

METODY WYZNACZANIA OPORÓW TARCIA PODCZAS KSZTAŁTOWANIA BLACH PRZEZNACZONYCH NA KAROSERIE POJAZDÓW SAMOCHODOWYCH

Zjawisko tarcia towarzyszące niemal wszystkim procesom przeróbki plastycznej, w szczególności procesom kształtowania blach jest złożoną funkcją właściwości materiału, parametrów procesu kształtowania, topografii powierzchni kształtowanej blachy i narzędzi oraz warunków smarowania. Podczas procesu kształtowania wytłoczek występują strefy zróżnicowane pod względem stanu naprężeń, stanu odkształceń, prędkości przemieszczeń i warunków tarcia. W artykule scharakteryzowano metody wyznaczania wartości współczynnika tarcia w wybranych obszarach kształtowanej blachy oraz przedstawiono wady i ograniczenia tychże metod.

WSTĘP

Jednym z najważniejszych zjawisk technologicznych, które w dużej mierze odpowiada za charakter płynięcia odkształcanego materiału i warunkuje otrzymanie elementu o żądanych wymiarach i kształtach są opory tarcia. Podczas procesu tarcia tworzone są połączenia tarciove, które w trakcie trwania ruchu ulegają zniszczeniu. Wielkość powstających oporów tarcia jest głównie uwarunkowane wytrzymałością na ścinanie połączeń tarciowych [1, s. 1-35]. Rodzaj powstających złącz tarciowych zależy od materiałów pary trącej, w szczególności od ich wytrzymałości na ścinanie. Duże wartości odkształceń oraz wzrost temperatury w mikroobszarach styku sprzyjają tworzeniu się połączeń adhezyjnych pomiędzy powierzchniami blachy i narzędzia.

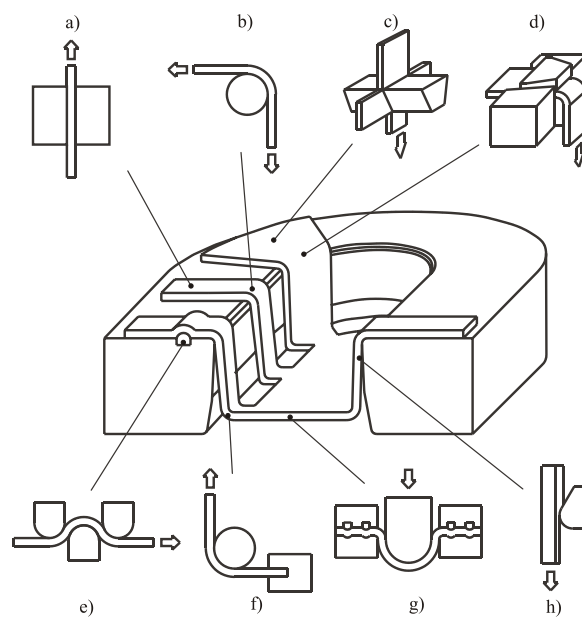
Z uwagi na występowanie w poszczególnych obszarach kształtowanej blachy karoseryjnej zróżnicowanych warunków pod względem stanu naprężeń, odkształceń i prędkości przemieszczeń, dla potrzeb plastycznego kształtowania blach opracowano szereg testów troybologicznych modelujących warunki tarcia (rys. 1).

Badania symulujące warunki tarcia i smarowania można podzielić na testy symulujące procesy i testy symulujące warunki troybologiczne [2, s. 21-30]. Testy symulujące procesy mają za zadanie modelowanie operacji przeróbki plastycznej z zachowaniem kinematyki procesu. Testy symulujące warunki troybologiczne modelują określone zjawisko, często bez zachowania kinematyki procesu. Obie grupy testów można podzielić na próby z bezpośrednim lub pośrednim pomiarem wartości współczynnika tarcia.

Sposób wyznaczania wartości współczynnika tarcia na zaokrąglonej krawędzi matrycy za pomocą czujników pomiarowych umieszczonych w narzędziu mierzących siły kontaktowe został zaproponowany przez Jurkovicę i in. [3, s. 383-386]. Sprzężona metoda analityczno-eksperymentalna potwierdziła możliwość wyznaczenia wartości współczynnika tarcia na podstawie pomiaru siły normalnej oraz stycznej na krawędzi matrycy.

Stosowane są również przyrządy o kinematyce procesu rzeczywistego oraz uniwersalne przyrządy, pozwalające na modelowanie zjawiska tarcia w różnych strefach odkształcanego blachy lub w grupie procesów kształtowania blach. Do testów symulujących proces wytłaczania blach należy zaliczyć przyrząd do kształtowania wytłoczki.

W artykule scharakteryzowano metody wyznaczania wartości współczynnika tarcia, które są stosowane w obróbce plastycznej metali na zimno.



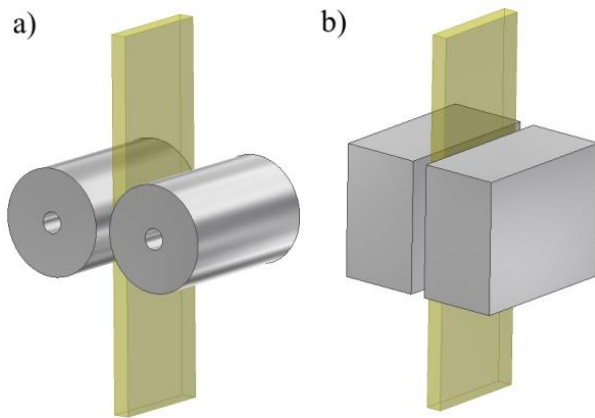
Rys. 1. Obszary do których przypisywane są podstawowe odmiany testów tarcia: a) test ciągnięcia paska blachy, b) test zginania blachy z rozciąganiem, c) testy ciągnięcia blachy w warunkach ściskania blachy, d) test rozciągania blachy w warunkach ściskania blachy, e) test zginania blachy z ciągnięciem, f) test zginania blachy z ciągnięciem, g) wtlaczanie stempla półkolistego, h) test redukcji grubości blachy; opracowano na podstawie [4, s. 844-853]

1. METODY BADANIA TARCIA

1.1. Test przeciągania paska blachy

W procesie tłoczenia próbę ciągnięcia paska blachy przypisuje się do modelowania zjawiska tarcia między stemplem i ścianką wytłoczki. Próba ta polega na przeciąganiu paska blachy umieszczonego między nieobrotowymi przeciwpróbkami, najczęściej o kształcie walcowym [5] (rys. 2a) lub płaskim [6, s. 60-63] (rys. 2b). Występowanie sił tarcia na dwóch powierzchniach styku sprzyja uzyskaniu

większej dokładności pomiaru współczynnika tarcia. Tak jak w większości realizowanych prób tarcia, próbka o szerokości kilkakrotnie większej od grubości jest przeciągana w płaskim stanie odkształcenia. Parametrami wpływającymi na zmianę oporów tarcia jest siła docisku przeciwpróbek, warunki smarowania, prędkość ciągnięcia próbki, chropowatość powierzchni przeciwpróbek [7, s. 125-134].



Rys. 2. Schemat testu ciągnięcia paska blachy między przeciwpróbkami walcowymi (a) oraz płaskimi (b)

Wartość współczynnika tarcia jest wyznaczana z zależności:

$$\mu = \frac{F_T}{2F_N} \quad (1)$$

gdzie: F_T - siła ciągnięcia (tarcia), F_N - siła docisku przeciwpróbek.

Problematyka wpływu prędkości ciągnięcia próbek oraz ukierunkowanej walcowaniem topografii powierzchni blach aluminiowych na wartość oporów tarcia i zmianę topografii powierzchni w warunkach smarowania mieszanego była przedmiotem rozważań Roizarda i in. [5, s. 739-747]. Podczas ciągnięcia blach, których grzbiety nierówności były zorientowane prostopadle do kierunku ciągnięcia siła tarcia była o 30% niższa, niż podczas ciągnięcia próbek odwrotnie zorientowanych. Analiza zmian chropowatości powierzchni blach aluminiowych podczas testu ciągnięcia blach pomiędzy przeciwpróbkami walcowymi i płaskimi [8, s. 757-766] wykazała podobny charakter zmian topografii powierzchni oraz porównywalna wartość współczynnika tarcia wyznaczonych w obu testach. Współczynnik tarcia określany jest jako stosunek siły normalnej i siły stycznej występującymi podczas ciągnięcia blachy pomiędzy powierzchniami walcowymi (rys. 3a) z zależności [9, s. 107-111]:

$$\mu = \frac{F_T - 2F_N \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{2F_N + F_T \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \quad (2)$$

gdzie: F_T - siła ciągnięcia blachy, F_N - siła docisku przeciwpróbek, α - kąt łuku walcowej powierzchni kontaktu.

$$\tan \frac{\alpha}{2} = \sqrt{\frac{g_0 - g_1}{4R - (g_0 - g_1)}} \quad (3)$$

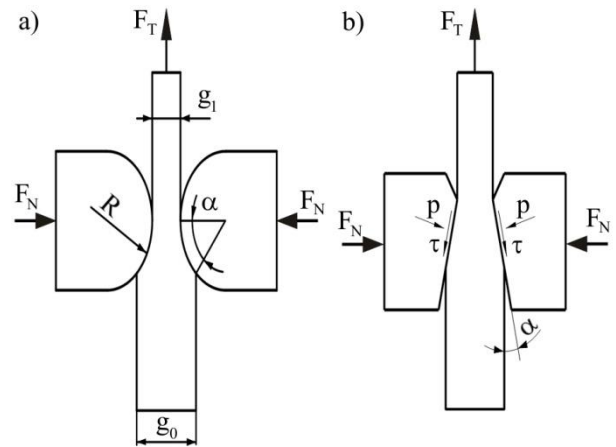
gdzie: R - promień zaokrąglenia walcowej powierzchni kontaktu, g_0 - grubość początkowa blachy, g_1 - grubość końcowa blachy.

Z warunków równowagi elementarnego przekroju blachy pomiędzy płaskimi matrycami (rys. 3b) przedstawionego m.in. w pracy [10, s. 123-128] zależność pomiędzy siłą ciągnięcia F_T blachy i siłą nacisku F_N jest następująca:

$$\frac{F_T}{F_N} = \frac{2(\mu + \tan \alpha)}{1 - \mu \tan \alpha} \quad (4)$$

Wartość współczynnika tarcia, przy założeniu, że jego wartość nie zmienia się wzdłuż powierzchni kontakty blachy z matrycami wyniesie:

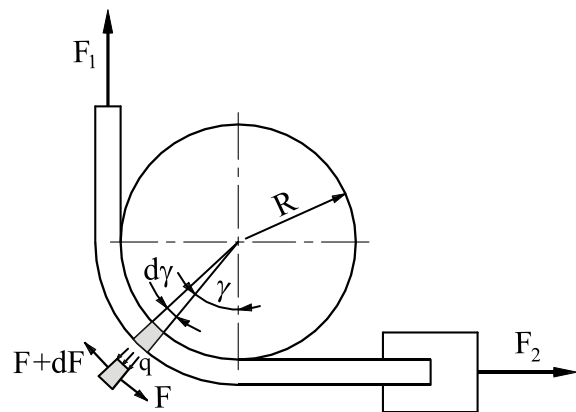
$$\mu = \frac{F_T - 2F_N \tan \alpha}{2F_N + F_T \tan \alpha} \quad (5)$$



Rys. 3. Schemat prób tarcia między matrycami walcowymi (a) i płaskimi (b)

1.2. Test gięcia blachy z rozciąganiem

Do drugiego typu prób zaliczamy test zginania blachy z rozciąganiem, z ang. *Bending Under Tension* (BUT) opracowany przez Littlewooda i Wallace'a [11, s. 925-1930] przypisywany modelowaniu tarcia na krawędzi ciągnącej matrycy. Test polega na ciągnięciu paska blachy wokół walcowej przeciwpróbki (rys. 4).



Rys. 4. Siły działające na elementarny wycinek paska blachy

Próba zginania blachy z rozciąganiem pozwala wyznaczyć nie tylko wartość współczynnika tarcia, ale także jego zmianę w trakcie procesu odkształcania próbki. Zmianę tę można wiązać ze zmianą topografii powierzchni blachy w wyniku odkształceń [12, s. 610-617] oraz zmianą warunków kontaktu związanych z umocnieniem odkształceniowym materiału próbki [13, s. 809-815]. Występowanie oporów tarcia między rolką a blachą powoduje, że zachodzi nierówność $F_1 > F_2$. Odkształcenie paska blachy w strefie działania siły F_1 nie tylko określa długość drogi tarcia blachy dookoła rolki, ale także odpowiada za wielkość odkształcenia granicznego blachy [14, s. 85-95]. Zakładając, że wartość współczynnika tarcia jest jednakowa dla całej powierzchni styku oraz kąt opasania γ jest stały podczas deformacji można wyznaczyć wartość współczynnika tarcia z warunków równowagi elementarnego wycinka próbki (rys. 1.14).

$$F + q\mu wRdy - (F + dF) = 0 \quad (6)$$

$$qwRdy - F\sin\frac{dy}{2} - (F + dF)\sin\frac{dy}{2} = 0 \quad (7)$$

gdzie q jest naciskiem jednostkowym blachy na rolkę, w jest szerokością próbki.

Zakładając, że kąt dy jest bardzo mały otrzymamy $\sin\frac{dy}{2} \approx \frac{dy}{2}$ oraz przyjmując, że $dF \ll F$ z równań (6) i (7) otrzymamy:

$$\mu \cdot dy = \frac{dF}{F} \quad (8)$$

Po scałkowaniu równania (8) i uwzględniając, że $\gamma = \frac{\pi}{2}$ wartość współczynnika tarcia jest równa:

$$\mu = \frac{2}{\pi} \ln\left(\frac{F_1}{F_2}\right) \quad (9)$$

Równanie 9 nie uwzględnia wpływu oporów związanych z gięciem blachy na wartość współczynnika tarcia.

Średni nacisk w strefie kontaktu odpowiadający próbie wykonywanej przy zablokowanej przeciwpróbce wynosi:

$$q = \frac{F_1 + F_2}{2wR} \quad (10)$$

Uwzględniając wpływ grubości blachy i promienia zaokrąglenia przeciwpróbek zależność do określania współczynnika tarcia na podstawie pomiaru sił rozciągających w obu etapach jest następująca:

$$\mu = \frac{1}{\theta} \frac{2R + g}{2R} \ln \frac{F_{1a} - (F_{1b} - F_{2b})}{F_{2a}} \quad (11)$$

gdzie: R - promień przeciwpróbki, θ - kąt opasania przeciwpróbki, g - grubość blachy, F_{1a} - siła rozciągania przy wałku nieruchomym, F_{1b} - siła rozciągania przy wałku ruchomym, F_{2a} - siła naciągu przy wałku nieruchomym, F_{2b} - siła naciągu przy wałku ruchomym.

Wartości sił rozciągających uwzględniają pokonywanie oporów związanych z gięciem blachy dookoła przeciwpróbki, dlatego w równaniu (1.16) nie występuje jawnie siła gięcia równa:

$$F_b = F_{1b} - F_{2b} \quad (12)$$

W Ohio State University opracowano przyrząd do określania wartości współczynnika tarcia (rys. 5) w warunkach zmieniającego się kąta opasania [15, s. 13-18], którego metodologia jest modyfikacją testu ciągnięcia blachy z rozciąganiem. Opracowaną metodę w literaturze przyjęto określać skrótem pochodzącym od nazwy uniwersytetu, w którym opracowano test - O. S. U. Podobnie jak w przypadku testu gięcia blachy z rozciąganiem można oddzielić opory związane z gięciem próbki i ciągnięciem przez przeprowadzenie testu dla przeciwpróbek ruchomych i zablokowanych. Niezaprzeczną zaletą metody jest zapewnienie realizmu procesu odkształcania blachy i warunków kontaktu:

- jednoczesne występowanie procesu gięcia i rozciągania,
- kąt opasania przeciwpróbek zmienia się stopniowo ze wzrostem ich przemieszczenia.

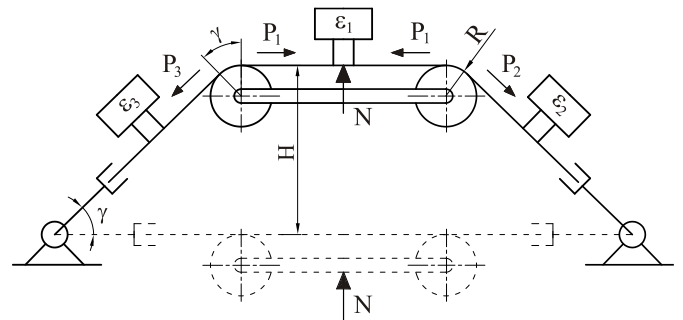
Pomijając wpływ gięcia i prostowania blachy zależność pomiędzy siłami rozciągającymi P_1 i P_2 wynosi:

$$\frac{P_1}{P_2} = e^{\mu\gamma} \quad (13)$$

gdzie: γ - kąt opasania przeciwpróbki, μ - współczynnik tarcia.

Stąd wartość współczynnika tarcia wyniesie:

$$\mu = \frac{1}{\gamma} \ln \frac{P_1}{P_2} \quad (14)$$



Rys. 5. Schemat testu tarcia O.S.U., opracowano na podstawie [15, s. 13-18]

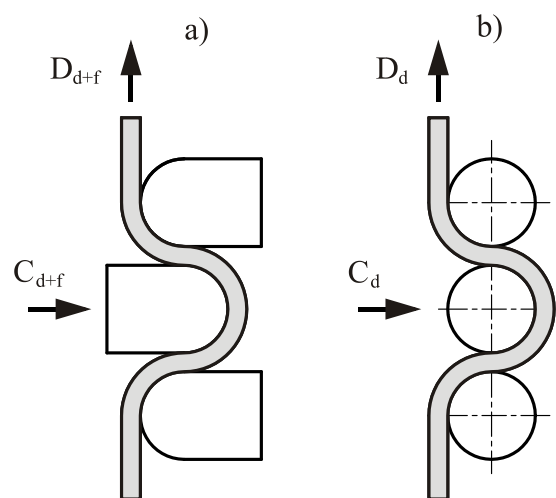
Odształcenie plastyczne blachy spowodowane jej gięciem wokół przeciwpróbki powoduje zmiany topografii powierzchni i w konsekwencji lokalne naciski odniesione do rzeczywistej powierzchni kontaktu są mniejsze od nacisków nominalnych uwzględniających nominalną powierzchnię kontaktu.

1.3. Test gięcia blachy z przeciąganiem

Test zginania blachy z ciągnięciem, którego koncepcja została opracowana przez Nine'a [16, s. 179-211] przypisuje się modelowaniu tarcia na progu ciągowym. Progi ciągowo są stosowane podczas kształtowania przedmiotów o złożonych kształtach aby wyrównać opory płynięcia materiału na całym obwodzie wytłoczki lub zmienić stan naprężeń w określonych miejscach kształtowanej wytłoczki.

Krzywizna blachy przechodzącej przez próg ciągowy ulega kilkukrotnej zmianie, blacha jest na przemian wyginana i prostowana. Podczas przejścia blachy przez próg należy pokonać opory odkształcenia oraz opory tarcia między progiem a blachą. Ideą budowy przyrządu jest możliwość oddzielenia oporów odkształcenia blachy od oporów tarcia.

W próbie podczas ciągnięcia paska blachy po rolkach zablokowanych i ruchomych mierzy się siłę ciągnięcia i siłę docisku (rys. 6). Ciągnięcie blachy przez układ wałków ruchomych pozwala zminimalizować opory tarcia. Siła ciągnąca w tym przypadku wiąże się z pokonywaniem oporów odkształcenia blachy. Układ wałków zamocowanych nieruchomo reprezentuje całkowite opory ciągnięcia blachy przez próg.



Rys. 6. Idea wyznaczania oporów tarcia: a) wałki zablokowane, b) wałki ruchome

Różnicę siły ciągnięcia dla układu wałków ruchomego i nieruchomego można przypisać procesowi tarcia i wykorzystać do obliczenia wartości współczynnika tarcia według zależności [16, s. 179-211]:

$$\mu = \frac{1}{\pi} \frac{D_{d+f} - D_d}{C_{d+f}} \quad (15)$$

gdzie: D_{d+f} - siła ciągnięcia przy rolkach zablokowanych, D_d - siła ciągnięcia przy rolkach ruchomych, C_{d+f} - siła docisku przy rolkach zablokowanych.

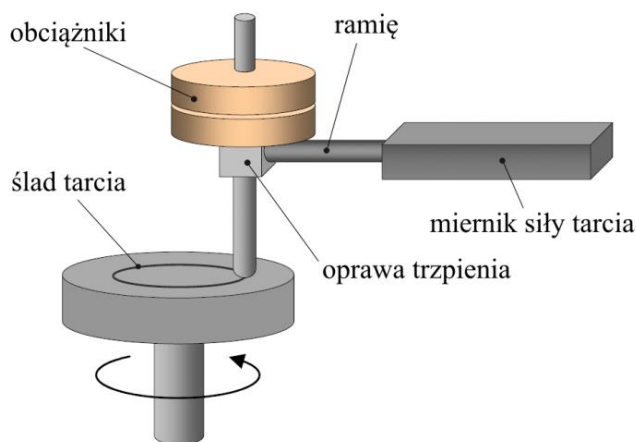
Zależność (15) umożliwia wyznaczenie wartości współczynnika tarcia dla kąta opasania walca środkowego równego 180° . W zależności od odmiany prób zginania z rozciąganiem blachy zmianę warunków tarcia uzyskuje się przez [17, s. 94-103]: zmianę kąta opasania przeciwpróbki, warunków smarowania, kształtu i wymiarów modelu progu ciągowego oraz prędkości ciągnięcia blachy.

Czynnikiem, którego wpływ nie jest często uwzględniany podczas wyznaczania wartości współczynnika tarcia za pomocą symulatorów tarcia jest wpływ tolerancji wykonania blachy na wartość i zakłócenia rejestrowanych parametrów [18, s. 41-49].

Wpływ wartości parametrów chropowatości powierzchni blach na wartość współczynnika tarcia został szczegółowo omówiony w pracy Skarpelosa i Morrisa [19, s. 165-172]. Blachy charakteryzujące się wyższymi wartościami parametru R_a wykazują niższą wartość współczynnika tarcia w próbie ciągnięcia blachy ze zginaniem, co potwierdzają inne badania.

1.4. Testy o obrotowym ruchu narzędzia

Próby o obrotowym ruchu narzędzia (rys. 7) polegają na umieszczeniu próbki w postaci pierścienia lub krążka między płytą i przeciwpróbką wykonującą ruch obrotowy, podczas którego dokonuje się pomiaru siły stycznej i siły normalnej w obszarze styku. Jako przeciwpróbkę stosuje się trzpień o powierzchni płaskiej (*ang. pin-on-disc*) lub kulistej (*ang. ball-on-disc*) [20, s. 345-349]. Wielkość oporów tarcia możemy określić dla różnych prędkości poślizgu oraz sił nacisku.



Rys. 7. Schemat ogólny stanowiska pomiarowego

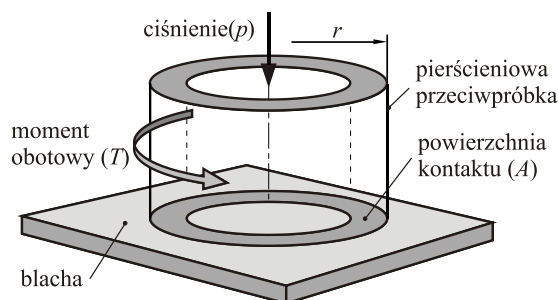
Badania na stanowiskach typu trzpień-tarcza (*pin-on-disc*) gdzie kierunek, a także zwrot wektora prędkości poślizgu jest stały w czasie nie można porównywać z pomiarami wykonanymi na stanowiskach pracujących w ruchu przemiennym (np. posuwisto-zwrotnym). Zaletą tego typu badań jest możliwość pomiaru zarówno współczynnika tarcia kinetycznego jak i statycznego w węzłach maszyn. Z uwagi na cykliczny kontakt przeciwpróbki z powierzchnią badanej blachy i skoncentrowany charakter styku wzmagający aktywację procesu zużycia reprezentatywną dla danej powierzchni wartość współczynnika tarcia można określić tylko dla początkowego stadium procesu tarcia.

W Instytucie Technologii Eksploatacji - Państwowym Instytucie Badawczym w Radomiu opracowano kilkadziesiąt typów tribotesterów, które poza wyznaczaniem wartości oporów tarcia (współczynnika tarcia) pozwalają na określenie sumarycznego zużycia liniowego elementów węzła tarcia.

Stosowanie tribotesterów do wyznaczania współczynnika tarcia blach kształtowanych plastycznie jest ograniczone ze względu na charakter styku skoncentrowanego, którego występowanie w rzeczywistych procesach wytłaczania jest ograniczone. Ponadto niski stosunek granicy plastyczności badanego materiału i materiału przeciwpróbki wpływa na szybkie zapoczątkowanie procesów zużycia. Powierzchniowy kontakt przeciwpróbki z powierzchnią badanej blachy zapewnia metoda wyznaczania współczynnika tarcia za pomocą pierścieniowej przeciwpróbki o średnicy zewnętrznej r obciążonej ciśnieniem p (rys. 8) [21, s. 299-304]. Wartość współczynnika tarcia wyznaczana jest z następującej zależności:

$$\mu = \frac{T}{r \cdot p \cdot A} \quad (16)$$

gdzie: r - promień zewnętrzny pierścieniowej przeciwpróbki, p - ciśnienie, T - moment obrotowy, A - pole powierzchni kontaktu.



Rys. 8. Schemat testu wciskania obrotowego pierścienia

Tribotester typu trzpień-tarcza jest podstawowym urządzeniem do badania zużycia materiałów [22, s. 219-253]. Anizotropia tarcia wpływa na intensywność zużycia materiału, która zależy od kierunku poślizgu wywołując zużycie anizotropowe. Prędkość zużycia anizotropowego była badana przez Zmitrowicza [22, s. 219-253], który rozszerzył równanie Archarda na materiały wykazujące anizotropię tarcia i właściwości mechanicznych.

PODSUMOWANIE

Analiza procesów tarcia i smarowania jest utrudniona na drodze teoretycznej oraz eksperymentalnej z uwagi na konieczność uwzględnienia dużej liczby czynników wpływających na zjawiska tribologiczne w strefie kontaktu blachy z narzędziem. Każda analiza procesów tarcia i smarowania nawet w warunkach laboratoryjnych będzie obarczona błędem, wynikającym z niemożności uwzględnienia wszystkich czynników, wpływających na przebieg i warunki tarcia. Wiele czynników nieskorelowanych ze sobą może w określonych warunkach tworzyć efekt interakcyjny wzmagając wpływ jednych parametrów względem innych.

W metodach pośrednich wyznaczania współczynnika tarcia jest wyznaczany na podstawie pomiaru innych wielkości np. siły tarcia i siły normalnej. W oparciu o przyjęty model tarcia następuje obliczenie wartości współczynnika tarcia. Wadą tego typu metod jest to, że umożliwiają wyznaczenie uśrednionej wartości współczynnika tarcia, natomiast nie umożliwiają pomiaru i określenia rzeczywistych oporów tarcia.

Istotną cechą przedstawionych w artykule metod jest to, że umożliwiają wyznaczenie wartości współczynnika tarcia uśrednionej dla całej powierzchni styku. Wadą opisanych metod jest to, że nie modelują złożonych warunków tarcia występujących w różnych obszarach wytłoczki. Pozwalają jedynie na określenie oporów tarcia w wybranych obszarach, co prowadzi do konieczności posługiwania się wieloma próbami tarcia. Przy zastosowaniu ciągłej rejestracji parametrów koniecznych do wyznaczenia wartości współczynnika tarcia

podczas poszczególnych testów można wyznaczyć obraz zmian oporów tarcia w czasie procesu tarcia. Rozbieżności w wartościach współczynnika tarcia materiału określonych w poszczególnych próbach mogą wynikać z występowania różnych stanów naprężeń i odkształceń próbki uwarunkowanych geometrią przeciwpórek. Różnorodność geometrii styku narzędzia z odkształcanym materiałem jak również odmienne stany odkształcenia i naprężenia w różnych procesach kształtowania blach sprawia, że do tej pory nie opracowano uniwersalnej metody wyznaczania współczynnika tarcia.

BIBLIOGRAFIA

1. Bhushan B., *Contact mechanics of rough surfaces in tribology: multiple asperity contact*, "Tribology Letters" 1998, vol. 4.
2. Świątkowski K., *Sposoby oceny wielkości tarcia na powierzchniach kontaktu niemetalicznego materiału modelowego i narzędzia*, „Obróbka Plastyczna Metali” 2000, nr 7, 2000.
3. Jurkovic M., Jurkovic Z., Buljan S., *The tribological state test in metal forming processes using experiment and modelling*, "Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering" 2006, vol. 18.
4. Bay N., Olsson D. D., Andreasen J. L., *Lubricant test methods for sheet metal forming*, "Tribology International" 2008, vol. 41.
5. Roizard X., Raharjaona F., von Stebut J., Belliard P., *Influence of sliding direction and sliding speed on the microhydrodynamic lubrication component of aluminium mill-finish sheets*, "Tribology International" 1999, vol. 32.
6. Lee B. H., Keum Y. T., Wagoner R. H., *Modeling of the friction caused by lubrication and surface roughness in sheet metal forming*, "Journal of Materials Processing Technology" 2000, vol. 130-131.
7. Trzepieciński T., *Analysis of the friction influence on change of surface topography in strip drawing test*, "Tribologia" 2013, tom 44.
8. Guillon O., Roizard X., Belliard P., *Experimental methodology to study tribological aspects of deep drawing – application to aluminium alloy sheets and tool coatings*, "Tribology International" 2001, vol. 34.
9. Matuszak A., *Determination of the frictional properties of coated steel sheets*, "Journal of Materials Processing Technology" 2000, vol. 106.
10. Le H. R., Sutcliffe M. P. F., *Measurements of friction in strip drawing under thin film lubrication*, "Tribology International" 2002, vol. 35.
11. Littlewood M., Wallace J. F., *The effect of surface finish and lubrication on the frictional variation involved in the sheet-metal-forming process*, "Sheet Metal Industry" 1964, vol. 41.
12. Zhang S., Hodgson P. D., Duncan J. L., Cardew-Hall M. J., Kalayanasundaram S.: *Effect of membrane stress on surface roughness changes in sheet forming*, "Wear" 2002, vol. 253.
13. Trzepieciński T., *Wpływ odkształcenia plastycznego blachy na zmianę oporów tarcia w procesie tłoczenia*, „Rudy i Metale Nieżelazne” 2009, vol. 54.
14. Lovell M. R., Deng Z., *Characterization of interfacial friction in coated sheet steel: influence of stamping process parameters and wear mechanisms*, "Tribology International" 2002, vol. 35.
15. Wagoner R. H., Wang W., Sriram S., *Development of OSU formability test and OSU friction test*, "Journal of Materials Processing Technology" 1994, vol. 45.
16. Nine H. D., *Draw bead forces in sheet metal forming*, Proceedings of a Symposium on Mechanics of Sheet metal Forming: Behaviour and Deformation Analysis, Plenum Press, Warren 1978.
17. Samuel M., *Influence of drawbead geometry on sheet metal forming*, "Journal of Materials Processing Technology" 2002, vol. 122.
18. Hirpa G. Lemu, Trzepieciński T., *Numerical and experimental study of the frictional behaviour in bending under tension test*, "Strojnicki Vestnik - Journal of Mechanical Engineering" 2013, vol. 59 (2013).
19. Skarpelos P., Morris Jr J. W., *The effect of surface morphology on friction during forming of electrogalvanized sheet steel*, "Wear" 1997, vol. 212.
20. Trzepieciński T., *Badania oporów tarcia wywołanych działaniem progów ciągowych w procesie kształtowania blach*, „Rudy i Metale Nieżelazne” 2010, tom 55.
21. Kim H., Han S., Yan Q., Altan T., *Evaluation of tool materials, coatings and lubricants in forming galvanized advanced high strength steels (AHSS)*, "CIRP Annals - Manufacturing Technology" 2008, vol. 57.
22. Zmitrowicz A., *Wear patterns and laws of wear - a review*, "Journal of Theoretical Applied Mechanics" 2006, vol. 44.

Methods of determination of frictional resistances in sheet metal forming of car body sheets

The friction phenomenon existed in almost all plastic working processes, in particular sheet metal forming, is a complex function of the material's properties, parameters of the forming process, surface topography of the sheet and tools, and lubrication conditions. During the stamping of the drawpieces there are zones differentiated in terms of stress and strain state, displacement speed and friction conditions. This article describes the methods for determining the value of the coefficient of friction in selected areas of sheet metal and presents the drawbacks and limitations of these methods.

Autorzy:

dr hab. inż. **Tomasz Trzepieciński** – Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, Katedra Przeróbki Plastycznej, al. Powst. Warszawy 8, 35-959 Rzeszów, e-mail: tomtrz@prz.edu.pl

dr inż. **Irena Nowotyńska** – Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza, Wydział Zarządzania, Zakład Informatyki w Zarządzaniu, al. Powstańców Warszawy 10, 35-959 Rzeszów, e-mail: i_nowot@prz.edu.pl

JEL: L64 DOI: 10.24136/atest.2018.170

Data zgłoszenia: 2018.05.24 Data akceptacji: 2018.06.15