

**Sylwia BEDNAREK<sup>\*</sup>, Janusz KRAWCZYK<sup>\*</sup>, Piotr BAŁA<sup>\*</sup>,  
Aneta ŁUKASZEK-SOLEK<sup>\*</sup>, Tomasz ŚLEBODA<sup>\*</sup>,  
Marek WOJTASZEK<sup>\*</sup>, Paweł CHYŁA<sup>\*</sup>**

**ANALIZA ODDZIAŁYWANIA MATERIAŁU  
WSADOWEGO NA MECHANIZM ZUŻYCIA  
WKŁADEK MATRYCOWYCH FORMUJĄCYCH  
W PROCESIE KSZTAŁTOWANIA ELEMENTÓW  
ZDERZAKA KOLEJOWEGO**

**THE ANALYSIS OF THE EFFECT OF BILLET MATERIAL  
ON THE MECHANISM OF WEAR IN FORMING DIE  
INSERTS IN THE PROCESS OF RAILWAY  
BUMPER FORMATION**

**Słowa kluczowe:**

zużycie, tribologia, modelowanie numeryczne, wyciskanie przeciwbieżne, stal narzędziowa

**Key words:**

wear, tribology, numerical modeling, backward extrusion, tool steel

---

<sup>\*</sup> AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej, al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, tel. (12) 617-26-19, fax (12) 617-31-90, e-mail: jkrawcz@agh.edu.pl.

## Streszczenie

W pracy omówiono mechanizm zużycia wkładki matrycowej formującej używanej do wyciskania bazy zderzaka kolejowego. Wkładka ta została wykonana ze stali X40CrMoV5-1. Sporządzono charakterystykę materiału, z którego została wykonana badana wkładka matrycowa formująca. Określono rolę mikrostruktury oraz rozszerzalności cieplnej na mechanizm zużycia badanej wkładki. Wyniki badań metaloznawczych mechanizmów zużycia oraz zmian w mikrostrukturze warstwy wierzchniej odniesiono do symulacji opartych na obliczeniach numerycznych współczynnika zużycia. Wyniki badań wskazują na istotną rolę w zużyciu wkładki matrycowej formującej mechanizmów takich jak: tworzenie się białej warstwy, zmęczenie cieplne, utlenianie.

## WPROWADZENIE

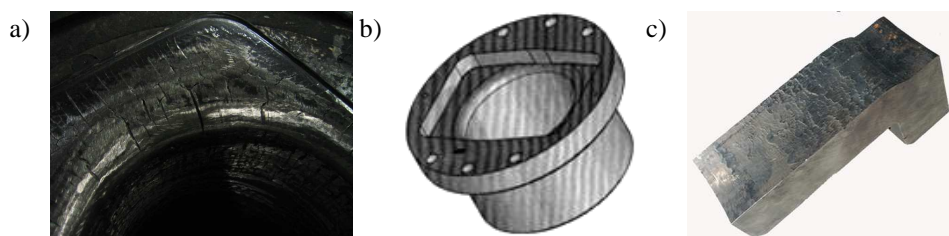
Koszt oprzyrządowania stanowi 11% jednostkowego kosztu wytwarzania w procesie kuźniczym, co powoduje, że trwałość narzędzi kuźniczych ma znaczący wpływ na wielkość kosztów produkcji odkuwek oraz na ich jakość [L. 1]. Modyfikacja warunków kucia oraz modyfikacja materiału, z którego wykonano narzędzie, może znacząco obniżyć ww. koszty. Dlatego prowadzi się badania nad optymalizacją procesu kucia przez symulacje numeryczne [L. 1–4]. Natomiast modyfikację materiału narzędzia poprzedzają badania mechanizmów jego zużycia w stosowanych warunkach jego pracy [L. 5–7]. Dopiero połączenie tych dwóch zagadnień badawczych stwarza możliwość określenia warunków technologicznych i materiałowych pozwalających na znaczące ograniczenie ww. kosztów. Takie kompleksowe podejście do zagadnienia zużycia narzędzi stosowanych przy produkcji elementów zderzaka kolejowego stało się celem niniejszej pracy, także dlatego, że ma istotne znaczenie naukowe ze względu na szczególnie trudne warunki pracy analizowanego narzędzia.

## MATERIAŁ DO BADAŃ

Materiał do badań pobrano ze zużytej wkładki matrycowej formującej (Rys. 1), kształtującej bazę zderzaka kolejowego [L. 1]. Sposób pobrania próbki do badań oraz powierzchnię po zużyciu tribologicznym obserwowaną na ww. próbce przedstawiono na Rys. 2. Odkuwki ze stali S355JR produkowano ze spęczonej wstępnie odkuwki w 1 operacji wyciskania.

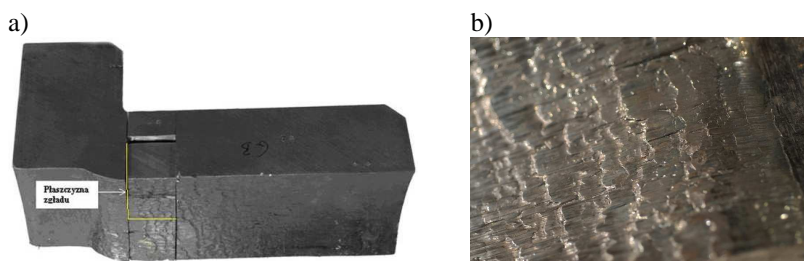
Czas chłodzenia narzędzia wynosił 5 s, a temperatura wsadu ok. 1250°C. Matryca była nagrzewana wstępnie do 350–450°C. Podczas wyciskania stosowano smar na bazie grafitu.

Wkładka formująca została wykonana ze stali X40CrMoV5-1 o składzie chemicznym zamieszczonym w **Tabeli 1**. Mikrostrukturę materiału rodzimego przedstawiono na **Rys. 3**. Obok obszarów o jednorodnym ziarnie z równomiernym rozkładem dyspersyjnych węglików stopowych drugorzędowych, występują obszary, gdzie obserwowana jest wyraźna segregacja pierwiastków stopowych i związanych z nią wydzielen węglików drugorzędowych. Obszary, w których występowała wspomniana segregacja, są prawdopodobnie miejscami, w których pozostała struktura pierwotna materiału, a miejsca wydzielenia węglików drugorzędowych odpowiadają granicom pierwotnego ziarna austenitu. Twardość wkładki matrycowej formującej wynosiła 406 HV30 (tj. 41,6 HRC).



**Rys. 1. Miejsce i sposób pobrania materiału do badań: a) zużyty element matrycy, b) sposób pobrania materiału do badań, c) materiał pobrany do badań**

Fig. 1. The material for investigations: a) used part of the die, b) the method of taking the material for the investigations, c) the material taken for investigations

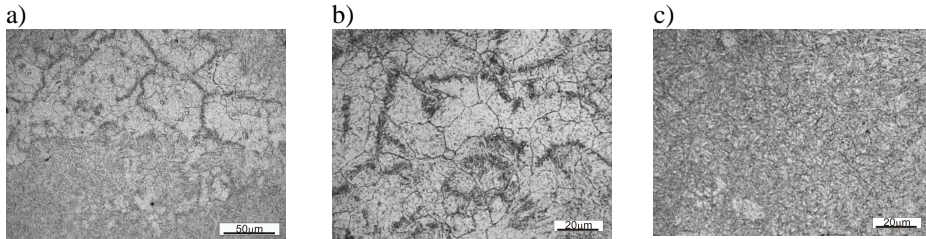


**Rys. 2. Miejsce i sposób pobrania materiału do badań: a) sposób pobrania próbek do badań metalograficznych, b) zużyta powierzchnia wkładki matrycowej formującej**

Fig. 2. The material for investigations: a) the method of taking the material for metallographic investigations, b) used surface of the die insert

**Tabela 1. Skład chemiczny (% masowy) stali, z której wykonano wkładkę matrycową**  
 Table 1. Chemical composition (weight %) of steel of which the die insert was made

C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Cu	W	V
0,43	0,36	0,93	4,90	0,21	1,25	0,10	0,15	0,83



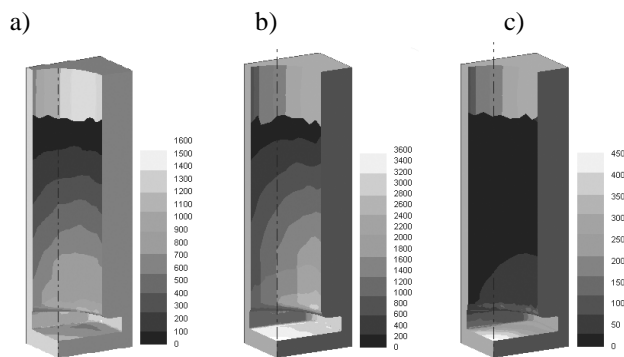
**Rys. 3. Różnice w mikrostrukturze badanej wkładki matrycowej formującej.**  
**Traw. 2% nital**

Fig. 3. The differences in the microstructure of the investigated die insert. Etched with 2% nital

## WYNIKI SYMULACJI NUMERYCZNYCH ZUŻYCIA NARZĘDZI

Obliczenia numeryczne wykonano programem komercyjnym QForm3D. Model tarcia w programie opisany jest prawem Levanova [L. 1]. Oszacowanie wartości powierzchniowego zużycia  $W$  wkładki matrycowej formującej dokonano w oparciu o obliczenia [L. 8] przy założeniu, że moc siły tarcia podczas odkształcenia plastycznego wsadu jest równa mocy odkształcenia plastycznego warstwy adhezji, która jest usuwana w procesie odkształcania. Obliczenia wykonano dla trzech założonych czynników tarcia: 0,4 (najbliższy warunkom przemysłowym, emulsja grafitowa), 0,8 (bez smaru) i 0,1 (smar na bazie szkła).

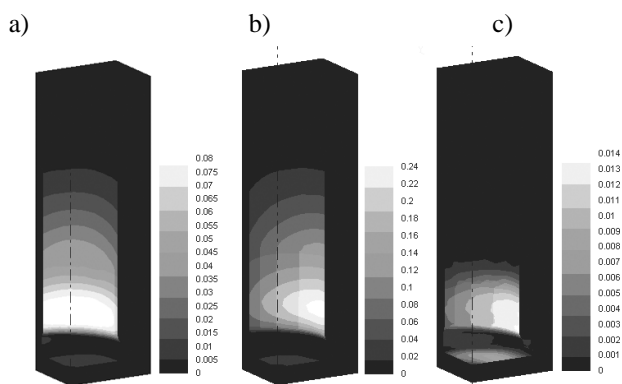
Proces wyciskania odkuwki zderzaka kolejowego polega na intensywnym przemieszczaniu metalu przez wyciskanie przeciwbieżne przy wysokiej wartości nacisku jednostkowego (Rys. 4). Tarcie na powierzchni narzędzi jest naturalną przyczyną zużycia. Warstwa smaru przy wysokich naciskach jednostkowych ulega przerwaniu, 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.



**Rys. 4. Rozkład nacisków na powierzchni matrycy dolnej do wyciskania bazy zderzaka przy czynniku tarcia: a)  $m = 0,4$ , b)  $m = 0,8$ , c)  $m = 0,1$**

Fig. 4. Distribution of contact pressure on the surface of lower tool used in railway bumper extrusion for friction factor: a)  $m = 0.4$ , b)  $m = 0.8$ , c)  $m = 0.1$

Na **Rys. 5** 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 w oparciu o statystyczne dane zużycia narzędzi otrzymane w praktyce przemysłowej. Największe wartości wskaźnika zużycia stwierdzono na przejściu płaszczyzny bocznej – tulei – w sferyczną zderzeniową. Intensywniejsze zużycie narzędzi w tym obszarze w konsekwencji powoduje niedotrzymanie ustalonych wymiarów i jakości powierzchni odkuwki zderzaka.

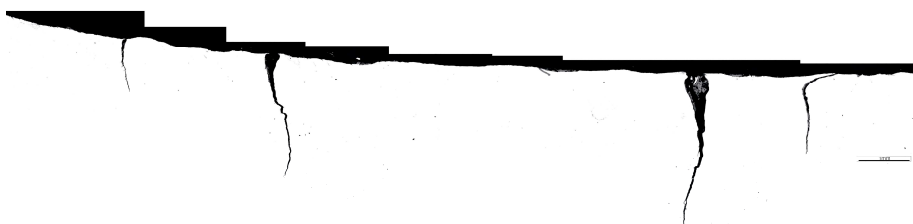


**Rys. 5. Wskaźnik zużycia narzędzi ( $\mu\text{m}$ ) w procesie kucia bazy zderzaka kolejowego przy czynniku tarcia: a)  $m = 0,4$ , b)  $m = 0,8$ , c)  $m = 0,1$**

Fig. 5. Die wear factor ( $\mu\text{m}$ ) in railway bumper forming process for friction factor: a)  $m = 0.4$ , b)  $m = 0.8$ , c)  $m = 0.1$

## WYNIKI BADAŃ METALOGRAFICZNYCH

Można zaobserwować głębokie pęknięcia zmęczeniowo-ciepłne w powierzchni wkładki matrycowej formującej (**Rys. 6**). Niektóre z pęknięć rozwijają się na początkowym etapie pod niewielkim kątem do powierzchni roboczej, a dopiero w dalszej części, w głąb materiału w kierunku prostopadłym do powierzchni roboczej. Taki rozwój pęknięcia wykazuje korelację z mikrostrukturą warstwy przypowierzchniowej, zwłaszcza obszarami, które wykazują cechy charakterystyczne dla tzw. białej warstwy [**L. 9**].

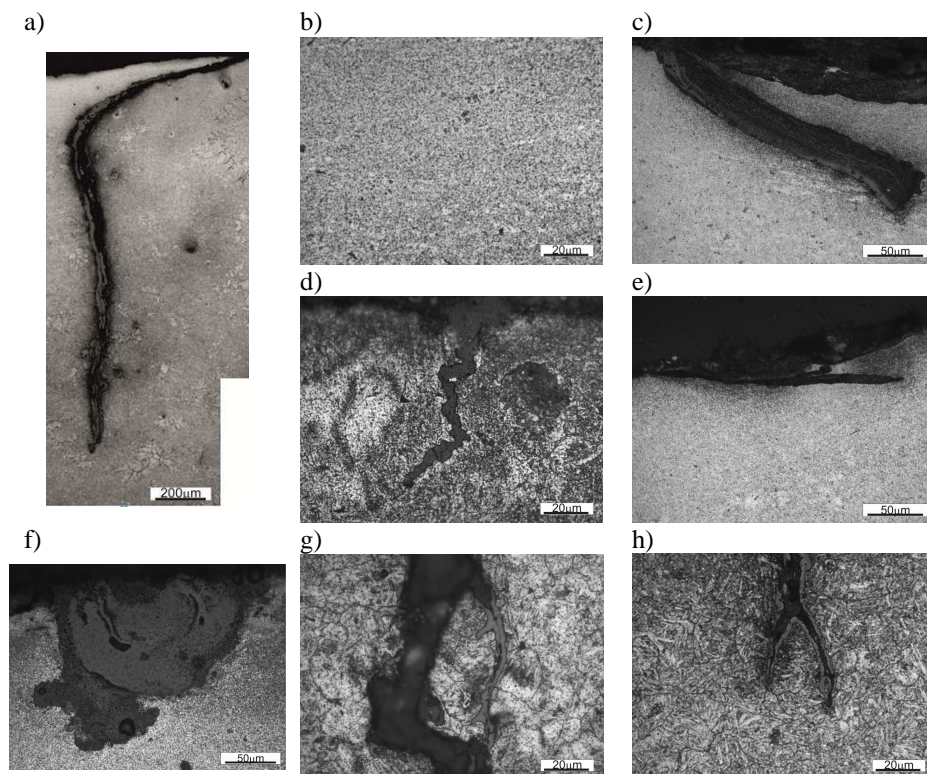


**Rys. 6. Zgląd nietrawiony w obszarze przypowierzchniowym wkładki matrycowej formującej**

Fig. 6. Unetched cross-section in the area near the surface of the investigated part of die insert

Pęknięcie na początkowym etapie rozwija się wzdłuż granicy pomiędzy ww. białą warstwą a materiałem rodzimym (**Rys. 7a**). Mikrostruktura w warstwie przypowierzchniowej wykazuje inne cechy morfologiczne niż w obszarze materiału rodzimego (**Rys. 7b**). Mikrostruktura warstwy przypowierzchniowej cechuje się znacznie mniejszym ziarnem (o wielkości w dużej części nanometrycznej) w stosunku do mikrostruktury materiału rodzimego. Wynikać to może z dużego odkształcenia plastycznego warstwy wierzchniej bez zachodzenia w niej przemiany austenicznej lub jak to ma miejsce w przypadku tworzenia się białej warstwy z przemianą austeniczną w warstwie przypowierzchniowej [**L. 9**]. Podobne cechy morfologiczne wykazuje mikrostruktura również w obszarach inicjacji pęknięć zmęczeniowo-ciepłnych. W tym przypadku istotną rolę wydają się odgrywać obszary charakteryzujące się segregacją pierwiastków węglilotwórczych (**Rys. 7c**). Obszary te odgrywają znaczną rolę w tworzeniu się karbów (przedpęknięć) w warstwie wierzchniej (**Rys. 7d**). Te obserwowane mikrodefekty mogą się tworzyć w wyniku

różnych mechanizmów: utlenianie selektywne wzdłuż mikrosegregacji składu chemicznego (**Rys. 7d**), płynięcie plastyczne warstwy wierzchniej (**Rys. 7e**), utlenianie w wyniku lokalnego przerwania (pęknięcia) warstwy tlenkowej (**Rys. 7f**), tworzenie się białej warstwy (**Rys. 7a**).



**Rys. 7. Mikrostruktura w warstwie wierzchniej wkładki matrycowej formującej. Traw. 2% nital**

Fig. 7. Microstructure in the top surface of the die insert. Etched with 2% nital

Analiza rozwoju pęknięć zmęczeniowo-ciepłych w mikrostrukturze materiału rodzimego jest utrudniona ze względu na dużą „szerokość” tych pęknięć. Dlatego, aby prześledzić drogę rozwoju w mikrostrukturze pęknięć zmęczeniowo-ciepłych oraz mechanizm ich powstawania, zdecydowano się na analizę obszarów nie w miejscach ich głównej propagacji, lecz w obszarach pęknięć wtórnych (**Rys. 7g**) lub w obszarach ich zakończeń (**Rys. 7h**). Istotną rolę w rozwoju pęknięcia odgrywa utlenia-

nie. Pozostaje jednak nie do końca nierozstrzygnięte czy dominujący mechanizm polega na utworzeniu się pęknięcia a następnie utlenieniu odsłoniętych powierzchni, co powinno mieć wpływ na dalszy jego rozwój, czy też na początku następuje selektywne utlenianie, a pęknięcie następuje w dalszej kolejności wzdłuż obszarów utlenionych. Mikroobszary z wyraźną segregacją węglików drugorzędowych są miejscami łatwiejszego rozwoju pęknięć zmęczeniowo-cieplnych, a drogami uprzywilejowanego rozwoju tych pęknięć jest siatka wydzieleni węglików.

## WNIOSKI

Pomimo ww. możliwości korekty danych wyjściowych zastosowana symulacja dobrze określa miejsce najintensywniejszego zużycia narzędzia. Dalszy rozwój symulacji zużycia wymaga uwzględnienia przemian fazowych w warstwie wierzchniej narzędzia podczas jego pracy oraz niejednorodności mikrostruktury. Twierdzenie to wynika z zaobserwowanej roli, jaką odgrywają niejednorodności mikrostruktury oraz tworzenie się białej warstwy w zużyciu narzędzia. Istotnym jest również uwzględnienie obserwowanych mechanizmów selektywnego utleniania. Ponadto dla ograniczenia skłonności do powstania pęknięć należy zweryfikować możliwości obróbki cieplnej stali, z której wykonano badane narzędzie z uwzględnieniem obserwowanej skłonności tworzenia się niejednorodności mikrostruktury. W tym ostatnim przypadku należy podkreślić konieczność analizy jakości metalurgicznej materiału dostarczonego do wykonania badanego narzędzia.

## Podziękowania

*Mgr inż. B. Bojarskiej dziękujemy za pomoc w przygotowaniu niniejszej pracy.*

*Badania realizowane w ramach Projektu „Opracowanie nowych zaawansowanych technologii kucia materiałów wysokotopliwych” Nr WND-POIG.01.03.01-12-004/09 w Programie Operacyjnym Innowacyjna Gospodarka (POIG). Projekt współfinansowany przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego.*



## LITERATURA

1. Łukaszek-Sołek A., Sińczak J., Bednarek S.: Wpływ tarcia na rozkład odkształceń oraz trwałość narzędzi w procesie wyciskania przeciwbieżnego – modelowanie numeryczne, *Obróbka Plastyczna Metali* 18, 4 (2007) 11–18.
2. Kang J.H., Park I.W., i in.: 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.
3. Łukaszek-Sołek A., Sińczak J., Bednarek S.: Advanced estimation of tool life in backward extrusion by means of FEM simulation, *Metal Forming* 2 (2008) 1–6.
4. Sińczak J., Łukaszek-Sołek A., Bednarek S.: Ocena trwałości narzędzi w procesie wyciskania elementów ciąglowych i zderzakowych na przykładzie zderzaka kolejowego, *Mechanik* 8–9 (2008) 695–698.
5. Krawczyk J.: Strukturalne przyczyny mechanizmów wadliwego zużywania się żeliwnych walców hutniczych, *Tribologia* 212, 2 (2007) 353–366.
6. Krawczyk J.: Zjawiska tribologiczne zachodzące na powierzchni czopów żeliwnych walców hutniczych, *Tribologia* 219, 3 (2008) 17–26.
7. Krawczyk J., Pacyna J.: Effect of tool microstructure on the white layer formation, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering* 17, 1–2 (2006) 93–96.
8. Biba N., Stebunov S., Muntinga H.: Increasing of tool life in cold forging by FEM simulation. [www.qform3d.com](http://www.qform3d.com). 20.06.2011.
9. Pacyna J., Krawczyk J.: Warunki powstawania i własności białej warstwy, *Hutnik – Wiadomości Hutnicze* 72, 11 (2005) 545–553.

**Recenzent:**  
**Józef GAWLIK**

## Summary

**The mechanism of wear in the forming die insert used for the extrusion of a railway bumper was investigated in this work. The insert was made of X40CrMoV5-1 steel. The analysis of the die insert material was performed. The role of the microstructure and thermal expansion in the mechanisms of wear of the investigated die insert was also studied. The results of metallographical investigations of the mechanisms of wear and changes in the microstructure of the top surface of the die insert were linked to the results of the numerical simulations of the die wear factor. The obtained results indicate that such mechanisms as white layer formation, thermal fatigue, and oxidation, play an important role in the wear of the die insert.**

