

Zjawiska cieplne związane z odkształceniem plastycznym w czasie rozciągania i ich interpretacja na poziomie mikroskopowym

Małgorzata OSTROMEŃKA¹, Jakub SIWIEC²

Streszczenie

Zjawiska cieplne dotyczące odkształceń plastycznych mogą być powszechnie obserwowane. Wystarczy dotknąć zerwanej, czy zgiętej próbki, aby przekonać się, że w miejscu odkształcenia wzrosła temperatura. Obserwacje takie mogą być prowadzone w celu oceny jakościowej lub ilościowej. Niniejszy artykuł służy do jakościowego powiązania zmian zachodzących w strukturze odkształcanego materiału ze wzrostem temperatury zaobserwowanym przy użyciu kamery na podczerwień.

Słowa kluczowe: odkształcenie materiałów, wydzielanie ciepła, próba rozciągania, złącze różnoimienne, zgrzewanie tarciove

1. Wprowadzenie

Statyczna próba rozciągania metali jest jednym z podstawowych i najczęściej wykonywanych badań wytrzymałości materiałów między innymi ze względu na to, że odkształcenie i pękanie materiałów konstrukcyjnych stanowi nieustanny przedmiot zainteresowań wielu badaczy. W Instytucie Kolejnictwa ta próba jest realizowana w temperaturze pokojowej w licznych badaniach elementów konstrukcji lub materiałów elementów kolejowych. Badania są wykonywane zgodnie z zaleceniami normy PN-EN ISO 6892-1:2016-09 metodą B [1]. Wynikiem statycznej próby rozciągania jest zazwyczaj wyznaczenie jednej lub kilku z podanych wielkości:

- granicy (umownej) plastyczności,
- wytrzymałości na rozciąganie,
- naprężeń rozrywających,
- wydłużenia względnego,
- przewężenia względnego.

W zakresie standardowych badań wykonywanych na potrzeby przemysłu, w Instytucie rzadko analizuje się zjawiska, które dotyczą emisji ciepła podczas odkształcania materiału, choć nietrudno tego doświadczyć – po zerwaniu, próbka metalowa jest nagrzana w miejscu przełomu. Niniejszy artykuł ma na celu prezentację wyników statycznej próby rozciągania różnoimennego złącza zgrzewanego tarciovo, wzbogaconych o obserwację z zastosowaniem

kamery na podczerwień oraz interpretację towarzyszących temu mechanizmów odkształcenia.

2. Opis wybranych zjawisk zachodzących podczas odkształcenia plastycznego

Zasadniczo można przedstawić dwa skrajne przypadki: odkształcanie quasi-statyczne oraz dynamiczne. W odkształcaniu quasi-statycznym w każdej chwili występuje stan równowagi statycznej, czyli suma sił działających na każdy fragment odkształcanego elementu jest bliska zeru, zatem ten przypadek można rozpatrywać jako sekwencje stanów równowagi opisywanych za pomocą równań mechaniki materiałów.

Natomiast przy obciążaniu zadawanym z dużą szybkością, gdy na jedną część elementu działa siła, a inna część tego „nie odczuwa”, to oznacza że naprężenie „przemieszcza się” przez element z określoną prędkością jako fala. W zależności od szybkości odkształcania można przedstawić trzy scenariusze obejmujące emisję ciepła:

- wydzielające się w trakcie procesu ciepło jest przewodzone przez elementy urządzenia i otoczenie i ulega rozproszeniu tak, że ciało pozostaje praktycznie w warunkach izotermicznych (nieduże prędkości odkształcania);
- proces jest praktycznie adiabatyczny, ponieważ jest zbyt mało czasu na odprowadzenie

¹ Dr inż.; Instytut Kolejnictwa, Laboratorium Badań Materiałów i Elementów Konstrukcji; e-mail: mostromecka@ikolej.pl.

² Mgr inż.; Instytut Kolejnictwa, Laboratorium Badań Materiałów i Elementów Konstrukcji; e-mail: jsiwiec@ikolej.pl.

wytworzonego ciepła (dynamiczne procesy odkształcania);

- proces wiąże się z generowaniem ciepła, jak i jego dyssypacją (stan pośredni – średnie szybkości odkształcania) [2].

Procesy cieplne towarzyszące odkształceniu są bezpośrednio związane z mechanizmem odkształcenia i przy wzroście szybkości odkształcania następuje zmiana z poślizgu, przez poślizg kontrolowany i przez procesy aktywowane, na płynięcie lepkoplastyczne.





Zgodnie z obecnym stanem wiedzy [3], podstawowym mechanizmem odkształcenia plastycznego materiałów krystalicznych jest nieodwracalny ruch dyslokacji w płaszczyznach poślizgu (rys. 1). Dodatkowo, w niektórych warunkach np. w wysokiej temperaturze, przemieszczenia atomów mogą zachodzić wskutek dyfuzyjnego transportu masy lub też poślizgu po

granicach ziaren. Kryształy, które nie mają dostatecznej liczby niezależnych systemów poślizgu, oprócz poślizgu odkształcają się również przez bliźniakowanie. Na skutek lokalnego ścinania w odkształconym obszarze (bliźniaku), orientacja sieci krystalicznej zmienia się na zwierciadlane odbicie sieci nieodkształconej (rys. 2).

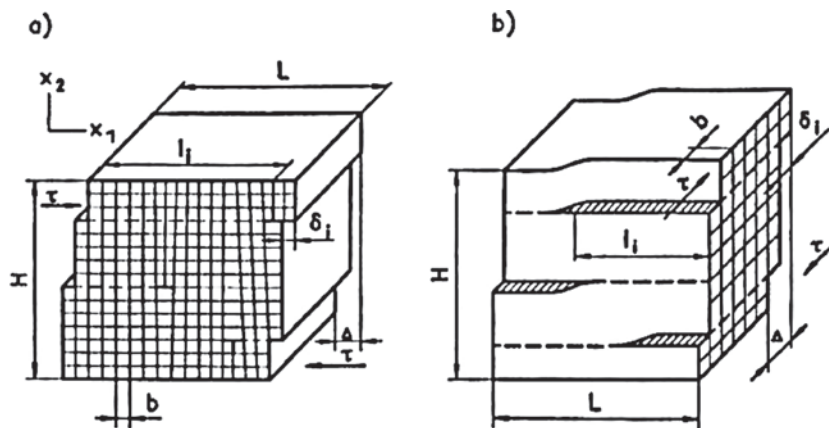
Końcowym stadium procesu odkształcania jest pęknięcie. Przebieg pęknięcia jest w znacznym stopniu określony przez charakter wcześniejszego odkształcenia. Zależy on zatem od rodzaju materiału i jego właściwości, a więc wynika nie tylko z naprężeń mechanicznych, ale również cieplnych, magnetycznych oraz innych. Kierunek naprężeń maksymalnych oraz rodzaj pęknięcia dla rozciągania przedstawiony w tabelicy 1. W zależności od orientacji makroskopowej powierzchni złomu można rozróżnić:

- oderwanie (pęknięcie rozdzielcze, rys. 3a),
- ścięcie (pęknięcie ciągliwe, rys. 3b).

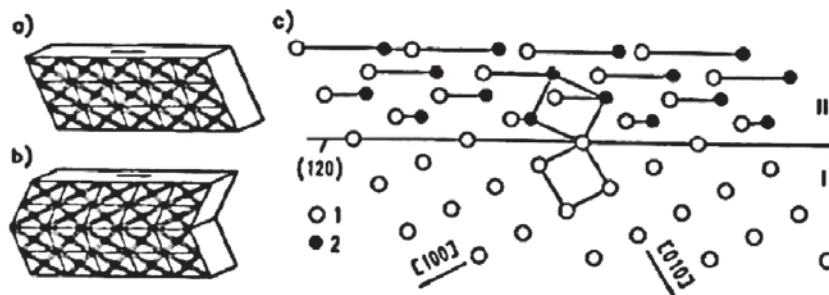
Kierunek naprężeń maksymalnych oraz rodzaj pęknięcia przy rozciąganiu [4]

Sposób obciążenia	Kierunek naprężeń maksymalnych		Rodzaj pęknięcie	
	normalnych	stycznych	oderwanie	ścięcie
Rozciąganie				

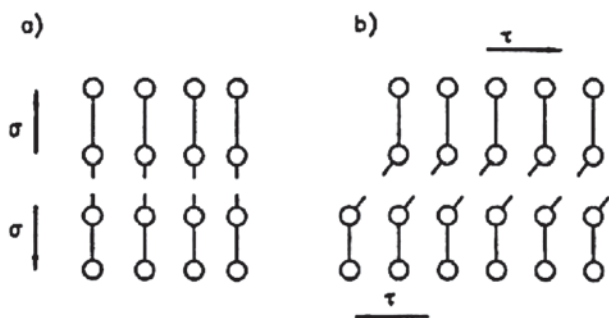
Tablica 1



Rys. 1. Odształcenie kryształu po przejściu dyslokacji [3]: a) krawędziowych; b) śrubowych



Rys. 2. Schemat odkształcenia plastycznego kryształu o sieci regularnej przez bliźniakowanie [4]: a) kryształ nieodkształcony, b) kryształ po bliźniakowaniu, c) geometria bliźniakowania wzdłuż płaszczyzny bliźniakowania (120); I – niebliźniaczona część kryształu, II – zbliźniaczona część kryształu, o – początkowe położenie atomów, • – położenie atomów po bliźniakowaniu



Rys. 3. Schemat zerwania wiązań atomowych [3]: a) przy oderwaniu, gdzie wskutek oddziaływania normalnych naprężeń rozciągających następuje zerwanie wiązań atomowych w płaszczyźnie pęknięcia, zorientowanej prostopadle do kierunku naprężenia; b) przy ścinaniu, które zachodzi wskutek zerwania wiązań atomowych pod wpływem oddziaływania naprężeń stycznych w płaszczyźnie pęknięcia równoległej do kierunku naprężenia przez ścinanie poprzeczne lub wzdłużne

W przypadku metali nie otrzymuje się idealnie kruchego oderwania, a pęknięcie jest poprzedzone bardzo małymi odkształceniami plastycznymi.

3. Materiały i metodyka badań

Przedmiot badań stanowiły złącza zgrzewane tarciovo, zgodnie z opracowaną technologią zgrzewania, wykonane pomiędzy prętem żebrowanym ze stali zbrojeniowej B500B, a stalą stopową martenzytyczną 1.4021 (2H13). Składy chemiczne materiałów rodzimych podano w tablicach 2 i 3, a parametry zgrzewania w tablicy 4.

Stanowisko badawcze (rys. 4, 5) składało się z maszyny wytrzymałościowej Instron Schenck Testing Systems LFV o maksymalnym nacisku 5000 kN ze sterowaną komputerowo konsolą sterująco-pomiarową oraz kamerą: FLIR ONE (błąd graniczny pomiaru $\pm 3^{\circ}\text{C}$ lub 5%).



Rys. 4. Stanowisko badawcze – maszyna wytrzymałościowa [fot. M. Ostromecka]

Tablica 2

Skład chemiczny stali zbrojeniowej (materiał rodzimy 1)

Stal zbrojeniowa B500B	C [%]	N [%]	S [%]	P [%]	Cu [%]	Równoważnik węgla C_{eq}
	$\leq 0,24$	$\leq 0,013$	$\leq 0,055$	$\leq 0,055$	$\leq 0,85$	$\leq 0,52$

[Na podstawie załączonych atestów].

Tablica 3

Skład chemiczny stali martenzytycznej (materiał rodzimy 2)

Stal 1.4021 (2H13)	C [%]	Mn [%]	Si [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]	Ni [%]	Cu [%]
	0.16 – 0.25	< 1,5	< 1,0	< 0,04	< 0,03	12,0 – 14,0	–	–

[Na podstawie załączonych atestów].

Tablica 4

Parametry zgrzewania

Prędkość obrotowa n [rpm]	Siła docisku F_f [kG/cm ²]	Siła spęczania F_s [kG/cm ²]	Czas tarcia t_t [s]	Czas spęczania t_s [s]	Powierzchnia zgrzewania [mm ²]
800	115	140	5	6	490

[Na podstawie opracowanej technologii zgrzewania].



Rys. 5. Kamera ustawiona przed badaniem [fot. M. Ostromęcka]

Rozciąganie próbek odbyło się w temperaturze $27^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ z prędkością wyznaczoną na podstawie normy PN-EN ISO 6892-1 pkt 10.3.3 (*Testing rate based on stress rate – method B*), tablica 3 – materiały z modułem $E \geq 150$ GPa. Szybkość narastania obciążenia wynosiła 30 MPa/s. Otrzymane wyniki wykorzystano w celu określenia wytrzymałości na rozciąganie złącza oraz w celu obserwacji zjawisk cieplnych w ocenie jakościowej. Należy zaznaczyć, że rozciąganiu poddano złącza bez specjalnego przygotowania, w tym bez usunięcia wypływki.

Zgłady do obserwacji mikrostruktury złącza przygotowano za pomocą szlifierko-polerki Rotopol-22 firmy Struers. Próbkę szlifowano diamentowymi tarczami szlifierskimi o gradacji: 80, 120, 600, 1200, a na końcu wypolerowano je z pomocą zawiesziny diamentowej polikrystalicznej o średnicy $1\ \mu\text{m}$ firmy Buehler. Trawienie przeprowadzono 4% odczynnikiem Nital oraz odczynnikiem Adlera. Szczegółowe opisy procedur stosowanych w przygotowaniu próbek do badań makro- i mikroskopowych opisano w osobnym artykule [5]. Obserwację mikrostruktury przeprowadzono za pomocą mikroskopu cyfrowego KEYENCE VHX-900F.

4. Dyskusja wyników

Materiał podstawowy po stronie pręta zbrojeniewego miał strukturę perlityczno-ferrytyczną, która

ulegała rozdrobnieniu przy zbliżeniu do linii zgrzewania. Po obu stronach zgrzeiny była widoczna strefa cieplno-plastyczna z charakterystycznie układającymi się liniami. Po stronie stali typu 1.4021 struktura w bezpośrednim sąsiedztwie zgrzeiny była bardzo drobna i w miarę oddalania się od linii zgrzeiny ziarna stawały się coraz większe i składały się z martenzytu listwowego. Sama zgrzeina była bardzo wąska, typowa dla procesu zgrzewania tarciovego. Po stronie stali martenzytycznej zaobserwowano niekorzystną włóknistość struktury, co mogło mieć istotny wpływ na przebieg pęknięcia (rys. 6).



Rys. 6. Mikrostruktura złącza zgrzewanego różnoimiennej pomiędzy stalą B500B i 1.4021; po lewej stronie mikrostruktura stali zbrojeniewej B500B, po prawej struktura stali martenzytycznej z wyraźną włóknistością; mikrostruktura w stanie wyjściowym przed rozciąganiem [fot. M. Ostromęcka]

Podczas statycznej próby rozciągania, zerwanie próbki B22.5/21 nastąpiło w 26,5 sekundzie przy maksymalnej sile zrywającej 327,28. Pęknięcie miało charakter krucho-plastyczny, ze znaczną przewagą kruchości i braku przewężenia. Wypływką z obu zgrzewanych materiałów nadal przylegała do części martenzytycznej złącza, co może wskazywać na to, że pęknięcie nastąpiło w strefie cieplno-plastycznej w bezpośrednim sąsiedztwie zgrzeiny po stronie stali zbrojeniewej. Zdjęcia zerwanej próbki przedstawiono na rysunkach 7 i 8. Wytrzymałość na rozciąganie obliczona dla tej próbki wynosiła 668 MPa. Była to wartość odpowiadająca wytrzymałości wskazanej w atencji dla stali zbrojeniewej B500B. Złącze przeniosło zatem oczekiwane obciążenia.

W przypadku próbki B23.4/21 zerwanie nastąpiło w 26,8 sekundy przy maksymalnej sile zrywającej 302,09. Pęknięcie również miało charakter krucho-plastyczny, ze znaczną przewagą kruchości i braku przewężenia, jednakże wypływką była zerwana w osi zgrzeiny, co może sugerować, że najbardziej

osłabionym miejscem złącza była jednak sama zgrzeina. Prawdopodobnie w procesie nastąpiło przyklejenie z niedostatecznym stopniem wymieszania materiału obu stali. Zdjęcia zerwanej próbki przedstawiono na rysunkach 9 i 10. Wytrzymałość na rozciąganie, obliczona dla tej próbki, wynosiła 616 MPa. Była to wartość o około 10% niższa w stosunku do wartości wytrzymałości wskazanej w atestie dla stali zbrojeniowej B500B. Uzyskane wyniki zaprezentowano w tablicy 5.



Rys. 7. Próbkę B22.5/21 po badaniu [fot. M. Ostromęcka]



Rys. 8. Przekrój w zgrzeinie w próbce B22.5/21 [fot. M. Ostromęcka]



Rys. 9. Próbkę B23.4/21 po badaniu [fot. M. Ostromęcka]



Rys. 10. Przekrój w zgrzeinie w próbce B23.4/21 [fot. M. Ostromęcka]

Rysunek 11 przedstawia kształt zależności obciążenie – przemieszczenie w próbce B23.4/21. Przebieg tego wykresu wskazuje na to, że przejście od odkształcenia sprężystego (zakres od O do A) do plastycznego (od punktu B) jest procesem złożonym i na krzywej odkształcenia tworzy się tzw. odcinek płynięcia (AB). Długość tego odcinka nazywany jest odkształceniem Lüdersa. Zakres krzywej pomiędzy punktami B i C przedstawia odkształcenie plastyczne (nieodwracalne), które kończy się zerwaniem próbki w punkcie C. Zależność obciążenie

Tablica 5

Wyniki badań uzyskane dla wybranych próbek podczas rozciągania

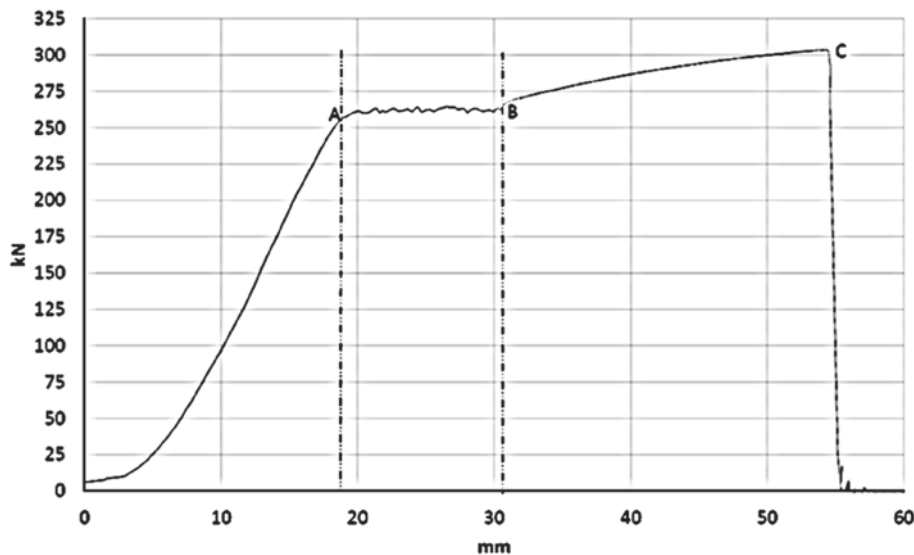
Oznaczenie próbki	Pole powierzchni przekroju początkowego [mm ²]	Max. siła zrywająca Fm [kN]	Wytrzymałość na rozciąganie Rm [MPa]	Miejsce zerwania
B22.5/21	490	327,28	668	zgrzeina/w strefie cieplno-plastycznej po stronie stali zbrojeniowej
B22.5/21	490	302,09	616	w zgrzeinie

[Opracowanie własne].

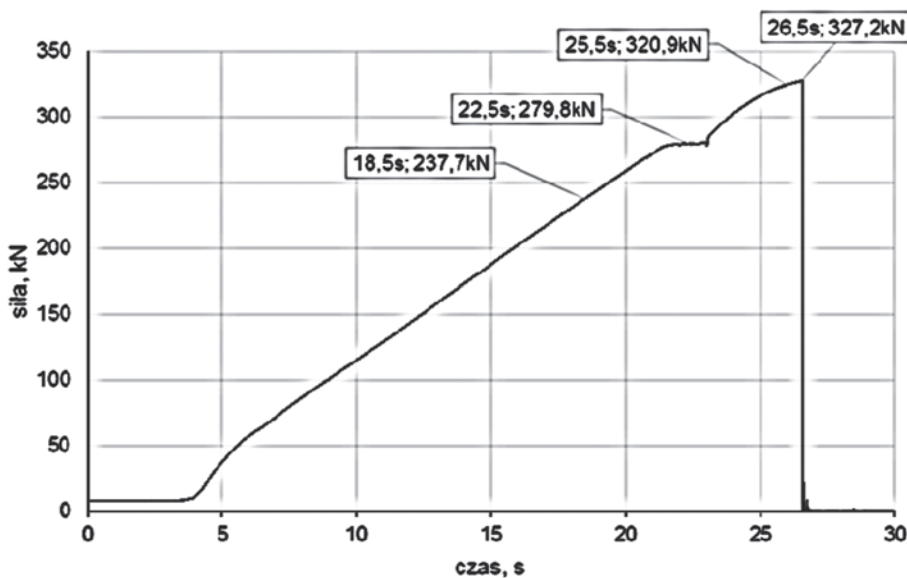
– przemieszczenie dla obu badanych próbek miała zbliżony kształt, a różnice dotyczyły tylko położenia punktów charakterystycznych. W przypadku próbki B23.4/21 naprężenie rozpoczynające proces płynięcia miało wartość około 260 kN. Zjawisko to nie było poprzedzone występowaniem „zęba” płynięcia (wyraźnie wyższej wartości górnej granicy plastyczności w stosunku do granicy dolnej). Naprężenie to w dużym stopniu zależy od obecności koncentratorów naprężeń i wysokość „zęba” płynięcia zmniejsza się w przypadku naruszenia ciągłości materiału oraz obecności wtrąceń.

W próbce B22.5/21 również nie zaobserwowano „zęba” płynięcia, lecz naprężenie Lüdersa było wyższe – wynosiło około 280 kN. Przebieg zależności obciążenie – przemieszczenie dla obu próbek potwierdzał istnienie pewnego stanu wyjściowych naprężeń wewnętrznych, które miały postać zgodny z oczekiwaniami autorów opracowania. Odształcenie plastyczne rozpoczyna się

po przekroczeniu granicy sprężystości. Dalszy wzrost naprężenia powoduje generowanie nowych dyslokacji i zwiększanie pola naprężeń wokół dyslokacji istniejących. Po dojściu do górnej wartości granicy plastyczności w pobliżu koncentratorów naprężeń (takich jak: granice ziaren, cząstek faz wtórnych, wtrąceń itp.) następuje szybkie generowanie „nowych” dyslokacji. Podczas generowania takiej dyslokacji następuje spadek naprężenia do wartości dolnej granicy plastyczności, co jest warunkiem płynięcia plastycznego. Wykresy (rys. 12, 14) przedstawiają zależności obciążenie – czas dla próbek B22.5/21 i B23.4/21 zarejestrowane przy rozciąganiu z szybkością narastania obciążenia równą 30 MPa/s. Poszczególne punkty zaznaczone na wykresach odpowiadają kadrom z filmów nakręconych kamerą termowizyjną (rys. 13 i 15). Kadry zostały wybrane w ten sposób, aby pokazać reakcję materiału w zakresie sprężystym, podczas płynięcia, w zakresie plastycznym



Rys. 11. Kształt zależności obciążenie – przemieszczenie w próbce B23.4/21, OA – zakres sprężysty; AB – płynięcie; BC – zakres odkształcenia plastycznego; C – zerwanie próbki [opracowanie J. Siwiec]

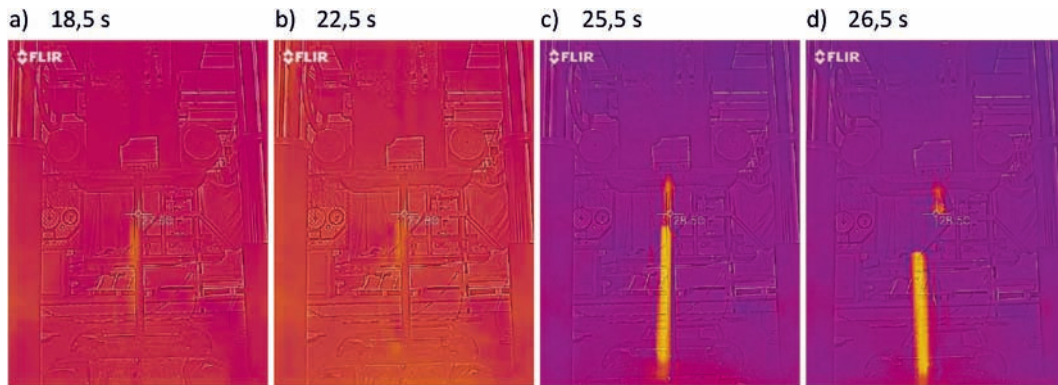


Rys. 12. Zależność obciążenie – czas w próbce B22.5/21 [opracowanie J. Siwiec]

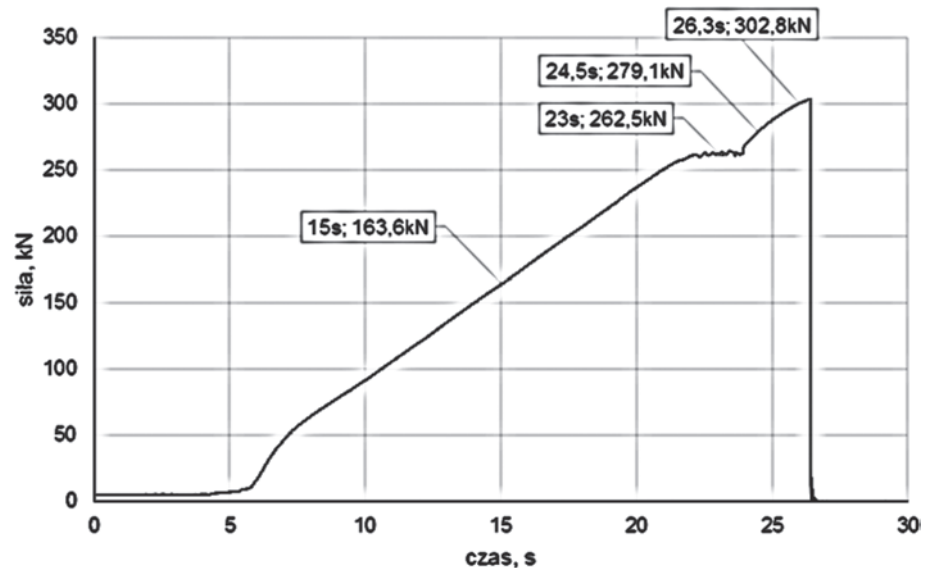
i przy zerwaniu. Ze względu na to, że temperatura wyjściowa rozciąganych próbek była stosunkowo wysoka (27–28°C), gdyż badanie było przeprowadzane w porze letniej, na kadrach z rysunków 13 oraz 15a, 15b nie zarejestrowano wyraźnej zmiany temperatur w stosunku do temperatury otoczenia. Kadry (rys. 15c, 15d) przedstawiają stan zarejestrowany w zakresie odkształcenia plastycznego. Kontrast kadru wskazuje na wyraźną różnicę

temperatury próbek w stosunku do temperatury otoczenia. Należy zwrócić uwagę, że w każdym przypadku po zerwaniu próbki temperatura w miejscu zerwania jeszcze rosła, a obserwowany wzrost temperatury sięgał do ponad 38°C.

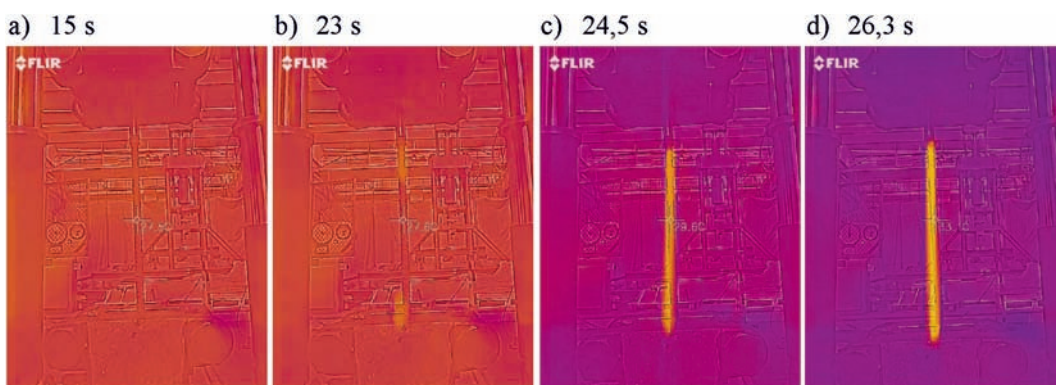
Na uwagę zasługuje fakt, że najwyższe temperatury rejestrowano po stronie pręta zbrojeniowego, który jest materiałem „słabszym” i to w tym obszarze



Rys. 13. Kadry pochodzące z obrazu z kamery termowizyjnej w kolejnych sekundach nagrania dla próbki B22.5/21 [opracowanie J. Siwiec]



Rys. 14. Zależność obciążenie – czas w próbce B23.4/21 [opracowanie J. Siwiec]



Rys. 15. Kadry pochodzące z obrazu z kamery termowizyjnej w kolejnych sekundach nagrania dla próbki B22.5/21 [opracowanie J. Siwiec]

przewidywano zerwanie. Wzrost temperatury w tym obszarze manifestował się na kadrze filmu przez intensywny żółty kolor, kontrastujący wyraźnie z fioletowym tłem otoczenia. Obserwacje potwierdzały, że podczas odkształcenia generowane jest ciepło rozprzeszczerzane dynamicznie, choć przebiega z pewnym opóźnieniem, co jest związane z zastosowaną prędkością odkształcania i przewodnictwem cieplnym.

W polikrystalicznym materiale odkształcanym plastycznie w temperaturze pokojowej, rozwój mikrostruktury rozpatruje się z perspektywy rozwoju układów dyslokacyjnych, ze względu na ich wyższą (w porównaniu z defektami punktowymi) energię. Procesy tworzenia i ruchu dyslokacji, jak również oddziaływanie między nimi oraz innymi elementami mikrostruktury w istotny sposób wpływają na proces magazynowania energii i umacniania materiału. Zmiana pola temperatury w odkształcanym materiale stanowi makroskopową manifestację zjawisk zachodzących na poziomie mikrostrukturalnym.

Całkowita energia w zużyta na odkształcenie materiału jest równa pracy odkształcenia sprężystego w_e (odwracalnego) oraz pracy odkształcenia plastycznego w_p (nieodwracalnego) według:

$$w = w_e + w_p.$$

Energia odkształcenia plastycznego łączy się z dyssypacją ciepła q_d oraz z magazynowaniem energii w materiale e_s . Zatem:

$$w = w_e + q_d + e_s.$$

Wszystkie te wielkości były odniesione do jednostki masy roboczej próbki, czyli są wielkościami właściwymi.

Jeżeli rozpatruje się proces quasi-statycznego odkształcenia materiału, odnosząc go do stanu termodynamicznego próbki nieobciążonej w stanie wyżarzonym, można skorzystać z zasad termodynamiki klasycznej, aby na potrzeby tego artykułu dokonać opisu przeprowadzonej próby rozciągania [6]. Jednakże badane przez nas próbki miały już pewien stan naprężeń wewnętrznych związany z samym procesem łączenia (zgrzewania tarcowego) materiałów różnoimiennych. Ten stan manifestował się przez włóknistość struktury układającą się w sposób prostopadły do kierunku rozciągania. Na poziomie atomowym jest to związane z istnieniem znacznego nieuporządkowania sieci krystalicznej, co powoduje, że w czasie odkształcania istotny wpływ na jego przebieg może mieć entropia konfiguracyjna. W przypadku procesów quasi-statycznych, w materiałach jednorodnych w stanie wyżarzonym entropię konfiguracyjną pomija się, jednakże statyczna próba rozciągania zrealizowana w niniejszych badaniach była

przewodzona ze średnią prędkością rozciągania, a materiał miał wewnątrz karb strukturalny – zgrzeinę oraz liczne koncentraty naprężeń. Z tego powodu proces można było obserwować na poziomie jakościowym, a obliczenie wydzielonego w procesie ciepła związanego ze zmianą temperatury nie wnosiłoby żadnych konstruktywnych informacji ilościowych.

5. Podsumowanie

Obserwacja zjawisk termicznych podczas statycznej próby rozciągania na poziomie jakościowym jest dodatkowym źródłem informacji na temat miejsca występowania i mechanizmu odkształcenia plastycznego. W przypadku różnoimiennych połączeń zgrzewanych analiza termogramu na poziomie jakościowym może ułatwić doprecyzowanie miejsca zerwania, co w przypadku bardzo cienkich obszarów, jaki stanowi zgrzeina nie jest wcale oczywiste. Analiza filmu z kamery na podczerwień dostarcza również dość jednoznacznej informacji, który z materiałów jest bardziej skłonny do odkształcenia plastycznego. Informacji takiej nie dostarczają wykresy standardowo wykonywane w statycznej próbie rozciągania.

W przypadku obserwacji jakościowych możliwe jest badanie próbek bez specjalnego przygotowania. Zatem celowym może okazać się wykorzystanie tej metody przy badaniu gotowych wyrobów lub elementów kolejowych jak np. sprzęgi kolejowe.

Literatura

1. PN-EN ISO 6892-1:2016-09: Metale – Próba rozciągania – część 1: Metoda badania w temperaturze pokojowej.
2. Kyzioł L.: *Wpływ temperatury i szybkości odkształcania na charakterystyki wytrzymałościowe materiałów metalicznych*, Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Gdyni, 2017, nr 100, s. 109–119.
3. Wyrzykowski J.W., Pleszakow E., Sieniawski J.: *Odształcenie i pękanie metali*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne PWN, Warszawa, 1999.
4. Hertzberg R.W.: *Deformation and fracture mechanics of engineering materials*, J. Wiley and Sons, New York – Toronto, 1998.
5. Ostromęcka M., Szumański M.: *Preparatyka zglądów do badań makro- i mikroskopowych pochodzących ze zgrzewanych tarcowo złącz różnoimiennych stalowych oraz ich ocena w odniesieniu do obowiązującej norm*, Problemy Kolejnictwa, 2022, z. 195.
6. Maj M.: *Wpływ wstępnego odkształcenia na proces magazynowania energii w polikryształach*, rozprawa doktorska, Instytut Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk IPPT PAN, Warszawa, 2007.