

Irena NOWOTYŃSKA¹
Łukasz BĄK²
Tomasz TRZEPIECIŃSKI³
Sergei BOSIAKOW⁴

WPLYW ODKSZTAŁCENIA BLACHY STALOWEJ NA ZMIANĘ STRUKTURY GEOMETRYCZNEJ POWIERZCHNI W WARUNKACH KONTAKTU POWIERZCHNI SFERYCZNEJ Z POWIERZCHNIĄ PŁASKĄ

W artykule przedstawiono eksperymentalną i numeryczną analizę wpływu odkształcenia na zmianę struktury geometrycznej powierzchni blachy stalowej głębokotłocznej w warunkach kontaktu sztywnej powierzchni kulistej z powierzchnią blachy. Zmianę struktury geometrycznej powierzchni przeanalizowano dla różnych wartości obciążenia. Wyniki symulacji numerycznych kontaktu powierzchni sferycznej z chropowatą powierzchnią blachy wykazały, że wraz ze wzrostem siły nacisku strefa odkształceń plastycznych ulega powiększeniu. Początkowo odkształceniom plastycznym ulegają jedynie wzniesienia struktury geometrycznej powierzchni. Umocnienie odkształceniowe w warstwie wierzchniej wraz ze zwiększeniem obciążenia skutkuje wystąpieniem odkształcenia blachy w obszarach podpowierzchniowych.

Słowa kluczowe: blacha głębokotłoczna, metoda elementów skończonych, chropowatość powierzchni

1. Wprowadzenie

Mechanika kontaktów między chropowatymi powierzchniami jest zagadnieniem o dużym znaczeniu w inżynierii, ponieważ zjawiska powierzchniowe w technologii silnie zależą od topologicznych właściwości stykających się powierzchni. Podczas kontaktu dwóch powierzchni dochodzi do mikrometrycznych odkształceń na skutek sił obciążających powierzchnię. Odkształcenia w kontakcie

¹ Autor do korespondencji/corresponding author: Irena Nowotyńska, Politechnika Rzeszowska, al. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów, tel.: (17) 8651894, e-mail: i_nowot@prz.edu.pl

² Łukasz Bąk, Politechnika Rzeszowska, e-mail: lbak@prz.edu.pl

³ Tomasz Trzepieciński, Politechnika Rzeszowska, e-mail: tomtrz@prz.edu.pl

⁴ Sergei Bosiakow, Belarusian State University, e-mail: bosiakov@bsu.by

zależą od właściwości stykających się materiałów (modułu Younga, stałej Poissona, granicy plastyczności, wytrzymałości na rozciąganie), sumy krzywizn stykających się ciał oraz od stanu naprężeń [1].

Pierwsze badania nad kontaktem między dwoma elastycznymi sferami rozpoczął Hertz [2]. Później wielokrotnie wykorzystywano w pracach teorię Hertza, tworząc modele sprężysto-plastyczne, plastyczne, jak również modele zapewniające ciągłość pomiędzy pośrednimi stanami naprężeń. Ze względu na geometrię powierzchni będących w kontakcie tworzone coraz to nowsze modele kontaktu, począwszy od kontaktu pomiędzy sferami, poprzez badania kontaktu pomiędzy gładką sferą i gładką płaską powierzchnią w pełnym zakresie odkształceń [3], do modelowania tarcia pomiędzy chropowatymi powierzchniami. W ostatnim przypadku wykorzystano kontakt pomiędzy sferyczną a płaską powierzchnią, z uwzględnieniem podstawowych parametrów chropowatości [4]. Opracowane modele dotyczyły także kontaktu pomiędzy sferyczną a płaską powierzchnią, z uwzględnieniem parametrów opisujących nośność powierzchni [5]. W obecnie wykorzystywanych modelach kontaktu zastosowanie obliczeń Hertza jest uproszczeniem w zakresie odkształceń sprężystych i dlatego jest często stosowane w analizie kontaktu chropowatych powierzchni, rozpatrywanych z punktu widzenia pojedynczych mikronierówności [2, 6]. Opierając się na założeniach Hertza, Greenwood i Williamson (GW) rozpoczęli badania dotyczące kontaktu chropowatych powierzchni [7]. Model GW potwierdza prawidłowość założenia, że kontakt pomiędzy dwoma chropowatymi powierzchniami może być zastąpiony równoważnym kontaktem powierzchni sferycznej i płaskiej [8]. Do analizy kontaktu nierzadko są wybierane takie parametry, jak: siła pomiędzy kontaktującymi się powierzchniami, rzeczywista powierzchnia kontaktu czy zbliżenie powierzchni. W badaniach nad modelowaniem kontaktu powierzchni sferycznych jako jeden z parametrów kontaktu brano pod uwagę wartość krytycznego zbliżenia [9], opisującego dopuszczalne odkształcenie. W innych pracach, np. nad wyznaczeniem momentu zmiany stanu naprężenia w tzw. modelach sprężysto-plastycznych, kontakt dodatkowo charakteryzuje współczynnik plastyczności [7], który został dokładnie wyznaczony w pracy [10]. Inne badania kontaktu dotyczą zużycia warstwy materiału, formowania powierzchni w wyniku jej zużycia [11], jak również określenia stabilności kontaktu z tarciami [12].

Trwały rozwój modeli kontaktu jest powodowany rosnącymi możliwościami dokładnych obliczeń i coraz pełniejszym poznawaniem warunków pracy urządzeń. Z kolei zwiększenie zakresu analiz o nowe parametry kontaktu zwiększa złożoność obliczeń. Ponadto uwzględnienie chropowatości powierzchni w analizach kontaktu bardzo komplikuje obliczenia analityczne i powoduje poszukiwanie metod wspomagających obliczenia, np. MES. Jedną z pierwszych prac, które dostarczyły dokładnego wyniku dotyczącego elastyczno-plastycznego kontaktu półkuli i sztywnej płaskiej powierzchni przy użyciu MES było badanie Koguta i Etsiona [9]. Zastosowanie metody elementów skończonych do analizy kontaktu pomiędzy powierzchniami wykorzystano w wielu pracach [13-16]. W pracy [14]

przedstawiono modelowanie kontaktu przedmiotu i ustalacza (zderzaka) w procesie ustalania położenia.

Blachy głębokotłoczne w większości charakteryzują się zmienną strukturą geometryczną powierzchni w odniesieniu od kierunku walcowania. Ponadto chropowata powierzchnia wpływa na zmianę powierzchni kontaktu wraz ze zmieniającym się obciążeniem. Niniejsza praca dotyczy analizy wpływu odkształcenia blachy na sprężysto-plastyczny kontakt powierzchni sferycznej z powierzchnią płaską. W badaniach eksperymentalnych określono odkształcenia powierzchniowe struktury geometrycznej powierzchni dla różnych poziomów obciążenia. W celu dokładnego określenia mechanizmu odkształcenia wykonano symulacje numeryczne kontaktu powierzchni sferycznej z powierzchnią blachy metodą elementów skończonych (MES), z zastosowaniem modelu odzwierciedlającego rzeczywistą strukturę geometryczną powierzchni zastosowanej blachy.

2. Badania eksperymentalne

Badania eksperymentalne przeprowadzono dla blachy stalowej głębokotłocznej DC04. Właściwości mechaniczne blachy zastosowanej w badaniach określono na podstawie próby jednoosiowego rozciągania w trzech kierunkach w odniesieniu do kierunku walcowania (tab. 1.).

Tabela 1. Właściwości mechaniczne blachy stalowej DC04

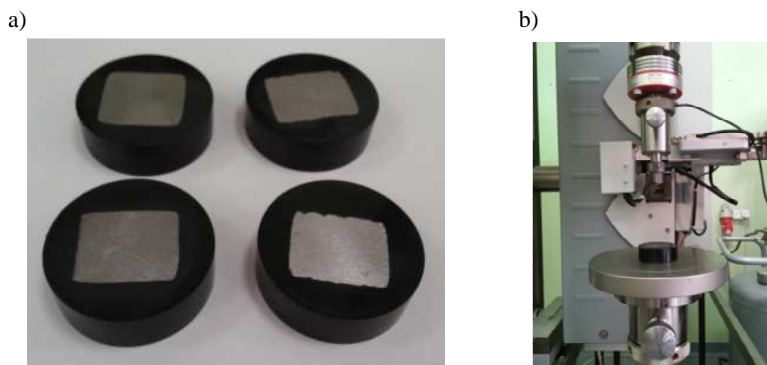
Table 1. Mechanical properties of DC04 steel sheet

Parametr	Orientacja próbki (względem kierunku walcowania)			
	0°	45°	90°	średnia
Granica plastyczności $R_{p0,2}$, MPa	182,1	196	190	189,9
Wytrzymałość na rozciąganie R_m , MPa	322,5	336,2	320,9	326,5
Wydłużenie A_{50} , %	45,8	41,6	45,6	44,3
Współczynnik umocnienia C , MPa	549,3	564,9	541,6	555,2
Wykładnik umocnienia n	0,214	0,205	0,209	0,208
Współczynnik Lankforda r	1,751	1,124	1,846	1,461

Właściwości tribologiczne zostały wyznaczone eksperymentalnie z użyciem tribotestera T01-M. W badaniach współczynnik tarcia wyznaczono w funkcji położenia kąta względem kierunku walcowania blach.

Badania eksperymentalne dotyczące kontaktu pomiędzy powierzchnią sferyczną i powierzchnią płaską zrealizowano w teście wciskania kulki o średnicy 6 mm. Badania przeprowadzono dla blachy z gatunku DC04 o grubości 2 mm, z której przygotowano próbki do badań, o wymiarach ok. 20 mm x 25 mm, i zainkludowano w tworzywie (rys. 1a). Testy zrealizowano na maszynie wytrzymałościowej Zwick Roell Z030 w trybie ściskania, w której zastosowano specjalne

oprzyrządowanie (rys. 1b). W trakcie realizacji prób rejestrowano siły wciskania w funkcji przemieszczenia w czasie rzeczywistym. Dla każdej próbki wykonano próbę wciskania kulki z maksymalnym obciążeniem, równym 60, 80, 100, 125, 150, 200, 250 oraz 300 N. Strukturę geometryczną blachy nieodkształconej oraz po teście wciskania kulki analizowano za pomocą mikroskopu optycznego Alicona Infinite Focus.



Rys. 1. Realizacja badań eksperymentalnych: a) próbki przeznaczone do badań, b) oprzyrządowanie pomiarowe na maszynie wytrzymałościowej

Fig. 1. Experimental investigation of indentation test: a) specimens, b) measurement equipment mounted in testing machine

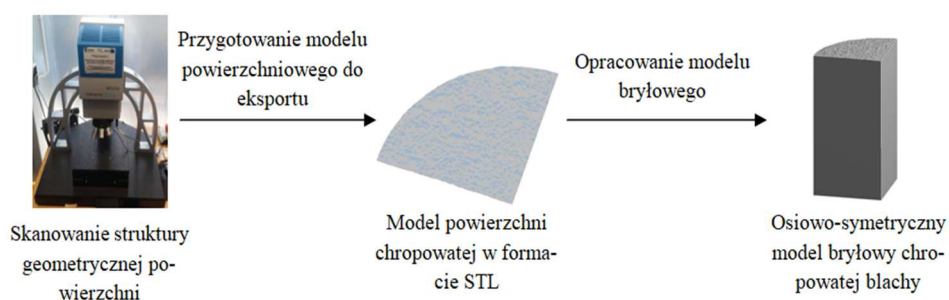
3. Modelowanie numeryczne

Symulacje numeryczne odkształceń podczas kontaktu powierzchni sferycznej z powierzchnią płaską przeprowadzono, wykorzystując model chropowatej powierzchni odzwierciedlającej rzeczywistą powierzchnię blachy zastosowanej w badaniach eksperymentalnych. Przygotowanie modelu CAD jako pliku wejściowego do analizy numerycznej przedstawiono schematycznie na rys. 2. W pierwszym etapie powierzchnia blachy została zeskanowana za pomocą mikroskopu optycznego Alicona Infinite Focus. Uzyskaną geometrię powierzchni poddano dalszej obróbce w dedykowanym do skanera oprogramowaniu IF Measurement Suite, w którym przygotowano obszar powierzchni odpowiedni do analizy osiowosymetrycznej (wycinek $\frac{1}{4}$ koła). Następnie wygenerowano triangulacyjny model powierzchni w formacie STL, który stanowił podstawę do modelowania bryłowego wycinka blachy o chropowatej powierzchni.

Przygotowanie modelu bryłowego do analiz numerycznych przeprowadzono w oprogramowaniu Autodesk Inventor Professional. Modelowanie, opierające się na wygenerowanym modelu powierzchniowym STL przysparza wielu problemów, dlatego model triangulacyjny zastąpiono powierzchnią opisaną za pomocą splejnow, wykorzystując narzędzie dopasowania powierzchni do siatki (ang. *Fit*

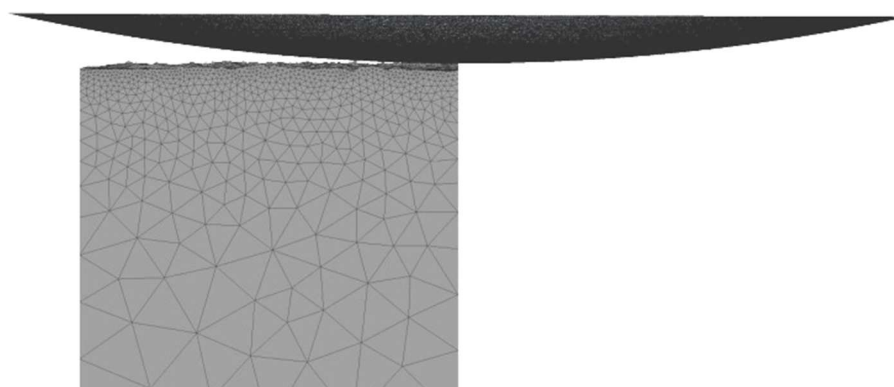
to *Mesh Face*). Tolerancja wygenerowanej powierzchni w stosunku do modelu wejściowego STL wynosiła $0,5 \mu\text{m}$. W kolejnym etapie zamodelowano bryłę w postaci ćwierci walca, a chropowatą strukturę geometryczną na powierzchni uzyskano przez jego przecięcie wcześniej wygenerowaną powierzchnią.

Analizy numeryczne wciskania powierzchni sferycznej w powierzchnię płaską wykonano za pomocą komercyjnego oprogramowania Ansys Workbench. Dla przygotowanego modelu chropowatej blachy przyjęto symetryczne warunki brzegowe. Dodatkowo zamodelowano pełną powierzchnię sferyczną o promieniu 3 mm jako sztywną (rys. 3.). Przyjęto sprężysto-plastyczny model materiałowy. Właściwości sprężyste materiału zdefiniowano przez moduł Younga ($E = 200 \text{ GPa}$) oraz współczynnik Poissona ($\nu = 0,3$). Krzywą odkształceń plastycznych zdefiniowano w próbie jednoosiowego rozciągania.



Rys. 2. Schemat przygotowania modelu bryłowego do analiz numerycznych

Fig. 2. Scheme of preparation the solid model for numerical analysis



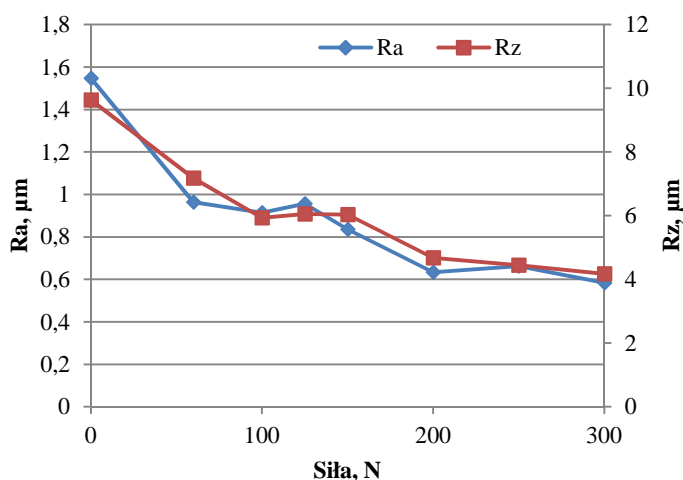
Rys. 3. Model MES zastosowany w analizie kontaktu powierzchni sferycznej z powierzchnią płaską

Fig. 3. FEM model used for contact analysis of sphere against deformable flat

Dyskretyzację modelu chropowatej powierzchni blachy wykonano przy użyciu elementów czworościennych 10-węzłowych w liczbie 227 820, natomiast dla powierzchni sferycznej zastosowano siatkę elementów skończonych zbudowaną z elementów trójkątnych (rys. 3.). W analizie przyjęto izotropowy model kontaktu Coulomba, gdzie założono współczynnik tarcia na poziomie $\mu = 0,1$.

4. Wyniki i ich analiza

Kontakt powierzchni kulki z powierzchnią blachy znacząco wpływa na zmianę parametrów chropowatości w obszarze odcisku (rys. 4.). Wartości parametrów chropowatości powierzchni Ra oraz Rz mierzonych na dnie odcisku maleją wraz ze wzrostem siły wciskania kulki (rys. 5.). Spadek wartości Ra i Rz świadczy o odkształcaniu wzniesień struktury geometrycznej powierzchni. Wciskanie kulki z siłą na poziomie 60 N pozostawia widoczny ślad na powierzchni badanej próbki (rys. 5a). Wzrost siły nacisku kulki na powierzchnię blachy powoduje jej odkształcenie (rys. 5b), przy czym dla sił wciskania do wartości 150 N wysokość wgniecenia nie przekracza wartości parametru chropowatości Rz wyznaczonego dla blachy nieodkształconej. Na tej podstawie można wnioskować, że odkształceniu uległy jedynie wzniesienia struktury powierzchni blachy.

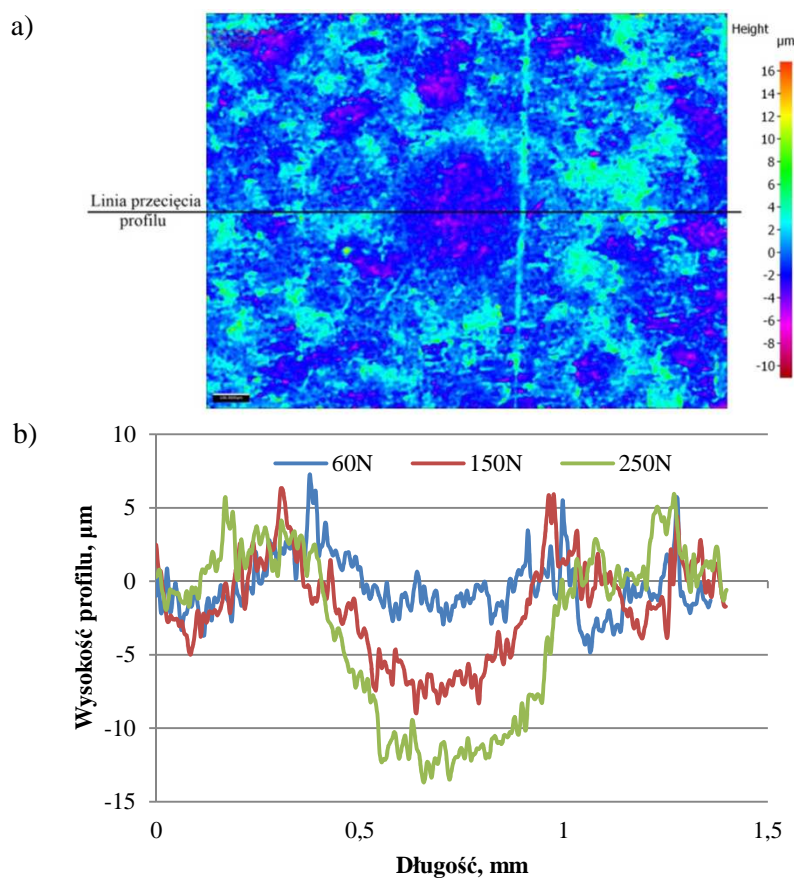


Rys. 4. Wpływ siły nacisku na wartość parametrów chropowatości Ra oraz Rz w obrębie wgniecenia

Fig. 4. The influence of normal load on Ra and Rz roughness parameters measured on indentation area

Pomimo znacznego zagłębienia kulki w przypadku sił nacisku 250 N oraz 300 N powierzchnia odcisku charakteryzuje się stosunkowo dużą chropowatością ($Ra = 0,59 \mu\text{m}$) w odniesieniu do polerowanej powierzchni wciskanej kulki

($R_a = 0,02$). Jest to spowodowane umocnieniem odkształceniowym wzniesień struktury powierzchni oraz zwiększeniem powierzchni kontaktu w trakcie ich odkształcenia, co może powodować odkształcenie blach w obszarach podpowierzchniowych.

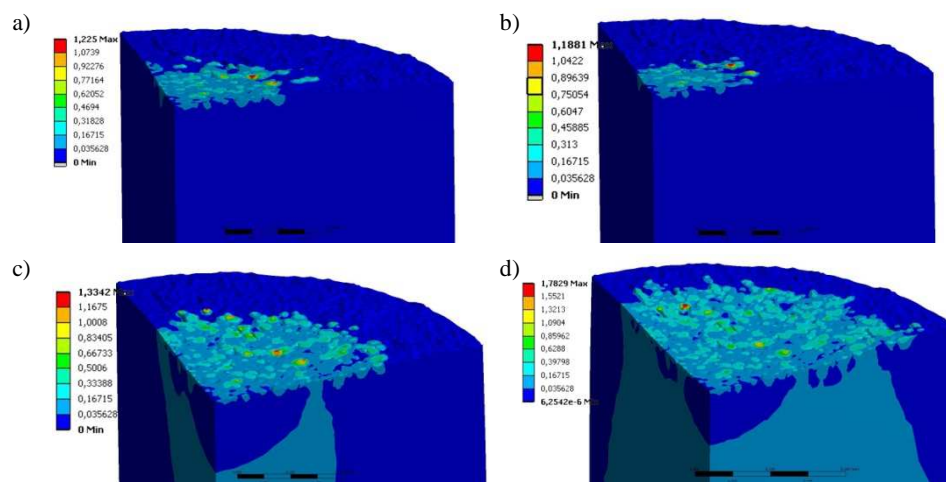


Rys. 5. Zdjęcie odcisku dla wgniecenia z siłą 60 N (a) oraz wpływ siły nacisku na głębokość wgniecenia (b)

Fig. 5. Optical micrograph of indentation for normal load 60 N and (a) and influence of normal load on indentation depth (b)

Symulacje numeryczne kontaktu powierzchni sferycznej z chropowatą powierzchnią blachy wykazały, że wraz ze wzrostem siły nacisku strefa odkształceń plastycznych rośnie (rys. 6.). Początkowo odkształceniom plastycznym ulegają jedynie wzniesienia struktury geometrycznej i warstwa wierzchnia blachy (rys. 6a, b). Umocnienie odkształceniowe w warstwie wierzchniej wraz ze zwiększaniem obciążenia skutkuje wystąpieniem odkształcenia blachy w obszarach

podpowierzchniowych (rys. 6c, d). Pomiędzy strefami odkształceń wierzchnich oraz podpowierzchniowych występują obszary nieulegające odkształceniom plastycznym. Niejednorodny rozkład naprężeń i odkształceń blachy jest uwarunkowany nieregularną strukturą na powierzchni blachy.



Rys. 6. Rozkład zredukowanych odkształceń plastycznych odkształczonej blachy: a) próba w trakcie obciążania siłą 60 N, b) próba w trakcie obciążania siłą 100 N, c) próba w trakcie obciążania siłą 150 N, d) próba po odciążeniu z odciskiem dla siły 250 N

Fig. 6. Distribution of equivalent plastic strain in sheet: a) indentation under load 60 N, b) indentation under load 100 N, c) indentation under load 150 N, d) indentation for unloaded surface after indentation with force 250 N

5. Podsumowanie

Wyglądanie wierzchołków nierówności struktury geometrycznej powierzchni obserwowane podczas kształtowania blach głębokotłocznych powoduje zwiększenie rzeczywistej powierzchni kontaktu blachy oraz narzędzia. Rzeczywiste pole powierzchni kontaktu narzędzia z przedmiotem obrabianym zależy od stopnia wstępnego odkształcenia próbki, obciążenia oraz mechanizmów towarzyszących wzajemnemu przemieszczaniu się powierzchni blachy po powierzchni narzędzia. Wyniki symulacji numerycznych uwzględniających rzeczywistą chropowatość powierzchni wskazują, że po osiągnięciu określonej wartości siły nacisku obciążenie jest przenoszone przez wierzchołki nierówności. Blacha stalowa głębokotłoczna poddawana odkształceniom plastycznym podlega zjawisku umocnienia odkształceniowego. Umocnienie odkształceniowe wierzchołków nierówności sprawia, że odkształcenie plastyczne, które początkowo występuje w wierzchołkach nierówności, propaguje do warstwy podpowierzchniowej blachy.

Podziękowanie: Badania przeprowadzono w ramach grantu n° IRSES-GA-2013-610547 finansowanego przez 7. Program Ramowy Unii Europejskiej 7PR / 2007-2013 (People Programme – Marie Curie Actions).

Literatura

- [1] Mazur T.: Badania grubości warstwy wierzchniej odkształconej plastycznie po nagniataniu umacniającym, praca doktorska, Politechnika Radomska, Radom 2003.
- [2] Abdo J., Farhang K.: Elastic-plastic contact model for rough surfaces based on plastic asperity concept, *Int. J. Non-Linear Mech.*, 40 (2005) 495-506.
- [3] Kogut L., Etsion I.: Elastic-plastic contact analysis of a sphere and a rigid flat, *J. Appl. Mech.*, 69 (2002) 657-662.
- [4] Karpenko Y.A., Akay A.: A numerical model of friction between rough surfaces, *Tribology Int.*, 34 (2001) 531-545.
- [5] Sellgren U., Björklund S., Andersson S.: A finite element-based model of normal contact between rough surfaces, *Wear*, 254 (2003) 1180-1188.
- [6] Zahouani H., Sidoroff F.: Rough surfaces and elasto-plastic contacts, *C.R. Acad. Sci. Paris*, 2 (2001) 709-715.
- [7] Greenwood J.A., Williamson J.B.P.: Contact of nominally flat surfaces, *Proc. R. Soc. London A*, 295 (1966) 300-319.
- [8] Greenwood J.A., Tripp J.H.: The contact of two nominally flat rough surfaces, *Proc. Inst. Mech. Eng.*, 185 (1971) 625-633.
- [9] Kogut L., Etsion I.: A finite element based elastic-plastic model for the contact of rough surfaces, *Tribol. Trans.*, 46 (2003) 383-390.
- [10] Kadin Y., Kligerman Y., Etsion I.: Unloading an elastic-plastic contact of rough surfaces, *J. Mech. Phys. Solids*, 54 (2006) 2652-2674.
- [11] Páczelt I., Mróz Z.: On optimal contact shapes generated by wear, *International J. Numerical Meth. Eng.*, 63 (2005) 1250-1287.
- [12] Mróz Z.: On the stability of friction contact, *J. Theor. Appl. Mech.*, 38 (2000) 315-329.
- [13] Kucharski S., Starzyński G.: Study of contact of rough surfaces: Modeling and experiment, *Wear*, 311 (2014) 167-179.
- [14] Maciołka P.: Wykorzystanie nośności powierzchni do uzyskania charakterystyki styku pomiędzy przedmiotem i ustalaczem położenia, *Inżynieria Maszyn*, 15 (2010) 53-66.
- [15] Peia L., Hyunb S., Molinaria J.F., Robbins M.: Finite element modeling of elasto-plastic contact between rough surfaces, *J. Mech. Phys. Solids*, 53 (2005) 2385-2409.
- [16] Poullos K., Klit P.: Implementation and applications of a finite-element model for the contact between rough surfaces, *Wear*, 303 (2013) 1-8.

THE INFLUENCE OF DEFORMATION OF STEEL SHEET ON THE CHANGE OF THE SURFACE TEXTURE IN CONTACT BETWEEN A SPHERE AND A FLAT SURFACE

S u m m a r y

This article presents an experimental and numerical analysis of the influence of deformation on the change of surface texture of the deep-drawing steel sheet under contact between a rigid spherical surface against the flat sheet surface. The change in the surface texture was analyzed for different load values. The results of numerical simulations of the contact of the sphere with the rough sheet surface shown that the zone of plastic deformation increases with an increase of the pressure force. Initially, only asperities of surface roughness were plastically deformed. Work hardening of material in the surface layer and increasing of the load result in the deformation of the sheet in the subsurface area.

Keywords: deep-drawing sheet, finite element method, surface roughness

DOI: 10.7862/rm.2018.04

Otrzymano/received: 05.12.2017 r.

Zaakceptowano/accepted: 20.12.2017 r.