



## Trwałość narzędzi w procesach kucia

### Tool lifetime in forging processes

(1) Zbigniew Gronostajski<sup>1\*</sup>, (2) Marcin Kaszuba<sup>1</sup>, (3) Marek Hawryluk<sup>1</sup>, (4) Bartłomiej Nowak<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Politechnika Wrocławska, Wydział Mechaniczny, Katedra Obróbki Plastycznej i Metrologii, ul. Łukasiewicza 5, 50-371 Wrocław, Poland

<sup>2</sup> Kuźnia Jawor, ul. Kuziennicza 4, 59-400 Jawor, Poland

#### Informacje o artykule

Data przyjęcia: 9.05.2015  
Data recenzji: 10.06.2015  
Data akceptacji: 30.09.2015

#### Wkład autorów

- (1) Konceptcja
- (2) Badania zużycia
- (3) Badania zużycia
- (4) Konceptcja i opracowanie wyników

#### Streszczenie

W artykule omówiono najważniejsze mechanizmy niszczące narzędzia w procesach kucia, takie jak: zużycie ściernie, zmęczenie cieplno-mechaniczne, odkształcenie plastyczne, pękanie zmęczeniowe, zużycie adhezyjne i utlenianie. Wykazano, że intensywność zużycia zmienia się wraz ze zmianą parametrów procesu lub miejsca na narzędziu, co jest zdeterminowane przez czas kontaktu pomiędzy matrycą i odkuwką oraz zmianami temperatury. Natomiast w literaturze wymienione zjawiska na ogół analizowane są oddzielnie i nie ma dokładnego opisu fizycznego procesu zużycia, uwzględniającego wszystkie zjawiska jednocześnie, jak ma to miejsce w rzeczywistości. Na podstawie analizy mechanizmów niszczących oraz warunków pracy narzędzi w procesach kucia na półgorąco i na gorąco, wyodrębniono trzy grupy czynników wpływających na trwałość narzędzi kuźniczych. Czynniki te związane są z narzędziem (rodzaj materiału, technologia wykonania, kształt, konstrukcja, jakość wykonania), z odkuwką (rodzaj materiału, kształt, temperatura początkowa przedkuwki, jakość powierzchni, tolerancja wymiarowa) oraz z eksploatacją (parametry procesu kucia, rodzaj maszyny, zastosowana technologia kucia). Omówiono również metodę poprawy trwałości narzędzi ze szczególnym uwzględnieniem technologii wykonania warstwy wierzchniej, gdzie obecnie duże perspektywy stwarzają metody hybrydowe obróbki powierzchniowej, polegające na zastosowaniu dwóch lub więcej technik inżynierii powierzchni w jednym procesie technologicznym. Najczęściej stosowanymi warstwami hybrydowymi są warstwy typu warstwa azotowana/powłoka PVD lub CVD. Dzięki połączeniu i wzajemnemu oddziaływaniu różnych technologii można uzyskać właściwości warstwy wierzchniej nieosiągalne przy zastosowaniu tych technik oddzielnie.

**Słowa kluczowe:** kucie, inżynieria powierzchni, trwałość, narzędzia

#### Article info

Received: 9.05.2015  
Reviewed: 10.06.2015  
Accepted: 30.09.2015

#### Authors' contribution

- (1) Concept
- (2) Wear investigation
- (3) Wear investigation
- (4) Concept and elaboration of results

#### Abstract

This article discusses the most important mechanisms of tool destruction in forging processes, such as: abrasive wear, thermomechanical fatigue, plastic deformation, fatigue cracking, adhesive wear, and oxidation. It is shown that the intensity of wear changes when process parameters or the location on the tool change, which is determined by the time of contact between the die and forging as well as by temperature changes. The aforementioned phenomena are generally analyzed separately in the literature, and there is no precise physical description of the wear process that accounts for all of these phenomena simultaneously, just as they occur in reality. Based on analysis of destructive mechanisms and tool working conditions in semi-hot and hot forging processes, three groups of factors with an influence on the lifetime of forging tools were distinguished. These factors are related to the tool (type of material, manufacturing technology, shape, design, quality of workmanship), to the forging (type of material, shape, initial preform

\* Autor do korespondencji. Tel.: +48 71 320 21 73; e-mail: zbigniew.gronostajski@pwr.wroc.pl

\* Corresponding author. Tel.: +48 71 320 21 73; e-mail: zbigniew.gronostajski@pwr.wroc.pl

*temperature, surface quality, dimensional tolerance) and to the forging process (forging process parameters, machine type, applied forging technology). A method for improving tool lifetime is also discussed, with particular emphasis on technology for forming the surface layer, where hybrid surface methods based on the application of two or more surface engineering techniques in one technological process are currently creating many new possibilities. The most commonly applied hybrid layers are nitrided layer/PVD or CVD coating. Thanks to the combination and reciprocal interaction of different technologies, properties of the surface layer that are not attainable when these techniques are applied separately can be achieved.*

**Keywords:** *forging, surface engineering, lifetime, tools*

## 1. WSTĘP

Trwałość narzędzi jest jednym z najtrudniejszych do kontroli parametrów procesów kucia. Niska trwałość narzędzi powoduje obniżenie jakości odkuwek [1] oraz w istotny sposób wpływa na koszty produkcji, gdyż koszty narzędzi mogą stanowić aż około 50% całkowitych kosztów produkcji [2].

Najczęstszymi wadami odkuwek spowodowanymi niską trwałością narzędzi są błędy w wypełnieniu wykroju matrycy, czyli niedokucia, zakucia, zadzior, skrzywienia, rysy, rozwarstwienia, mikro i makro pęknięcia, itp. To z kolei wpływa na funkcjonalność wyrobu finalnego powstałego z odkuwki.

Definicja trwałość narzędzia jest dość płynna, najczęściej przyjmuje się, że: trwałość narzędzia jest wyrażona ilością operacji, które można przeprowadzić za pomocą tego narzędzia otrzymując wyroby o wymaganej jakości. Trwałość narzędzi kuźniczych wiąże się z występowaniem różnych zjawisk niszczących. Duża ilość i różnorodność czynników wpływających na trwałość narzędzi w procesach kucia powoduje, że jest to bardzo trudne do analizy zagadnienie [1]. Obecnie w Polsce i na Świecie prowadzi się wiele badań w celu zwiększenia trwałości narzędzi, szczególnie w procesach kucia precyzyjnego.

Trwałość matryc kuźniczych zależy głównie od parametrów procesu kucia (nacisków, temperatury, częstotliwości kucia, itp.), ale również od parametrów narzędzia (materiał, obróbka cieplna i powierzchniowa) i parametrów odkuwki (kształt, materiał, temperatura) [1, 3].

## 1. INTRODUCTION

*Tool lifetime is one of the parameters of forging processes that is most difficult to control. Low tool lifetime causes deterioration of forging quality [1] and significantly impacts production costs, because tool costs may make up about 50% of total production costs [2].*

*The most common forging defects caused by low tool lifetime are errors in filling the die impression, such as underfills, overfills, flash, eccentricities, cracks, delamination, micro- and macro-cracks, etc. This, in turn, affects the functionality of the final product created from the forging.*

*The definition of tool lifetime (or durability) is rather fluid, and it is generally accepted that: tool lifetime is expressed as the number of operations that can be performed using this tool to obtain products of the required quality. The lifetime of forging tools is linked to the occurrence of various destructive phenomena. The large number and diversity of factors affecting tool lifetime in forging processes makes this a problem that is very difficult to analyze [1]. Many studies are currently being conducted in Poland and worldwide in order to improve tool lifetime, particularly in precision forging processes.*

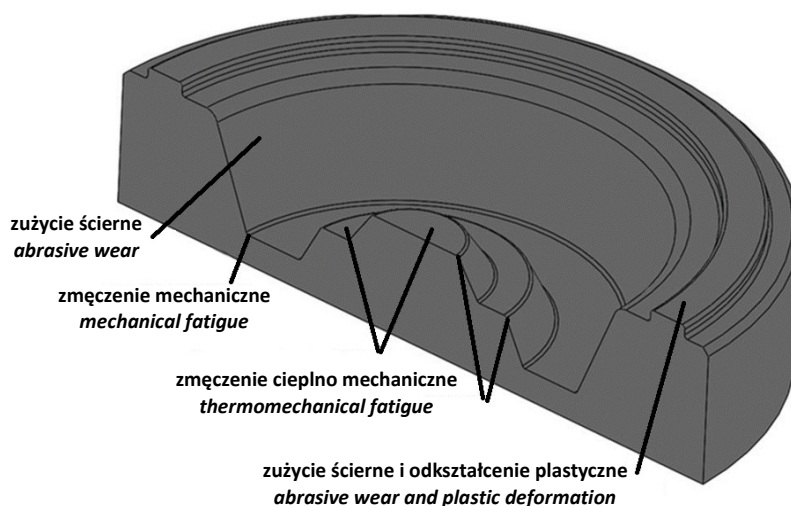
*The lifetime of forging dies primarily depends on the parameters of the forging process (forging pressures, temperature, forging frequency, etc.) but also on tool parameters (material, heat and surface treatment) and on the parameters of the forging (shape, material, temperature) [1, 3].*

W dostępnej literaturze znaleźć można wiele informacji na temat zjawisk niszczących, przy czym różne są klasyfikacje tych mechanizmów [4, 5]. Prowadzone dotychczas badania wskazują, że w warstwie wierzchniej matrycy występują następujące mechanizmy zużycia: zużycie ściernie, zmęczenie ciepłno-mechaniczne, odkształcenie plastyczne, pękanie zmęczeniowe, zużycie adhezyjne i utlenianie [6].

Na intensywność występowania poszczególnych mechanizmów niszczących ma wpływ również kształt wykroju roboczego narzędzia. Na rys. 1 zaznaczono miejsca na wykroju matrycy, w których dominują różne mechanizmy.

*Much information can be found in available literature on the subject of destructive phenomena, however classifications of these mechanisms vary [4, 5]. Research conducted until now indicates that the following wear mechanisms occur in the surface layer of dies: abrasive wear, thermomechanical fatigue, plastic deformation, fatigue cracking, adhesive wear, and oxidation [6].*

*The shape of the tool's working impression also affects the intensity of individual destructive mechanisms. Locations on the die impression in which different mechanisms are dominant are marked in Fig. 1.*



Rys. 1. Miejsca występowania różnych mechanizmów zużycia matrycy kutej

Fig. 1. Locations where different wear mechanisms occur on a forging die

## 2. OPIS MECHANIZMÓW ZUŻYCIA MATRYC KUŹNICZYCH

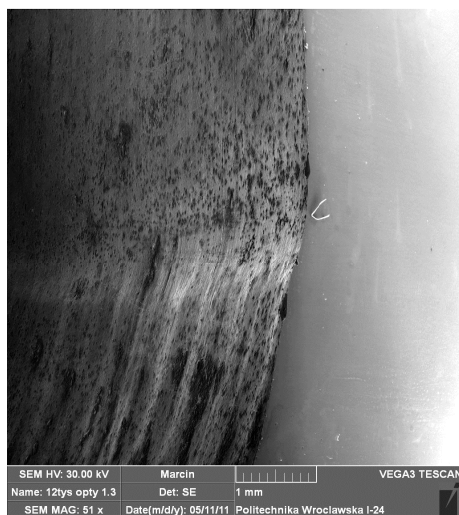
### 2.1. Zużycie ściernie

Zużycie ściernie jest wynikiem ubytku materiału, głównie poprzez oddzielenie się cząstek materiału z powierzchni. Taki proces występuje, gdy w obszarach współpracujących elementów znajdują się luźne lub utwardzone cząstki ścierniwa albo wystające nierówności twardszego materiału [7] (rys. 2). Cząstkami intensyfikującymi zużycie ściernie mogą być twarde tlenki powstałe w procesie wysokotemperaturowego utleniania, zarówno powierzchni odkuwki jak i samej matrycy.

## 2. DESCRIPTION OF FORGING DIE WEAR MECHANISMS

### 2.1. Abrasive wear

*Abrasive wear is the result of material loss, primarily through separation of material particles from the surface. This process occurs when loose or fixed particles of abrasive or protruding irregularities of harder material are in the inter-operating areas of components [7] (Fig. 2). Hard oxides formed in the process of high-temperature oxidation, on the surface of the forging and the die itself, may intensify abrasive wear.*



Rys. 2. Przykład typowego zużycia ściernego matrycy kuźniczej

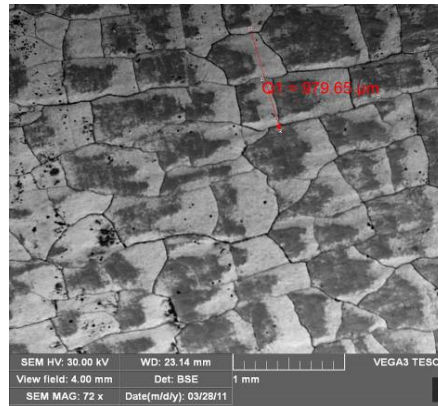
*Fig. 2. Example of typical abrasive wear of a forging die*

## 2.2. Zmęczenie cieplno-mechaniczne

Zmęczenie cieplno-mechaniczne jest rodzajem zużycia, w którym miejscowa utrata spójności i związane z nią ubytki materiału są spowodowane zmęczeniem materiału w wyniku cyklicznego oddziaływania naprężeń w warstwach wierzchnich matryc (generowanych dużymi naciskami – obciążeniami mechanicznymi – oraz gradientami temperatury) [7]. W wyniku intensywnych cyklicznych obciążeń cieplnych wywołanych naprzemiennym nagrzewaniem i chłodzeniem powierzchni narzędzi, powstają naprężenia cieplne, powodujące powstawanie siatki mikropęknięć. Ta forma zniszczenia określana jest jako zmęczenie cieplne. Dodatkowo, obecność cyklicznie zmiennych obciążeń mechanicznych powoduje występowanie procesów zmęczeniowych określanych jako zmęczenie mechaniczne, których intensywność wzrasta w wyniku pojawienia się siatki mikropęknięć, powstałych na skutek zmęczenia cieplnego, tworząc makropęknięcia. Współzależność mechanizmów zmęczenia cieplnego oraz zmęczenia mechanicznego powoduje, że oba te mechanizmy traktuje się razem, jako zmęczenie cieplno-mechaniczne (rys. 3) [8].

## 2.2. Thermomechanical fatigue

*Thermomechanical fatigue is a type of wear in which local loss of cohesion and the losses of material related to it are caused by material fatigue as a result of the cyclic action of stresses in the surface layers of dies (generated by high pressures – mechanical loads – and temperature gradients) [7]. Thermal stresses occur as a result of intensive cyclic thermal loads arising from alternating heating and cooling of tool surfaces, causing the formation of micro-crack patterns. This form of destruction is referred to as thermal fatigue. In addition, the presence of cyclically variable mechanical loads causes the fatigue processes referred to as mechanical fatigue to occur, and the intensity of these processes increases due to the appearance of a micro-crack pattern caused by thermal fatigue, resulting in macro-cracks. The codependence of thermal fatigue and mechanical fatigue mechanisms has caused that their combination is taken into consideration as thermomechanical fatigue (Fig. 3) [8].*



Rys. 3. Siatka pęknięć ciepłno – mechanicznych

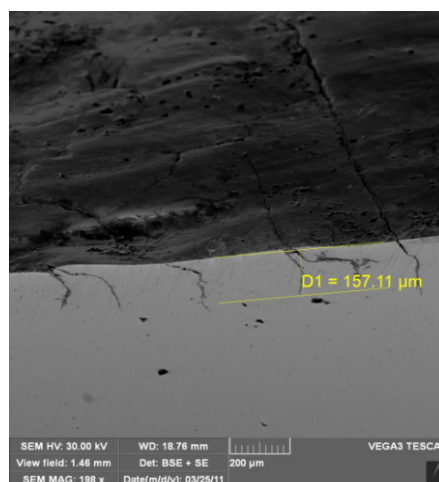
*Fig. 3. Thermomechanical crack pattern*

### 2.3. Odształcenie plastyczne

W wyniku obniżenia wytrzymałości na odkształcenie plastyczne materiału spowodowane procesem odpuszczania, dochodzi do obniżenia granicy plastyczności materiału, co w efekcie prowadzi do odkształcenia plastycznego wykroju matrycy w szczególnie narażonych obszarach (rys. 4). Zabezpieczenie narzędzia przed odkształceniem plastycznym wymaga, aby naprężenie w żadnym punkcie narzędzia nie przekroczyło granicy plastyczności materiału, z którego jest wykonane. W procesach kucia na gorąco temperatura warstwy wierzchniej narzędzi może osiągać nawet wartość 800°C, a naprężenia pochodzące od sił zewnętrznych 1000 MPa, co wskazuje na duże prawdopodobieństwo wystąpienia odkształceń plastycznych w matrycach kuźniczych [7].

### 2.3. Plastic deformation

*As a result of the reduction of the material's resistance to plastic deformation as a result of the tempering process, the material's yield point is lowered, which leads to plastic deformation of the die impression, particularly in the exposed areas (Fig. 4). To protect a tool against plastic deformation, it is required that stress does not exceed the yield point of the material from which the tool is made at any point of the tool. In hot forging processes, the temperature of tool surface layers may reach up to 800°C, and stresses caused by external forces reach up to 1000 MPa, which indicates a high probability of plastic deformations in forging dies [7].*



Rys. 4. Odształcenie plastyczne w warstwie wierzchniej matrycy w procesie kucia na gorąco

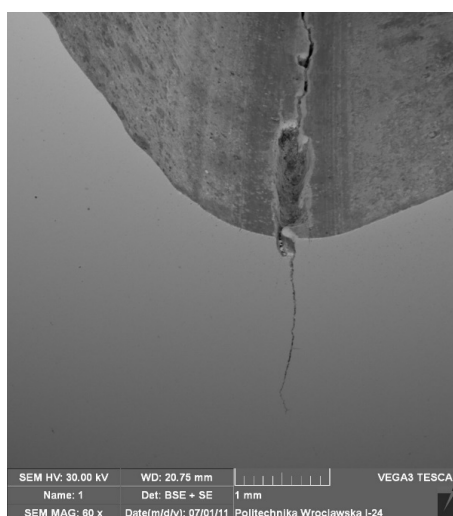
*Fig. 4. Plastic deformation in a dies surface layer in the hot forging process*

## 2.4. Pękanie zmęczeniowe

Pękanie zmęczeniowe narzędzi kuźniczych występuje w wyniku sumowania się odkształceń w warstwie wierzchniej, wywołanych łącznym oddziaływaniem naprężeń własnych i cyklicznych naprężeń od obciążeń zewnętrznych, jakie powstają podczas kształtowania odkuwki. W efekcie działania cyklicznych naprężeń, w miejscach ich spiętrzenia tworzą się mikropęknięcia zmęczeniowe, rozwijające się w czasie dalszej eksploatacji (rys. 5) [6].

## 2.4. Fatigue cracking

*Fatigue cracking of forging tools occurs as a result of the summation of deformations in the surface layer caused by the combined action of internal stresses and cyclic stresses caused by external loads occurring during the forging process. As a result of cyclic stresses, fatigue micro-cracks are formed where these stresses are concentrated and develop over the course of further exploitation (Fig. 5) [6].*



Rys. 5. Pęknięcie zmęczeniowe powstałe w narożu matrycy kuźniczej

*Fig. 5. Fatigue crack formed in the corner of a forging die*

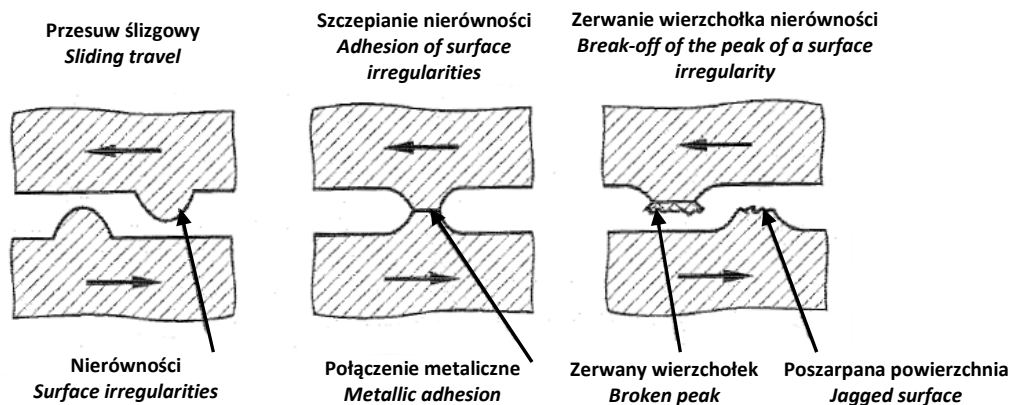
## 2.5. Zużycie adhezyjne

Zużycie adhezyjne występuje w mikroobszarach plastycznego odkształcenia warstwy wierzchniej, a zwłaszcza na najwyższych wierzchołkach chropowatości. Powstają wówczas lokalne szczeplenia metaliczne powierzchni trących i niszczenie tych połączeń wraz z odrywaniem cząstek metalu lub jego rozmazywaniem na powierzchniach trących [9]. Mechanizm zużycia adhezyjnego przedstawiony został na rys. 6.

## 2.5. Adhesive wear

*Adhesive wear occurs in micro-areas of plastic deformation on the surface layer, particularly at the highest coarseness peaks. Local metallic adhesions are formed between friction surfaces, and these adhesions are destroyed as metal particles are detached or spread over friction surfaces [9]. The mechanism of adhesive wear is presented in Fig. 6.*





Rys. 6. Mechanizm zużycia adhezyjnego [9]

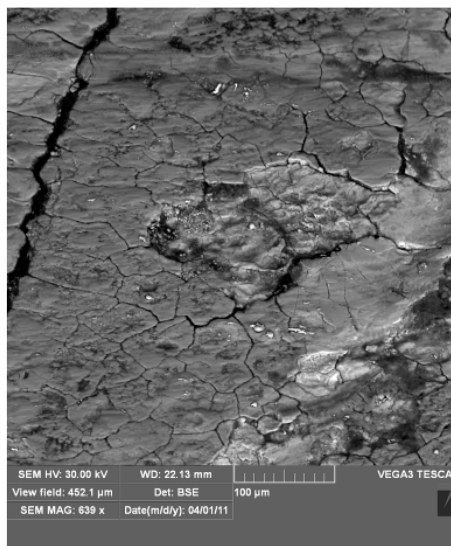
Fig. 6. Adhesive wear mechanism [9]

## 2.6. Utlenianie

Zużycie przez utlenianie polega na niszczeniu warstwy wierzchniej elementów metalowych, wskutek oddzielania warstwek tlenków, powstałych w wyniku absorpcji tlenu z atmosfery. Dyfuzja tlenu następuje w mikro-objętościach metalu, odkształconych sprężycie i plastycznie z jednoczesnym tworzeniem warstwek roztworów stałych. Zużycie przez utlenianie występuje wtedy, gdy intensywność tworzenia warstwek tlenków jest większa od intensywności niszczenia powierzchni przez ścieranie (rys. 7).

## 2.6. Oxidation

Wear by oxidation is based on the destruction of the surface layer of metallic components as a result of the separation of oxide layers formed by absorption of oxygen from the atmosphere. Oxygen diffusion takes place in micro-volumes of metal that have been subjected to elastic and plastic deformation, with simultaneous formation of solid solution layers. Wear by oxidation occurs when the intensity of oxide layer formation is greater than the intensity of surface destruction by abrasion (Fig. 7).



Rys. 7. Wykruszenia warstwy tlenków na powierzchni matrycy kuźniczej

Fig. 7. Chipping of oxide layers on the surface of a forging die

### 3. METODY POPRAWY TRWAŁOŚCI NARZĘDZI KUŹNICZYCH

Na podstawie analizy mechanizmów niszczących oraz warunków pracy narzędzi w procesach kucia na półgorąco i gorąco, można wyodrębnić trzy grupy czynników wpływających na trwałość narzędzi kuźniczych [8, 10]. Czynniki te związane są z:

- narzędziem: rodzaj materiału, technologia wykonania, kształt, konstrukcja, jakość wykonania;
- odkuwką: materiał, kształt, temperatura początkowa przedkuwki, jakość powierzchni, tolerancja wymiarowa;
- eksploatacją: parametry procesu, rodzaj maszyny, technologia kucia.

Czynniki związane z odkuwką i eksploatacją przeważnie są z góry określone i pozostają na ogół stałe. W opracowanym procesie technologicznym ewentualne zmiany mogą dotyczyć jedynie czynników związanych z narzędziem. Dlatego też przez odpowiedni dobór materiału narzędziowego, technologii wykonania, kształtu, konstrukcji i jakości wykonania, można kształtować trwałość stosowanych matryc kuźniczych [1, 8].

#### 3.1. Technologia wykonania warstwy wierzchniej

Przedstawione mechanizmy niszczące narzędzia kuźnicze w procesach kucia na półgorąco i na gorąco dotyczą przede wszystkim warstwy wierzchniej narzędzi. Wobec powyższego, modyfikowanie właściwości warstwy wierzchniej narzędzi kuźniczych jest najbardziej efektywnym sposobem poprawy ich trwałości [8, 11]. Kształtowanie właściwości warstwy wierzchniej narzędzi możliwe jest dzięki rozwojowi metod inżynierii powierzchni. Ogólnie techniki kształtowania właściwości warstwy wierzchniej można podzielić na:

- techniki polegające na obróbce cieplno-chemicznej (warstwy dyfuzyjne),
- techniki CVD, PVD,
- techniki mechaniczne (nagniatanie, kulowanie, krążkowanie itp.),
- techniki wiązkowe (implantacja jonów, obróbka laserowa),
- techniki hybrydowe

### 3. METHODS FOR IMPROVING THE LIFETIME OF FORGING TOOLS

*Based on analysis of destructive mechanisms and tool working conditions in semi-hot and hot forging processes, three groups of factors with an influence on the lifetime of forging tools can be distinguished [8, 10]. These factors are related to:*

- *the tool: type of material, manufacturing technology, shape, design, quality of workmanship;*
- *the forging: material, shape, initial preform temperature, surface quality, dimensional tolerance;*
- *the forging process: process parameters, type of machine, forging technology.*

*Factors related to the forging and the forging process are generally determined in advance and remain constant. Potential changes in the developed technological processes may only pertain to factors related to the tool. This is why the lifetime of applied forging dies can be controlled through the appropriate selection of the tools material, manufacturing technology, shape, design, and quality of workmanship [1, 8].*

#### 3.1. Surface layer modification technology

*The presented forging tool destruction mechanisms in semi-hot and hot forging processes pertain to the surface layers of tools, above all. In light of the above, modifying the properties of forging tools' surface layers is the most effective way to improve their lifetime [8, 11]. Shaping the properties of the surface layer of tools is possible thanks to the development of surface engineering methods. General techniques for modifying the properties of the surface layer can be divided into:*

- *techniques based on thermochemical treatment (diffusion layers),*
- *CVD, PVD techniques,*
- *mechanical techniques (burnishing, ball burnishing, roller burnishing, etc.),*
- *beam techniques (ion implantation, laser treatment),*
- *hybrid techniques*



### 3.2. Obróbka cieplno-chemiczna

W przypadku narzędzi kuźniczych powszechnie stosowaną obróbką cieplno-chemiczną, mającą na celu zwiększenie ich trwałości, jest azotowanie.

Azotowanie polega na dyfuzyjnym nasyceniu azotem warstw wierzchnich narzędzi wygrzewanych w atmosferze azotu, np. częściowo zdysocjowanego amoniaku. Proces przeprowadza się w zakresie temperatur 400–700°C w czasie 0,5–50 h. Azotowanie może być realizowane przez zastosowanie różnych technologii, najbardziej popularną metodą jest azotowanie gazowe oraz rozwijane w ostatnich latach i dające bardzo dobre wyniki azotowanie plazmowe (jarzeniowe). Niezależnie od sposobu zastosowania azotowania umożliwia podwyższenie odporności na ścieranie, wytrzymałości zmęczeniowej oraz odporności na korozję narzędzi.

Obserwacje wielu przemysłowych procesów kucia, w których matryce kuźnicze poddano procesowi azotowania wykazały, że zabieg ten pozwala na kilkukrotne zwiększenie ich żywotności.

### 3.3. Techniki CVD, PVD

Spośród wielu technik zwiększania trwałości powierzchni materiałów inżynierskich istotną rolę w praktyce przemysłowej odgrywają :

- metody fizycznego osadzania powłok z fazy gazowej PVD (*physical vapour deposition*),
- metody chemicznego osadzania powłok z fazy gazowej CVD (*chemical vapour deposition*).

Metody z grupy PVD polegają na fizycznym osadzaniu powłok z fazy gazowej przy ciśnieniu niższym od atmosferycznego i przy wykorzystaniu różnych procesów fizycznych do uzyskania par osadzanych materiałów (np. azotków, węglików, borków). Pary metali lub związków osadzane przy temperaturze podłoża <500°C, dzięki czemu możliwe jest pokrywanie narzędzi po uprzedniej obróbce cieplnej, bez wysokiej temperatury w procesie osadzania powłoki.

### 3.2. Thermochemical treatment

*In the case of forging tools, nitriding is the thermochemical treatment most commonly applied to improve their lifetime.*

*Nitriding is based on diffusive nitrogen saturation of the surface layers of tools soaked in a nitrogen atmosphere, e.g. of partially dissociated ammonia. The process is performed within the temperature range of 400–700°C over a time of 0.5–50 h. Nitriding may be performed by applying different technologies, but the most popular method is gas nitriding as well as plasma (or ion) nitriding, which has been developed recently and yields very good results. Regardless of the method, the application of nitriding makes it possible to improve resistance to abrasion, fatigue strength, and corrosion resistance of tools.*

*Observations of many industrial forging processes in which forging dies were subjected to the nitriding process have proven that this treatment makes it possible to increase tool lifetime several times over.*

### 3.3. CVD, PVD techniques

*Among the many techniques of improving the durability of the surfaces of engineering materials, the following methods play an important role in industrial practice :*

- *physical vapor deposition (PVD),*
- *chemical vapor deposition (CVD).*

*Methods in the PVD group are based on physical deposition of coatings from a gaseous phase at sub-atmospheric pressure by utilizing various physical processes to obtain vapors of deposited materials (e.g. nitrides, carbides, borides). Vapors of metals or compounds are deposited at substrate temperatures <500°C, thanks to which it is possible to coat tools that have previously been heat-treated without fear of hardness reduction as a result of the action of high temperature in the coating deposition process.*

Połączenie powłoki z podłożem ma charakter adhezyjny, rzadziej adhezyjno-dyfuzyjny [8]. Obecnie znanych jest wiele różnych odmian i modyfikacji metod PVD takich, jak:

- ARE – aktywowane reaktywnie naporowanie przy użyciu działa elektronowego,
- BARE – aktywowane reaktywnie naporowanie przy użyciu działa elektronowego z ujemną polaryzacją podłoża,
- ICB – reaktywne nanoszenie ze zjonizowanych klastrow,
- TAE – odparowanie reaktywne łukiem elektrycznym,
- CAD – katodowe odparowanie łukowe,
- RIP – reaktywne napyłanie jonowe,
- HHCD – aktywowane odparowanie gorącą katodą wnątkową,
- PPM – odparowanie metalu następuje impulsowo-plazmowo,
- RMS – reaktywne rozpyłanie magnetronowe.

Metody w grupie CVD – chemiczne osadzanie z fazy gazowej – są procesami, w których substraty do wytwarzania materiałów powłok pozyskiwane są na drodze reakcji chemicznych. W konwencjonalnych metodach CVD reakcje chemiczne zachodzą w wysokich temperaturach 900–1000°C, co znacznie zmniejsza zakres stosowania tej metody, szczególnie w przypadku narzędzi po wcześniejszej obróbce cieplnej.

Spośród wielu różnych metod z grupy CVD, najbardziej perspektywiczne wydają się być metody chemicznego osadzania z fazy gazowej, wspomagane plazmą PACVD/PECVD. Metody te są bardzo atrakcyjne ze względu na niższą niż w klasycznych procesach CVD temperaturę procesu, możliwość osadzania nierównowagowych faz oraz lepszą kontrolę nad stechiometrią i czystością pokryć, dzięki możliwości oczyszczenia podłoża plazmą. Niską temperaturę osadzania w procesach CVD wspomaganym plazmą uzyskuje się dzięki wykorzystaniu plazmy do wzbudzenia cząstek mieszaniny gazowej do poziomu energii zgodnej z termicznym wzbudzeniem. Wówczas osadzanie faz materiału powłoki może zajść w temperaturze poniżej 600°C, czyli wiele niższej niż w konwencjonalnych technikach CVD [12, 13].

*The connection of the coating to the substrate is adhesive in nature, and less commonly, adhesive-diffusive [8]. Many different varieties and modifications of the PVD method are currently known, such as:*

- ARE – Activated Reactive Evaporation using an electron beam,
- BARE – Bias Activated Reactive evaporation using an electron beam and with negative polarization of the substrate,
- ICB – Ionized Cluster Beam deposition,
- TAE – Thermionic Arc Evaporation,
- CAD – Cathodic Arc Deposition,
- RIP – Reactive Ion Plating,
- HHCD – Hot Hollow Cathode Deposition,
- PPM – Pulse Plasma Method (metal evaporated by plasma pulses),
- RMS – Reactive Magnetron Sputtering.

*Methods from the CVD group – chemical vapor deposition – are processes in which the substrates for producing coating materials are obtained by way of chemical reactions. In conventional CVD methods, chemical reactions occur at high temperature within the 900–1000°C range, which significantly reduces the scope of this method's application, particularly in the case of tools that have previously been heat-treated.*

*Among the many different methods from the CVD group, the ones with the most potential seem to be PACVD/PECVD plasma-assisted chemical vapor deposition methods. These methods are very attractive due to a process temperature that is lower than in classical CVD processes, the capability of depositing non-equilibrium phases, and better control over the stoichiometry and purity of coatings thanks to the capability of purifying the substrate with plasma. The low deposition temperature in plasma-assisted CVD processes is achieved thanks to the utilization of plasma to excite particles of the gas mixture to an energy level of thermal excitation. When this is achieved, deposition of coating material phases may occur at a temperature below 600°C, which is much lower than in conventional CVD techniques [12, 13].*

### 3.4. Obróbka mechaniczna

Do mechanicznych metod obróbki mających na celu poprawę właściwości eksploatacyjnych warstw wierzchnich narzędzi jest kulowanie. Polega ono na dynamicznej powierzchniowej obróbce plastycznej na zimno. Warstwy wierzchnie wytworzone w procesie kulowania charakteryzują się dużymi wartościami bezwzględnych maksymalnych naprężeń własnych oraz granicy plastyczności [14].

### 3.5. Techniki wiązkowe

Techniki wiązkowe należą do stosunkowo nowych metod wzmacniania warstwy wierzchniej i obecnie nie są powszechnie stosowane. Zaliczyć do nich można implantację jonów oraz obróbkę laserową.

Implantacja polega na wprowadzaniu w zewnętrzne obszary struktury materiału jonów innych pierwiastków. Proces ten nie odbywa się w podwyższonej temperaturze, natomiast wprowadzane jony są rozpędzane do dużych prędkości, w wyniku czego uderzają w implantowany obiekt z dużą energią. Głębokość wnikania obcych jonów jest oczywiście związana z ich energią, jednak nie przekracza kilku  $\mu\text{m}$  [11].

Obróbka laserowa również należy do nowych metod poprawy właściwości eksploatacyjnych powierzchni narzędzi. Promień lasera umożliwia lokalne silne rozgrzanie powierzchni materiału i zmiany jej właściwości z zachowaniem właściwości rdzenia. Dodatkowo, zastosowanie obróbki laserowej umożliwia wprowadzenie do warstwy wierzchniej obrabianego przedmiotu pierwiastków stopowych (np. WC lub stellite) w czasie topienia powierzchni wiązką laserową. W wyniku tego procesu, po zakrzepnięciu tworzy się warstwa o odmiennym składzie chemicznym, strukturze i własnościach [11].

### 3.6. Techniki hybrydowe

Badania prowadzone w wielu ośrodkach naukowych w zakresie złożonych metod obróbki powierzchniowej doprowadziły do

### 3.4. Mechanical working

*Mechanical working methods intended to improve the functional properties of tool surface layers include ball burnishing. It is based on cold dynamic surface working. Surface layers produced by the ball burnishing process are characterized by high absolute values of maximum internal stresses and yield point [14].*

### 3.5. Beam techniques

*Beam techniques are relatively new methods of surface layer hardening and are currently not commonly used. Ion implantation and laser treatment figure among them.*

*Implantation is based on introducing ions of other elements into the exterior areas of the material's structure. While this process does not take place at an elevated temperature, ions are accelerated to high speeds and thus impact the object in which they are implanted with high energy. The depth of penetration of foreign ions is obviously related to their energy, however it does not exceed several  $\mu\text{m}$  [11].*

*Laser treatment is another new method for improving the functional properties of tool surfaces. A laser beam enables strong local heating of the material's surface as well as a change of its properties while maintaining the properties of the core. In addition, the application of laser treatment makes it possible to introduce alloying elements (e.g. WC or stellite) into the surface layer of the treated object during melting of the surface with a laser beam. As a result of this process, a layer with a different chemical composition, structure, and properties is formed after solidification [11].*

### 3.6. Hybrid techniques

*Studies conducted at many research centers in the scope of combined surface treatment methods have led to the creation of hybrid*

powstania technologii hybrydowych, polegających na zastosowaniu dwóch lub więcej technik inżynierii powierzchni w jednym procesie technologicznym. Dzięki połączeniu i wzajemnemu oddziaływaniu różnych technologii można uzyskać właściwości warstwy wierzchniej nieosiągalne przy oddzielnym stosowaniu tych technik [8, 10].

### 3.7. Warstwy hybrydowe typu warstwa azotowana/powłoka PVD lub CVD

Technologie hybrydowe należą do najnowszych metod modyfikowania właściwości warstwy wierzchniej. W zastosowaniu do poprawy trwałości narzędzi kuźniczych najlepsze efekty obserwowane są właśnie dla metod hybrydowych, które łączą w sobie metody obróbki cieplnej i jednej z technik PVD lub CVD. Technologia ta umożliwia nadanie warstwie wierzchniej odpowiednich właściwości eksploatacyjnych oraz stworzenie bariery, która w skuteczny sposób ograniczy wpływ czynników niszczących.

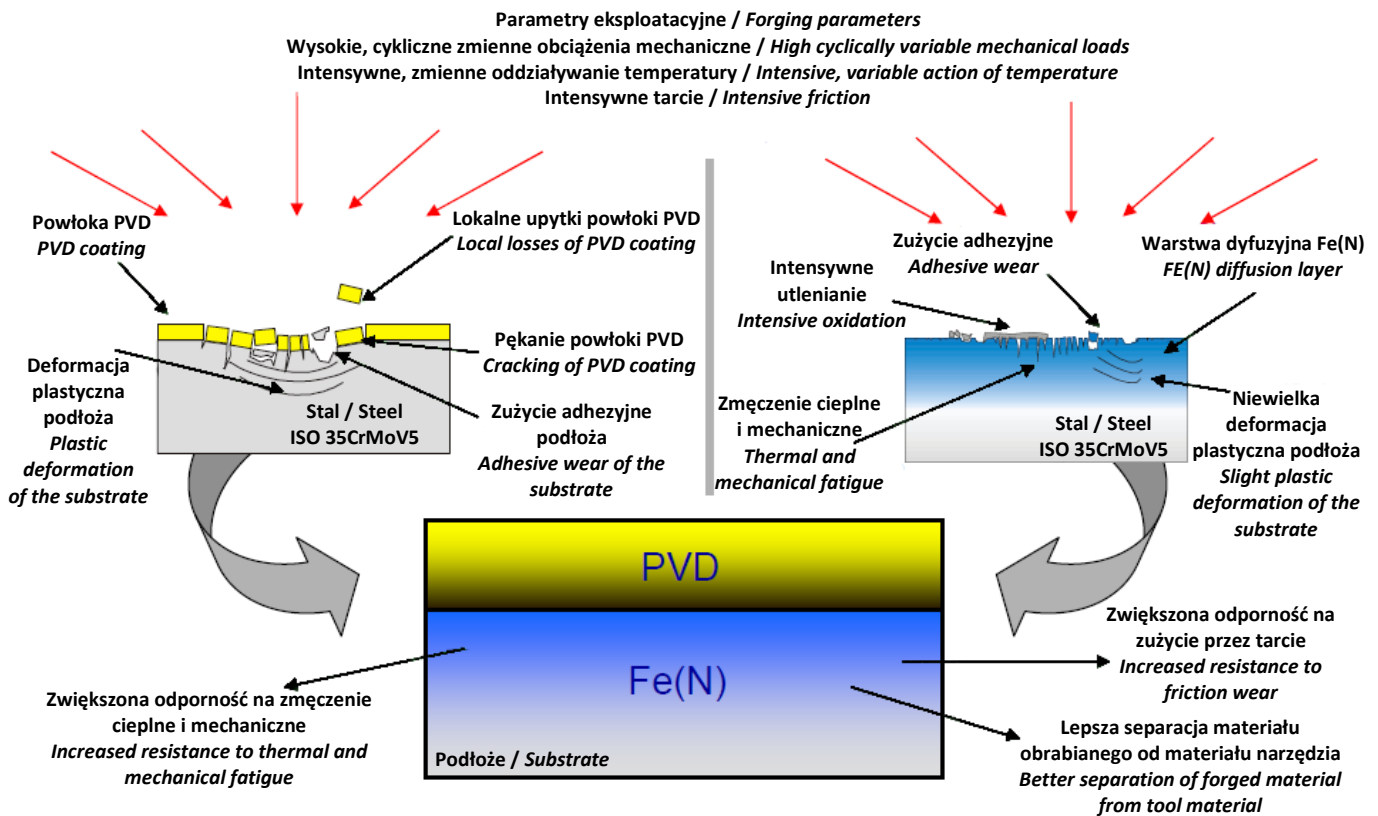
Najczęściej stosowanymi warstwami hybrydowymi są warstwy typu warstwa azotowana/powłoka PVD lub CVD. Efektem materiałowym ich stosowania są układy wielowarstwowe, których jedną część stanowi odpowiednio przygotowane podłoże – warstwa azotowana, drugą natomiast odpowiednio dobrana, wytworzona na powierzchni podłoża, powłoka adhezyjna. Zastosowanie jedynie warstwy azotowanej nie zabezpieczałoby w wystarczający sposób warstwy wierzchniej narzędzi przed występującymi w czasie pracy czynnikami niszczącymi takimi jak szoki cieplne, intensywne tarcie oraz duże obciążenia mechaniczne. Głównym zadaniem warstwy azotowanej jest zwiększenie twardości i odporności podłoża na odkształcenia plastyczne. Zabezpiecza to twardą powłokę PVD lub CVD przed utratą spójności wewnętrznej do podłoża. Powłoki PVD i CVD stanowią natomiast skuteczną izolację podłoża, ograniczając wpływ niszczących czynników zewnętrznych w procesie eksploatacji. Rys. 8 przedstawia rolę poszczególnych elementów takiej warstwy hybrydowej [8].

*technologies, which are based on the application of two or more surface engineering techniques in a single technological process. Thanks to the combination and reciprocal interaction of different technologies, properties of the surface layer that are not attainable when these techniques are applied separately can be achieved [8, 10].*

### 3.7. Nitrided layer/PVD or CVD coating hybrid layers

*Hybrid technologies are among the latest methods of modifying the properties of the surface layer. When they are applied to improve the lifetime of forging tools, the best effects are observed for hybrid methods that combine heat treatment methods and either the PVD or CVD method. This technology makes it possible to endow the surface layer with the appropriate functional properties and to create a barrier that will effectively limit the impact of destructive factors.*

*The most commonly applied hybrid layers are nitrided layer/PVD or CVD coating. Multi-layered systems are the effect of their application of in the material, where one part is the properly prepared substrate – nitrided layer, and the second is an appropriately selected adhesive coating produced on the substrates surface. The application of only the nitrided layer would not sufficiently protect the surface layer of a tool against destructive factors occurring during work, such as thermal shocks, intense friction, and high mechanical loads. The primary task of a nitrided layer is to improve the hardness and resistance of the substrate to plastic deformation. This protects the hard PVD or CVD coating against loss of internal cohesion with the substrate. PVD and CVD coatings effectively isolate the substrate, limiting the impact of destructive external factors during the forging process. Fig. 8 presents the role of the individual components of such a hybrid layer [8].*



Rys. 8. Funkcje poszczególnych elementów warstwy hybrydowej typu warstwa azotowana/powłoka PVD [8]

Fig. 8. Functions of individual components of nitrided layer/PVD coating hybrid layers [8]

Wzajemne występowanie i oddziaływanie dwóch elementów struktury, tj. warstwy azotowanej i powłoki PVD lub CVD, umożliwia uzyskanie warstwy wierzchniej o właściwościach nieosiągalnych przy zastosowaniu każdej z tych technik oddzielnie [8].

#### 4. PODSUMOWANIE

Wpływ mechanizmów zużycia na trwałość matryc jest na ogół analizowany oddzielnie i nie jest znany dokładny globalny opis fizyczny procesu zużycia, uwzględniający wszystkie zjawiska jednocześnie, jak ma to miejsce w rzeczywistości. W praktyce, intensywność zużycia zmienia się wraz ze zmianą parametrów procesu kucia lub miejsca na narzędziu, co determinuje czas kontaktu i zmiany temperatury [7]. Na rys. 9 przedstawiona została powierzchnia robocza matrycy kuźniczkiej do kucia na gorąco, na której widoczna jest siatka pęknięć cieplno-mechanicznych oraz ślady zużycia ściernego w postaci bruzd, tworzących się wzdłuż wcześniej powsta-

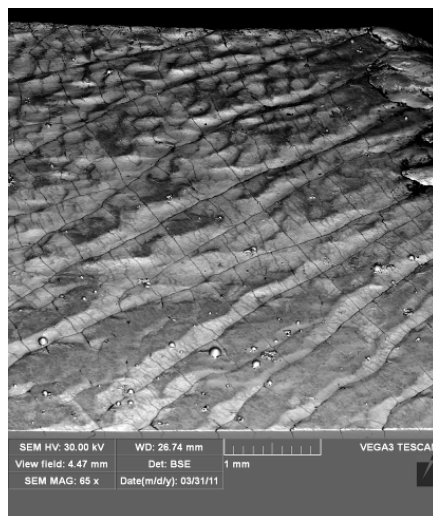
The presence and reciprocal interaction of two structural components, i.e. nitrided layer and PVD or CVD coating, make it possible to obtain a surface layer with properties that are not attainable when each of these techniques is applied separately [8].

#### 4. SUMMARY

The impact of wear mechanisms on die lifetime is generally analyzed separately for each mechanism, and no precise, global physical description of the wear process is known that would account for all phenomena simultaneously, just as they occur in reality. In practice, the intensity of wear changes as the parameters of the forging process or locations on the tool change, which is determined by time of contact and temperature changes [7]. Fig. 9 presents the working surface of a hot forging die, on which a pattern of thermomechanical cracks is visible along with traces of abrasive wear in the form of grooves formed along cracks that were formed

łych pęknięć. Świadczy to o współzależności tych dwóch mechanizmów.

earlier. This indicates that these two mechanisms are co-dependent.



Rys. 9. Powierzchnia robocza matrycy kuźniczej z siatką pęknięć cieplno-mechanicznych i śladami zużycia ściernego

*Fig. 9. Working surface of the forging die with thermomechanical crack pattern and traces of abrasive wear*

Na podstawie analizy mechanizmów niszczących oraz warunków pracy narzędzi w procesach kucia na półgorąco i gorąco, można wyodrębnić trzy grupy czynników wpływających na trwałość narzędzi kuźniczych.

Czynniki te związane są z:

- narzędziem: rodzaj materiału, technologia wykonania, kształt, konstrukcja, jakość wykonania;
- odkuwką: materiał, kształt, temperatura początkowa przedkuwki, jakość powierzchni, tolerancja wymiarowa;
- eksploatacją: parametry procesu, rodzaj maszyny, technologia kucia.

Obecnie najbardziej popularną metodą poprawy trwałości jest modyfikacja warstwy wierzchniej, gdzie obecnie duże perspektywy dają metody hybrydowe, polegających na zastosowaniu dwóch lub więcej technik inżynierii powierzchni. Dzięki połączeniu i wzajemnemu oddziaływaniu różnych technologii można uzyskać właściwości warstwy wierzchniej nieosiągalne przy zastosowaniu tych technik oddzielnie.

## PODZIĘKOWANIA

Badania zostały sfinansowane przez Narodowe Centrum Nauki projekt nr 2011/01/B/ST8/02056.

Based on analysis of destructive mechanisms and tool working conditions in semi-hot and hot forging processes, three groups of factors with an influence on the lifetime of forging tools can be distinguished.

These factors are related to:

- the tool: type of material, manufacturing technology, shape, design, quality of workmanship;
- the forging: material, shape, initial preform temperature, surface quality, dimensional tolerance;
- the forging process: process parameters, type of machine, forging technology.

Currently, the most popular method of improving lifetime is surface layer modification, and hybrid methods based on the application of two or more surface engineering techniques have great potential in this area. Thanks to the combination and reciprocal interaction of different technologies, properties of the surface layer that are not attainable when these techniques are applied separately can be achieved.

## ACKNOWLEDGEMENTS

Research has been financed by the National Science Centre, project no. 2011/01/B/ST8/02056.



## LITERATURA

- [1] Sińczak Jan, 2007. *Kucie dokładne*. Kraków: Uczelniane Wydaw. Nauk.-Dydakt. AGH
- [2] Brucelle, Olivier, Bernhart, Gerard. 1999. „Methodology for service life increase of hot forging tools.” *Journal of Materials Processing Technology* 87 (1): 237-246.
- [3] Kocańda, Andrzej. 2003. „Określenie trwałości narzędzia w obróbce plastycznej metali.” *Informatyka w Technologii Metali*, edited by Piela Antoni, Grosman Franciszek, Kusiak Jan and Pietrzyk Maciej, 213-256. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej.
- [4] Ryuichiro, E., Katsuaki, K. 2008 „Failure analysis of hot forging dies for automotive components”. *Engineering, Failure Analysis* 15: 881–893.
- [5] Gronostajski, Zbigniew, Hawryluk, Marek, Zwierzchowski, Maciej, Kaszuba Marcin, Marciniak Marcin. 2011. „Analiza zmęczenia cieplnego stali WCLV stosowanej na matryce do kucia na gorąco.” *Rudy i Metale Nieżelazne* 56 (11): 654-660
- [6] Ryuichiro, Ebara, Katsuaki, Kubota. 2008. „Failure analysis of hot forging dies for automotive components.” *Engineering, Failure Analysis* 15: 881–893.
- [7] Gronostajski, Zbigniew, Hawryluk, Marek, Zwierzchowski Maciej, Kaszuba Marcin, Niechajowicz Adam. 2011. „Opis zjawisk zużycia matryc do kucia na gorąco tarczy do skrzyni biegów”. *Hutnik-Wiadomości Hutnicze* 78 (8): 607-611.
- [8] Smolik, Jerzy. 2007. *Rola warstw hybrydowych typu warstwa azotowana/powłoka PVD w procesie zwiększania trwałości matryc kuźniczych*. Radom: WITE.
- [9] Klimpel, Andrzej, 1999. *Technologie napawania i natryskiwania cieplnego*. Gliwice : WPS.
- [10] Meller, Artur, Legutko, Stanisław, Smolik, Jerzy. 2010. „Badanie wpływu warstw hybrydowych na trwałość matryc do kucia na gorąco.” *Archiwum Technologii Maszyn i Automatykacji* 30 (4): 199-211.
- [11] Starzyński, Grzegorz. 2002. „Warstwa wierzchnia i jej modelowanie.” Paper presented at VIII Seminarium Szkoleniowe nt. „Nieniszczące badania materiałów”, Zakopane.
- [12] Smolik, Jerzy, Mazurkiewicz, Adam, Walkowicz, Jan. 2008. „Aplikacje hybrydowych technologii inżynierii powierzchni w praktyce przemysłowej.” Paper presented at Zebranie Komitetu Nauki o Materiałach – Polskiej Akademii Nauk, Radom, October 13.
- [13] Kwaśny, Waldemar. 2009. *Prognozowanie własności powłok PVD i CVD na podstawie wielkości fraktalnych opisujących ich powierzchnie*, Gliwice: International OCSCO World Press.

## REFERENCES

- [1] Sińczak Jan, 2007. *Kucie dokładne*. Kraków: Uczelniane Wydaw. Nauk.-Dydakt. AGH
- [2] Brucelle, Olivier, Bernhart, Gerard. 1999. „Methodology for service life increase of hot forging tools.” *Journal of Materials Processing Technology* 87 (1): 237-246.
- [3] Kocańda, Andrzej. 2003. „Określenie trwałości narzędzia w obróbce plastycznej metali.” *Informatyka w Technologii Metali*, edited by Piela Antoni, Grosman Franciszek, Kusiak Jan and Pietrzyk Maciej, 213-256. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej.
- [4] Ryuichiro, E., Katsuaki, K. 2008 „Failure analysis of hot forging dies for automotive components”. *Engineering, Failure Analysis* 15: 881–893.
- [5] Gronostajski, Zbigniew, Hawryluk, Marek, Zwierzchowski, Maciej, Kaszuba Marcin, Marciniak Marcin. 2011. „Analiza zmęczenia cieplnego stali WCLV stosowanej na matryce do kucia na gorąco.” *Rudy i Metale Nieżelazne* 56 (11): 654-660
- [6] Ryuichiro, Ebara, Katsuaki, Kubota. 2008. „Failure analysis of hot forging dies for automotive components.” *Engineering, Failure Analysis* 15: 881–893.
- [7] Gronostajski, Zbigniew, Hawryluk, Marek, Zwierzchowski Maciej, Kaszuba Marcin, Niechajowicz Adam. 2011. „Opis zjawisk zużycia matryc do kucia na gorąco tarczy do skrzyni biegów”. *Hutnik-Wiadomości Hutnicze* 78 (8): 607-611.
- [8] Smolik, Jerzy. 2007. *Rola warstw hybrydowych typu warstwa azotowana/powłoka PVD w procesie zwiększania trwałości matryc kuźniczych*. Radom: WITE.
- [9] Klimpel, Andrzej, 1999. *Technologie napawania i natryskiwania cieplnego*. Gliwice : WPS.
- [10] Meller, Artur, Legutko, Stanisław, Smolik, Jerzy. 2010. „Badanie wpływu warstw hybrydowych na trwałość matryc do kucia na gorąco.” *Archiwum Technologii Maszyn i Automatykacji* 30 (4): 199-211.
- [11] Starzyński, Grzegorz. 2002. „Warstwa wierzchnia i jej modelowanie.” Paper presented at VIII Seminarium Szkoleniowe nt. „Nieniszczące badania materiałów”, Zakopane.
- [12] Smolik, Jerzy, Mazurkiewicz, Adam, Walkowicz, Jan. 2008. „Aplikacje hybrydowych technologii inżynierii powierzchni w praktyce przemysłowej.” Paper presented at Zebranie Komitetu Nauki o Materiałach – Polskiej Akademii Nauk, Radom, October 13.
- [13] Kwaśny, Waldemar. 2009. *Prognozowanie własności powłok PVD i CVD na podstawie wielkości fraktalnych opisujących ich powierzchnie*, Gliwice: International OCSCO World Press.

[14] Ciski, Aleksander, Nakonieczny Aleksander, Babul, Tomasz. 2009. „Badanie możliwości połączenia technologii długookresowego wymrażania i kulowania stali narzędziowej do pracy na gorąco W300, *Inżynieria Powierzchni* 2: 3-9.

[14] Ciski, Aleksander, Nakonieczny Aleksander, Babul, Tomasz. 2009. „Badanie możliwości połączenia technologii długookresowego wymrażania i kulowania stali narzędziowej do pracy na gorąco W300, *Inżynieria Powierzchni* 2: 3-9.