

Dr inż. Aneta ŁUKASZEK-SOŁEK, dr hab. inż. Jan SIŃCZAK, prof. AGH,
mgr inż. Sylwia BEDNAREK

Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej, Kraków

Wpływ tarcia na rozkład odkształceń oraz trwałość narzędzi w procesie wyciskania przeciwbieżnego – modelowanie numeryczne

*Effect of friction on strain distribution and tool life during
backward extrusion process – numerical modelling*

Streszczenie

W artykule przedstawiono analizę procesu wyciskania przeciwbieżnego na gorąco odkuwki bazy zderzaka kolejowego. W analizie zwrócono uwagę na wybrane problemy technologiczne występujące podczas procesu wyciskania. Badano wpływ tarcia w zakresie odpowiadającym skrajnym warunkom występującym w praktyce przemysłowej przy odkształcaniu na gorąco stali niskowęglowej. Ocenę procesu przeprowadzono na podstawie map rozkładu intensywności odkształcenia, nacisków na powierzchni styku materiału z narzędziem oraz wskaźnika zużycia narzędzi.

Abstract

Backward extrusion process of a railway buffer base was analysed. The work was focused on selected technological problems occurring during the extrusion process. Effect of friction in range of extreme conditions met in industrial practice in hot deformation of low-alloyed steel. The process estimation was carried out based on maps of effective strain distribution, contact pressure and die wear factor in the contact surface metal – tool.

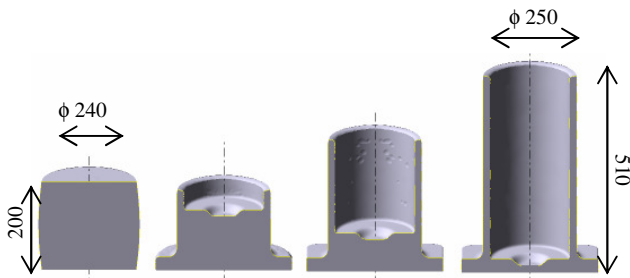
Słowa kluczowe: wyciskanie, modelowanie numeryczne, tarcie, intensywność odkształcenia, niejednorodność odkształcenia

Key words: *extrusion, numerical modelling, friction, effective strain, heterogeneity of strain*

1. WPROWADZENIE

Wiedza dotycząca żywotności narzędzi nabiera istotnego znaczenia, zwłaszcza wtedy, gdy jednocześnie rozpatruje się zagadnienia związane ze zwiększeniem efektywności procesu kucia [1]. Trwałość matryc kuźniczych ma znaczący wpływ na wielkość kosztów produkcji odkuwek oraz ich jakość. Szacuje się, że koszt oprzyrządowania stanowi około 11% jednostkowego kosztu wytwarzania. Dążenie do poprawy trwałości oprzyrządowania kuźniczego jest więc stałą tendencją w doskonaleniu technik jego wytwarzania, eksploatacji i regeneracji narzędzi, a także metod projektowania oraz poszukiwania nowych smarów, materiałów narzędziowych i stosowania nowoczesnej obróbki cieplnej narzędzi [2].

Zadaniem zderzaka pojazdów szynowych jest elastyczne przyjęcie siły powstałej podczas zderzenia wagonów lub zmiany ich prędkości jazdy oraz pochłonięcie i rozproszenie w formie ciepła części energii zderzenia [3]. Z tego względu, z uwagi na konieczność zapewnienia bezpieczeństwa użytkowania finalnego wyrobu, bufor oraz baza zderzaka muszą spełniać określone wymagania odnośnie własności mechanicznych i udarowych, jak również jakości powierzchni roboczych i określonych tolerancjach wymiarowych. W artykule, na podstawie obliczeń numerycznych, przedstawiono wyniki analizy tych parametrów procesu wyciskania na gorąco odkuwki bazy zderzaka (rys. 1), które w istotny sposób wpływają na żywotność narzędzi do wyciskania odkuwki.



Rys. 1. Etapy procesu wytwarzania odkuwki bazy zderzaka kolejowego

Fig. 1. Stages of extrusion of forging of buffer's basis

2. MODELOWANIE NUMERYCZNE PROCESU WYCISKANIA

Obliczenia numeryczne wykonano za pomocą programu komercyjnego QForm3D [4, 5, 6]. W kolejnych modyfikacjach procesu technologicznego zmieniano wartość czynnika tarcia, jako podstawowego parametru decydującego o zużyciu narzędzi. W modelowaniu numerycznym przyjęto warunki tarcia powierzchniowego wsad – matryca w kilku wariantach, podanych w tablicy 1.

Tablica 1. Zestawienie wariantów obliczeń numerycznych dla różnych warunków tarcia

Table 1. Juxtaposition of variants of numerical modelling of different friction conditions

Nr	Proces	Warunki smarowania – czynnik tarcia	
		Stempel	Matryca
1	Nominalne tarcie	0,4	0,4
2	Maksymalne tarcie	0,8	0,8
3	Minimalne tarcie	0,1	0,1

Pozostałe warunki brzegowe są następujące:

1. Temperatura nagrzewu materiału wyjściowego 1200°C (materiał stal S355J2G3).
2. Temperatura narzędzi 300°C (materiał 55NiCrMoV6).
3. Czas transportu z pieca 30 s.
4. Czas chłodzenia w narzędziach 5 s.
5. Współczynnik emisyjności 0,6.
6. Współczynnik przewodności cieplnej 3500 W/m²K.
7. Przewodność cieplna 45 W/mK.
8. Wymiary nominalne materiału wyjściowego: średnica 210 mm, wysokość 250 mm.

Aby oszacować powierzchniowe zużycie narzędzi posłużono się zależnością [6]:

$$W = \int_0^t \frac{a \cdot \tau \cdot V_x}{\bar{\sigma}} dt,$$

gdzie:

W – wskaźnik zużycia powierzchniowego narzędzi [μm] (wskaźnik tarcia powierzchniowego),

a – współczynnik wyznaczony doświadczalnie,

V_x – prędkość płynięcia na obwodzie deformowanego materiału,

$\bar{\sigma}$ – naprężenie uplastyczniające narzędzia,

t – czas kontaktu punktu powierzchni narzędzia z odkształcanym materiałem,

τ – naprężenie ścinające deformowanego materiału w punkcie styku z powierzchnią narzędzia, wyrażone zależnością:

$$\tau = m \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} (1 - e^{-1.25(\sigma_n/\sigma_s)}),$$

gdzie:

σ_s – naprężenie uplastyczniające odkształcanego materiału,

σ_n – naprężenie normalne w punkcie kontaktu,

m – czynnik tarcia.

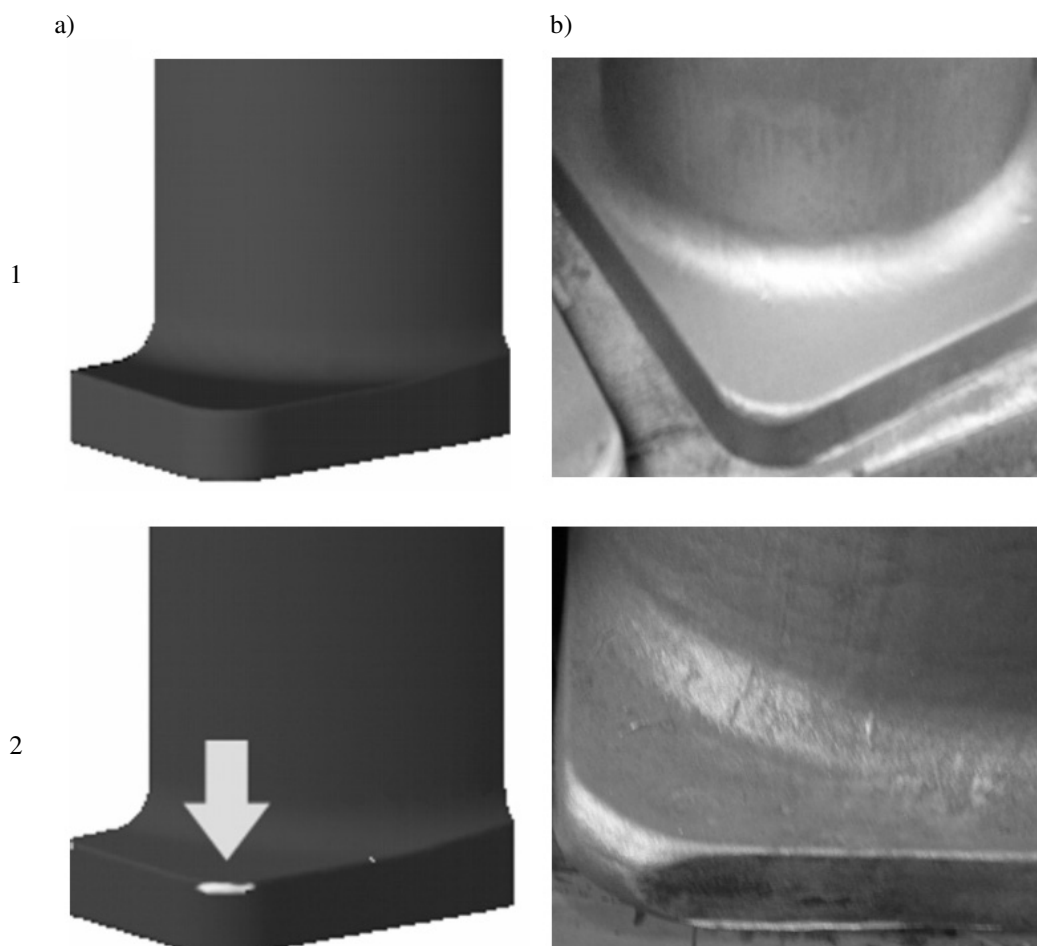
Wielkość powierzchniowego zużycia narzędzi, opisana powyższym wzorem, wynika z zależności, że moc sił tarcia podczas odkształcenia plastycznego materiału wyjściowego jest równa mocy odkształcenia plastycznego warstwy adhezji (przywierania), która powstaje w procesie odkształcania. Wskaźnik zużycia narzędzi może posłużyć jako kryterium do oceny trwałości narzędzi.

3. ANALIZA WYNIKÓW OBLICZEŃ NUMERYCZNYCH

Obliczenia numeryczne posłużyły do wyznaczenia rozkładu intensywności odkształcenia w objętości odkuwki podczas odkształcania. Na rysunku 2, dla przyjętych do analizy wariantów, przedstawiono powierzchnię materiału w miejscach styku z narzędziem, w końcowym etapie procesu wyciskania bazy zderzaka kolejowego. W przypadku zastosowania czynnika tarcia 0,1 nie uzyskano wypełnienia naroży (rys. 2 poz. 2a). Materiał wyj-

ściowy w wyniku małego tarcia przemieszczał się wzdłuż osi głównej stempla. Spowodowało to niewypełnienie przy podstawie bazy zderzaka kolejowego. Poprawne wypełnienie wykroju w tym obszarze uzyskano dla czynnika tarcia wynoszącego 0,4 (rys. 2, poz. 1a). Wzrost tarcia na powierzchni bocznej wykroju zwiększa gwarancję wypełnienia podstawy bazy zderzaka kolejowego jednak przy jednoczesnym obniżeniu trwałości wykroju. Próby wykonane w kuźni dla przyjętych do analizy wartości czynnika tarcia potwierdziły poprawność przeprowadzonych obliczeń numerycznych. W przypadku zastosowania smaru o czynniku tarcia ok. 0,1 w praktyce przemysłowej uzyskano odkuwkę z niewypełnionymi narożami (rys. 2, poz. 2b).

Rozkład odkształceń przedstawiony na rysunku 3 jest typowy dla procesu wyciskania przeciwbieżnego. Występuje duże zróżnicowanie wartości intensywności odkształcenia w całej objętości odkształcanego materiału. Lokalizacja wysokich wartości intensywności odkształcenia jest efektem przemieszczania materiału do wgłębień lub zmiany przekroju poprzecznego odkuwki. Gradient odkształcenia określony rozkładem intensywności odkształcenia (rys. 3) zmienia się od 0,05 do 8. W obszarze cylindrycznej części odkuwek odkształcenie jest niejednorodne. Dla największego przyjętego czynnika tarcia $m = 0,8$ maksimum intensywności odkształcenia znajduje się w obszarze przejścia podstawy zderzaka kolejowego w cylinder.

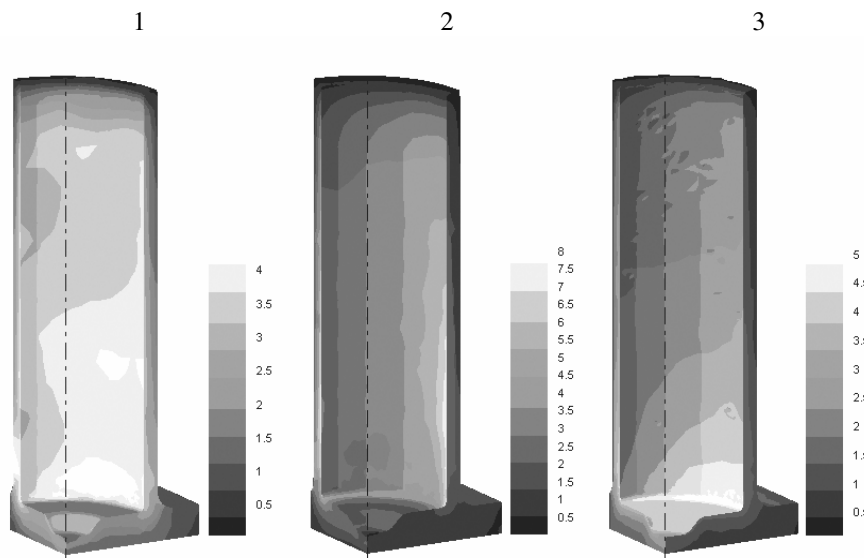


Rys. 2. Wypełnienie wykroju w procesie kształtowania bazy zderzaka kolejowego przy czynniku tarcia:

1 – 0,4, 2 – 0,1, a) modelowanie numeryczne, b) odkuwka rzeczywista

Fig. 2. Filling of impression in forging process of basis for friction factor:

1 – 0,4, 2 – 0,1, a) numerical modelling, b) forging



Rys. 3. Rozkład intensywności odkształcenia w materiale w procesie kształtowania bazy zderzaka kolejowego przy czynniku tarcia: 1 – $m = 0,4$, 2 – $m = 0,8$, 3 – $m = 0,1$

Fig.3. Distribution of effective strain in forging process of basis for friction factor: 1 – $m = 0,4$, 2 – $m = 0,8$, 3 – $m = 0,1$

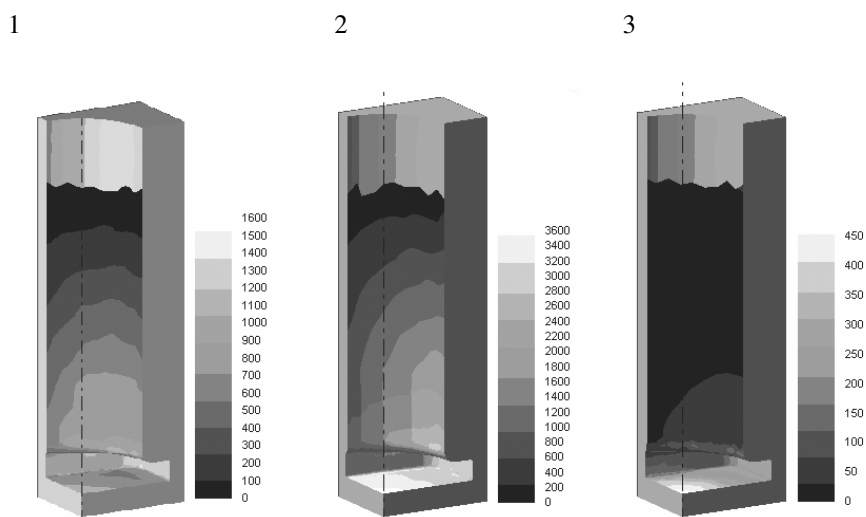
Największa równomierność odkształceń, przy jednocześnie najmniejszej bezwzględnej wartości intensywności odkształcenia występuje przy minimalnym czynniku tarcia $m = 0,1$. W rzeczywistych warunkach procesu wyciskania czynniki tarcia wynoszą $m = 0,4$.

Ruch odkształcanego metalu po narzędziu jest determinowany oporami tarcia i zmienia się począwszy od całkowitego poślizgu do przywierania (ruch materiału jest zahamowany). Materiał w pobliżu naroży podstawy zderzaka kolejowego oraz końca części cylindrycznej zderzaka i kontaktu z narzędziem ulega mniejszym odkształceniom, niż w części środkowej, gdzie płynie intensywnie. Z uwagi na to, że w warstwie wierzchniej występuje największy gradient odkształceń, właściwości tej warstwy wyrobu różnią się w sposób zasadniczy od pozostałej części odkuwki. W warstwach leżących w strefie kontaktu ze ściankami matrycy występuje wyraźne hamowanie płynięcia. Im większy czynniki tarcia tym większe oddziaływanie ścian matrycy na odkształcanie materiału (najintensywniejsze płynięcie obserwuje się w części środkowej).

4. ZUŻYCIE NARZĘDZI

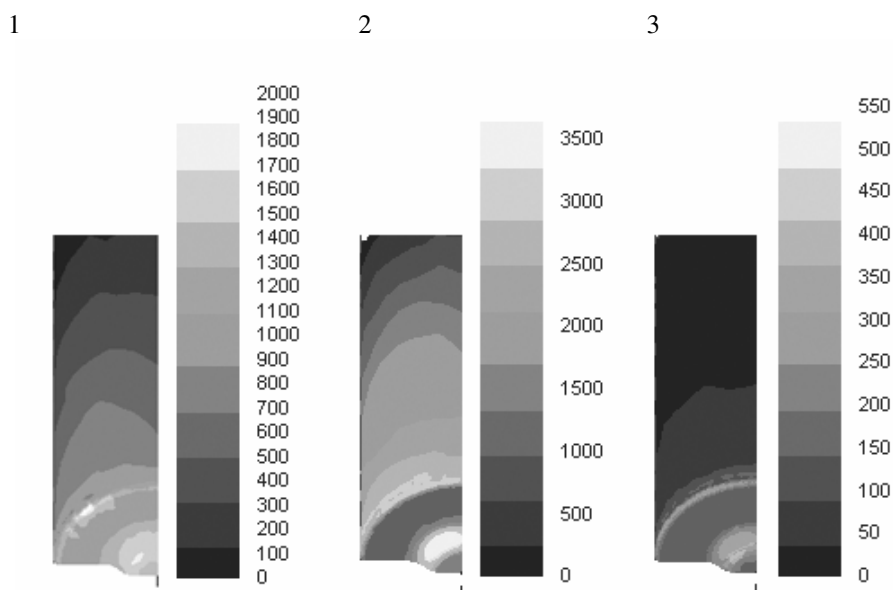
Proces wyciskania analizowanej odkuwki zderzaka kolejowego polega na intensywnym przemieszczaniu metalu przez wyciskanie przeciwbieżne przy wysokiej wartości nacisku jednostkowego (rys. 4 i rys. 5). Tarcie na powierzchni narzędzi jest naturalną przyczyną zużycia. Warstwa smaru przy wysokich naciskach jednostkowych ulega przerwaniu, odsłaniając powierzchnię wsadu pokrytą twardymi cząstkami, które zwiększają zużycie narzędzi. Większa gładkość powierzchni wykroju matrycy może spowodować obniżenie jakości przywierania warstwy smaru, który наносzony jest na powierzchnię ścianek matrycy.

Na rysunku 6 przedstawiono lokalizację strefy najintensywniejszego zużycia narzędzi, wyrażonej za pomocą wskaźnika zużycia, który uwzględnia odpuszczające działanie ciepła przy przemieszczeniu materiału na powierzchni narzędzi oraz lokalnie występującą wartość nacisku. Wyznaczony numerycznie wskaźnik zużycia narzędzi jest skalowany na podstawie statystycznych danych zużycia narzędzi w praktyce przemysłowej. Jak widać na rysunku 6, największe wartości wskaźnika zużycia stwierdzono na krawędzi między czołem a powierzchnią boczną stempla.



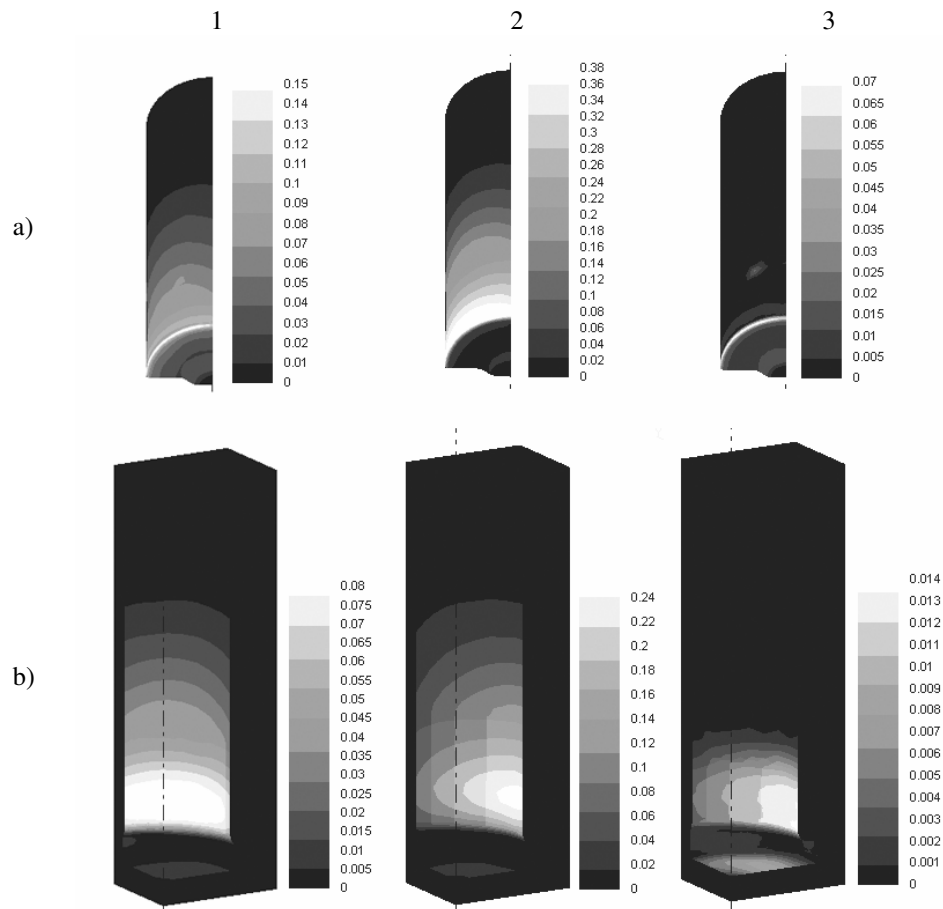
Rys. 4. Rozkład nacisków na powierzchni matrycy dolnej do wyciskania bazy zderzaka przy czynniku tarcia:
 1 – $m = 0,4$, 2 – $m = 0,8$, 3 – $m = 0,1$

Fig. 4. Distribution of contact pressure on the surface of bottom tool in forging process of basis for friction factor:
 1 – $m = 0,4$, 2 – $m = 0,8$, 3 – $m = 0,1$



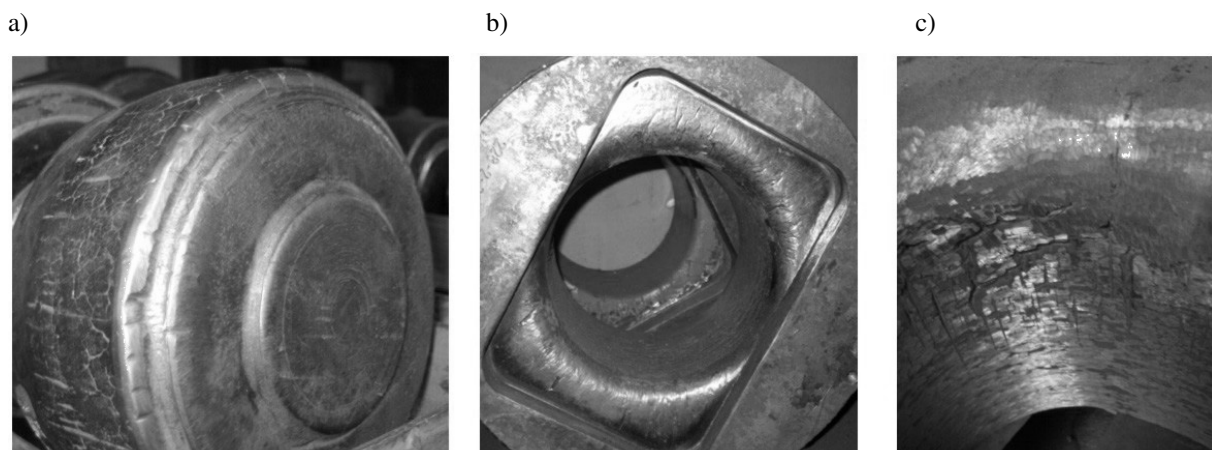
Rys. 5. Rozkład nacisków na powierzchni stempla do wyciskania bazy zderzaka przy czynniku tarcia:
 1 – $m = 0,4$, 2 – $m = 0,8$, 3 – $m = 0,1$

Fig. 5. Distribution of contact pressure on the surface of top tool in forging process of basis for friction factor:
 1 – $m = 0,4$, 2 – $m = 0,8$, 3 – $m = 0,1$



Rys. 6. Wskaźnik zużycia narzędzi – W (μm) w procesie wyciskania bazy zderzaka kolejowego przy czynniku tarcia: 1 – $m = 0,4$, 2 – $m = 0,8$, 3 – $m = 0,1$, a) stempel, b) matryca

Fig.6. Die wear factor – W (μm) in forging process of basis for friction factor: 1 – $m = 0,4$, 2 – $m = 0,8$, 3 – $m = 0,1$, a) top tool, b) bottom tool



Rys. 7. Zużycie narzędzi przemysłowych do wyciskania odkuwki bazy zderzaka kolejowego: a) stempel, b) i c) matryca

Fig. 7. Tool wear of buffer's basis: a) top tool, b), c) bottom tool

Intensywniejsze zużycie stempla w tym obszarze w konsekwencji powoduje niedotrzymanie ustalonych wymiarów i pogorszenie jakości powierzchni odkuwki zderzaka. Dla wariantu 2 wartości wskaźnika zużycia narzędzi są najwyższe, co spowodowane jest przyjęciem wysokiej wartości czynnika tarcia ($m = 0,8$). Dla pozostałych wariantów przyjętych mniejszych wartości czynnika tarcia, wskaźniki zużycia narzędzi są niższe, a obszary ich występowania są zlokalizowane przy krawędzi stempla.

Wskaźnik zużycia ściernego stempla i matrycy w obszarach krytycznych (dla $m = 0,4$) dla bazy zderzaka kolejowego wynosi odpowiednio:

- stempel $W = 0,15 \mu\text{m}$ (przejście płaszczyny bocznej w czołową tłoczną) (rys. 6 poz. 1a),
- matryca $W = 0,08 \mu\text{m}$ (przejście płaszczyny bocznej tulei w sferyczną zderzeniową) (rys. 6 poz. 1b).

Przeprowadzone obliczenia zużycia narzędzi są zgodne z obserwacjami uzyskanymi z praktyki przemysłowej. Rysunek 7 przedstawia zużyte i pęknięte powierzchnie robocze narzędzi (matrycy i stempla). Wycofanie z eksploatacji narzędzi było spowodowane zużyciem ściernym narzędzi i siatką pęknięć termicznych, pogłębiających się w kolejnych cyklach procesu wyciskania odkuwki bazy zderzaka. Wyznaczone numerycznie, jak i występujące w praktyce przemysłowej, obszary najintensywniejszego zużycia związane są ze zmianą kierunku płynięcia przy jednoczesnym wysokim gradiencie intensywności odkształcenia.

Celem ustalenia wartości prognozowanej trwałości narzędzi dla odkuwki bazy zderzaka kolejowego opracowano uogólniony wzór empiryczny. Wzór ten można przyjąć dla procesu wyciskania na gorąco przy odpowiednim ustaleniu (doborze) jego składników i parametrów. Rozważania oparte zostały na analizie zużycia ściernego powierzchni narzędzi (w krytycznych obszarach powierzchni roboczej stempla i wykroju matrycy odkuwki bazy zderzaka kolejowego), a także pęknięć termicznych, wykruszeń cząstek materiałów oraz nierówności powierzchni roboczych, które pozwoliły z jednej strony porównać obliczone zużycie i trwałość z wynikami obliczeń przy modelo-

waniu numerycznym, a z drugiej opracować wzór empiryczny dla tych zależności. W tworzeniu wzoru empirycznego oparto się na twierdzeniu Archard'a [7], opisującym wielkość zużycia ściernego (ubytku materiału – V). Twierdzenie mówi, że wielkość zużycia narzędzi V (wyrażona w mm^3), jest wprost proporcjonalna do wartości siły nominalnej F (wyrażonej w Niutonach) i drogi tarcia s (wyrażonej w metrach), a odwrotnie proporcjonalna do twardości materiału H (w N/cm^2).

Wzór ma postać: $V = K \frac{F \cdot s}{H}$, przy czym K jest bezwymiarowym współczynnikiem zużycia ściernego.

Trwałość narzędzi wyrażona liczbą odkuwek w jednym cyklu do regeneracji wyraża się następującą zależnością [8]:

$$T_n = K_m \frac{F \cdot s \cdot \rho \cdot \Delta t_m \cdot T_k}{HB \cdot m \cdot t_k \cdot T_{ch}}, \quad \text{szt.},$$

gdzie:

- K_m – współczynnik proporcjonalności charakteryzujący odmianę procesu kształtowania plastycznego dla określonej siły lub energii maszyny kuźniczej, ustalony doświadczalnie w warunkach przemysłowych; dla procesu wyciskania na prasie przyjmuje wartość 10^4 ,
- F – maksymalna siła nacisku stempla, N,
- s – droga przemieszczania (tarcia) stempla, cm,
- ρ – masa właściwa, g/cm^3 ,
- HB – twardość narzędzi wg Brinell'a, N/cm^2 ,
- m – masa odkuwki, g,
- Δt_m – gradient temperatury w materiale odkuwki, $^{\circ}\text{C}$,
- t_k – temperatura wyciskania, $^{\circ}\text{C}$
- T_k – czas wyciskania, s,
- T_{ch} – czas chłodzenia przedkuwki w wykroju, s.

Dla analizowanej odkuwki bazy zderzaka kolejowego wyliczona powyższym wzorem trwałość narzędzi wynosi

$$T_n = 10^4 \frac{50 \cdot 10^6 \cdot 21,6 \cdot 7,85 \cdot 700 \cdot 5}{490,2 \cdot 10^3 \cdot 56,8 \cdot 10^3 \cdot 1200 \cdot 6} = 1480 \text{ szt.},$$

gdzie:

$$K_m - 10^4,$$

$$F - 50 \text{ MN} = 50 \cdot 10^6 \text{ N},$$

$$s - 216 \text{ mm} = 21,6 \text{ cm},$$

$$\rho - 7,85 \text{ g/cm}^3,$$

$$HB - 490,2 \cdot 10^3 \text{ N/cm}^2,$$

$$m - 56,8 \text{ kg} = 56,8 \cdot 10^3 \text{ g},$$

$$T_k - 5 \text{ s},$$

$$T_{ch} - 6 \text{ s},$$

$$\Delta t_m - 700^\circ\text{C},$$

$$t_k - 1200^\circ\text{C}.$$

5. PODSUMOWANIE

Matryca i stempel do wytwarzania odkuwek bazy zderzaka kolejowego podlegają intensywnemu zużyciu z uwagi na charakter płynięcia metalu, w którym podstawowym procesem jest wyciskanie przeciwbieżne. Badania trwałości narzędzi w procesie wyciskania oparto o teoretyczne wyznaczenie obszarów powierzchni wykroju szczególnie narażonych na intensywne zużycie, posługując się obliczeniami numerycznymi, w których zmiennym parametrem był wskaźnik tarcia powierzchniowego (wskaźnik zużycia narzędzi – W).

Do oszacowania wartości powierzchniowego zużycia narzędzi – W wykorzystano teoretyczną zależność, w której uwzględniono czynnik tarcia – m wyznaczony doświadczalnie. Do oceny poprawności tak wyznaczonego wskaźnika zużycia narzędzi – W , wykonano obliczenia numeryczne w zakresie płynięcia metalu i finalnego kształtu odkuwki.

Analiza trwałości narzędzi do wyciskania odkuwki bazy zderzaka kolejowego, z uwzględnieniem zużycia powierzchniowego narzędzi, przeprowadzona na podstawie obliczeń numerycznych, jest zgodna z danymi rzeczywistymi. Potwierdza to przydatność obliczeń metodą elementów skończonych do wyznaczania jednego z głównych składników kosztów wytwarzania wyrobów kutech, jakim jest koszt narzędzi.

Ocena wskaźnika zużycia narzędzi – W , połączona z wielkością zużycia ściernego – V , stanowi podstawę dla oszacowania ilości od-

kuwek możliwych do wykonania w okresie do kolejnej regeneracji.

Praca finansowana przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego, nr umowy 3T08B 010 30

LITERATURA

- [1] Kang J.H., Park I.W., et al., A study on a die wear model considering thermal softening: (I) application of the suggested wear model, *J. Mater. Process. Technol.* 94 (1999) 183–188
- [2] Ziółkiewicz S., Szyndler R.: Obciążenie cieplne narzędzi kuźniczych do pracy na gorąco, Jubileuszowa XV Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna: Konstrukcja i Technologia Wytwórczek i Wyprasek, Poznań-Wąsowo, 17-19.06.2002, INOP, Poznań, s. 51-52
- [3] Podemski J., Marczewski R.: Urządzenia ciąglowe i zderzakowe, WKiŁ, Warszawa 1979
- [4] Biba N., Stebunov S., Lishny A., Vlasov A.: New approach to 3D finite-element simulation of material flow and its application to bulk metal forming, 7th International Conference on Technology of Plasticity, 27 Oktober – 1 November, 2002, Yokohama, pp.829-834
- [5] Biba N., Stebunov S., Masterkov V.: Gesenk- und Freiformschmiedesimulation mit QForm3D, MEFORM 2005 Neue Entwicklungen beim Gesenk- und Freiformschmieden, MEFORM 2005, 30 Marth-1 April, 2005, Freiberg, Germany, pp.79-88
- [6] Biba N., Stebunov S., Muntinga H.: Increasing of tool life in cold forging by means of FEM simulation, www.qform3d.com
- [7] Archard J.F.: Contact and rubbing of flat surfaces, *Journal Applied Physics*, 1953, 24, pp. 981-988
- [8] Lim S.C., Ashby M.F.: Wear mechanism maps, *Acta Metalurgica*, 1987, 35(1), pp. 1-24