



Wpływ zmęczenia cieplnego na udatność stali narzędziowej do pracy na gorąco Orvar Supreme

Influence of thermal fatigue on the impact strength of Orvar Supreme hot-work tool steel

(1) J. Lulkiewicz*, (2) B. Pachutko, (3) M. Gąsioriewicz, (4) S. Szkudelski, (5) Z. Garczyński, (6) S. Ziółkiewicz

Instytut Obróbki Plastycznej, ul. Jana Pawła II 14, 61-139 Poznań, Poland

Informacje o artykule

Data przyjęcia: 21.10.2014
Data recenzji: 7.11.2014
Data akceptacji: 16.03.2015

Wkład autorów

- (1) Opracowanie artykułu, przeprowadzenia badań zmęczenia cieplnego
- (2) Wykonanie badań metalograficznych, współpracewanie artykułu
- (3) Przeprowadzenie badań zmęczenia cieplnego
- (4) Przeprowadzenie badań zmęczenia cieplnego
- (5) Przeprowadzenie badań zmęczenia cieplnego
- (6) Kierownik projektu, koncepcja, założenia, metodyka badań

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań zmęczenia cieplnego stali do pracy na gorąco Orvar Supreme (odpowiednik stali WCLV) na stanowisku badawczym zaprojektowanym w Instytucie Obróbki Plastycznej. Stanowisko składało się głównie z następujących elementów: nagrzewnicy indukcyjnej, układu chłodzenia i pirometrów. Pęknięcia cieplne wytworzono na próbkach prostopadłościennych, które wymiarami były zbliżone do standardowych próbek udatnościowych, ale nie miały karbu. Cykle nagrzewania próbki prowadzono w temperaturze wynoszącej: 500°C, 600°C i 650°C. Liczba cykli wynosiła 1 tysiąc i 5 tysięcy. Nieniszczące pomiary łącznej długości pęknięć cieplnych na krawędzi próbki wykonano za pomocą tomografu komputerowego w Instytucie Odlewnictwa w Krakowie. Próbę udatności sposobem Charpy'ego wykonano w temperaturze wynoszącej: 500°C, 600°C i 650°C na próbkach poddanych 1 tysiącowi oraz 5 tysiącom cykli nagrzewania. W badaniach stosowano młot wahadłowy o początkowej energii uderzenia wynoszącej 300 J. Przeprowadzono pomiary głębokości pęknięć na przekrojach próbek, po wykonaniu prób udatności oraz przeanalizowano wyniki otrzymanych badań. Badania te wykonano na próbkach poddanych cyklicznemu nagrzewaniu w temperaturze 600°C i 650°C. W wyniku cyklicznego nagrzewania próbek do temperatury 500°C przy 5 tysiącach cykli nie stwierdzono pęknięć cieplnych. Nagrzanie próbek poddanych cyklicznemu zmęczeniu cieplnemu w temperaturze 500°C i 650°C spowodowało zwiększenie energii uderzenia w porównaniu do próbek ulepszonych cieplnie. W temperaturze 600°C wystąpił efekt zwiększenia twardości, co skutkowało zmniejszeniem energii uderzenia potrzebnej na złamanie próbki udatnościowej. Najdłuższe pęknięcia otrzymano na próbkach poddanych 5 tysiącom cykli nagrzewania w temperaturze wynoszącej 650°C.

Słowa kluczowe: zmęczenie cieplne, stal narzędziowa do pracy na gorąco, Orvar Supreme, pęknięcia cieplne

Article info

Received: 21.10.2014
Reviewed: 7.11.2014
Accepted: 16.03.2015

Authors' contribution

- (1) Preparation of the article, thermal fatigue investigation
- (2) Metallographic investigation, preparation of the article
- (3) Thermal fatigue investigation

Abstract

The paper presents the results of investigation of thermal fatigue of Orvar Supreme steel (equivalent of WCLV steel) on a test stand designed by the Metal Forming Institute. The stand consisted of the following main elements: induction heater, cooling system of pyrometers. Thermal cracks have been made on rectangular samples with the dimensions close to those of standard impact test pieces but without notch. The heating cycles of the sample have been performed at the temperature of 500°C, 600°C, and 650°C. The number of cycles was 1 thousand and 5 thousand. Non-destructive measurements of the total length of thermal cracks on the sample edge have been performed by means of a computer tomograph by the Institute of Casting in Cracow. Charpy impact test has been performed at the temperature of 500°C, 600°C and 650°C on samples subjected to a thousand and 5 thousand heating cycles. In the tests, Charpy pendulum machine with

* Autor do korespondencji. Tel.: +48 61 657 05 55; fax: +48 61 657 07 21; e-mail: jaroslaw.lulkiewicz@inop.poznan.pl

* Corresponding author. Tel.: +48 61 657 05 55; fax: +48 61 657 07 21; e-mail: jaroslaw.lulkiewicz@inop.poznan.pl

- (4) Thermal fatigue investigation
 (5) Thermal fatigue investigation
 (6) Project manager, concept, assumptions, methodology

initial impact energy of 300 J has been used. The crack depths have been measured on the cross sections of samples after impact tests and the test results have been analysed. The tests have been performed on samples subjected to cyclic heating at the temperature of 600°C and 650°C. As a result of the cyclic heating of the samples up to the temperature of 500°C, at 5 thousand cycles, thermal cracks have not been found. Heating has caused increase of the impact energy as compared to toughened samples. At the temperature of 600°C, the effect of hardness increase has taken place, which has resulted in reduction of the energy necessary to break the impact test piece. The longest cracks have been obtained on the samples subjected to 5 thousand heating cycles at 650°C.

Keywords: thermal fatigue, hot-work tool steel, Orvar Supreme, thermal cracks

1. WSTĘP

Na trwałość narzędzi składa się wiele czynników, które najczęściej działają jednocześnie. Pomijając czynniki zewnętrzne, jakimi są: błąd ludzki, stan maszyn czy konstrukcja narzędzi, to głównymi czynnikami wpływającymi na zużycie narzędzi kuźniczych są: wartość nacisku jednostkowego, wielkość przemieszczenia materiału na powierzchni styku par trących, gatunek materiału narzędzia, jakość obróbki cieplnej i cieplno-chemicznej narzędzia oraz masa odkuwki [1]. Warstwa wierzchnia matrycy poddawana jest podczas kucia cyklicznym naprężeniom cieplno-mechanicznym, początkowo naprężeniom ściskającym, a następnie rozciągającym podczas chłodzenia wykroju, po odkształceniu materiału wsadowego i jego usunięciu z matrycy. W artykule zwrócono uwagę na zagadnienie naprężeń cieplnych, ponieważ wskutek działania tych naprężeń powstaje siatka pęknięć na powierzchni matryc kuźniczych. Zwiększenie ilości cykli naprężeń cieplnych powoduje zwiększenie długości pęknięć, a przy dodatkowym działaniu naprężeń mechanicznych następuje wykruszenie materiału matrycy i stopniowa degeneracja wykroju matrycy, aż do utraty wymiaru [2]. Struktura i właściwości wytrzymałościowe warstwy wierzchniej mają decydujący wpływ na trwałość narzędzi w początkowym etapie produkcji. Od materiałów na matryce do kucia na gorąco wymagana jest wysoka wytrzymałość i udatność w temperaturach pracy narzędzia.

2. CEL BADAŃ

Konkurencja na rynku i wzrastające koszty pracy sprawiają, że kuźnie poszukują oszczędności przy produkcji wyrobów kutych. Duży wpływ na

1. INTRODUCTION

Many factors, often acting simultaneously, determine the lifetime of tools. Besides external factors, such as: human error, the technical condition of machinery, or tool design, the main factors affecting forging tool wear are: unit pressure value, material displacement on the contact surface of friction pairs, tool material grade, quality of heat and thermochemical treatment of the tool, and the mass of the forging [1]. In the forging process, the surface layer of the die is subjected to cyclic thermomechanical stresses, initially compressive stresses, then tensile stresses during cooling of the impression, after deformation of the feedstock and its removal from the die. This article also draws attention to the issue of thermal stresses, because, as a result of these stresses, a net of cracks forms on the surfaces of forging dies. An increase in the number of thermal stress cycles causes an increase in crack length, and with the additional action of mechanical stresses, the die material is chipped away and its impression gradually deteriorates, until loss of dimension [2]. The structure and strength properties of the surface layer are decisive to tool life in the initial stage of production. High strength and impact resistance at the tool's working temperatures is required of hot forging dies.

2. GOAL OF STUDIES

Competition on the market and increasing labor costs are causing forging shops to seek savings in the production of forged products. The lifetime

przy produkcji wyrobów kutech. Duży wpływ na obniżenie kosztów produkcji ma trwałość matryc do kucia, dlatego istotne znaczenie ma wykonanie ich z odpowiedniego materiału, który spowoduje podniesienie trwałości, a tym samym obniży koszty jednostkowe odkuwek.

Celem badań było określenie wpływu cyklicznego zmęczenia cieplnego na udarność stali narzędziowej do pracy na gorąco Orvar Supreme. Badania pozwoliły uzyskać odpowiedź na pytanie, czy stal Orvar Supreme wykazuje zmianę udarności po okresie pracy w warunkach zbliżonych do warunków eksploatacji narzędzi kuźniczych.

3. MATERIAŁ I METODYKA BADAŃ

3.1. Materiał do badań

Właściwości stali chromowo-molibdenowo-wanadowej Orvar Supreme (odpowiednik stali WCLV wg normy PN-EN ISO 4957:2004 – *Stale narzędziowe*) sprawiają, że jest ona bardzo często stosowana na matryce kuźnicze do kucia na gorąco. Według oferty producenta omawiana stal dzięki przetopowi elektrożułowemu wykazuje jednorodne właściwości w porównaniu do tradycyjnie produkowanych gatunków stali AISI H13 [3]. Zawartość podstawowych składników chemicznych stali Orvar Supreme podano w tab. 1.

Tab. 1. Zawartość składników chemicznych stali Orvar Supreme
Tab. 1. Content of chemical ingredients in Orvar Supreme steel

Zawartość pierwiastków w % wagowych Element content in %wt.					
C	Si	Mn	Cr	Mo	V
0,39	1,0	0,4	5,2	1,4	0,9

3.2. Stanowisko badawcze

Istnieją różnego rodzaju stanowiska badawcze do badań zmęczenia cieplnego. Wiele z nich stanowi unowocześnienie metody „wirującego krążka”. W metodzie tej zanurzony w wodzie obracający się krążek nagrzewany jest lokalnie w sposób indukcyjny lub za pomocą acetyleny. Taki układ zmęczeniowy powoduje szybkie poja-

in the production of forged products. The lifetime of forging dies has a great impact on reducing production costs, so their manufacture from the appropriate material, which will increase their lifetime and reduce forging unit costs, is very important.

The goal of studies was to determine the influence of cyclic thermal fatigue on the impact strength of Orvar Supreme hot-work tool steel. Studies will make it possible to obtain an answer to the question of whether Orvar Supreme steel exhibits a change in impact resistance after the working period under conditions similar to the exploitation of forging tools.

3. RESEARCH MATERIAL AND METHODOLOGY

3.1. Research material

The properties of Orvar Supreme chromium-molybdenum-vanadium steel (the counterpart of WCLV steel according to the PN-EN ISO 4957:2004 – *Tool steels standard*) are such that it is often used to manufacture hot forging dies. According to the manufacturer's offer, thanks to electroslag remelting, the steel in question exhibits uniform properties in comparison to conventionally manufactured AISI H13 steel grades [3]. The contents of basic chemical ingredients in Orvar Supreme steel are given in Tab. 1.

3.2. Research station

There are various types of research stations for thermal fatigue studies. Many of them involve the modernized “spinning disk” method. In this method, a spinning disk, immersed in water, is locally heated by induction or by means of acetylene. Such a fatigue system causes the fast appearance of cracks on the sample, and determination

wianie się pęknięć na próbce, a określenie wielkości i kształtu tych pęknięć powoduje jednocześnie określenie odporności materiału na zmęczenie cieplne [4]. Współczesne modernizacje stanowiska badawczego metodą „wirującego krążka” dotyczą głównie układu chłodzenia, grzania oraz systemu pomiarowego [5]. Instytut Obróbki Plastycznej w Poznaniu zaprojektował autorskie i innowacyjne urządzenie do badań zmęczenia cieplnego. Główną ideą przy tworzeniu urządzenia było zaprojektowanie go w taki sposób, aby jak najlepiej symulowało proces zmęczenia cieplnego materiału narzędziowego, jaki ma miejsce podczas seryjnego wytwarzania wyrobów kutech. Urządzenie wyposażone było w nagrzewnicę indukcyjną oraz układ siłowników pneumatycznych umożliwiającymi szybkie przemieszczenia próbki między strefą grzania a chłodzenia. Stanowisko badawcze posiadało szereg regulacji pozwalających na dowolne zaprogramowanie procesu. Należały do nich:

- regulacja czasu i wartości prądu przy nagrzewaniu,
- regulacja czasu postoju próbki w strefach pomiaru temperatury (po nagrzaniu i po chłodzeniu),
- regulacja czasu chłodzenia próbki.

Stanowisko do badań zmęczenia cieplnego pokazano na rys. 1.

of the size and shape of these cracks also determines the material's resistance to thermal fatigue [4]. Modern "spinning disk" research stations mainly involve the cooling, heating, and measuring systems [5]. The Metal Forming Institute in Poznań has designed an original and innovative machine for thermal fatigue testing. The main concept in the creation of the machine was to design it in such a way, so that it best simulates the thermal fatigue process of tool material that takes place during the serial production of forged products. The machine was equipped with an induction heater and a system of pneumatic cylinder enabling fast relocation of the sample between the heating and cooling zones. The research station had a series of controls allowing for free programming of the process. These included:

- *control of the heating time and current value,*
- *control of sample standstill time in temperature measurement zones (after heating and after cooling),*
- *control of sample cooling time.*

The station for thermal fatigue studies is shown in Fig. 1.



Rys. 1. Stanowisko do badań zmęczenia cieplnego

Fig. 1. Station for thermal fatigue studies

Urządzenie badawcze wyposażone było w układ chłodzenia próbki (2). Zastosowanie jako chłodziwa dejonizowanej wody eliminuje wżery ko-

The testing machine was equipped with a sample cooling system (2). The application of deionized water as a coolant eliminates corrosion pits

rozyjne, jakie mogą pojawić się na próbce, oraz zapobiega osadzeniu się soli. Układ posiadał dwie główne strefy: chłodzenia oraz dejonizowania wody. Chłodzenie polegało na podziale strumienia na wiele mniejszych i grawitacyjnym spadku do zbiornika głównego, natomiast dejonizacja przebiegała poprzez przepływ chłodziwa przez wymiennik wypełniony żywicą dejonizacyjną.

Dla poprawnego określenia współczynnika emisyjności przygotowano specjalne próbki pokryte grafitem z miejscem na zamocowanie termopary. Następnie zostały one poddane zmęczeniu cieplnemu w temperaturze 500°C, 600°C oraz 650°C przy liczbie cykli: 500 oraz 1500. Wzorcem temperatury próbki były wskazania termopary, a na podstawie odczytów z termopary skalibrowano pirometry stosowane w badaniach.

3.3. Metodyka badań

Wykonano próbki materiału o wymiarach 11x11x56 mm o twardości 50±2 HRC. Na podstawie wcześniej przeprowadzonych badań udarności w podwyższonej temperaturze wybrano trzy wartości temperatury nagrzewania próbek: 500°C, 600°C i 650°C. Próbki o takiej temperaturze poddano zmęczeniu cieplnemu – 1000 i 5000 cykli nagrzewania i chłodzenia.

W pracy zastosowano następujące metody badawcze:

- pomiar twardości próbek metodą Rockwella, wg normy PN-EN ISO 6508-1:2007 - *Metale -- Pomiar twardości sposobem Rockwella -- Część 1: Metoda badań (skale A, B, C, D, E, F, G, H, K, N, T)*, za pomocą twardościomierza FR-3ATL (Future Tech Corp.) przed i po badaniach zmęczenia cieplnego,
- pomiar głębokości pęknięć próbek metodą radiograficzną za pomocą tomografu rentgenowskiego zgodnie z wytycznymi w Procedurze TBS/P/012/01 pt. „Badania radiograficzne odlewów, odlewów z żeliwa, staliwa, stopów metali nieżelaznych. Ujawnianie wad, określanie ich rozmiarów i położenie w badanym elemencie metodą radiograficzną” oraz norm PN-EN16016-3:2011 - *Badania nieniszczące -- Metoda radiacyjna – Tomografia*

that could appear on the sample and prevents salt deposition. The system consisted of two main zones: cooling and water deionization. Cooling was based on separation of the stream into many smaller ones and gravity runoff to the main tank, and deionization took place by means of the flow of coolant through an exchanger filled with deionizing resin.

In order to properly determine the emissivity coefficient, special graphite-coated samples, with a thermocouple fastening point, were prepared. They were then subjected to thermal fatigue at temperatures of 500°C, 600°C and 650°C at 500 and 1500 cycles. The reference sample temperature was the indication on the thermocouple, and the pyrometers that were used in studies were calibrated based on readings from the thermocouple.

3.3. Research methodology

Material samples with dimensions of 11x11x56 mm and 50±2 HRC hardness were made. Based on previous impact testing at raised temperatures, three sample heating temperatures were selected: 500°C, 600°C and 650°C. At these temperatures, samples were subjected to thermal fatigue – 1000 and 5000 heating and cooling cycles.

The following research methods were applied in the study:

- sample hardness measurement using the Rockwell method, according to standard PN-EN ISO 6508-1:2007 - *Metallic materials -- Rockwell hardness test -- Part 1: Test method (scales A, B, C, D, E, F, G, H, K, N, T)*, by means of an FR-3ATL hardness tester (Future Tech Corp.) before and after thermal fatigue tests,
- crack depth measurement in samples using the radiographic method, using an X-ray CT scanner in compliance with the guidelines in Procedure TBS/P/012/01, entitled “Radiographic testing of castings made of cast iron, cast steel, or alloys of non-ferrous metals. Detection of defects, determination of their sizes and positions in the tested element using the radiographic method” as well as in compliance with standards PN-EN 16016-3:2011 -

- nymi z obowiązującą procedurą wykonywania badań),
- badanie udarności próbek na młocie udarnościowym RKP 300 (Zwick/Roell) według normy PN-EN ISO 148-1:2010 -- *Próba udarności sposobem Charpy'ego -- Część 1: Metoda badania*,
 - pomiar głębokości pęknięć przy użyciu mikroskopu świetlnego Eclipse L150 (Nikon) wyposażonego w program do analizy obrazu NIS Elements.
- the hardware manufacturer's guidelines and documents related to the current testing procedure),*
- *impact testing of samples on an RKP 300 impact test hammer (Zwick/Roell), in compliance with standard PN-EN ISO 148-1:2010 -- Charpy pendulum impact test -- Part 1: Test method,*
 - *crack depth measurement using an Eclipse L150 optical microscope (Nikon), equipped with NIS Elements image analysis software.*

4. WYNIKI BADAŃ

4.1. Pomiary twardości

Twardość próbek w stanie ulepszonym cieplnie wyniosła 50 ± 2 HRC. Po wykonaniu badań zmęczenia cieplnego twardość próbek zmierzono ponownie. Uśrednione wyniki pomiarów wraz z odchyleniem standardowym podano w tab. 2.

4. TESTS RESULTS

4.1. Hardness measurements

Sample hardness in the heat-treated state was 50 ± 2 HRC. After thermal fatigue tests were performed, sample hardness was measured once again. Averaged results of measurements, along with their standard deviations, are given in Tab. 2.

Tab. 2. Twardość próbek w stanie ulepszonym cieplnie oraz po badaniach zmęczenia cieplnego w różnej temperaturze przy różnej liczbie cykli

Tab. 2. Sample hardness in a heat-treated stated and after thermal fatigue tests at various temperatures and numbers of cycles

Stan próbki <i>Sample state</i>	Średnia twardość HRC <i>Average HRC hardness</i>	Odchylenie standardowe HRC <i>HRC standard deviation</i>
Ulepszona cieplnie <i>Heat-treated</i>	49,9	0,19
500°C / 1 tys. cykli <i>500°C / 1 thousand cycles</i>	48,4	0,30
600°C / 1 tys. cykli <i>600°C / 1 thousand cycles</i>	47,0	1,03
650°C / 1 tys. cykli <i>650°C / 1 thousand cycles</i>	38,4	1,85
500°C / 5 tys. cykli <i>500°C / 5 thousand cycles</i>	37,0	1,12
600°C / 5 tys. cykli <i>600°C / 5 thousand cycles</i>	43,4	0,48
650°C / 5 tys. cykli <i>650°C / 5 thousand cycles</i>	27,0	2,41

Badania wykazały, że wzrost temperatury badania oraz wzrost liczby cykli podgrzewania i chłodzenia powodują obniżenie twardości próbek. Największe obniżenie twardości, skutkiem zmęczenia cieplnego stwierdzono po 5000 cykli w temperaturze 650°C.

Tests showed that an increase in the testing temperature and number of heating and cooling cycles causes a reduction in the hardness of samples. The greatest reduction in hardness as a result of thermal fatigue was observed after 5000 cycles at a temperature of 650°C.

Analizując twardość próbek poddanych badaniom zmęczenia cieplnego przez 5000 cykli nagrzewania i chłodzenia, można zauważyć, że najmniejsze obniżenie twardości w porównaniu do próbek ulepszonych cieplnie ma miejsce w przypadku próbek nagrzewanych do temperatury 600°C. Związane jest to najprawdopodobniej z wydzielaniem się stopowych węglików.

4.2. Badania udarności

Próbki poddane zmęczeniu cieplnemu obrabiono mechanicznie do wymiarów znormalizowanej próbki do badań udarnościowych. Wyniki badań udarności próbek po zmęczeniu cieplnym podano w tab. 3 oraz na rys. 2.

By analyzing the hardness of samples subjected to thermal fatigue tests over 5000 cycles of heating and cooling, it can be seen that the least hardness reduction compared to heat-treated samples takes place in the case of samples heated to 600°C. This is most probably related to alloy carbide precipitation.

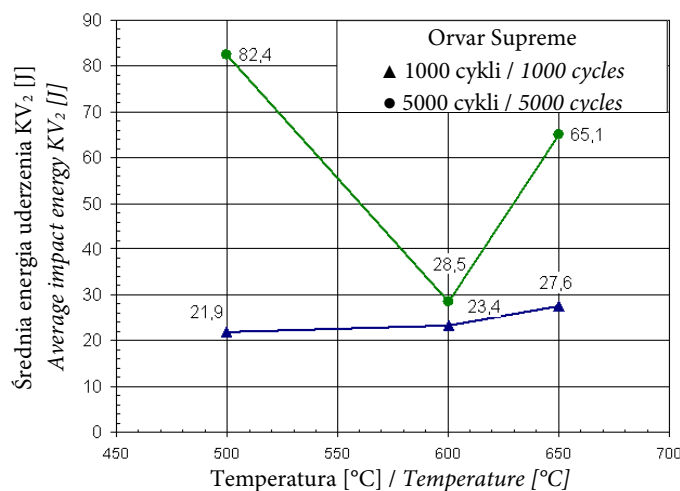
4.2. Impact testing

Samples subjected to thermal fatigue were mechanically machined to the dimensions of a standardized impact testing sample. The results of impact testing of samples subjected to thermal fatigue are given in Tab. 3 and in Fig. 3.

Tab. 3. Udarność próbek po ulepszeniu cieplnym oraz badaniach zmęczenia cieplnego

Tab. 3. Sample impact strength after heat treatment and after thermal fatigue tests

Stan próbki Sample state	Średnia energia uderzenia KV ₂ [J] Average impact energy KV ₂ [J]	Odchylenie standardowe KV ₂ [J] KV ₂ standard deviation [J]
Ulepszona cieplnie Heat-treated	22,0	1,27
500°C / 1 tys. cykli 500°C / 1 thousand cycles	21,9	3,52
600°C / 1 tys. cykli 600°C / 1 thousand cycles	23,4	3,70
650°C / 1 tys. cykli 650°C / 1 thousand cycles	27,6	2,74
500°C / 5 tys. cykli 500°C / 5 thousand cycles	82,4	15,2
600°C / 5 tys. cykli 600°C / 5 thousand cycles	28,5	3,82
650°C / 5 tys. cykli 650°C / 5 thousand cycles	65,1	5,52



Rys.2. Zależność energii uderzenia od temperatury nagrzewania próbek

Fig.2. Impact energy as a function of sample heating temperature

Z próby udatności próbek poddanych zmęczeniu cieplnemu w 1000 cykli nagrzewania i chłodzenia wynika, że energia uderzenia próbek nagrzewanych do temperatury 500°C zmniejszyła się niewiele (o 0,1 J) w stosunku do próbek ulepszonych cieplnie. Wskazuje to, że zmiany zachodzące w strukturze materiału próbek są niewielkie. W przypadku próbek nagrzewanych do temperatury 600°C i 650°C wzrost energii uderzenia wynosił odpowiednio 1,4 J i 5,6 J. Ma to związek z uplastycznianiem materiału, a tym samym ze spadkiem jego twardości. Suma czasu cyklicznego nagrzewania próbek do temperatury 600°C przy 1000 cykli jest zbyt krótka, by można było zaobserwować utwardzenie wydzieleniowe w warstwie wierzchniej próbek. Wyniki pomiarów twardości próbek poddanych zmęczeniu cieplnemu dla 5000 cykli nagrzewania i chłodzenia mają swoje odzwierciedlenie w wynikach próby udatności. Próbki nagrzewane do 600°C wykazują największą twardość, dlatego energia uderzenia potrzebna na ich złamanie jest najmniejsza. Wartość energii uderzenia próbek nagrzewanych cyklicznie do 500°C i próbek nagrzewanych do 650°C była większa.

4.3. Badania metodą radiologiczną

Trwałość matrycy zależy od jakości powierzchni wykrojów, ponieważ wżery, pęknięcia, wytarcia zmieniają geometrię odkuwki, a to może spowodować przekroczenie dopuszczalnych tolerancji wymiarowych wyrobu. Chcąc szerzej poznać zmiany na powierzchni próbek po zmęczeniu cieplnym, przeprowadzono nieniszczące badania mające na celu określenie wielkości pęknięć zmęczeniowych. Badania nieniszczące metodą radiologiczną przeprowadzono w Instytucie Odlewnictwa w Krakowie, za pomocą tomografu komputerowego typu v|tome|x L-450 (Phoenix).

Badania obejmowały pomiar łącznej długości pęknięć na krawędziach próbki. Pomiar wykonano z dokładnością: 5,0 $\mu\text{m}/\text{vox}$ (rozmiar woxela). W tab. 4 zaprezentowano wyniki pomiarów najdłuższych pęknięć, a na rys. 3 – przykładowe tomogramy.

Impact testing of samples subjected to thermal fatigue over 1000 heating and cooling samples indicates that the impact energy of samples heated to a temperature of 500°C was reduced by little (by 0.1 J) compared to heat-treated samples. This indicates that the changes occurring in the structure of the sample material are small. In the case of samples heated to temperatures of 600°C and 650°C, the increase in impact energy amounted to 1.4 J and 5.6 J, respectively. This is linked to plasticization of the material, and thus, to the reduction of its hardness. The total time of cyclic sample heating to 600°C over 1000 cycles is too short to observe precipitation hardening in the surface layer of samples. The results of hardness measurements of samples subjected to thermal fatigue over 5000 heating and cooling cycles are reflected in impact test results. Samples heated to 600°C exhibit the greatest hardness, which is why the impact energy required to break them is the lowest. The impact energy value was greater in the case of samples cyclically heated to 500°C and samples heated to 650°C.

4.3. Radiological testing

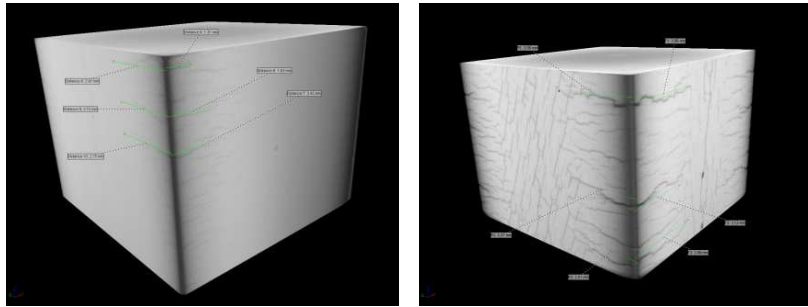
The durability of a die depends on the quality of impression surfaces, because pits, cracks, and abrasions change the geometry of the forging, and this may cause the acceptable dimensional tolerances of the product to be exceeded. To better understand the changes on the surfaces of samples after thermal fatigue, non-destructive tests were conducted for the purpose of determining the size of fatigue cracks. Non-destructive radiological tests were conducted at the Foundry Research Institute in Cracow by means of a v|tome|x L-450 CT scanner (Phoenix).

Studies included measurement of total crack length on sample edges. Measurements were performed with an accuracy to: 5.0 $\mu\text{m}/\text{vox}$ (voxel size). Tab. 4 presents the results of measurements of the longest cracks, and Fig. 3 presents examples of CT scan images.

Tab. 4. Zależność maksymalnych pęknięć od temperatury cyklicznego nagrzewania: 5000 cykli

Tab. 4. Dependency of maximum cracks on cyclic heating temperature: 5000 cycles

Temperatura / Temperature	Maksymalna długość pęknięcia [mm] / Maximum crack length [mm]
500°C	Brak pęknięć / No cracks
600°C	5,17
650°C	7,52



Rys. 3. Tomogramy komputerowe powierzchni próbek po zmęczeniu cieplnym 5000 cykli dla temperatur 600°C i 650°C

Fig. 3. CT scan images of sample surfaces after thermal fatigue over 5000 cycles at temperatures of 600°C and 650°C

Na próbkach poddanych badaniom cyklicznego nagrzewania w temperaturze 650°C, najdłuższe pęknięcie przy krawędzi wyniosło 7,52 mm. Na powierzchni próbek poddanych badaniom zmęczenia cieplnego w temperaturze 500°C nie zaobserwowano żadnych pęknięć.

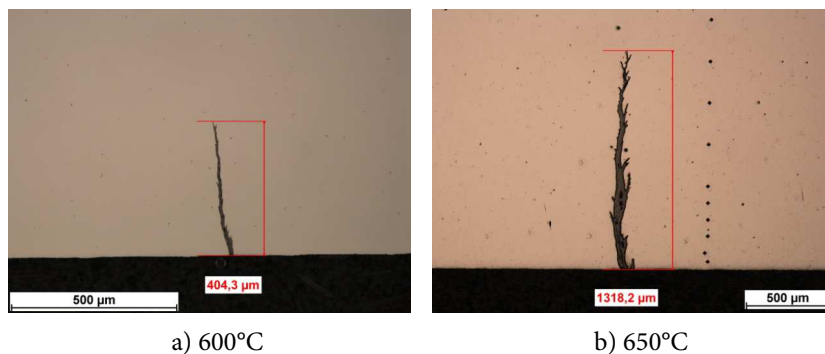
In samples subjected to cycle heating tests at a temperature of 650°C, the longest crack near an edge was 7.52 mm long. No cracks were observed on the surfaces of samples subjected to thermal fatigue tests at 500°C.

4.4. Badania głębokości pęknięć z pomocą mikroskopu świetlnego

W celu pełniejszego udokumentowania pęknięć próbek poddanych zmęczeniu cieplnemu przeprowadzono pomiary głębokości pęknięć na zglądach metalograficznych. Na rys. 4. przedstawiono wyniki pomiarów maksymalnych głębokości pęknięć próbek poddanych zmęczeniu cieplnemu przy 5000 cykli nagrzewania i chłodzenia.

4.4. Crack depth measurement by means of an optical microscope

In order to more fully document cracks in samples subjected to thermal fatigue, crack depth measurements were conducted on metallographic specimens. Fig. 4. presents the results of measurements of maximum crack depths in samples subjected to thermal fatigue over 5000 heating and cooling cycles.



Rys. 4. Pomiary głębokości pęknięć próbek poddanych badaniom zmęczenia cieplnego w temperaturze 600°C i 650°C

Fig. 4. Crack depth measurements of samples subjected to thermal fatigue tests at temperatures of 600°C and 650°C

Największą głębokość pęknięcia, która wyniosła 1,3 mm miała próbka poddana zmęczeniu cieplnemu w temperaturze 650°C. Natomiast w próbce badanej w temperaturze 600°C maksymalna głębokość pęknięcia wyniosła 0,4 mm. Próbki poddane cyklom zmęczenia cieplnego w temperaturze 500°C nie wykazywały pęknięć.

5. PODSUMOWANIE

Badania opisane w publikacji pozwoliły ocenić wpływ cyklicznego zmęczenia cieplnego stali Orvar Supreme na twardość i udarność scharakteryzowaną przez energię uderzenia użytą na złamanie próbki. Największy wzrost energii uderzenia do wartości 82,4 J (w stosunku do próbek ulepszonych cieplnie) wykazały próbki badane w temperaturze 500°C. Na powierzchni tych próbek nie zaobserwowano żadnych pęknięć, ani wżerów korozyjnych.

Cykliczne nagrzewanie stali do 600°C powoduje pewien wzrost właściwości udarnościowych stali w stosunku do próbek ulepszonych cieplnie, przy zachowaniu wysokiej twardości. Korzystne właściwości zaobserwowano zarówno dla 1000 cykli nagrzewania i chłodzenia (wzrost energii uderzenia o 6% przy obniżeniu twardości o 6%) oraz dla 5000 cykli, kiedy energia uderzenia wzrosła o 30%, przy jednoczesnym spadku twardości o 12%. Zmierzona głębokość pęknięć była trzykrotnie mniejsza od tej, jaka powstała w próbkach poddanych cyklicznemu zmęczeniu cieplnemu w temperaturze 650°C.

PODZIĘKOWANIA

Badania sfinansowano w ramach projektu pt. „Kompleksowy system ekspertowy do optymalizacji trwałości narzędzi w procesach kucia”, nr projektu: WND-POIG.01.03.01-02-161/09.

LITERATURA

- [1] Dobrzański L., Hajduczek E., Marciniak J., Nowosielski R.: *Metaloznawstwo i obróbka cieplna materiałów narzędziowych*. WNT Warszawa 1990.

The greatest crack depth, which amounted to 1.3 mm, was found in a sample subjected to thermal fatigue at 650°C. The maximum crack depth in a sample tested at 600°C amounted to 0.4 mm. Samples subjected to thermal fatigue cycles at 500°C did not exhibit cracks.

5. CONCLUSIONS

The studies described in this publication have allowed for assessment of the influence of cyclic thermal fatigue of Orvar Supreme steel on hardness and impact strength, characterized by the impact energy consumed to break the sample. The greatest increase in the value of impact energy, to a value of 82.4 J (compared to heat-treated samples, was exhibited by samples tested at 500°C. No cracks or corrosion pits were observed on the surfaces of these samples.

Cyclic heating of steel to 600°C causes a certain increase in the impact properties of the steel relative to heat-treated samples, with the preservation of high hardness. Favorable properties have been observed for both 1000 heating and cooling cycles (increase of impact energy by 6% with hardness reduction by 6%) and for 5000 cycles, where the impact energy increased by 30% with a simultaneous reduction in hardness by 12%. The measured crack depth was three times less than the crack depth in samples subjected to cyclic thermal fatigue at a temperature of 650°C.

ACKNOWLEDGEMENTS

Studies were financed within the framework of the project entitled “Complete expert system for optimization of tool life in forging processes”, WND-POIG.01.03.01-02-161/09.

REFERENCES

- [1] Dobrzański L., Hajduczek E., Marciniak J., Nowosielski R.: *Physical metallurgy and heat treatment of tool materials*. WNT Warsaw 1990.

-
- [2] Gronostajski Z., Hawryluk M., Zwierzchowski M., Kaszuba M.: *Zużycie matryc do kucia na gorąco odkuwki koła czołowego*. *Rudy i Metale Nieżelazne* t. 56 nr 11 (2011), s. 571–576.
- [3] Uddeholm – prospekt dotyczący właściwości stali Orvar Supreme.
- [4] Żmihorski E.: *Stale narzędziowe i obróbka cieplna narzędzi*. WNT Warszawa 1976.
- [5] Hawryluk M., Marciniak M.: *Zmęczenie cieplne stali WCLV stosowanej na matryce w procesie kucia koła czołowego*. *Hutnik – Wiadomości Hutnicze* nr 8 (2012), s. 587–591.
- [2] Gronostajski Z., Hawryluk M., Zwierzchowski M., Kaszuba M.: *The wear of dies for hot forging of the front wheel*. *Ores and Non-Ferrous Metals* v. 56 no. 11 (2011), pp. 571–576.
- [3] Uddeholm – brochure concerning the properties of the Orvar Supreme steel.
- [4] Zmihorski E.: *Stale narzędziowe i obróbka cieplna narzędzi*. WNT Warsaw 1976.
- [5] Hawryluk M., Marciniak M.: *Thermal fatigue of WCLV steel used for dies in forging of the front wheel*. *Metallurgy – Metallurgical Engineering News* no. 8 (2012), pp. 587–591.

