statystycznie ustalono wzrastającą ilość pęknięć dla partii blach wykazujących wyższą wartość tłoczności Erichsena na wytłoczkach zewnętrznego boku nadwozia fiat 126p.

Pozukując właściwej metody oceny przydatności do tłoczenia zaproponowano stosowanie dużej ilości różnorodnych prób technologicznych [2, 3]. Oprócz wymienionej próby Erichsena najbardziej rozpowszechnione są próby mięszkowania Swifta, Fukui i Engelhardta-Grossa oraz próba wyrzucania krążka ciśnieniem cieczy (Bulge-Test). Szereg dalszych prób stosowanych jest w węższym zakresie (na przykład próby KWI lub przewijania), inne mają znaczenie tylko historyczne.

Duża ilość prób wynika z różnorodności technologicznych operacji tłoczenia i związanego z tym różnicowania stanów odkształceń i warunków ob-

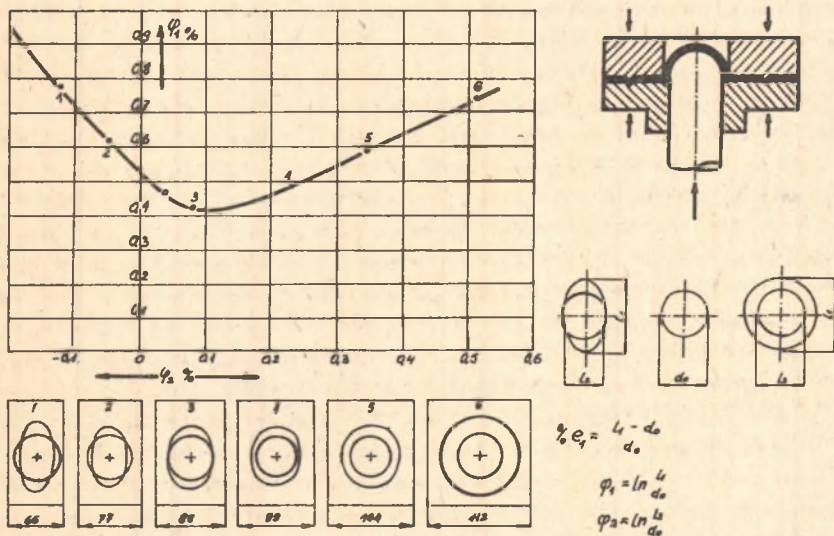
ciążenia. Obok typowych operacji obciążania i wytłaczania znacznie częściej występują procesy złożone, charakterystyczne udziałem zróżnicowanych stanów odkształcenia w oddzielnych obszarach kształtowanej wytłoczki. Często również w określonym obszarze wytłoczki stan odkształcenia ulega znacznej zmianie w kolejnych fazach procesu.

Wszystkie wymienione próby technologiczne są więc jedynie próbami modelującymi z określonym stopniem przybliżenia odpowiednie operacje tłocznicze. Jednak trudność doboru właściwej dla danej wytłoczki próby, duży wpływ na wynik czynników pozamateriałowych a także w wielu przypadkach złożone oprzyrządowanie i znaczna pracochłonność są przyczynami, że ta grupa metod badań nie znalazła powszechnego zastosowania dla oceny własności tłocznych.

Techniczne udoskonalenie metody nanoszenia na powierzchnię blachy siatek podziałowych umożliwiających analizę lokalnych stanów odkształcenia na wytłoczkach przemysłowych i w próbach laboratoryjnych dało podstawę do rozpowszechnienia metody oceny blach na podstawie tak zwanej granicznej krzywej tłoczności. Pierwsza praktyczna koncepcja takiej uogólnionej dla wszystkich stanów odkształcenia charakterystyki tłoczności została przedstawiona przez Kellera [4], a następnie pracami wielu autorów pogłębiona i udoskonalona [5]. Teoretyczne podstawy jej stosowania zostały wyłożone w pracach Marciniaka [6]. Obecnie wyznaczanie krzywej tłoczności najczęściej oparte jest na metodzie Vermeena [7], pozwalającej jednym kompletem narzędzi (kuliasty stempel i okrągła matryca) realizować różne stany odkształcenia przez zmianę szerokości wytłaczanego pasa blachy i zmienne warunki tarcia.

W każdym przypadku tłoczenia ewentualne pęknięcie materiału poprzedza osiągnięcie w tym obszarze stanu granicznego, charakterystycznego zlokalizowanym odkształceniem skupionym w postaci bruzdy lub przewężenia. Odpowiednia ilość prób, o zróżnicowanych stanach odkształcenia, pozwala w układzie współrzędnych odkształceń głównych w płaszczyźnie blach  $\Psi_1$  i  $\Psi_2$  wykreślić graniczne krzywe tłoczności dla kryterium przewężenia i pęknięcia (rys. 1). Jeśli krzywa taka może zostać uznana za charakterystykę blachy danego gatunku, to odniesione na wykres punkty odpowiadające stanom odkształceń najbardziej odkształconych obszarów badanej wytłoczki przemysłowej pozwalają sądzić o stopniu wyczerpania zastosowanego materiału. Jeśli dla któregoś obszaru punkt leży zbyt blisko krzywej granicznej, konieczne jest zastosowanie materiału o krzywej wyżej leżącej, albo takie zmniejszenie warunków tłoczenia, aby wyczerpanie w krytycznym obszarze zmniejszyło się. Problemem istotnym w chwili obecnej jest dokładne określenie stanu odkształcenia w momencie utraty stateczności, dlatego wciąż jeszcze metody tej nie można uważać za doskonałe narzędzie oceny własności tłocznych blach.

Dokładna analiza statycznej próby rozciągania płaskich próbek z blach cienkich pozwoliła wprowadzić nowe charakterystyki tłoczności. Pierwszą



Rys. 1. Idea granicznej krzywej tłoczności oraz narzędzia i próbki do jej wyznaczania wg propozycji Veermana [7]

jest współczynnik anizotropii normalnej  $r$ , równy ilorazowi rzeczywistych odkształceń szerokości i grubości próbki w fazie jej równomiernego wydłużenia:

$$r = \frac{\varphi_b}{\varphi_g} = \frac{\ln b_1/b_0}{\ln g_1/g_0}$$

gdzie:  $b_0, b_1$  - szerokość a  $g_0, g_1$  grubości odpowiednio początkowe i po rozciągnięciu.

Istnieje teoretyczne uzasadnienie [6] poparte wielokrotnie badaniami, że zwiększenie wartości  $r$  zwiększa możliwość odkształcenia w operacjach zbliżonych do wytłaczania.

Drugą nowo wprowadzoną charakterystykę z próby rozciągania jest wykładnik funkcji umocnienia  $n$ . Wielokrotnie wykazano, że jeśli zależność naprężenia uplastyczniającego od odkształcenia zastępczego da się aproksymować funkcją

$$\sigma_p = C\varphi^n,$$

w której  $C$  oraz  $n$  - stałe, to wartość  $n$  jest związana z wydłużeniem równomiernym  $A_r$  zależnością:

$$n = \ln(1 + A_r).$$

Dla typowych materiałów tłocznych o wystarczająco dużej jednorodności i małej czułości na prędkość odkształcenia zależności te są praktycznie spełnione. Wydłużenie równomierne mierzone w próbie rozciągania jest niewątpliwie wielkością ściśle związaną z granicznym odkształceniem przewężeniowym. W praktyce dokładniej i pewniej można wyznaczyć wykładnik  $n$  przez matematyczne opracowanie wykresu umocnienia z próby rozciągania, aniżeli zmierzyć na próbce wydłużenie równomierne  $A_r$ .

Obecnie przekonanie o słuszności oceny tłoczności blach parametrami  $r$  i  $n$  jest już bardzo rozpowszechnione. Istotny problem przy wdrażaniu tej metody do praktyki przemysłowej stanowi poprawne ustalenie niezbędnych minimalnych wartości. Wydaje się jednak, że zasadniczą przyczyną trudności w upowszechnianiu tej metody w przemyśle są wysokie wymagania poprawności wykonania tych prób oraz ich względnie duża pracochłonność w porównaniu do dotychczas stosowanych prób odbiorczych.

Ilustracją złożoności poprawnej oceny własności blach i doboru właściwych kryteriów mogą być wyniki badań autorów nad zastosowaniem blach krajowej produkcji na wanny kąpielowe, wykonywane nowoczesną metodą jednooperacyjnego tłoczenia [8]. W pierwszym okresie po uruchomieniu produkcji stosowano wyłącznie blachy importowane. Dostawy firm Sollac, VOEST, Klockner i Hoogovens uznane zostały za bardzo dobre, gdyż ilość braków nie przekraczała w partii 2%. Partia dostarczona z firmy Kobe-Steel uznana została za złą (20% braków).

Na podstawie prób wykonanych u producenta wanien ustalono przez porównanie z materiałem importowanym wymagane wartości tłoczności Erichsena  $IE_{20}$  oraz  $R_m$ ,  $R_{0,2}$  i  $A_{50}$  z próby rozciągania jako podstawę badań odbiorczych dla planowanych dostaw z Huty im. Lenina. Pierwsze dostarczone przez HIL partie blach wymagania te spełniały lub przewyższały, jednak ilość braków sięgała 50%.

W tej sytuacji w podjętej pracy postanowiono szerzej zbadać własności stosowanych blach. Próbami objęto dostawy z pięciu partii importowanych od wymienionych producentów oraz z czterech partii produkcji HIL. Wykonano:

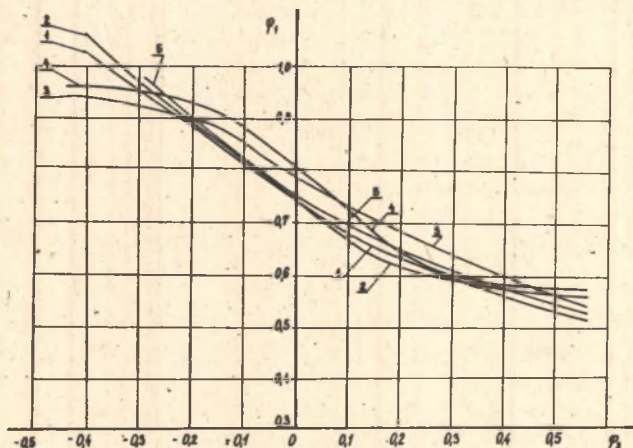
- 1) próbę rozciągania według norm, określając  $R_m$ ,  $R_{0,2}$ ,  $A_{50}$  i  $A_r$ ,
- 2) dodatkowe próby rozciągania na paskach wyciętych pod kątami  $0,45$  i  $90^\circ$  do kierunku walcowania blachy, wyznaczając średnie wartości wskaźników  $r$  i  $n$ ,
- 3) próbę tłoczności według Erichsena  $JE_{20}$ , oraz
- 4) próbę Erichsena według DIN dla grubości powyżej 2,0 mm (stemplem kulistym  $\varnothing 20$  mm w matrycy  $\varnothing 40$  mm) -  $JE_{20/40}$ ,
- 5) próbę wybrzuszenia krążka ciśnieniem cieczy (BULGE - TEST) w matrycy  $\varnothing 100$  mm, której miarą jest wysokość czaszy kulistej  $H_{max}$  w chwili pęknięcia,
- 6) próbę miseczkowania Swifta stemplem płaskim  $\varnothing 50$  mm, oznaczając graniczny współczynnik tłoczności  $\beta$  metodą Schmidta.

Wszystkie wyniki prób zestawiono w tablicy 1.

Tablica 1

## Wyniki prób wytrzymałościowych i technologicznych badanych blach

Materiał	Braki w produkcji	$R_m$ MPa	$R_{0,2}$ MPa	$A_{50}$ %	$A_r$ %	n -	r -	JE <sub>20</sub> mm	JE <sub>20/40</sub> mm	H <sub>max</sub> mm	$\rho_0$ mm
Sollac	małe	330	190	52,5	23,5	0,220	1,48	16,3	13,0	42,7	2,10
VOEST	małe	315	170	53,8	27,1	0,265	1,50	17,4	13,6	40,3	2,00
Klöckner	małe	320	200	50,0	21,7	0,210	1,44	16,6	13,0	39,9	2,4
Hoogovens	małe	325	205	51,5	26,3	0,205	1,75	-	12,9	-	-
Kobe-Steel	duże	310	200	57,5	22,7	0,200	1,34	16,4	13,3	39,8	2,11
HIL-1	b. duże	315	195	51,7	24,6	0,225	1,09	16,3	13,0	39,9	1,88
HIL-2	b. duże	315	205	46,4	19,0	0,175	1,13	15,9	13,2	40,6	2,00
HIL-3	duże	310	210	50,9	16,3	0,165	1,22	16,0	13,2	41,3	2,09
HIL-4	b. duże	320	190	47,3	25,7	0,235	1,17	-	13,0	-	-

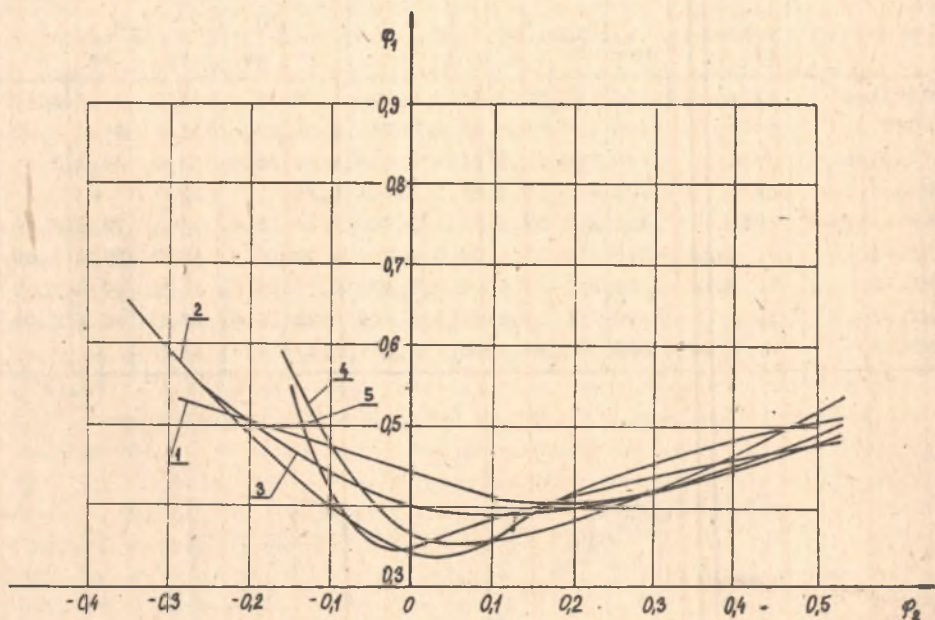


Rys. 2. Graniczne krzywe tłoczności wg kryterium pęknięcia badanych blach  
1 - Sollac, 2 - VOEST, 3 - Klöckner, 4 - Kobe-Steel, 5 - HIL-1

Dla pięciu z badanej grupy blach wyznaczono graniczne krzywe tłoczności pęknięcia (rys. 2) i przewężenia (rys. 3). Stosowano metodę Vermana (stempel kulisty 75 mm, matryca  $\phi$  100 mm, siatka podziałowa okręgi o średnicy 2 mm).

Uzyskane wyniki pozwalają na stwierdzenie, że jedyną cechą jednoznacznie odróżniającą blachy uznane w produkcji za dobre od złych jest duża wartość r. Wartości  $R_m$ ,  $R_{0,2}$ ,  $A_{50}$ ,  $A_r$ , n, JE<sub>20</sub>, JE<sub>20/40</sub> i H<sub>max</sub> blach dobrych i złych różnią się nieistotnie, a w niektórych przypadkach wskaźniki dla blach złych są wyższe. Również wartości granicznego współczynnika miesięczowania nie zachowują w pełni właściwej korelacji.

Próba oceny na podstawie granicznych krzywych tłoczności (rys. 2 i 3) też nie pozwoliła jednoznacznie odróżnić blach dobrych i złych.



Rys. 3. Graniczne krzywe tłoczności według kryterium przewężenia badanych blach. Oznaczenia jak na rys. 2

W tej sytuacji dla uzyskania pełniejszego obrazu wykonano analizę samego procesu tłoczenia wanien (rys. 3). W przypadku stosowania złego materiału powstające wady to:

- zerwania w postaci poziomych pęknięć wybiegające z naroża stępła wzdłuż krótkiej ściany pochyłej (obszar A),
- fałdy pionowe na krótkiej ścianie poniżej krawędzi ciągnawej matrycy (obszar B).

Zmniejszając siłę docisku na kołnierze wytłoczki i zwiększając ilość podawanego smaru powodujemy ograniczenie zrywów, natomiast powstają fałdy, zwiększenie docisku powoduje ograniczenia fałd, lecz natychmiast następuje zerwanie. Materiał uznany za zły dopuszcza więc tylko bardzo mały zakres regulacji procesu zmienną siłą docisku i smarowaniem. Ponieważ w praktyce własności kolejnych arkuszy nie są identyczne, praktycznie większość wytłoczek zostaje wybrakowana. W przypadku materiału dobrego przedział swobodnej regulacji jest wystarczająco szeroki, aby objąć zmienne własności blach.

Taki przebieg procesu może być logicznie uzasadniony dla materiałów o zróżnicowanej anizotropii normalnej a podobnych pozostałych własnościach. Większa wartość  $r$  pozwala uplastyczyć obszar kołnierza wytłoczki będący w płaskim stanie naprężeń rozciągająco-ściskających działaniem mniejszej siły i dlatego w obszarze A dwukierunkowego rozciągania wyczerpanie materiału jest mniejsze. Z kolei większa anizotropia normalna daje większy opór przeciwko wybaczeniu (powstawanie fałd) w obszarze B powierzchni swobodnej blachy nie obciążonej naciskiem narzędzia.

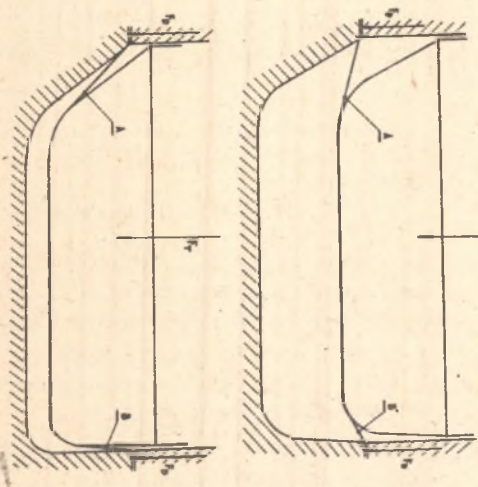
Dla blach Hoogovens (duże  $r$ ) i HIL (małe  $r$ ) na podstawie zmian wymiarów siatki podziałowej przeanalizowano stan odkształceń w obszarze naroża (A). Pomiary wykonano dla 4 kolejnych faz tłoczenia, odpowiadających 1/4, 1/2, 3/4 i pełnemu skokowi stempla. Badania wykazały, że już w pierwszej fazie tłoczenia w krytycznym obszarze A występuje większe

dwukierunkowe rozciąganie w materiale o małym  $r$ . Różnica wzrasta w kolejnych fazach tłoczenia a równocześnie obszar intensywnego dwukierunkowego rozciągania powiększa się bardziej dla małej wartości anizotropii.

Przedstawione badania pozwoliły przyjąć współczynnik anizotropii normalnej  $r$ , jako najważniejsze kryterium oceny własności blach, przeznaczonych na wanny tłoczne i ustalić minimalną wartość niezbędną  $r = 1,40$ . Wyprodukowane w ramach pracy wdrożeniowej w HIL blachy, które spełniały to kryterium, dały w procesie tłoczenia rezultat zadowalający.

#### LITERATURA

- [1] Badania tłoczności blach karoserii fiata 126p. Sprawozdanie z obozu naukowego studentów w FSM w Tychach pod kierunkiem dr inż. A. Sobańskiego (nie publikowane).
- [2] Morawiecki M., Sadok L., Wosiek E.: Teoretyczne podstawy technologicznych procesów przeróbki plastycznej. Wyd. Śląsk, Katowice 1977.
- [3] Grasshof H.W.: Technologische Prüfung von Kaltband und Fragen der Güte [w:] Herstellung von Kaltgewalzten Band, t. 2, Düsseldorf 1970.
- [4] Keeler S.P.: Determination of forming limits in automotive stampings. Sheet Metal Ind. 1965, s. 683.



Rys. 4. Schemat procesu tłoczenia wanny

- [5] Sanz G.: Graniczne krzywe tłoczności. Obróbka plastyczna, t.14(1975), s. 35.
- [6] Marciniak Z.: Odkształcenie graniczne przy tłoczeniu blach. WNT, Warszawa 1971.
- [7] Veerman C.: Determination of the admissible Strains (the FLD) Deep Drawing Conference, Amsterdam 1972, ss. 81-90.
- [8] Murski C., Sobański A.: Badanie wyężenia i odkształcalności granicznej blach przeznaczonych do tłoczenia na wanny i zlewozmywaki emaliowane. Ekspertyza nr 116/77 Zespołu Rzeczoznawców SITPH, Katowice 1977.

#### ПРОГРЕСС В ИССЛЕДОВАНИЯХ ШТАМПУЕМОСТИ ЛИСТОВОЙ СТАЛИ

#### Р е з ю м е

В статье приводятся разнообразные методы оценки пригодности листовой стали для штамповки: из основных сопротивляемых проб, технологические пробы, предельной кривой штампуемой, а также существенных материальных свойств - показатель упрочнения  $n$  и коэффициента нормальной анизотропии  $r$ . Критически рассматривается предел и применения для оценки шихты для разнообразных технологических процессов.

Примерно рассматривается способ подбора материальных свойств необходимых для листовой стали предназначенной на штампованные лотки.

#### DEVELOPEMENT IN THE DOMAIN OF RESEARCH ON METAL PLATES PRESS-FORMABILITY

#### S u m m a r y

The different methods of estimation of plates usability for press-formability have been presented: from the basic strength tests, technological tests, boundary curve of press-formability and the essential material properties - hardening index  $n$ , and normal strain ratio  $r$ . The range of usefulness of these methods in ingot estimation in various technological processes has been critically discussed. For example, the way of choosing material properties for plates utilized in drawing bath production was discussed.