

prof. dr hab. inż. Zbigniew GRONOSTAJSKI, dr inż. Marek HAWRYLUK,
mgr inż. Marcin MARCINIAK
Politechnika Wroclawska, Wrocław
kontakt: marcin.marciniak@pwr.wroc.pl

Niskocyklowe zmęczenie cieplne stali narzędziowej WCLV

Low-cycle thermal fatigue of hot-work tool steel H13

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań odporności na pękanie stali narzędziowej WCLV w warunkach zmęczenia cieplnego. Przyjęta metodyka pracy łączy badania eksperymentalne oraz symulacje komputerowe. Opisano także wyniki badań jakościowych i ilościowych z przeprowadzonych prób eksperymentalnych w zależności od warunków temperaturowych oraz przedstawiono wyniki spadku twardości warstwy wierzchniej. Otrzymane wyniki badań oraz symulacja komputerowa stanowiska badawczego pozwolą na wyznaczenie charakterystyki zmęczenia cieplnego stali WCLV.

Abstract

This paper presents the results of crack resistance tests carried out on hot-work tool steel H13 in thermal fatigue conditions. The adopted research methodology combines experiments and computer simulations. Also the results of qualitative and quantitative tests for different temperature conditions, showing the cycle temperature to be a factor contributing to a decrease in surface layer hardness, are reported. The experimental results and computer simulations will be used to determine the thermal fatigue characteristic of steel H13.

Słowa kluczowe: zmęczenie cieplne, niskocyklowa wytrzymałość zmęczeniowa, stal narzędziowa do pracy na gorąco

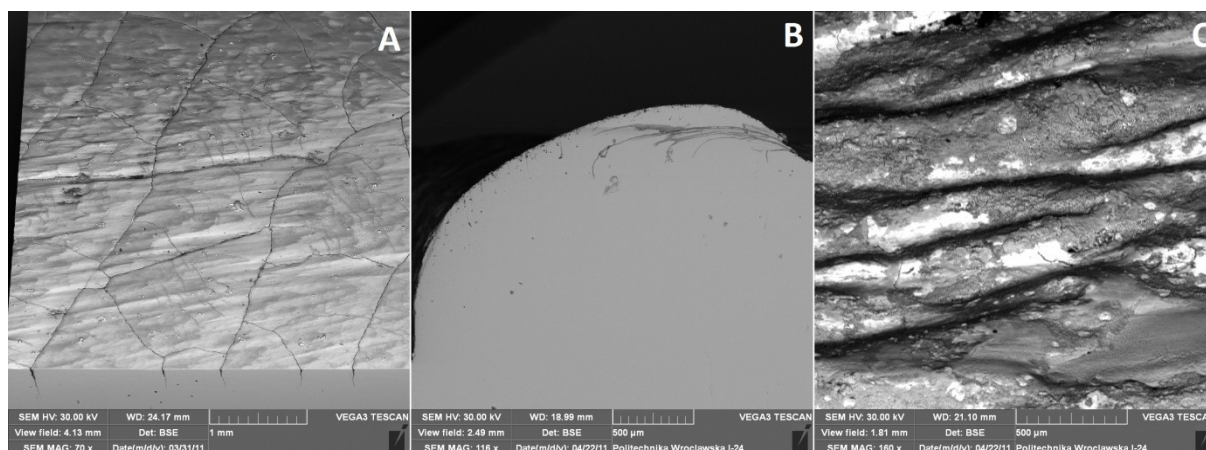
Keywords: thermal fatigue, low-cycle fatigue, hot tool steel

1. WPROWADZENIE

Ze względu na ekstremalne warunki pracy matryce kuźnicze stosowane w procesach kucia na gorąco narażone są na działanie wielu mechanizmów niszczących. Powierzchnia narzędzi jest systematycznie i intensywnie nagrzewana, ścierana, utleniana, dlatego materiał matrycy powinien charakteryzować się odpornością na wysokie wartości obciążeń mechanicznych oraz cieplnych [1, 2]. Na rysunku 1 przedstawiono zdjęcia wyeksploatowanej (zużytej) powierzchni oraz profil matrycy po odkuciu 4300 odkuwek. Najczęściej obserwowanym zjawiskiem w przypadku kucia matrycowego na gorąco jest siatka pęknięć powstała w wyniku działania mechanizmu zmęczenia cieplnego (rys. 1a). Rys. 1b przedstawia zdeformowany fragment narzędzia spowodowany

1. INTRODUCTION

Because of the extreme conditions in which they operate, the dies used in hot forging processes are exposed to the action of many destructive mechanisms. Since the surface of the tools is repeatedly intensively heated up, abraded and oxidized, the die material should withstand severe mechanical and thermal impacts [1, 2]. Figure 1 shows photographs of the worn out surface and profile of the die after 4300 forgings. In die hot forging, thermal fatigue usually results in a network of cracks (fig. 1a). Figure 1b shows a fragment of the tool deformed as a result of the plastic strain of the material. Grooves characteristic of abrasive wear are visible in fig. 1c.



Rys. 1. Zużyte fragmenty narzędzi po kuciu na gorąco: A – siatka pęknięć, B – odkształcenie plastyczne profilu matrycy, C – bruzdy powstałe w wyniku zużycia ściernego materiału

Fig. 1. Fragments of tools worn out after hot forging: A – network of cracks, B – plastic deformation of die profile, C – grooves which formed due to abrasive wear

odkształceniem plastycznym materiału. Z kolei na rysunku 1c widoczne są bruzdy charakterystyczne dla zużycia ściernego.

Zjawiskiem, które istotnie obniża trwałość narzędzi jest zmęczenie cieplne. Ze względu na ograniczoną przewodność cieplną materiału występuje duży gradient temperatur między rdzeniem a powierzchnią wkładek matrycowych. Zachodzi cykliczna zmiana naprężeń wywołujących duże odkształcenia plastyczne. Następstwem tego jest zapoczątkowanie siatki pęknięć na powierzchni narzędzia. Siatka zmęczeniowa wpływa negatywnie na jakość gotowego wyrobu odwzorowując się na jego powierzchni. Pęknięcie zmęczeniowe może być ogniskiem kruchego pęknięcia prowadzącego do całkowitego zniszczenia narzędzia. Wraz ze zwiększaniem się ilości odkuwek pojawia się wtórna siatka pęknięć obejmująca głównie warstwę tlenków. Spękanie utlenione warstwy odrywają się od powierzchni i przyczyniają się do zwiększenia zużycia ściernego matrycy.

2. CEL I ZAKRES PRACY

Trwałość narzędzi jest istotnym czynnikiem wpływającym na koszt wytwarzania elementów kutych. Szacuje się, że 10% ceny odkuwki to koszty matrycy. Celowe jest zatem prowadzenie badań determinujących poprawę trwałości oraz skuteczne prognozowanie czasu pracy narzędzi [3]. Badanie odporności na zmęczenie cieplne materiału w rzeczywistych

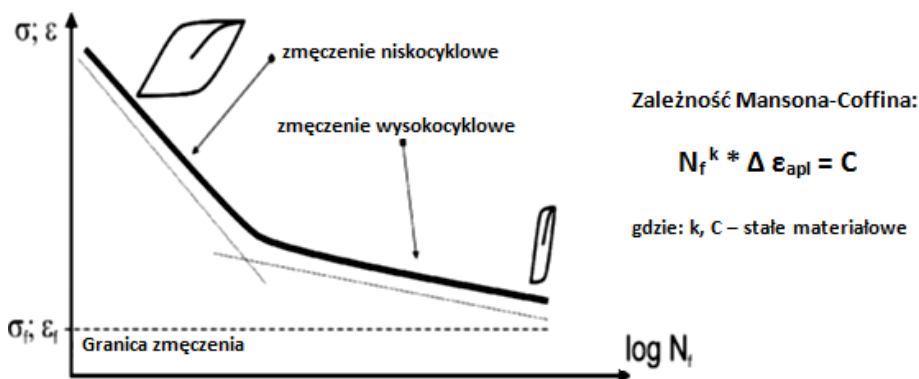
Thermal fatigue significantly reduces tool life. Because of the limited heat conductivity of the material a large temperature gradient between the core and the surface of the die inserts occurs. The stresses causing high plastic strains change cyclically. As a result, a network of cracks forms on the surface of the tool. The fatigue crazing adversely affects the quality of the finished product since it is reproduced on the latter's surface. A fatigue crack can result in a brittle fracture leading to the total destruction of the tool. As the number of forgings increases, a secondary network of cracks appears, spreading mainly in the layer of oxides. The cracked oxidized layers separate from the surface, contributing to the abrasive wear of the dies.

2. AIM AND RANGE OF PRESENT RESEARCH

Tool life is a major factor having a bearing the cost of forged products. It is estimated that die costs amount to 10% of the forged product price. Therefore research aimed at improving the durability of the tools and accurately predicting their service lifetime is needed [3]. The testing of the thermal endurance of a material in real operating conditions usually takes much time and is expensive [4].

warunkach często jest długotrwałe i kosztowne [4]. Pozostają symulacyjne badania numeryczne, które nie zawsze pozwalają na dokładne odwzorowanie warunków pracy elementów oraz zachowania materiału. Przedstawiona koncepcja badań opiera się na połączeniu modelowania fizycznego wraz z modelowaniem numerycznym. Autorzy zbudowali stanowisko do badania zmęczenia cieplnego opisane w pozycji [5] oraz opracowany został model numeryczny odwzorowujący warunki próby laboratoryjnej [6]. W przypadku zmęczenia cieplnego rozpatruje się niskocyklową wytrzymałość materiału ze względu na występujący wysoki poziom odkształceń. Podstawowym równaniem opisującym zachowanie się metali w obszarze niskocyklowego zmęczenia jest zależność doświadczalna sformułowana przez Mansona i Coffina wiążąca liczbę cykli od zniszczenia N_f z zakresem odkształceń plastycznych $\Delta \epsilon_{apl}$ [7]. Badania eksperymentalne pozwolą określić moment inicjacji pęknięć materiału narzędziowego (N_f). Przeprowadzenie natomiast symulacji odwzorowującej warunki poszczególnych testów pozwoli na określenie wartości odkształceń plastycznych. Otrzymane wyniki posłużą do zbudowania wykresu niskocyklowego zmęczenia cieplnego stali WCLV (rys. 2). W pracy przedstawiono pierwszą część badań dotyczącą określenia momentu powstawania pęknięć zmęczeniowych.

Hence numerical simulations are used for this purpose. However, they do not always accurately reproduce the conditions in which the forged parts operate or the behaviour of the material. The proposed idea of testing consists in combining physical modelling and numerical modelling. The authors built a thermal fatigue test rig (described in [5]) and developed a numerical model reproducing the laboratory test conditions [6]. In the case of thermal fatigue, because of the high level of strains the low-cycle strength of the material is a major consideration. The main equation which describes the behaviour of metals in the low-cycle fatigue region is the experimental dependence formulated by Manson and Coffin, interrelating the number of cycles until failure (N_f) and plastic range $\Delta \epsilon_{apl}$ [7]. The aim of the experimental studies is to determine the instant (N_f) at which the tool material begins to crack while the simulations, reproducing the conditions of the particular tests, will make it possible to determine the values of the plastic strains. The results will be used to draw a diagram of the low-cycle thermal fatigue of hot-work tool steel H13 (fig. 2). This paper presents the first part of the research, dealing with the determination of the onset of fatigue cracking.



Rys. 2. Uproszczony wykres Wöhlera przedstawiający trwałość zmęczeniową oraz model Mansona-Coffina

Fig. 2. Simplified Wöhler diagram showing fatigue life and Manson-Coffin model

(zmęczenie niskocyklowe – low-cycle fatigue, zmęczenie wysokocyklowe – high-cycle fatigue, granica zmęczenia - fatigue limit, zależność Mansona-Coffina - Manson-Coffin relation, gdzie: k, C – stałe materiałowe - where: k, C – material constants)

3. DOBÓR WARUNKÓW PRÓBY ZMĘCZENIA CIEPLNEGO

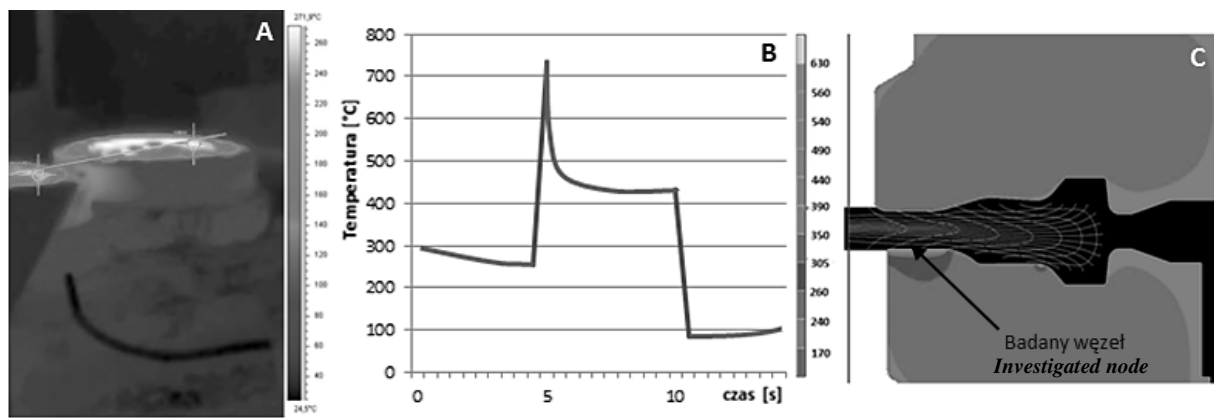
W celu określenia zakresu temperatury cyklu zmęczeniowego zarejestrowane zostały termogramy powierzchni pracujących matryc wybranego procesu (rys. 3A). Pomiaru kamerą termowizyjną można było dokonać jedynie, gdy matryce są „otwarte”. W przypadku kucia matrycowego nie ma możliwości zarejestrowania temperatury w momencie formowania wsadu. W tym etapie temperatura na powierzchni narzędzia osiąga najwyższą wartość, której rejestracja jest niezbędna do prawidłowego odwzorowania warunków zmęczenia cieplnego matryc. Innym sposobem pomiaru może być umieszczenie termopary w bliskiej odległości od powierzchni roboczej narzędzia. Jednak nie w każdym przypadku jest to możliwe. Ingerencja w strukturę wewnętrzną może prowadzić do osłabienia matrycy, koncentracji naprężeń w miejscu otworu i skutkować szybkim zniszczeniem matrycy. Również odległość od powierzchni musi zostać zachowana, co przekłada się na brak odczytu temperatury bezpośrednio z powierzchni narzędzia. Rozwiązaniem tego problemu jest zaproponowany przez autorów model numeryczny wybranego procesu kucia matrycowego. Uproszczony model został utworzony w programie Simufact Forming (rys. 3C) dokładny opis znajduje się w pozycji [8]. Model złożony jest z dwuwymiarowych elementów typu Quad4. Operacja kucia została zamodelowana w osiowosymetrycznym stanie odkształcenia modelu termomechanicznego ze sztywnymi narzędziami (stemple i matryce-elementy z wymiana ciepła). Geometria narzędzi, wstępniaka (stal 1.7147), a także pozostałe parametry technologiczne procesu zostały zaimplementowane do programu na podstawie oryginalnych modeli 2d i kart technologicznych. Przyjęto prasę korbową. Prędkość ruchu stempla była zależna od położenia kąтового prasy. Zastosowano bilinearny model tarcia SHEAR oraz współczynniki tarcia: między matrycami a materiałem odkształcanym 0,2; między stemplami a materiałem odkształcanym 0,2 oraz między wypychaczami a materiałem odkształcanym 0,1. Symulacja polegała na formowaniu przedkuwki tak jak to ma miejsce

3. SELECTION OF THERMAL FATIGUE TEST CONDITIONS

In order to determine the fatigue cycle temperature range, thermograms of the surfaces of the operating dies were recorded for a selected process (fig. 3A). Measurements by means of a thermal imaging camera could be performed only when the dies were open. In the case of die forging it is not possible to register temperature while the charge is being formed. At this stage the temperature on the surface of the tool reaches the highest value and it needs to be registered in order to accurately represent the die thermal fatigue conditions. The temperature can also be measured by placing a thermocouple close to the working surface of the tool. But this is not always possible. The interference into the internal structure may weaken the die, result in the concentration of stresses in the area of the hole and quickly lead to the failure of the die. Moreover, the thermocouple should be situated at a distance from the surface, which means that no temperature readings would be taken directly from the tool surface. The proposed by the authors numerical model of the selected die forging process is a solution to this problem. A simplified model was created in the Simufact Forming program (fig. 3C). Its detailed description can be found in [8]. The model is made up of 2D Quad4 elements. The forging operation was modelled for the axially symmetric strain of the thermomechanical model with stiff tools (punches and die-elements with heat exchange). The geometry of the tools and the preform (steel 1.7147) and the other process parameters were implemented in the program on the basis of original 2D models and operation sheets. A crank press was adopted. The speed of motion of the punch depended on the angular position of the press. The bilinear SHEAR model of friction was adopted. The friction coefficients were: 0.2 between the dies and the material being deformed, 0.2 between the punches and the material being deformed and 0.1 between the knock-outs and the material being deformed. In the simulation the preform was formed as in the second operation of spur gear forging.

w drugiej operacji kucia koła czołowego. Wsad miał początkową temperaturę 1150°C. Po odkuciu odkuwki następowało chłodzenie narzędzia. Na wykresie (rys. 3B) przedstawiono przebieg zmiany temperatury w czasie dla wybranego pojedynczego węzła na powierzchni wykroju. Temperatura po kilku cyklach utrzymywała się w stałych granicach pomiędzy 80°C a 750°C. Na podstawie symulacji oraz pomiarów termowizyjnych przyjęto następujące temperatury cyklu zmęczeniowego: stałą dolną granicę $T_d = 80^\circ\text{C}$ oraz górną w przedziale $T_g = 650\text{-}750^\circ\text{C}$.

The initial temperature of the charge was 1150°C. The tool would be cooled after forging. Figure 3B shows temperature variation over time for a selected single node on the surface of the impression. After a few cycles the temperature would remain within a constant range of 80-750°C. On the basis of the simulations and the thermal imaging measurements the following fatigue cycle temperatures were adopted: constant lower limit $T_l = 80^\circ\text{C}$ and upper limit T_u in a range of 650-750°C.



Rys. 3. A – termogram wkładek matrycowych, B – rozkład temperatury w cyklu kucia dla wybranego węzła, C – model procesu kucia matrycowego koła czołowego

Fig. 3. A – thermal image of die inserts, B – temperature distribution in forging cycle for selected node, C – model of spur gear die-forging process

4. METODYKA BADAŃ

Badania polegają na analizie odporności na zmęczenie cieplne stali WCLV, przy wykorzystaniu metody „wirującego krążka”. Przeprowadzono badania laboratoryjne dla różnych warunków i próbek walcowych wykonanych z tego samego materiału, z którego wykonuje się wkładki matrycowe. Metoda ta polega na cyklicznym nagrzewaniu i chłodzeniu próbki i pozwala na odwzorowanie warunków obciążeń cieplnych bez udziału obciążeń mechanicznych, które występują w przemysłowym procesie kucia. Badanie odporności na zmęczenie cieplne zakładało określenie momentu powstawania pęknięć zmęczeniowych na powierzchni próbki. W tym celu badania makroskopowe próbek zostały podzielone na etapy. Po wykonaniu 100 cykli zmęczeniowych powierzchnia była oczyszczana z tlenków, po

4. RESEARCH METHODOLOGY

The thermal endurance of steel H13 was studied using the spinning disk test method. Laboratory tests were carried out for different conditions on cylindrical specimens of the same material from which the die inserts are made. The testing method consists in the cyclical heating up and cooling of the specimen and it reproduces the heat load conditions (without the mechanical loads) which occur in industrial forging. The instant at which fatigue cracks appeared on the surface of the specimen was to be determined as part of the fatigue endurance tests. The macroscopic examination of the specimens was organized as follows. After 100 fatigue cycles the surface would be cleaned of oxides and examined under the maximum magnification of $\times 20$ by means of a metallographic microscope

czym dokonywano obserwacji w celu zlokalizowania zmian zmęczeniowych. Obserwacja wykonywana była za pomocą mikroskopu metalograficznego przy maksymalnym powiększeniu (x20). Jeśli wykryto pęknięcia badanie przerywano i próbka poddawana była dalszej analizie niszczącej. Natomiast w przypadku nie wykrycia na powierzchni pęknięć zmęczeniowych próba była kontynuowana (kolejne 100 cykli).

5. WYNIKI BADAŃ

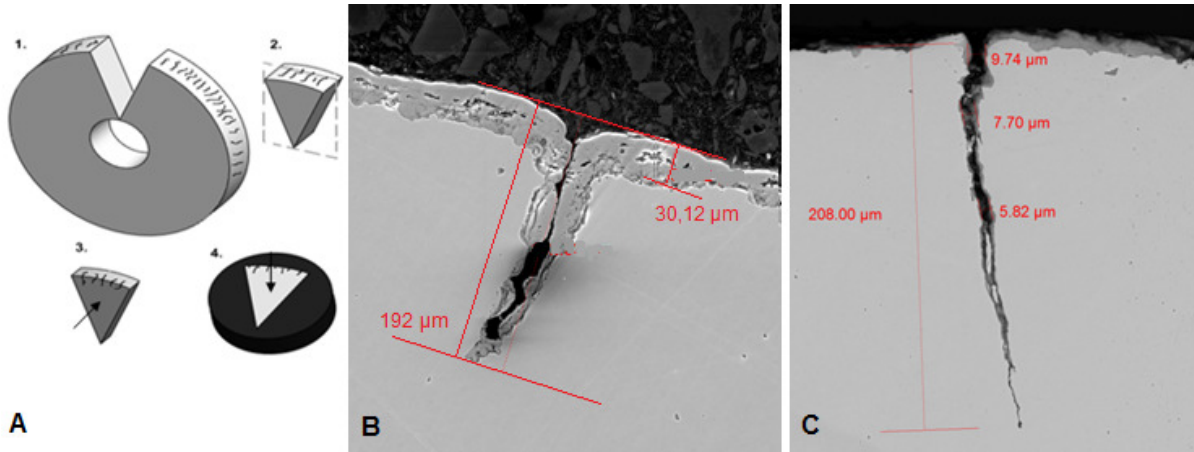
Wycinki do badań pobrano z próbek według schematu z rys 4a. Otrzymane zglądy posłużyły do określenia stopnia zmęczenia cieplnego oraz pomiarów twardości. Ponieważ w początkowym stadium inicjacji trudno jest rozróżnić pęknięcie od mikro nierówności powierzchni. Jako początek powstawania pęknięć uznano moment, w którym obliczona średnia wartość gęstości pęknięć przekracza wartość R_a powierzchni próbek ($16\mu\text{m}$). Na podstawie pomiaru pęknięć i otrzymanych wartości średnich określono moment inicjacji pęknięć: dla temperatury 650°C - 600 cykli, 700°C - 300 cykli, 750°C - 200 cykli. Pęknięcia układały się prostopadle do powierzchni próbki wzdłuż promienia zarodkując głównie na defektach powierzchniowych (rys. 4B). Zaobserwowano, że szerokość pęknięć zwiększa się wraz ze wzrostem liczby cykli zmęczeniowych. Pęknięcia powstałe w trakcie próby są porównywalne z zaobserwowanymi na wkładkach matrycowych (rys. 4C). W obu przypadkach charakterystyczna jest warstwa tlenków wypełniająca szczelinę pęknięcia. Na rysunku 5 zostały przedstawione wyniki analizy przeprowadzonych prób badawczych. Badania przeprowadzono w trzech zakresach górnej temperatury cyklu: $T_g = 650\text{-}750^\circ\text{C}$, dla $T_d = 80^\circ\text{C}$ (temperatura wody w pojemniku chłodzącym) przy stałej długości pojedynczego cyklu - 7s. Dla porównania poszczególnych warunków prób wybrano następujące wskaźniki zmęczenia cieplnego oparte na pomiarze długości pęknięć: *średnia długość pojedynczego pęknięcia, gęstość pęknięć, odchylenie standardowe, maksymalna, minimalna długość pojedynczego pęknięcia.*

in order to locate fatigue changes. If cracks were discovered, the examination would be discontinued and the specimen would be subjected to further destructive testing. If no fatigue cracks on the surface were discovered, the testing would be continued (for the next 100 cycles).

5. RESEARCH RESULTS

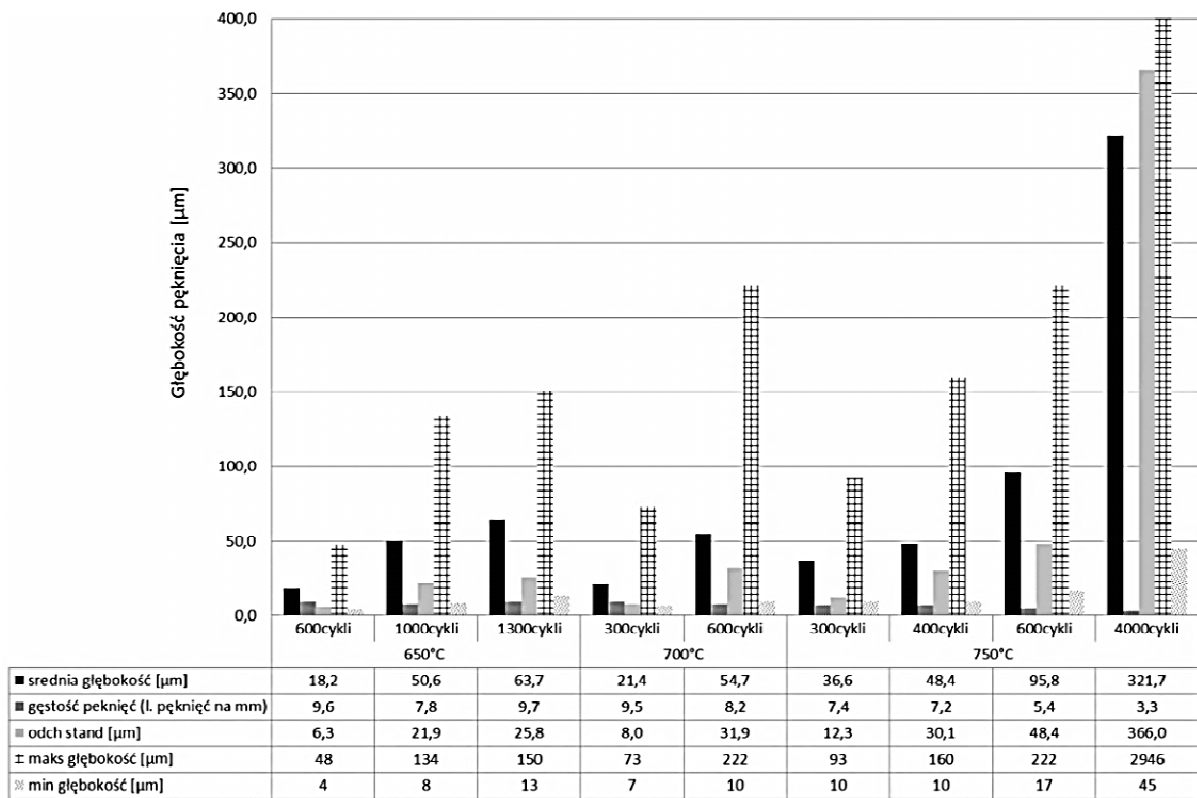
Sections for testing were taken from the specimens according to the scheme shown in fig. 4a. The polished sections were used to determine the degree of thermal fatigue and to measure hardness. Since in the initial phase it is difficult to distinguish between microcracks and surface microirregularities, the instant at which the calculated average density of cracks exceeds the R_a value of the specimen surface ($16\mu\text{m}$) was adopted as the onset of cracking. On the basis of the crack measurements and the calculated averages the onset of cracking was determined to occur at: 650°C - 600 cycles, 700°C - 300 cycles and 750°C - 200 cycles. Cracks would run perpendicularly to the specimen surface and along its radius, nucleating mainly in surface defects (fig. 4B). It was found that the width of the cracks increased with the number of fatigue cycles. The cracks which appeared in the course of the test are comparable with the ones observed on the die inserts (fig. 4C). In both cases, a characteristic layer of oxides fills the cracks. Figure 5 shows a comparison of the test results. The tests were carried out in the three ranges of upper cycle temperature $T_u = 650\text{-}750^\circ\text{C}$ at $T_l = 80^\circ\text{C}$ (the temperature of the water in the tank) for a constant single cycle length of - 7s.

In order to compare the particular test conditions the following thermal fatigue indicators based on crack length measurements were adopted: the average length of a single crack, the standard deviation and the maximum/minimum length of a single crack.



Rys. 4. A – schemat pobierania wycinka przeznaczanego do badań mikroskopowych, B – pęknięcie – próbka walcowa 4000 cykli, $T_g = 750^\circ\text{C}$, C – widok pęknięcia na przekroju matrycy kuźniczej po 3500 sztukach

Fig. 4. A – scheme showing how section is taken for microscopic examinations, B – crack – cylindrical specimen after 4000 cycles, $T_u = 750^\circ\text{C}$, C – crack in forging die cross section after 3500 forgings



Rys. 5. Zestawienie wyników pomiarów długości pęknięć dla prób zmęczenia cieplnego stali WCLV

Fig. 5. Comparison of crack length measurements for fatigue endurance tests of steel H13

(głębokość pęknięcia – crack depth, średnia głębokość – average depth, gęstość pęknięć – cracking density (number of cracks per mm), odchylenie standardowe – standard deviation, maks głębokość – max. depth, min głębokość – min. depth, 600 cykli – 600 cycles)



Rys. 6. Widok pęknięć zmęczeniowych na przekroju próbek walcowych po 600 cyklach: A – $T_g = 650^\circ\text{C}$, B – $T_g = 700^\circ\text{C}$, C – $T_g = 750^\circ\text{C}$

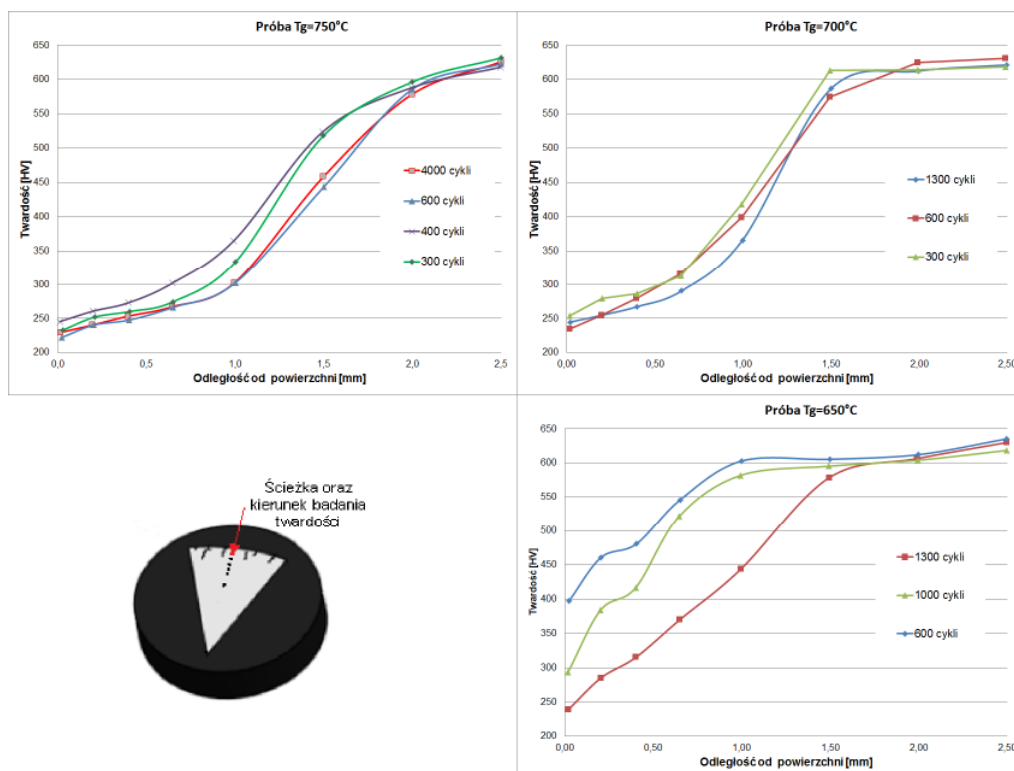
Fig. 6. Fatigue cracks in cross section of cylindrical specimens after 600 cycles: A – $T_u = 650^\circ\text{C}$, B – $T_u = 700^\circ\text{C}$, C – $T_u = 750^\circ\text{C}$

Na tym poziomie pęknięcia charakteryzują się dużą szerokością w stosunku do długości. Początkowo zainicjowane pęknięcia zmęczeniowe propagują a część z nich zanika, gdyż pokryta jest tlenkami które utrudniają identyfikację. Zjawisko to wpływa na zauważalny spadek gęstości pęknięć odnotowany dla $T_g = 700^\circ\text{C}$ oraz $T_g = 750^\circ\text{C}$. Na gęstość pęknięć w $T_g = 600^\circ\text{C}$ nie wpływała liczba cykli, wyniki były wyrównane na poziomie 10 pęknięć na mm. Analiza wszystkich warunków prób wykazała liniowy wzrost głębokości pęknięć wraz z liczbą cykli zmęczeniowych. Większa wartość T_g pojedynczego cyklu również wpływała na zwiększenie głębokości pęknięć zmęczeniowych. Relację tą ilustruje rysunek 6, na którym przedstawiono pęknięcia dla różnej wartości T_g przy tej samej liczbie cykli zmęczeniowych.

Pęknięcia wykazywały niekiedy zmiany kierunku rozwoju na pewnej głębokości. Zmiana krzywizny pęknięcia może wynikać z napotkania na granicę odpuszczonej warstwy wierzchniej z twardym rdzeniem, co potwierdzają pomiary mikrotwardości (rys. 7).

At this level, cracks are characterized by a large width as compared to their length. Initially, the cracks propagate while some of them disappear, being covered by oxides making identification difficult. This contributes to a notable decrease in cracking density registered for $T_u = 700^\circ\text{C}$ and $T_u = 750^\circ\text{C}$. Cracking density at $T_u = 600^\circ\text{C}$ was not affected by the number of cycles: the results were uniform, amounting to 10 cracks per mm. An analysis of all the test conditions showed a linear increase in crack depth with the number of fatigue cycles. Also a higher T_u value of a single cycle would contribute to an increase in fatigue crack depth. This relationship is illustrated in fig. 6 where cracks for different T_u values at the same number of fatigue cycles are shown.

Sometimes the direction of crack development would change at a certain depth. The change in crack curvature is probably due to the fact that the boundary between the tempered surface layer and the core is encountered. This is confirmed by microhardness measurements (fig. 7).



Rys. 7. Wykresy twardości wyznaczonej na przekroju próbek walcowych poddanych badaniom zmęczenia cieplnego oraz schemat pomiaru twardości

Fig. 7. Diagrams of hardness determined on cross section of cylindrical specimens subjected to thermal fatigue tests, and hardness measurement scheme

Z każdej próbki walcowej pobrano trzy wycinki i dokonywano trzech pomiarów twardości przy obciążeniu 1kg. Pomiar wykonywany był na zgładach (rys. 7) od powierzchni w kierunku osi próbki. Na wykresach można odnotować znaczny spadek twardości materiału w warstwie przypowierzchniowej. Najmniejszy w przypadku próbki o $T_g = 650^\circ\text{C}$ (do 300 HV) oraz największy dla prób przy $T_g = 700^\circ\text{C}$, $T_g = 750^\circ\text{C}$ (do 200 HV). Następnie twardość osiągała stałą wartość dla wszystkich próbek na poziomie około 625 HV. Spadek twardości na największej odległości (2 mm) został odnotowany dla próbki poddanej najwyższej temperaturze. Dla ($T_g = 700^\circ\text{C}$) odległość spadku odnotowano na poziomie około 1,75 mm. Osiągnięcie poziomu twardości rdzenia dla ($T_g = 650^\circ\text{C}$) następuje na odległości 0,6 mm od powierzchni. Zaobserwowano również, że wraz ze wzrostem liczby cykli głębokość warstwy odpuszczonej wzrasta. Podczas grzania materiału dochodzi do zmiany struktury materiału w warstwie wierzchniej. Dodatkowo atmosfera redukcyjna, jaką jest para wodna potęguje odwęglanie powierzchni. Zmniejszona zawartość węgla w strefie powierzchniowej oraz zmiana struktury próbki prowadzi do zaobserwowanej obniżonej twardości.

6. PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania umożliwiły określenie odporności na pękanie stali WCLV w wybranych warunkach zmęczenia cieplnego. Zaobserwowano, że charakter pęknięć i ich wymiary zależą od temperatury cyklu oraz od ilości cykli zmęczeniowych. Pomiar mikro-twardości pozwoliły określić wpływ działania temperatury na głębokość warstwy odpuszczonej. Otrzymano wyniki z próby eksperymentalnej w postaci granicznej liczby cykli potrzebnej do powstania pęknięć w zależności od T_g . Kolejnym etapem prac będzie przeprowadzenie symulacji numerycznej odwzorowującej warunki badania zmęczenia cieplnego, które wskażą wartości odkształceń materiału.

Three sections were taken from each cylindrical specimen and three hardness measurements under the load of 1 kg were carried out. The measurements were made on the polished sections (fig. 7), from the surface towards the specimen axis. The diagrams show a considerable decrease in material hardness in the near-surface layer, which is the smallest (down to 300 HV) for specimen at $T_u = 650^\circ\text{C}$ and the largest (down to 200 HV) for the specimens at $T_u = 700^\circ\text{C}$ and $T_u = 750^\circ\text{C}$. The hardness would stabilize at about 625 HV. A decrease in hardness along the largest length (2 mm) was recorded for the specimen subjected to the highest temperature. At $T_u = 700^\circ\text{C}$ the distance along which the decrease occurred amounted to about 1.75 mm. The core hardness level at $T_u = 650^\circ\text{C}$ is reached at a distance of 0.6 mm from the surface. It was also found that as the number of cycles increases so does the depth of the tempered layer. As the material is heated up its structure in the surface layer changes. In addition, the reducing atmosphere (water vapour) intensifies surface decarburization. The reduced carbon content in the surface zone and the change in the specimen structure result in the lower hardness.

6. CONCLUSION

The crack resistance of hot-work tool steel H13V in selected thermal fatigue conditions has been determined. It has been found that the character and dimensions of the cracks depend on the cycle temperature and on the number of fatigue cycles. The influence of temperature on tempered layer depth was determined through microhardness measurements. Experimental results in the form of the limit number of cycles needed for cracks to appear depending on T_u were obtained. In the next part of this research a numerical simulation reproducing the thermal fatigue test conditions will be carried out to determine the material strains.

Wynikiem połączenia symulacji oraz eksperymentu będzie wyznaczenie krzywej Wöhlera na podstawie modelu Coffina-Mansona dla badanej stali.

Thanks to the combination of the experiment and the simulation the Wöhler curve will be determined on the basis of the Coffin-Manson model for the tested steel.

LITERATURA / REFERENCES

- [1] Gronostajski Z., Hawryluk M.: The main aspects of precision forging. Archives of Civil and Mechanical Engineering 2008, 8(2), 39-57.
- [2] Summerville E., Venkatesan K., Subramanian C.: Wear processes in hot forging press tools. Materials and Design 1995, 16(5), 289-294.
- [3] Lapovok R., Smirnov S., Shveykin V.: Damage mechanics for the fracture prediction of metal forming tools. International Journal of Fracture 2000, 103(2), 111-126.
- [4] Weroński A.: Zmęczenie cieplne metali. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne 1983.
- [5] Gronostajski Z., Hawryluk M., Zwierzchowski M., Kaszuba M., Marciniak M.: Analiza zmęczenia cieplnego stali WCLV stosowanej na matryce do kucia na gorąco. Rudy i Metale Nieżelazne 2011, 56(11), 654-660.
- [6] Gronostajski Z., Hawryluk M., Krawczyk J., Marciniak M.: Numerical modelling of the thermal fatigue of steel WCLV used for hot forging dies. Maintenance and Reliability 2013, 15(2), 128-132.
- [7] Kocańda S., Szala J.: Podstawy obliczeń zmęzeniowych. PWN, Warszawa 1991.
- [8] Gronostajski Z., Hawryluk M., Niechajowicz A., Polak S., Krawczyk J.: Modelowanie numeryczne procesu kucia matrycowego na gorąco koła czołowego. Hutnik - Wiadomości Hutnicze 2012 R. 79 nr 3 s. 135-139.