

Adam LIPSKI, Stanisław MROZIŃSKI

TERMOWIZYJNA ANALIZA ZMIANY TEMPERATURY W TRAKCIE MONOTONICZNEGO ROZCIĄGANIA PRÓBK STALOWEJ BEZ WYRAŻNEJ GRANICY PLASTYCZNOŚCI

W artykule przedstawiono termowizyjną analizę zmiany temperatury w trakcie monotonicznego rozciągania próbki stalowej bez wyraźnej granicy plastyczności. Wskazano na zakres odkształcenia próbki, dla którego zaobserwowano zgodność z klasyczną teorią termosprężystości. Zweryfikowano możliwość termowizyjnego wykrywania obszaru powstającego przewężenia i zniszczenia próbki.

Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy, Wydział Mechaniczny,
al. Prof. S. Kaliskiego 7, 85-789 Bydgoszcz

1. WPROWADZENIE

Efekt termosprężysty znany jest już od prawie dwóch wieków, jednakże praktyczne zastosowanie w metodach eksperymentalnych znalazł dopiero w drugiej połowie XX wieku w nieniszczącej bezstykowej metodzie termosprężystej analizy naprężeń TSA (Thermoelastic Stress Analysis).

Efekt termosprężysty polega na odwrotnej konwersji pomiędzy energią mechaniczną i ciepłą towarzyszącą sprężystym obciążeniom rozciągającym lub ściskającym, powodującym zmianę temperatury obiektu. Efekt ten nie jest jedyną przyczyną zmiany temperatury badanego obiektu – oprócz niego zmianę temperatury powodować mogą: zewnętrzne źródło ciepła, przewodność cieplna oraz wewnętrzna dyssypacja energii [1].

Pierwsze obserwacje efektu termosprężystego przypisuje się Wilhelmowi Weberowi (1830 r.) [2], chociaż pewne wzmianki jego dotyczące znaleźć można w pracach Gougha (1805 r.). Teoretyczne podstawy termosprężystości podał Wiliam Thomson (znany później jako Lord Kelvin) w 1853 r. [3] w postaci zależności:

$$Q = -T_0 \cdot \frac{dw}{dT} \quad (1)$$

gdzie:

- Q -- ciepło generowane na jednostkę objętości w trakcie odkształcania materiału,
- T_0 -- temperatura absolutna,
- dw/dT -- praca mechaniczna w odniesieniu do temperatury.

Powyższe równanie określa relację pomiędzy wydzielającą się energią ciepłą a pracą odkształcenia sprężystego, przypadającą na jednostkę objętości materiału [4].

Praca ta może być wyrażona za pomocą zależności:

$$dw = \sigma_i \cdot d\varepsilon_i, \quad i = 1, 2, 3, \quad (2)$$

gdzie:

- i – oznacza kierunek główny,
- σ_i – naprężenie w kierunku głównym i ,
- ε_i – odkształcenie w kierunku i .

Uwzględniając warunki procesu adiabatycznego oraz równanie (2), równanie (1) zapisać można w postaci:

$$Q = -T_0 \cdot \sigma_i \cdot \frac{d\varepsilon_i}{dT} \quad (3)$$

gdzie $d\varepsilon_i/dT$ stanowi liniowy współczynnik rozszerzalności cieplnej w określonym kierunku głównym i .

Zgodnie z powyższym zapisem w warunkach adiabatycznych w zakresie odkształceń sprężystych w przypadku rozciągania następował będzie spadek temperatury ciała, a w przypadku ściskania jej wzrost [5].

Zakładając własności izotropowe materiału równanie (3) przyjmuje postać:

$$Q = -T_0 \cdot \sigma_m \cdot \alpha \quad (4)$$

gdzie: $\sigma_m = \frac{\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}}{3} = \frac{\sigma_{ii}}{3}$ – naprężenie średnie,

α – liniowy współczynnik rozszerzalności cieplnej dla materiału izotropowego.

Różniczkując równanie (4) względem naprężeń otrzymuje się równanie:

$$\frac{\partial Q}{\partial \sigma_{ii}} = -\frac{3 \cdot T_0 \cdot \alpha}{3} = -T_0 \cdot \alpha_i \quad (5)$$

które po rozwiązaniu i podzieleniu przez objętościową pojemność cieplną C daje klasyczną zależność termosprężystą:

$$\Delta T = -\frac{T_0 \cdot \alpha}{C} \cdot \Delta \sigma_{ii} \quad (6)$$

Obecnie podaje się je w postaci liniowej zależności pomiędzy zmianą temperatury izotropowego ciała stałego a zmianą sumy naprężeń głównych [6]:

$$\Delta T = -\frac{\alpha}{\rho \cdot C_\varepsilon} \cdot T \cdot \Delta \sigma = -K_m \cdot T \cdot \Delta \sigma \quad (7)$$

gdzie:

- α – liniowy współczynnik rozszerzalności cieplnej,
- ρ – gęstość,
- C_ε – ciepło właściwe dla stałego odkształcenia,

- T – temperatura otoczenia,
 K_m – termosprężysta stała materiałowa,
 $\Delta\sigma$ – zmiana sumy naprężeń głównych lub normalnych:

$$\Delta\sigma = \Delta(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) = \Delta(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) \quad (8)$$

przy czym dla przypadku płaskiego naprężenia (powierzchnia ciała) $\sigma_z = 0$.

Ponieważ w wyniku analizy TSA otrzymuje się sumę naprężeń, konieczne więc jest dokonanie ich rozdzielenia na poszczególne składowe [7].

Zgodnie z przedstawionym powyżej opisem zakres zastosowania klasycznej termosprężystej analizy naprężeń TSA ogranicza się do zakresu obowiązywania równania (7).

Niniejsza praca ma charakter rozpoznawczy – dotyczy określenia zakresu zastosowania TSA na podstawie analizy zmiany temperatury próbki stalowej w trakcie monotonicznego rozciągania.

2. STANOWISKO BADAWCZE

Na rysunku 1 pokazano stanowisko wykorzystane w trakcie analizy termowizyjnej.



Rys. 1. Stanowisko badawcze z termowizyjnym układem pomiarowym: 1 – kamera termowizyjna CEDIP Silver 420M, 2 – badany obiekt (próbka), 3 – hydrauliczna maszyna wytrzymałościowa INSTRON 8502, 4 – konsola systemu sterowania 8500 maszyny wytrzymałościowej INSTRON, 5 – komputer PC z oprogramowaniem umożliwiającym sterowanie kamerą termowizyjną, 6 – odbiornik TV z podglądem obrazu z kamery termowizyjnej

Głównym elementem stanowiska badawczego jest kamera termowizyjna CEDIP Silver 420M wyposażona w wysokiej czułości matrycę InSb chłodzoną pompą Stirlinga. Podstawowe parametry kamery:

- rozdzielczość 320×256 pikseli, plamka 30 μm ,
- zakres spektralny 3,6÷5,0 μm ,
- czułość poniżej 20 mK (osiągalna 8 mK),
- częstotliwość 100 Hz dla całej matrycy (do 25000 Hz w mniejszej rozdzielczości).

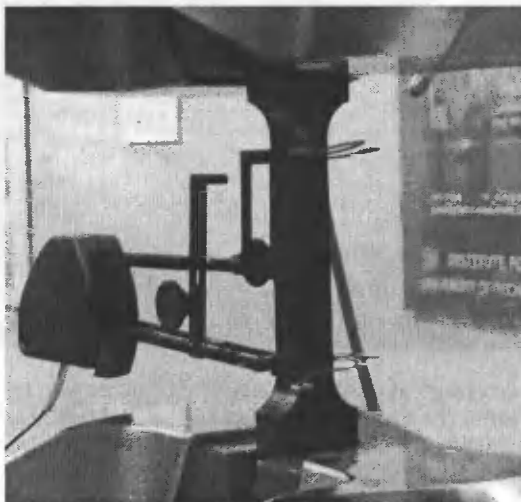
Kamera termowizyjna (1) rejestruje rozkład temperatury badanego obiektu (próbki) (2) zamocowanego na hydraulicznej maszynie wytrzymałościowej INSTRON 8502 (3), realizującej założony program obciążenia poprzez konsolę układu sterowania (lub komputer PC) oraz system sterowania 8500 (4). Obraz z kamery przekazywany jest za pomocą złącza USB 2.0 do komputera PC (5) z odpowiednim oprogramowaniem, gdzie jest nagrywany w postaci cyfrowej do pamięci komputera lub bezpośrednio na dysk w formie plików PTW. Jednocześnie podłączony monitor TV (6) umożliwia ciągły podgląd nagrywanego obrazu z kamery termowizyjnej.

Komputer PC (6) zawiera oprogramowania:

- VirtualCAM umożliwiające dwustronną komunikację komputera z kamerą termowizyjną poprzez złącze USB 2.0,
- CIRRUS Front End stanowiące interfejs użytkownika kontrolujący kamerę CEDIP,
- ALTAIR umożliwiające pobieranie, rejestrację oraz zaawansowaną obróbkę obrazów termograficznych.

3. OPIS BADANIA I ZASTOSOWANEJ PRÓBKII

Na rysunku 2 przedstawiono zastosowaną w doświadczeniu próbkę wykonaną ze stali stopowej ($R_{0,2} = 321 \text{ MPa}$, $R_m = 664 \text{ MPa}$, $A = 21\%$, $Z = 49,5\%$). Przekrój próbki w części pomiarowej wynosił 166 mm^2 , długość części pomiarowej 80 mm, długość całkowita próbki 300 mm.

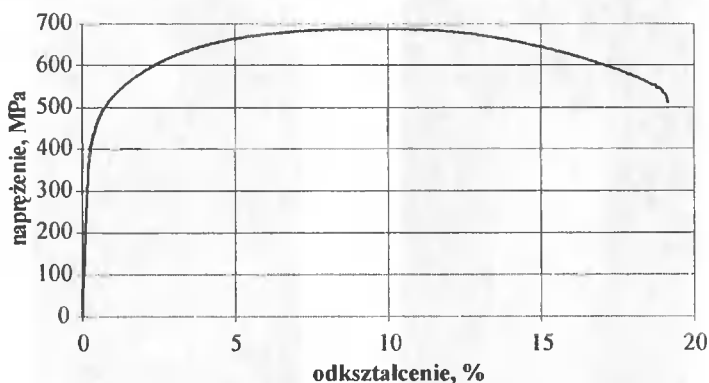


Rys. 2. Próbką zastosowaną w badaniu

Badanie przeprowadzono przy zachowaniu stałej prędkości przemieszczenia uchwytu maszyny wytrzymałościowej wynoszącej $0,5 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$. W trakcie badania rejestrowano siłę, przemieszczenie uchwytów i odkształcenie w obrębie części pomiarowej, jak również polowy rozkład temperatury powierzchni próbki. Próbę prowadzono do momentu zerwania próbki.

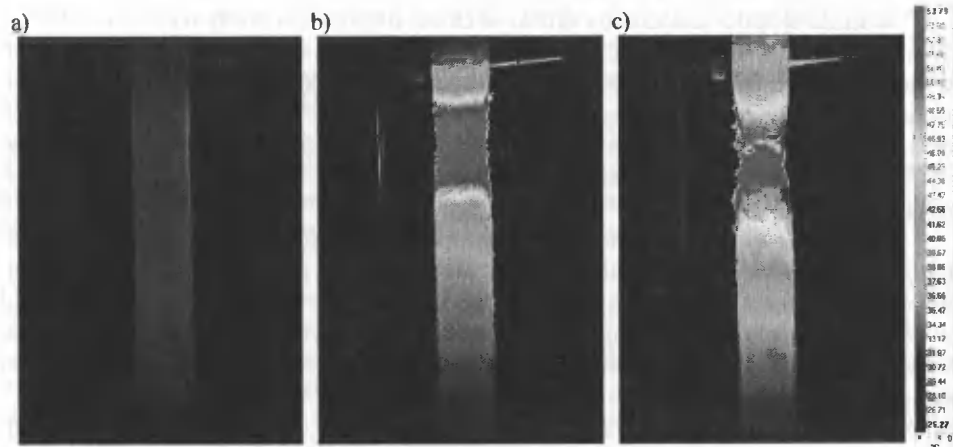
4. WYNIKI POMIARÓW I ICH ANALIZA

Wykres monotonicznego rozciągania otrzymany w przeprowadzonej próbie przedstawiono na rysunku 3.



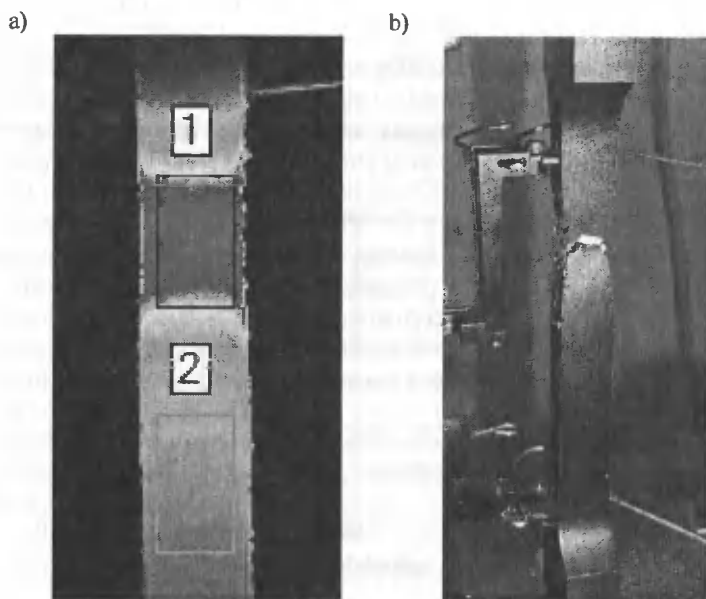
Rys. 3. Wykres monotonicznego rozciągania próbki otrzymany w badaniu

W trakcie próby zarejestrowano łącznie 3 600 termogramów (częstotliwość zapisu 50 Hz, odstęp pomiędzy kolejnymi rejestracjami 20 ms). Wybrane termogramy zarejestrowane w trakcie próby monotonicznego rozciągania przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Wybrane termogramy zarejestrowane podczas próby monotonicznego rozciągania: a) odpowiadający maksymalnemu obciążeniu w próbie, b) odpowiadający momentowi zerwania próbki, c) po zerwaniu (widoczny przelot próbki)

W trakcie dalszej obróbki zarejestrowanego materiału w programie ALTAIR wyróżniono dwa obszary (rys. 5) – obszar 1 odpowiadający rejonowi ukształtowania się przewężenia i zerwania próbki oraz porównawczy obszar 2, znajdujący się poza tym rejonem.

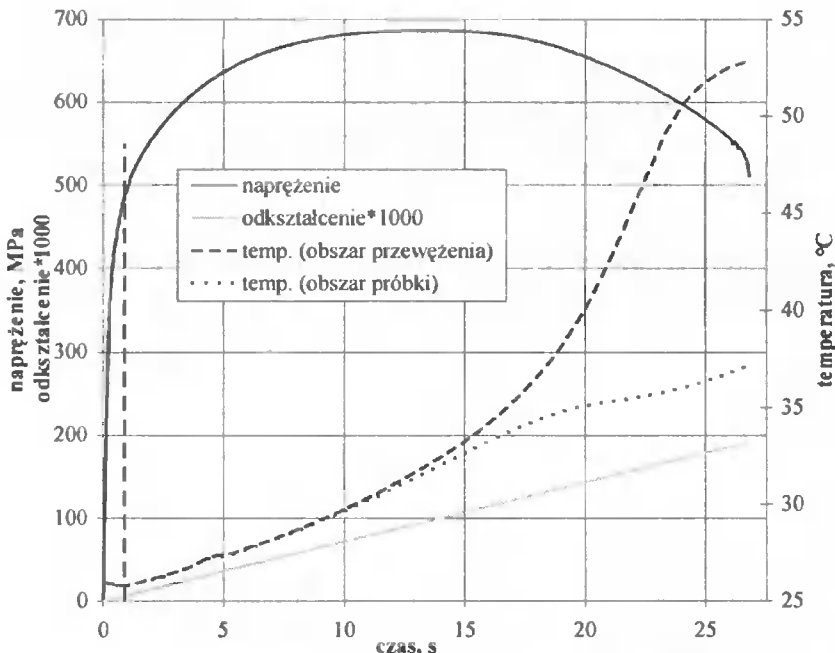


Rys. 5. Przykładowy termogram z zaznaczonymi obszarami szczegółowej analizy zmiany temperatury w czasie (a) oraz widok próbki po zerwaniu (b)

Na rysunku 6 zestawiono przebiegi czasowe naprężenia, odkształcenia oraz średniej temperatury w obszarze 1 (przewężenia) oraz obszarze 2 (porównawczym).

Wartość średniej temperatury próbki w chwili rozpoczęcia próby wynosiła $25,95^{\circ}\text{C}$. W pierwszym etapie monotonicznie narastającego obciążenia – do wartości naprężenia wynoszącego ok. 486 MPa i odkształcenia wynoszącego ok. $0,63\%$ – zauważyć można stopniowy liniowy spadek temperatury próbki (do wartości $25,77^{\circ}\text{C}$), zgodny z charakterem zależności (7), co zaznaczono na rysunku 5 linią kreskową. Granicę tę uznać można za zakres stosowalności klasycznej termosprężystej analizy naprężeń TSA dla tego materiału.

Przy dalszym wzroście obciążenia następował stopniowy, równomierny wzrost temperatury próbki w obu analizowanych obszarach. Po przekroczeniu maksymalnej wartości obciążenia temperatura w obu obszarach zaczęła przyrastać z różną prędkością; w obszarze 1 w rejonie kształtującego się przewężenia przyrost temperatury był istotnie większy niż w pozostałej części próbki reprezentowanej przez obszar 2. Średnia temperatura w rejonie przewężenia osiągnęła swoją maksymalną wartość wynoszącą $52,87^{\circ}\text{C}$ w chwili zerwania próbki. Poza tym rejonem temperatura wzrosła do znacznie niższej wartości wynoszącej $37,2^{\circ}\text{C}$. Różnica temperatury pomiędzy porównywanymi obszarami, wynosząca ponad 15°C , wskazuje na znaczną pracę odkształcenia plastycznego wykonaną w czasie kształtowania się przewężenia.



Rys. 6. Przebieg zmian naprężenia, odkształcenia oraz średniej temperatury w obszarze ukształtowania się przewężenia i zerwania próbki w czasie próby monotonicznego rozciągania oraz poza tym obszarem (linią kreskową zaznaczono zakres obowiązywania zależności (7))

5. PODSUMOWANIE

Przedstawione w pracy badanie miało charakter rozpoznawczy i weryfikacyjny, dotyczący nowej aparatury badawczej i metody wyznaczania rozkładów naprężeń bazującej na efekcie termosprężystym. Przeprowadzone badanie wykazało zgodność zależności opisującej efekt termosprężysty stosowanej w klasycznej analizie TSA jedynie dla niewielkiego zakresu odkształcenia badanego materiału.

Jednocześnie przedstawiono możliwość termowizyjnego wykrywania obszaru powstającego przewężenia i zniszczenia próbki oraz wskazano na istotny wzrost temperatury w tym obszarze, związany ze znacznymi odkształceniami plastycznymi występującymi w rejonie kształtującego się przewężenia.

LITERATURA

- [1] Boroński D., 2007. Metody badań odkształceń i naprężeń w zmęczeniu materiałów i konstrukcji. Wyd. Instytutu Technologii Eksploatacji – PIB.
- [2] Weber W., 1830. Über die spezifische Wärme fester Körper insbesondere der Metalle. Ann. d. Physik u. Chemie 96, 177-213.
- [3] Thomson W. (Lord Kelvin), 1853. On the Dynamical Theory of Heat. Trans. Roy. Soc. 20, Edinburgh, 261-283.
- [4] Haldorsen L.M., 1998. Thermoelastic Stress Analysis System Developed For Industrial Application. Institute of Mechanical Engineering, Aalborg University.

- [5] Kaleta J., Moczko P., 1999. Efekt termosprężysty w para- i ferromagnetykach obciążonych cyklicznie. Materiały VII Krajowej Konferencji Mechanika Pękania. Kielce-Cedzyna. 197-204.
- [6] Kobayashi A.S. (ed.), 1993. Handbook on Experimental Mechanics. Second Revised Edition, Society for Experimental Mechanics, Inc.
- [7] Inoue H., Hirokawa Y., Kishimoto K., 2004. Stress Separation in Thermoelastic Stress Analysis Using Nonlinearity of the Thermoelastic Effect. JSME International Journal, Series A, 47(3), 305-311.

Praca naukowa finansowana ze środków finansowych na naukę w latach 2006-2009 jako projekt badawczy nr 61/EUR/2006/02.