



Analiza przyczyn występowania nagłych uszkodzeń narzędzi kuźniczych

Analysis of the causes of rapid damage of forging tools

(1) Marek Hawryluk*, (2) Paweł Widomski, (3) Jacek Ziemba

Politechnika Wroclawska, Wydział Mechaniczny, Katedra Obróbki Plastycznej i Metrologii, ul. Łukasiewicza 5, 50-371 Wrocław, Poland

Informacje o artykule

Data przyjęcia: 4.01.2017
Data recenzji: 13.02.2017
Data akceptacji: 31.03.2017

Wkład autorów

- (1) Główny autor koncepcji, założeń, metod i przeprowadzonych badań
- (2) Autor koncepcji, założeń, metod, przeprowadzonych badań i przygotowania artykułu
- (3) Autor przeprowadzonych badań

Streszczenie

Artykuł dotyczy analizy przyczyn występowania przedwczesnych uszkodzeń i awarii matryc i stempli we wczesnym etapie ich eksploatacji, w odróżnieniu od „typowego”, przewidywalnego i postępującego zużycia narzędzi i oprzyrządowania kuźniczego. Obecnie w Europie i na świecie prowadzi się liczne badania zmierzające do podniesienia trwałości narzędzi kuźniczych. Trwałość najczęściej określana jest liczbą wyprodukowanych przez dane narzędzie, prawidłowych pod względem geometrycznym i jakościowym, odkuwek. Przyjmuje się, że w przypadku narzędzi stosowanych w procesach kucia na gorąco średnia trwałość wynosi około 5000 odkuwek, a czynniki i mechanizmy powodujące skrócenie czasu eksploatacji są dosyć dobrze przeanalizowane. Natomiast w literaturze przedmiotu niewiele miejsca poświęca się przedwczesnym uszkodzeniom oprzyrządowania kuźniczego. Przedstawiona w pracy analiza licznych takich przypadków, a także doświadczenia autorów wskazują, że najczęstszą przyczyną nagłej awarii są problemy związane z niewłaściwą obróbką cieplną (38%), obróbką mechaniczną powierzchni narzędzi (21%), materiałem narzędziowym (16%), błędami wynikającymi z niewłaściwego przygotowania narzędzi do eksploatacji (15%), nieodpowiednio opracowaną technologią kucia (6%) oraz inne przyczyny (4%). Należy podkreślić, że istotny wpływ na przedwczesne zużycie ma także czynnik ludzki, który niejednokrotnie w sposób świadomy lub nieświadomy przyczynia się do wystąpienia nieoczekiwanego zdarzenia powodującego nagłe uszkodzenie lub inną nieprzewidzianą awarię. Przedstawiona analiza ma przyczynić się do rozpoznania przyczyn tego rodzaju uszkodzeń oraz do skutecznej ich eliminacji.

Słowa kluczowe: kucie matrycowe, przedwczesne zużycie, trwałość, eksploatacja

Article info

Received: 4.01.2017
Reviewed: 13.02.2017
Accepted: 31.03.2017

Authors' contribution

- (1) The lead author of the concept, assumptions, methods and research
- (2) The author of the concept, assumptions, methods, research and preparation of the article
- (3) The author of the performed research

Abstract

The article presents an analysis of the causes of the occurrence of premature damage and failure of dies and punches at an early stage of operation, as compared to the “typical”, predictable and proceeding wear of forging tools. At present, in Europe and the world, numerous studies are being performed aiming at increasing the durability of forging tools. The latter is usually determined by the number of forgings properly produced by the given tool in respect of geometry and quality. It is assumed that, in the case of tools used in hot forging processes, the average tool life is about 5000 forgings, and the factors and mechanisms shortening the operation time have been quite well analyzed. In turn, the subject literature provides little information on preliminary damage of forging instrumentation. An analysis of such numerous cases presented in the study as well as the authors' experience point to the fact that the most common cause of rapid failure are problems connected with inappropriate thermal treatment (38%), improper mechanical treatment of tool surfaces (21%), faulty tool material (16%), errors resulting from the tools' improper preparation for work (15%), inappropriately elabora-

* Autor do korespondencji. Tel.: +48 71 320 21 64; e-mail: marek.hawryluk@pwr.edu.pl

* Corresponding author. Tel.: +48 71 320 21 64; e-mail: marek.hawryluk@pwr.edu.pl

ted forging technology (6%) and others (4%). It should be emphasized that preliminary wear is also significantly affected by the human factor, which, often, consciously or unconsciously, contributes to the occurrence of an unexpected event causing rapid damage or failure. The presented analysis aims at contributing to the recognition of the causes of such type of damage as well as their effective elimination.

Keywords: *die forging, premature wear, durability, exploitation*

1. WSTĘP

Narzędzia kuźnicze, stosowane w procesach kucia matrycowego na gorąco, cechują się niestabilną i stosunkowo niską trwałością, co z kolei w sposób znaczący wpływa na jakość i koszt wykonania odkuwek. Niska trwałość narzędzi spowodowana jest ekstremalnymi warunkami eksploatacyjnymi panującymi w przemysłowych procesach kucia na gorąco, wynikającymi z jednoczesnego występowania wielu złożonych zjawisk i mechanizmów destrukcyjnych. Stanowi ona trudny i nierozwiązany problem zarówno pod względem naukowym, jak i ekonomicznym [1].

Trwałością narzędzia, z produkcyjnego „punktu widzenia”, określa się najczęściej liczbę wyprodukowanych odkuwek spełniających wymagania dotyczące zakładanej geometrii, właściwości oraz jakościowe, wytworzonych przy użyciu danego narzędzia. Natomiast z naukowego punktu widzenia, trwałość narzędzia wiąże się z jego odpornością na czynniki niszczące występujące podczas pracy [1]. W tym przypadku istotna jest obiektywna ocena i analiza mechanizmów niszczących, które powodują zużycie lub zniszczenie narzędzia.

W dostępnej literaturze można znaleźć informacje dotyczące trwałości narzędzi kuźniczych, z których wynika, że statystycznie 70% matryc kuźniczych zostaje wycofana z produkcji z powodu utraty wymiarów – wskutek zużycia ściernego [2, 3] i odkształcenia plastycznego, a 25% w wyniku pęknięć zmęczeniowych i jedynie 5% z innych powodów, jak: nieprzestrzeganie technologii, wady konstrukcyjne, materiałowe lub wady obróbki cieplnej i cieplno-chemicznej itp. [4]. Zużycie i zniszczenie narzędzi podczas kucia na gorąco stanowi znaczący udział w kosztach produkcji stanowiąc nawet 8–15% całkowitych kosztów produkcji, a w skrajnych przypadkach, przy małych seriach produkcyjnych, nawet 30%. W rzeczywistości, uwzględniając czas

1. INTRODUCTION

Forging tools used in hot die forging processes characterize in unstable and relatively low durability, which, in turn, significantly affects their quality and the cost of producing the forgings. The low tool quality is caused by the extreme operation conditions present in the industrial hot forging processes, resulting from a simultaneous occurrence of many complex destruction phenomena and mechanisms. It constitutes a difficult and unsolved problem, both in respect of science and economy [1].

Tool life, from the production point of view, usually refers to the number of forgings which fulfill the requirements of the assumed geometry, properties and quality, produced by the given tool. From the scientific point of view, in turn, durability of the tools is connected with its resistance to destructive factors present during their operation [1]. In this case, it is important to perform an objective evaluation and analysis of the destructive mechanisms which cause wear or degradation of the tool.

The available literature provides information on the durability of forging tools, from which it can be inferred that, statistically, 70% of forging dies is removed from production due to the loss of dimensions as a result of abrasive wear [2, 3] and plastic deformation, 25% – because of fatigue cracks and only 5% for other reasons, such as: disregard of technology, construction faults, material defects or faults of thermal and thermo-mechanical treatment [4]. The wear and destruction of tools during hot forging processes constitutes a large part of the production costs. At present, it is estimated that the tool costs can equal as much as 8–15% of the total production costs, while reaching even 30% in extreme cases, with small production series. In

czas potrzebny na wymianę wyeksploatowanego oprzyrządowania lub w przypadku nieoczekiwanego zniszczenia narzędzi, koszty te mogą wzrosnąć nawet do 40%. Zużywanie się narzędzi w istotny sposób wpływa także na obniżenie jakości wytwarzanych odkuwek.

Mimo że trwałość narzędzi jest problemem złożonym, to wydaje się, iż czynniki oraz mechanizmy powodujące skrócenie czasu eksploatacji oprzyrządowania kuźniczego są dosyć dobrze znane. Ponadto, ciągła konkurencja na rynku wymusza od producentów wyrobów kutych stałe obniżanie kosztów oraz wytwarzanie odkuwek o wysokiej jakości, co powoduje duże zainteresowanie problemem zwiększenia trwałości narzędzi [3, 4, 6]. Natomiast w literaturze przedmiotu niewiele miejsca poświęca się przedwczesnym, nagłym uszkodzeniom oprzyrządowania kuźniczego. Dlatego uzasadniona jest analiza dominujących przyczyn występowania uszkodzeń narzędzi kuźniczych we wczesnym etapie ich eksploatacji. Ich znajomość oraz podniesienie świadomości wśród technologów, konstruktorów, operatorów urządzeń kuźniczych przyczyni się do częściowego ich wyeliminowania.

2. PRZEDWCZESNE ZUŻYCIE NARZĘDZI – ANALIZA STATYSTYCZNA

Oceniając trwałość narzędzi kuźniczych, należy wziąć pod uwagę przypadki nagłych uszkodzeń/zniszczenia matryc i stempli, rozumiane jako wystąpienie nieoczekiwanej, gwałtownej wady, powodującej wycofanie narzędzia i przerwanie produkcji, co ma miejsce najczęściej w początkowym etapie procesu kucia lub podczas krótkiej eksploatacji. Należy odróżnić nagłe zdarzenie od systematycznego, cyklicznego zużywania się bądź zniszczenia, wskutek typowych mechanizmów niszczących, występujących podczas typowej eksploatacji.

W tab. 1 przedstawiono zestawienie trwałości matryc kuźniczych, różnicę pomiędzy typowym zużyciem narzędzi (ich trwałością), a przedwczesnym ich uszkodzeniem (podczas eksploatacji za okres 20 miesięcy) stosowanych w wielooperacyjnym procesie kucia obudowy przegubu homokinetycznego [1].

reality, considering the time needed to replace the worn instrumentation or the case of unexpected tool damage, these costs can rise to as much as 40%. Tool wear also significantly lowers the quality of the produced forgings.

Despite the fact that tool life is a complex problem, it seems that the factors and mechanisms shortening the operation time of forging instrumentation are relatively well-known. Also, the continuous competitiveness on the market forces the producers of forged products to constantly lower the costs and produce high quality forgings, which raises the interest in the problem of increasing tool durability [3, 4, 6]. In turn, the literature provides little information on premature rapid damage of forging instrumentation. And so, it is justifiable to consider an analysis of the dominant causes of the occurrence of forging tool damage at an early stage of the tool operation. Knowing these causes and raising the awareness of technologists, constructors and operators of forging tools will contribute to their partial elimination.

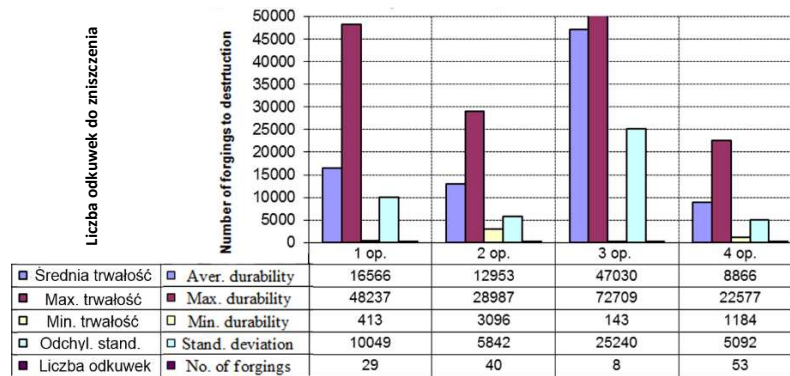
2. PREMATURE TOOL WEAR – STATISTICAL ANALYSIS

In the evaluation of forging tool durability, one should consider the case of sudden damage/destruction of dies and punches, understood as the occurrence of an unexpected, rapid defect, which causes removal of the tool and interruption in the production process, this taking place usually at the initial stage of forging or after a short time of operation. One should distinguish between a sudden event and progressive periodical wear or degradation as result of typical destruction mechanisms present during regular operation.

Tab. 1 presents a compilation of durability values of forging dies – the difference between the typical tool wear (durability) and the premature damage (during a 20-month period) – used in the multi-operation process of forging a constant velocity joint casing [1].

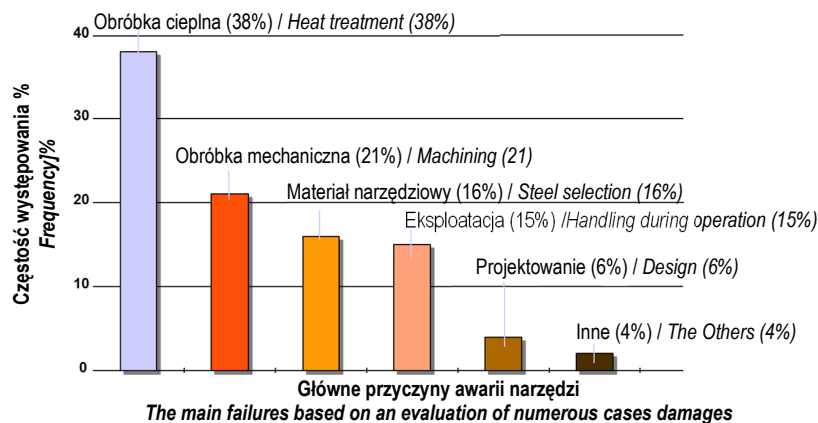
Tab. 1. Trwałość matryc w procesie kucia obudowy przegubu w kuźni GKN Driveline w Oleśnicy

Tab. 1. Durability of dies in the process of forging a constant velocity joint casing at the GKN Driveline in Oleśnica



Badania wykazały, że największą średnią trwałość matryc w analizowanym procesie mają narzędzia stosowane w trzeciej operacji kucia. Przy tej operacji występuje największe odchylenie standardowe, spowodowane z dużą różnicą pomiędzy maksymalną a minimalną zarejestrowaną trwałością przy czym w tym okresie wykorzystano jedynie 8 sztuk matryc. Podczas, gdy najniższą średnią trwałość, wynoszącą niespełna 9000 odkuwek, odnotowano dla czwartej operacji kucia; wyeksploatowano aż 53 narzędzia. Duży rozrzut wyników dla maksymalnej i minimalnej trwałości wskazuje, że istnieje kilka przyczyn przedwczesnego zużycia narzędzi, np: niewłaściwe wykonanie narzędzia (obróbka cieplna i mechaniczna), nieodpowiednia konstrukcja „zespołu narzędzi” oraz kształt wielokrotnie modyfikowanego wykroju (także przez autorów). Na rys. 1 przedstawiono zestawienie dotyczące częstotliwości najczęściej występujących przyczyn nagłego uszkodzenia narzędzi [1, 7].

The investigations showed that the highest average durability of dies in the analyzed process is exhibited by the tools used in the third forging operation. This operation involved the highest standard deviation, caused by the big difference between the recorded maximal and minimal durability, while, in this process, only 8 die items were used. The lowest average durability, equaling only 9000 forgings, was recorded for the fourth forging operation; as many as 53 tools were worn out. The high scatter or results for the maximal and minimal durability points to the existence of several causes of premature tool wear, such as: improper tool preparation (thermal and mechanical treatment), inappropriate construction of the “tool set” and the shape of repeatedly modified impression (also by the authors). Fig. 1 shows a compilation of the frequency of the most common causes of sudden tool damage [1, 7].



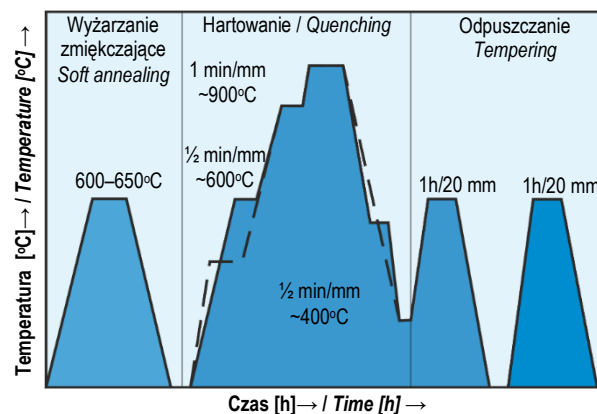
Rys. 1. Zestawienie danych statystycznych dotyczących przyczyn występowania nagłych uszkodzeń narzędzi kuźniczych [7]

Fig. 1. Compilation of statistical data concerning the causes of sudden damage of forging tools [7]

Przedstawione zestawienie, opracowane na podstawie analizy licznych przypadków uszkodzenia narzędzi w przemysłowych procesach kucia matrycowego na gorąco, wskazuje, że statystycznie najczęstszą przyczyną nagłej awarii jest niewłaściwa obróbka cieplna (38%), zła obróbka mechaniczna powierzchni narzędzi (21%), materiał narzędziowy (16%), błędy wynikające z niewłaściwego przygotowania narzędzi do eksploatacji (15%), nieodpowiednio opracowana technologia kucia (6%) oraz inne przyczyny (4%).

2.1. Nieprawidłowa obróbka cieplna

Obróbka cieplna większości materiałów stosowanych na narzędzia do obróbki plastycznej na gorąco złożona jest z trzech zasadniczych zabiegów: wyżarzania, hartowania oraz jedno-, dwu- lub trzykrotnego odpuszczania [6]. Niekiedy dla nowych gatunków stali narzędziowych tej grupy stosowane są dodatkowe zabiegi, pozwalające na uzyskanie jeszcze lepszych własności (np. w przypadku stali Thermodur 1.2999 stosowany jest przetop elektrożuźlowy). Na rys. 2 przedstawiono wykres przebiegu obróbki cieplnej dla narzędzi wykonanych ze stali narzędziowej do pracy na gorąco.



Rys. 2. Przebieg procesu obróbki cieplnej stali narzędziowych do pracy na gorąco, wysokostopowych [8]

Fig. 2. Course of thermal treatment of high-alloy tool steels for hot operations [8]

Nagrzewanie do temperatury austenitowania narzędzi o dużych wymiarach prowadzi się stopniowo z małymi szybkościami celem zmniejszenia naprężeń cieplnych, mogących spowodować ich pęknięcie. Czas austenitacji narzędzi o dużych wymiarach może dochodzić do kilku

The presented compilation, elaborated based on the analysis of numerous cases of tool damage in the industrial hot die forging processes, suggest that, statistically, the most common causes of rapid failure are: inappropriate thermal treatment (38%), poor mechanical treatment of the tool surface (21%), tool material (16%), errors resulting from improper tool preparation (15%), inappropriately elaborated forging technology (6%) and others (4%).

2.1. Improper thermal treatment

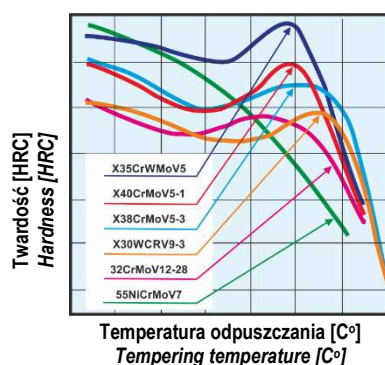
Thermal treatment of most materials used for tools working in hot plastic treatment operations consists of three basic procedures: annealing, quenching and one-, two- or three-fold tempering [6]. Sometimes, for new types of tool steels in this group, additional procedures are performed, which makes it possible to obtain even better properties (e.g. in the case of Thermodur 1.2999 steel, when electroslag remelting is applied). Fig. 2 shows a diagram of the course of thermal treatment for tools made of tool steel for hot operations.

Heating large size tools to the austenitization temperature is conducted gradually at low rates in order to reduce thermal stresses, which may cause cracking. The austenitization time of large size tools can reach a few hours. The austenitization temperature depends on the chemical composition of steel.

godzin. Temperatura austenitowania uzależniona jest od składu chemicznego stali. Dla stali niskostopowych wynosi 900–1050°C, wysokostopowych 1120–1150°C i jest dobierana tak, aby nie dopuścić do nadmiernego rozrostu ziaren austenitu pierwotnego, gdyż powoduje to zmniejszenie ciągliwości stali. Odpowiednio dobrane warunki austenitowania zapewniają uzyskanie po hartowaniu struktury martenzytu listwowego, nasyconego pierwiastkami stopowymi i węglem, co umożliwia podczas odpuszczania wydzielanie węglików stopowych (M_4C_3 , M_2C oraz M_7C_3), powodujących efekt twardości wtórnej [8].

Chłodzenie stali narzędziowych przeprowadza się najczęściej w oleju lub powietrzu. Czasami w celu uniknięcia odwęglenia i utlenienia powierzchni obróbkę cieplną przeprowadza się w piecach z atmosferą ochronną. Wtedy do chłodzenia można zastosować przedmuch azotem.

Bezpośrednio po schłodzeniu narzędzi do temperatury około 80–200°C przeprowadza się proces odpuszczania. W przypadku stali narzędziowych do pracy na gorąco, w celu ułatwienia przemiany austenitu szczytkowego, stosuje się najczęściej kilkukrotne odpuszczanie w temperaturze zbliżonej do temperatury efektu twardości wtórnej. Temperatura ta jest uzależniona od składu chemicznego stali. Na rys. 3 przedstawiono wpływ temperatury odpuszczania na twardość wybranych gatunków stali.



Rys. 3. Wpływ temperatury odpuszczania na twardość stali narzędziowych do pracy na gorąco [8]

Fig. 3. Effect of tempering temperature on the hardness of tool steels for hot operations [8]

Ponadto temperatura odpuszczania powinna być wyższa od temperatury pracy narzędzi [8].

Po prawidłowo przeprowadzonej obróbce cieplnej, struktura stali narzędziowej do pracy na gorąco składa się z martenzytu odpuszczonego oraz drobno dyspersyjnych, równomiernie roz-

For low-alloy steels, it equals 900–1050°C, and for high-alloy steels – 1120–1150°C and it is selected in a way preventing excessive growth of the primary austenite grains, as this reduces the ductility of steel. Properly selected austenitization conditions ensure that a lath martensite structure is obtained after the quenching, which is saturated with alloy elements and carbon, thus ensuring the precipitation of alloy carbides (M_4C_3 , M_2C and M_7C_3) during the tempering, causing the effect of secondary hardness [8].

The cooling of tool steel is usually performed in oil or air. Sometimes, in order to avoid decarburization and deoxidization of the surface, the thermal treatment is conducted in furnaces with a protective atmosphere, when nitrogen blow-through is applied for the cooling process.

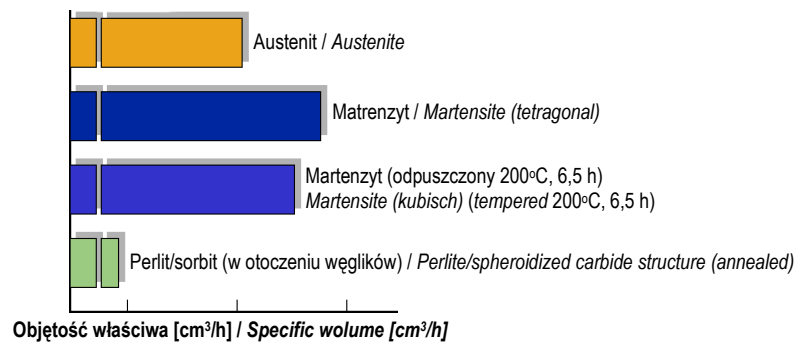
Directly after the tools have been cooled to about 80–200°C, the tempering process is performed. In the case of tool steels for hot operations, in order to facilitate the transformation of retained austenite, repeated tempering at the temperature similar to that of the secondary hardness effect is usually applied. This temperature depends on the chemical composition of steel. Fig. 3 shows the effect of the tempering temperature on the hardness of selected types of steel.

Also, the tempering temperature should be lower than the tool operation temperature [8].

After a properly performed thermal treatment, the structure of the tool steel for hot operations consists of tempered martensite and fine dispersive, uniformly distributed carbides as well as larger,

mieszczonych węglików oraz większych, skoagulowanych węglików, nierozpuszczonych podczas austenitizacji. Błędy obróbki cieplnej narzędzi wynikają najczęściej z niedotrzymania założonych parametrów technologicznych procesu. Czasami jednak mogą wynikać z nieprawidłowo przeprowadzonych procesów metalurgicznych [6, 7, 8]. Na rys. 4 przedstawiono orientacyjny udział objętości właściwych typowych faz występujących w stali narzędziowej do pracy na gorąco po prawidłowo przeprowadzonej obróbce cieplnej.

coagulated carbides, not dissolved during the austenitization. The errors of the tools' thermal treatment usually result from unfulfilled technological parameters of the process. Sometimes, however, they can be a consequence of improperly conducted metallurgical processes [6, 7, 8]. Fig. 4 shows approximate volume fractions of typical phases present in tool steel for hot operations after appropriate thermal treatment.



Rys. 4. Udziały objętości właściwych typowych faz występujących w stali narzędziowej o zawartości węgla 0,35–0,5% [9]

Fig. 4. Volume fractions of typical tool steels with carbon content 0,35–0,5% [9]

W tab. 2 przedstawiono najczęściej występujące błędy technologiczne w obróbce cieplnej i spowodowane nimi wady narzędzi.

Tab. 2 shows the most common technological errors in thermal treatment and the tool defects caused by them.

Tab. 2. Najczęściej występujące błędy technologiczne w obróbce cieplnej i spowodowane nimi wady narzędzi [9]

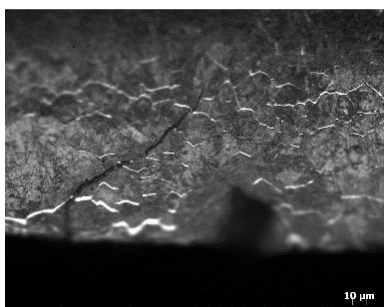
Tab. 2. Common technological errors in thermal treatment and the related tool defects [9]

Zabieg technologiczny obróbki cieplnej narzędzi <i>Technological procedure of tool thermal treatment</i>	Urządzenie do obróbki cieplnej <i>Thermal treatment device</i>	Błędy technologiczne podczas obróbki cieplnej narzędzi <i>Technological errors during tool thermal treatment</i>	Wady narzędzi obrobionych cieplnie <i>Defects of thermally treated tools</i>
Podgrzewanie do hartowania <i>Heating to quenching</i>	Piecze z atmosferą ochronną, sole kąpielowe lub zwykłe bez atmosfery ochronnej <i>Furnaces with protective atmosphere, bath salts or regular, without protective atmosphere</i>	Za duża szybkość podgrzewania <i>Excessive heating rate</i>	Paczenie się lub pęknięcie <i>Warping or cracking</i>
Wyrzwanie w temperaturze hartowania <i>Annealing at quenching temperature</i>		Brak atmosfery ochronnej, zużyta zanieczyszczona kąpiel solna, złe zabezpieczenie przed atmosferą utleniającą <i>Lack of protective atmosphere, impure, used up salt bath, poor protection from oxidizing atmosphere</i>	Odwęglanie i utlenianie powierzchni <i>Surface decarburization and oxidation</i>
Wyrzwanie w temperaturze hartowania <i>Annealing at quenching temperature</i>	Piecze z atmosferą ochronną, sole kąpielowe lub zwykłe bez atmosfery ochronnej <i>Furnaces with protective atmosphere, bath salts or regular, without protective atmosphere</i>	Za niska temperatura lub za niski czas austenitizowania <i>Too low temperature or too short austenitization time</i>	Zbyt małe nasycenie austenitu pierwiastkami stopowymi i węglem, niskie właściwości wytrzymałościowe, niska odporność na odpuszczanie <i>Too low austenite saturation with alloy elements and carbon, low strength properties, low tempering resistance</i>

Zabieg technologiczny obróbki cieplnej narzędzi <i>Technological procedure of tool thermal treatment</i>	Urządzenie do obróbki cieplnej <i>Thermal treatment device</i>	Błędy technologiczne podczas obróbki cieplnej narzędzi <i>Technological errors during tool thermal treatment</i>	Wady narzędzi obrobionych cieplnie <i>Defects of thermally treated tools</i>
Wyrzewanie w temperaturze hartowania <i>Annealing at quenching temperature</i>	Piece z atmosferą ochronną, sole kąpielowe lub zwykłe bez atmosfery ochronnej <i>Furnaces with protective atmosphere, bath salts or regular, without protective atmosphere</i>	Za wysoka temperatura lub za długi czas austenitzowania <i>Too high temperature or too long austenitization time</i>	Nadmierny rozrost ziaren austenitu pierwotnego związane z tym zmniejszenie właściwości plastycznych i uderzeniowych <i>Excessive growth of primary austenite grains and related decrease of plastic and impact strength properties</i>
Chłodzenie po austenitzowaniu <i>Cooling after austenitization</i>	Wanny hartownicze z cieczami chłodzącymi, kąpiele solne, specjalne urządzenia do chłodzenia <i>Quenching tanks with cooling agents, salt baths, special cooling devices</i>	Zbyt duża szybkość chłodzenia, niewłaściwy sposób zanurzenia <i>Too high cooling rate, improper way of submersion</i>	Paczenie się i pękanie <i>Warping and cracking</i>
		Za duża szybkość chłodzenia, niewłaściwa temperatura lub czas wytrzymania przy chłodzeniu izotermicznym <i>Too high cooling rate, improper temperature or holding time during isothermal cooling</i>	Obniżone właściwości użytkowe <i>Lowered functional properties</i>
Odpuszczanie <i>Tempering</i>	Piece z atmosferą ochronną, kąpiele solne lub zwykła bez atmosfery ochronnej <i>Furnaces with protective atmosphere, salt baths or regular, without protective atmosphere</i>	Za duża szybkość podgrzewania <i>Too high heating rate</i>	Paczenie się i pękanie <i>Warping and cracking</i>
		Niedotrzymanie założonego czasu i temperatury odpuszczania <i>Disregard of predetermined tempering time and temperature</i>	Obniżone właściwości użytkowe <i>Lowered functional properties</i>

Przykładem wady powstałej wskutek nieprawidłowo przeprowadzonej obróbki cieplnej może być pęknięcie przebiegające po granicach ziaren, ujawnione na powierzchni narzędzia poddanego azotowaniu gazowemu (rys. 5).

An example of a defect caused by improperly performed thermal treatment can be a crack running along the grain boundaries, revealed on the tool surface which underwent gas nitriding (Fig. 5).



Rys. 5. Niewłaściwa obróbka cieplna – pęknięcie, powstałe po granicach ziaren, ujawnione na powierzchni narzędzia po azotowaniu

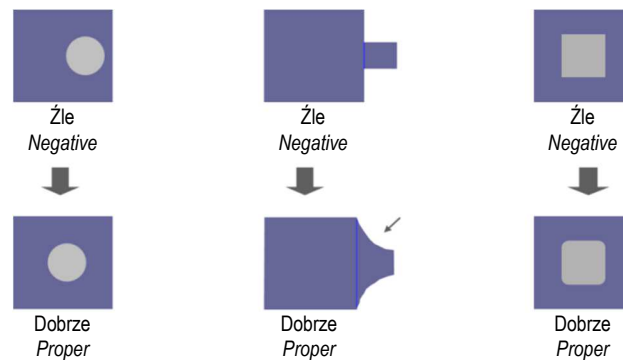
Fig. 5. Improper thermal treatment – a crack along grain boundaries revealed on tool surface after nitriding

Najwięcej przypadków nagłych uszkodzeń narzędzi kuźniczych związanych z obróbką cieplną wynika z nieodpowiedniego kształtu elementu poddanego ulepszeniu cieplnemu.

A majority of cases of rapid damage of forging tools related to thermal treatment result from an improper shape of the element which undergoes thermal improvement. Fig. 6 shows

Na rys. 6 przedstawiono przykłady niepoprawnie przyjętych kształtów oraz odpowiadające im poprawne rozwiązania.

examples of improperly assumed shapes and the corresponding correct solutions.



Rys. 6. Przykłady niewłaściwie/właściwie przyjętych kształtów elementów poddanych obróbce cieplnej

Fig. 6. Examples of properly/improperly assumed shapes of elements undergoing thermal treatment

Szczegółowe informacje dotyczące doboru optymalnych kształtów oraz zalecanych właściwych promieni w elementach poddanych obróbce cieplnej znaleźć można w normie DIN 17022-1. Na rys. 7 przedstawiono zdjęcia dolnej płyty stołowej, wykonanej ze stali WNLV, stosowanej do kucia (pod młotami) dużych odkuwek osiowosymetrycznych.

Detailed information concerning the selection of optimal shapes and the recommended proper radii in the elements which undergo thermal treatment can be found in the standard DIN 17022-1. Fig. 7 shows images of the lower table top, made from WNLV steel, used for the forging (with hammers) of large axisymmetric forgings.



Rys. 7. Zdjęcia dolnej płyty stołowej, wykonanej ze stali WNLV, stosowanej do kucia (na biało zaznaczono linie pęknięć oraz miejsca ich występowania)

Fig. 7. Images of lower table top made from WNLV steel, used for forging (crack lines and their locations marked in white)

Zdjęcia uszkodzonej płyty stołowej, poddanej obróbce cieplnej wykazują pęknięcia hartownicze spowodowane niewłaściwym kształtem przejść (ostre krawędzie, zamiast promieni).

The images of a damaged table top which underwent thermal treatment show quenching cracks caused by an improper shape of the transitions (sharp edges instead of radii).

2.2. Uszkodzenia spowodowane obróbką mechaniczną

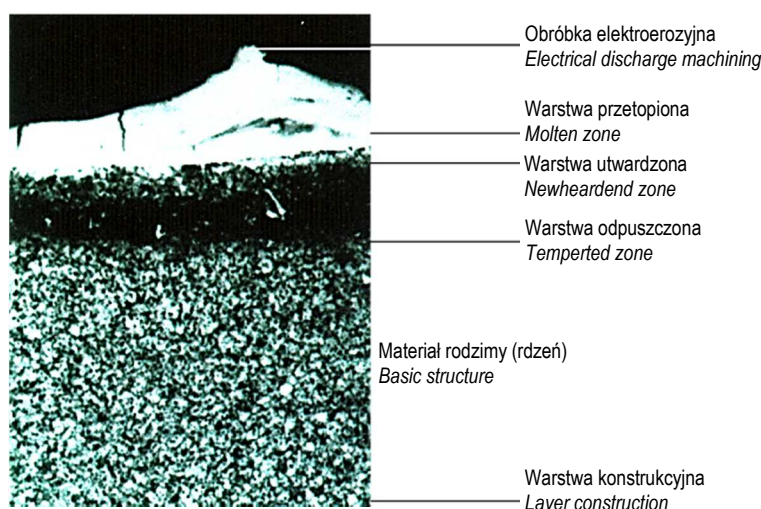
2.2. Damage caused by mechanical treatment

Drugą (co do częstości występowania) przyczyną powodującą przedwczesne uszkodzenie

The second most common cause of premature tool damage is improperly performed mechanical

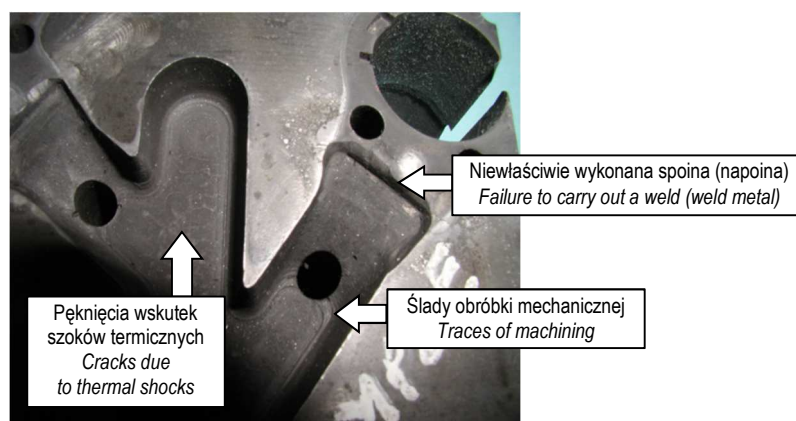
narzędzi jest niewłaściwie przeprowadzona obróbka mechaniczna. Może ona dotyczyć obróbki skrawaniem, obróbki elektroerozyjnej lub wykańczania powierzchni. W erozyjnym kształtowaniu elektrodoą może dojść do niekontrolowanego rozwoju strefy wpływu ciepła, co sprzyja występowaniu warstw materiału o zróżnicowanej twardości, powodując pęknięcie (rys. 8). Również podczas nieprawidłowo przeprowadzonej regeneracji matryc metodami spawalniczymi lub napawaniem regeneracyjnym (rys. 9) może dojść do lokalnego przegrzania i pęknięcia matrycy [7].

treatment. It can refer to machining, electro-machining or surface finishing. In the erosive electrode shaping, an uncontrolled development of the heat zone can occur, which favours the presence of material layers of diversified hardness, thus causing cracking (Fig. 8). Also during improperly performed die regeneration by means of welding methods or rebuilding (Fig. 9), one can observe local overheating and cracking of the dies [7].



Rys. 8. Warstwy materiału po obróbce elektroerozyjnej

Fig. 8. Layers of material after electromachining



Rys. 9. Wady matrycy po regeneracji metodami spawalniczymi

Fig. 9. Die defects after welding regeneration

2.3. Uszkodzenia wynikające z wad materiałowych narzędzi

W przypadku materiału narzędziowego, poza jego doбором niebagatelną rolę odgrywają wady metalurgiczne, których wykrycie jest

2.3. Damage caused by tool material faults

In the case of the tool material, next to its selection, metallurgical faults also play an important role, and their detection is difficult. Du-

utrudnione. Przy projektowaniu narzędzi zakłada się, że struktura wewnętrzna materiału jest jednorodna. Niestety w materiałach występują liczne nieciągłości takie jak pory, zanieczyszczenia, mikropęknięcia i rozwarstwienia, które są przyczyną nagłego rozwoju pęknięć niszczących matryce. Na rys. 10 przedstawiono typowe wady pochodzenia metalurgicznego ujawnione podczas produkcji wkładek matrycowych.



a)



b)

Rys. 10. Wady materiału pochodzenia „metalurgicznego”: a) pęknięcia, b) „pustki”, porowatość

Fig. 10. Metallurgical faults of material: a) cracks, b) „voids”, porosity

2.4. Błędy wynikające z niewłaściwego przygotowania narzędzi do eksploatacji

Istotną rolę, w przypadku nagłych awarii narzędzi, stanowią także warunki eksploatacji (aż 15% nieoczekiwanych uszkodzeń), co w wielu przypadkach jest związane z nieprzestrzeganiem podstawowych zaleceń technologicznych. Występują awarie wynikające z prostych błędów, czyli: niewłączenie smarowania, niedogrzanie do założonej temperatury materiału wsadowego bądź narzędzia (rys. 11), nieodpowiednie ustawienie narzędzia tzw. „otwarcia” matrycy itp.

2.4. Errors caused by improper tool preparation

An important role, in the case of sudden tool failures, is also played by the operation conditions (as much as 15% of unexpected damage cases), which is often connected with disregard of the basic technological guidelines. The failures are caused by simple errors, such as: deactivated lubrication, insufficient heating to the assumed charge material or tool temperature (Fig. 11), improper adjustment of the so-called “opening” of the dies etc.

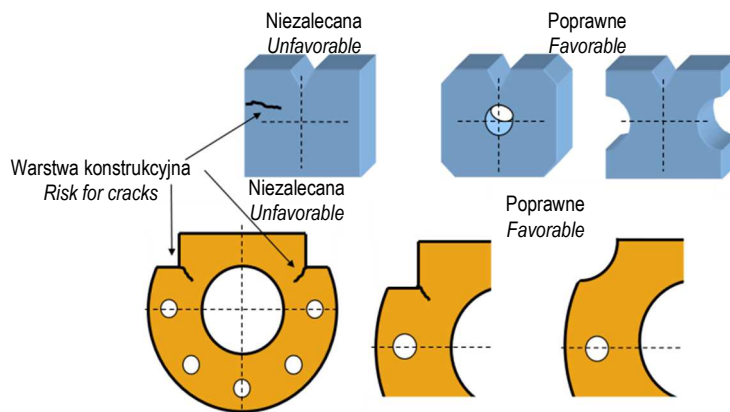


Rys. 11. Kruche pęknięcie matrycy wielowykrojowej – brak wstępnego podgrzania, koncentracja naprężeń

Fig. 11. Brittle cracking of a multi-impession die – lack of preliminary heating, stress concentration

2.5. Awarie spowodowane błędami konstrukcyjnymi narzędziami

Błędy popełnione przy projektowaniu narzędzi są przyczyną gwałtownych uszkodzeń (około 6%). Na rys. 12 przedstawiono przykłady niewłaściwie zaprojektowanych kształtów narzędzi.



Rys. 12. Przykłady zalecanych i niezalecanych kształtów narzędzi
Fig. 12. Examples of recommended and unrecommended tool shapes



Rys. 13. Uszkodzenie narzędzia kuźniczego wskutek niewłaściwej konstrukcji
Fig. 13. Forging tool damage caused by improper construction

Nieodpowiedni kształt lub konstrukcja może doprowadzić do natychmiastowego uszkodzenia narzędzia w wyniku koncentracji naprężeń lub niekorzystnego rozkładu obciążenia podczas procesu kucia (rys. 13).

Podobne skutki może spowodować zbyt duża objętość wsadu przy kuciu w matrycach zamkniętych oraz dobór niewłaściwej siły nacisku prasy lub zastosowania zbyt małego luzu na wypływkę w matrycach otwartych.

2.5. Failure caused by tool construction errors

Errors occurring during tool design are the cause of rapid damage (about 6%). Fig. 12 shows examples of improperly designed tool shapes.

An improper shape or construction can lead to immediate tool damage as a result of stress concentration or unfavourable load during the forging process (Fig. 13).

Similar effects can be caused by excessive an charge volume in closed dies as well as the selection of improper contact force of the press or the use of too little flash clearance in open dies.

3. CZYNNIK LUDZKI

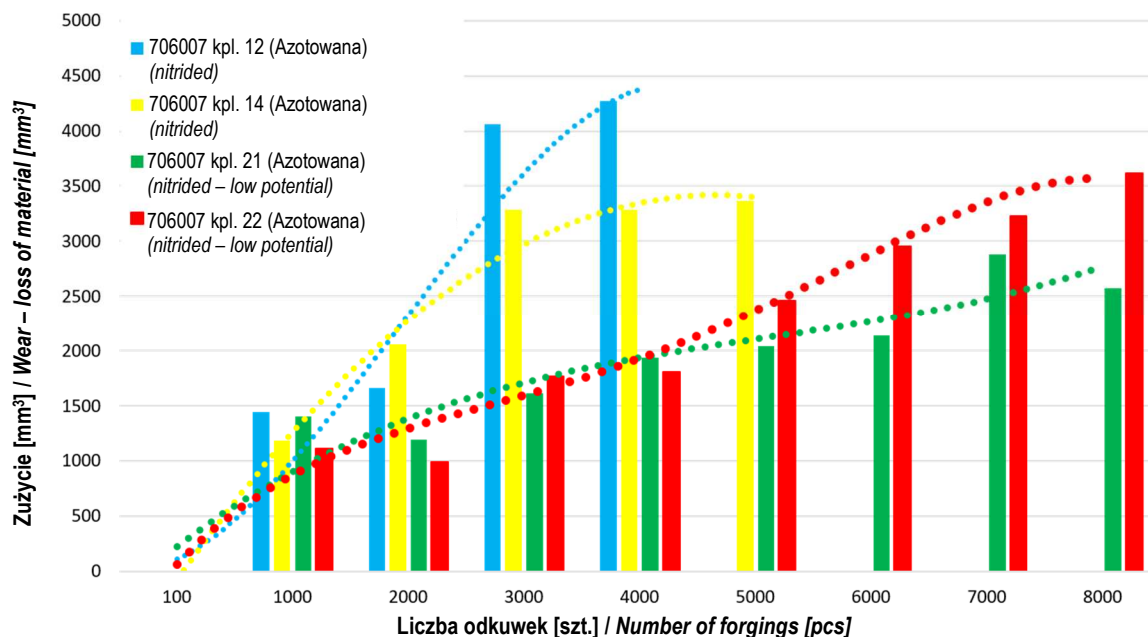
W przypadku procesów kucia matrycowego, w szczególności nie w pełni zautomatyzowanego, np. na młotach lub prasach z ręcznym transferem odkuwek, nie można zapominać o wpływie człowieka; niewłaściwe działania ludzi mogą nieść poważne konsekwencje. Działania człowieka (zarówno świadome, jak i nieświadome) mogą być związane nie tylko z obniżeniem trwałości narzędzi, lecz także stać się przyczyną wypadków w miejscu pracy. Do nieodpowiednich działań człowieka w procesach kucia, mających istotny wpływ na trwałość narzędzi, można zaliczyć: brak wystarczającej świadomości, odpowiedzialności, pośpiech, rutynę, niedostateczną koncentrację uwagi na wykonywanej czynności, opieszałość itp. Niekiedy operatorzy pracujący w systemie akordowym celowo zwiększają wydajność pracy agregatów kuźniczych, aby mogli wykonać więcej odkuwek. Kowal potrafi kontrolować proces kucia i na bieżąco reagować na pojawiające się zdarzenia i nieprawidłowości. Niejednokrotnie potrafi znacznie szybciej zauważyć przedwczesne zużycie narzędzia [1].

Przykładem świadomego działania kowala w procesie kucia jest regulacja wielkość zamknięcia matrycy poprzez podniesienie stołu prasy, na podstawie okresowej kontroli kluczowych wymiarów odkuwki. Zwykle dotyczy to ostatniej operacji kucia wykańczającego, dla której musi zostać zachowana określona grubość wypłytki. Jednocześnie przeprowadzona regulacja zmienia w sposób niekontrolowany wartość zamknięcia narzędzi w pozostałych operacjach realizowanych na tym stole. Taki świadomy zabieg operatorów prasy (zgodny z przyjętą technologią) może spowodować znaczący wzrost nacisków na niektórych narzędziach, co w konsekwencji może doprowadzić do gwałtownego przeciążenia i zintensyfikowanego zużycia a nawet pęknięcia narzędzia. Na rys. 14 przedstawiono wartość objętościową zużycia, wyznaczoną na podstawie metody skanowania odwrotnego 3D, w funkcji liczby wykonanych odkuwek dla kilku wybranych narzędzi przeznaczonych do kucia na gorąco [10].

3. HUMAN FACTOR

In the case of die forging processes, especially the not fully automated ones, e.g. on hammers or presses with manual forge transfer, one cannot forget about the human factor; inappropriate human actions can have serious consequences. Human actions, both conscious and unconscious, may not only reduce tool durability but they can also lead to accidents at the work place. The improper human actions during the forging processes which have a significant effect on tool durability include: lack of sufficient awareness and responsibility, haste, routine, insufficient concentration on the performed task, tardiness, etc. Sometimes, the operators working in the piecework system intentionally increase the efficiency of the forging aggregates so that they can produce more forgings. A forger can control the forging process and immediately react to the occurring events and irregularities. Often, he or she can notice premature tool wear much sooner [1].

An example of a conscious action of a forger during the forging process is regulating the closing value of the die by way of lifting the press table based on a periodical control of the key dimensions of the forging. Usually, this refers to the operation of finishing forging, when a specific thickness of the flash must be maintained. At the same time, the performed regulation changes, in an uncontrolled way, the value of the tool's closing in the other operations performed on this table. Such a conscious action of the press operators (according to the assumed technology) can cause a significant increase of pressures on certain tools, which in consequence can lead to rapid overload and intensified wear, and even cracking of the tool. Fig. 14 shows the volumetric values of wear, determined based on the reverse 3D scanning method, in the function of the number of produced forgings, for a few selected tools assigned for hot forging operations [10].



Rys. 14. Przebieg zmian zużycia objętościowego narzędzi, na podstawie metody skanowania odwrotnego 3D (cyklicznie pobieranych odkuwek), z oznaczonymi w ramach względnymi wielkościami zamknięcia

Fig. 14. Course of changes in tool volumetric wear based on reverse 3D scanning (of periodically collected samples), with relative values of closing given in boxes

Jednocześnie dla każdego narzędzia zmierzono wielkość zamknięcia i odniesiono do wartości nominalnej. Ujemna wartość w stosunku do wartości nominalnej oznacza zbyt małą grubość wypłytki i tym samym wystąpienie zwiększonych nacisków przyspieszających zużycie.

3.1. Nieprzestrzeganie technologii – warunki nagrzewania i smarowania matryc

Czynnikiem zależnym bezpośrednio od człowieka i mającym wpływ na przedwczesne zużycie oprzyrządowania jest nieprzestrzeganie warunków i zaleceń technologicznych procesu. Istotnym parametrem procesu kucia wpływającym na trwałość narzędzi, który powszechnie nie jest dotrzymywany ani kontrolowany, jest temperatura narzędzi w procesie, zwłaszcza temperatura ich wstępnego nagrzania. Zawężanie pól tolerancji matrycy i niewielkie odstępstwa pomiędzy poruszającymi się a stałymi komponentami zespołów narzędzi może doprowadzić do ich zablokowania na skutek zmiany ich wymiarów w wyniku rozszerzalności cieplnej mate-

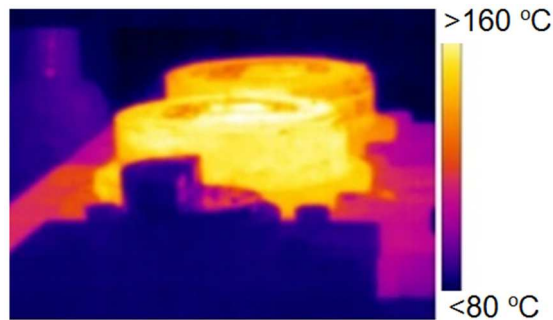
At the same time, for each tool, the value of opening was measured and referred to the nominal value. A negative value in respect of the nominal one means insufficient thickness of the flash and thus the occurrence of increased pressures, which accelerate wear.

3.1. Disregard of technology – die heating and lubricating conditions

A factor which directly depends on the human and which affects premature tool wear is the disregard of the conditions and technological guidelines of the process. An important parameter of the forging process which has an effect on the durability of tools and which is commonly disregarded and uncontrolled is the tool temperature in the process, especially the temperature of their preliminary heating. Narrowed tolerance zones of the die and short distances between the moving and the permanent components of the tool sets can lead to their blockage as a result of a change in their dimensions, caused by the thermal expansion of the ma-

riału. Obowiązek właściwego wstępnego nagrzania narzędzi wynika bezpośrednio z opracowanej dla danego procesu technologii. Jednakże często spotkać można niestosowanie się do zaleceń technologii lub ich świadome łamanie. Na przykład w analizowanym procesie kucia widłaka [11, 12] maksymalna temperatura na powierzchni narzędzi wynosiła 160°C (rys. 15), czyli o 90°C poniżej zalecanej. Wykazano, że zastosowana metoda nagrzewania matryc rozgrzanyimi wstępniakami (rys. 16), co jest często stosowane w kuźniach, nie zapewnia wymaganej temperatury procesu. Dodatkowo metoda ta może powodować odpuszczenie warstwy wierzchniej narzędzi.

The obligation of proper preliminary heating of the tools results directly from the technology elaborated for the given process. However, one can often observe disregard of the technology guidelines or their conscious breaking. For example, in the analyzed process of yoke forging [11, 12], the maximal temperature on the tool surface equaled 160°C (Fig. 15), that is 90°C lower than the recommended one. It was demonstrated that the advanced method of die heating by means of heated preforms (Fig. 16), which is often applied in foundries, does not ensure the required process temperature. Additionally, this method may cause tempering of the tool's surface layer.



Rys. 15. Termogram przedstawiający zbyt niską temperaturę wkładek matrycowych [11]

Fig. 15. Thermogram showing too low temperature of die inserts [11]



Rys. 16. Nagrzewanie narzędzi rozgrzanyimi wstępniakami [11]

Fig. 16. Heating of tools with heated preforms [11]

Wstępne nagrzewanie jest ważne z punktu widzenia trwałości narzędzi. W niższej temperaturze stal cechuje się gorszą odpornością na obciążenia dynamiczne. Co więcej szok termiczny, spowodowany dużym gradientem temperatury

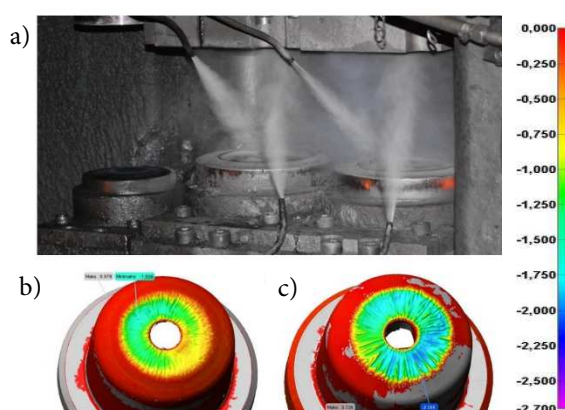
Preliminary heating is important for tool durability. At a lower temperature, steel characterizes in a worse resistance to dynamic loads. What is more, a thermal shock, caused by a high

pomiędzy nagrzanym wsadem a narzędziem, może spowodować ich kruche pękanie.

Kluczowym czynnikiem wpływającym na zużycie jest odpowiednie smarowanie, które decyduje nie tylko o powstawaniu odkuwki bez wad takich, jak niewypełnienia, ale także w dłuższym okresie wpływa na zużycie narzędzi, a przez to na dokładność kształtowo-wymiarową wykonywanego wyrobu. Na rys. 17a przedstawiono standardowy sposób smarowania stosowany na prasach korbowych poprzez ręczne ustawienie dysz smarujących, zgodnie z uznaniem i doświadczeniem operatora.

temperature gradient between the heated charge and the tool, may lead to brittle cracking.

The key factor affecting tool wear is proper lubrication, which determines not only the production of a forging without defects, such as underfills, but also, in the long term, the wear of the tools and thus the shape-dimension precision of the manufactured product. Fig. 17a shows the standard technique of lubrication used on crank presses, i.e. a manual adjustment of the lubricating nozzles, at the discretion and according to the experience of the operator.



Rys. 17. a) Półautomatyczny albo automatyczny sposób z ręczną regulacją ilości środka smarnego, b) zużycie narzędzia w przypadku nierównomiernego smarowania oraz c) zużycie narzędzia w przypadku równomiernego smarowania [11]

Fig. 17. a) Manual manner of lubricant supply, b) tool wear in the case of non-uniform lubrication and c) tool wear in the case of uniform lubrication [11]

Kąt i kierunek dostarczania środka smarnego na narzędzie w dużej mierze zależy od tego, w jaki sposób operator prasy ustawi dysze smarujące. Brak dostatecznej kontroli smarowania oraz złe ustawienie dysz na początku procesu są przyczynami nierównomiernego zużycia narzędzi (rys. 17b), przez co uszkodzenia następują intensywniej i skracają czas pracy narzędzi, a w przypadku dłuższej eksploatacji mogą wpływać na kształt odkuwki.

The angle and direction of the lubricating agent on the tool largely depends on how the press operator adjusts the lubricating nozzles. The lack of sufficient lubrication control and improper nozzle adjustment is the cause of non-uniform tool wear (Fig. 17b), which makes damage more intensive and shortens the time of tool operation, and in the case of a longer operation period, can affect the shape of the forging.

4. PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiono analizę najczęściej występujących przyczyn uszkodzeń narzędzi kuźniczych we wczesnym etapie ich eksploatacji. Przedstawiona w pracy ocena takich przy-

4. CONCLUSIONS

The study has presented an analysis of the common causes of forging tool damage at an early stage of their work. The demonstrated eva-

padków, a także doświadczenia autorów wskazują, że najczęstszą przyczyną nagłej awarii są: niewłaściwa obróbka cieplna (38%), niewłaściwa obróbka mechaniczna powierzchni narzędzi (21%), wadliwy materiał narzędziowy (16%), błędy wynikające z niewłaściwego przygotowania narzędzi do eksploatacji (15%), nieodpowiednia technologia kucia (6%) oraz inne przyczyny (4%). Należy podkreślić, że istotny wpływ na przedwczesne zużycie ma także czynnik ludzki, który w sposób świadomy lub nieświadomy przyczynia się do wystąpienia nieoczekiwane zdarzenia powodującego nagłe uszkodzenie lub inną nieprzewidzianą awarię.

Należy podkreślić, że ciągle podnoszenie poziomu świadomości wśród pracowników kuźni, w szczególności wśród kowali-operatorów, jak i technologów oraz konstruktorów, powinno przyczyniać się do wyeliminowania nagłych awarii i uszkodzeń oprzyrządowania kuźniczego, a tym samym spowodować zwiększenie jakości wyrobów kutych, a także obniżenia kosztów ich wytwarzania.

PODZIĘKOWANIA

Badania zostały sfinansowane przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju (NCBiR); projekt POIG.01.03.01-02-063/12.

LITERATURA

- [1] Hawryluk M. 2016. *Metody analizy oraz zwiększania trwałości narzędzi kuźniczych stosowanych w procesach kucia matrycowego na gorąco*. Radom: ITEE Radom.
- [2] Gronostajski Z., M. Kaszuba, M. Hawryluk, B. Nowak. 2015. „Trwałość narzędzi w procesach kucia”. *Obróbka Plastyczna Metali* 26 (3): 255–270.
- [3] Lange K., L. Cser, M. Geiger, J.A.G. Kals. 1993. „Tool Life and Tool Quality in Bulk Metal Forming”. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 207: 223–239.
- [4] Heinemeyer D. 1978. „Gensekschäden und Einflussgrößen der Standmenge”. *Industrieanzeiger* 100 (73).
- [5] Kocańda A. 2003. „Określenie trwałości narzędzia w obróbce plastycznej metali”. W: *Informatyka w Technologii Metali*, pod red. Piela A., F. Grosman,

evaluation of such cases as well as the authors' experience point to the fact that the most common causes of sudden tool failure are: improper thermal treatment (38%), improper mechanical treatment of the tool surface (21%), faulty tool material (16%), errors resulting from improper tool preparation (15%), inappropriate forging technology (6%) and others (4%). It should be emphasized that an important role in premature tool wear is also played by the human factor, which, consciously or unconsciously, contributes to the occurrence of an unexpected event causing rapid damage or failure.

One should note that the continuous attempts at raising the awareness among foundry workers, especially forger-operators as well as technologists and constructors, should contribute to the elimination of sudden failure and damage of forging instrumentation and thus increase the quality of the forged products, as well as lower the costs of their production.

ACKNOWLEDGEMENTS

This study was found by National Centre for Research and Development, Poland (NCBiR); grant no. POIG.01.03.01-02-063/12.

REFERENCES

- [1] Hawryluk M. 2016. *Metody analizy oraz zwiększania trwałości narzędzi kuźniczych stosowanych w procesach kucia matrycowego na gorąco*. Radom: ITEE Radom.
- [2] Gronostajski Z., M. Kaszuba, M. Hawryluk, B. Nowak. 2015. “Tool lifetime in forging processes”. *Obróbka Plastyczna Metali* 26 (3): 255–270.
- [3] Lange K., L. Cser, M. Geiger, J.A.G. Kals. 1993. “Tool Life and Tool Quality in Bulk Metal Forming”. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 207: 223–239.
- [4] Heinemeyer D. 1978. “Gensekschäden und Einflussgrößen der Standmenge”. *Industrieanzeiger* 100 (73).
- [5] Kocańda A. 2003. “Określenie trwałości narzędzia w obróbce plastycznej metali”. In: *Informatyka w Technologii Metali*, edit. Piela A., F. Grosman, J. Kusiak

- J. Kusiak i M. Pietrzyk, 213–256. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej.
- [6] Ebara R. 2011. „New Fatigue and Fracture Behavior of Forging Die Steels”. W: *Trends and Developments in Automotive Systems Engineering*, pod red. Chiaberge M., 47–65. Szanghaj: InTech.
- [7] Walkenhorst U. 2013. „Tool materials used for forging instrumentation.” Wykład – prezentacja multimedialna. Wrocław: Politechnika Wrocławska 21.11.2013.
- [8] Dobrzański L.A. 2004. *Metalowe materiały inżynierskie*. Poznań: Wydawnictwo Naukowo-Techniczne.
- [9] Dobrzański L.A. „Stale narzędziowe stopowe do pracy na gorąco.” Prezentacja multimedialna, Gliwice: IMLiB.
- [10] Gronostajski Z., M. Hawryluk, M. Kaszuba, J. Ziemia. 2016. „Application of a measuring arm with an integrated laser scanner in the analysis of the shape changes of forging instrumentation during production”. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 18 (2):194–200.
- [11] Gronostajski Z., M. Hawryluk, J. Jakubik, M. Kaszuba, G. Misiun, P. Sadowski. 2015. „Solution examples of selected issues related to die forging.” *Archives of Metallurgy and Materials* 60(4): 2767–2775.
- [12] Hawryluk M., J. Jakubik. 2016. „Analysis of forging defects for selected industrial die forging processes”. *Engineering Failure Analysis* 59: 396–409.
- i M. Pietrzyk, 213–256. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej.
- [6] Ebara R. 2011. “New Fatigue and Fracture Behavior of Forging Die Steels”. In: *Trends and Developments in Automotive Systems Engineering*, edit. Chiaberge M., 47–65. Szanghaj: InTech.
- [7] Walkenhorst U. 2013. „Tool materials used for forging instrumentation.” Lecture – multimedia presentation. Wrocław: Politechnika Wrocławska 21.11.2013.
- [8] Dobrzański L.A. 2004. *Metalowe materiały inżynierskie*. Poznań: Wydawnictwo Naukowo-Techniczne.
- [9] Dobrzański L.A. “Stale narzędziowe stopowe do pracy na gorąco.” Multimedia presentation, Gliwice: IMLiB.
- [10] Gronostajski Z., M. Hawryluk, M. Kaszuba, J. Ziemia. 2016. “Application of a measuring arm with an integrated laser scanner in the analysis of the shape changes of forging instrumentation during production”. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 18 (2):194–200.
- [11] Gronostajski Z., M. Hawryluk, J. Jakubik, M. Kaszuba, G. Misiun, P. Sadowski. 2015. “Solution examples of selected issues related to die forging.” *Archives of Metallurgy and Materials* 60(4): 2767–2775.
- [12] Hawryluk M., J. Jakubik. 2016. “Analysis of forging defects for selected industrial die forging processes”. *Engineering Failure Analysis* 59: 396–409.