

ANALIZA KINETYKI REKRYSYALIZACJI PO ODKSZTAŁCENIU ZA POMOCĄ METODY RELAKSACJI NAPRĘŻENIA

Głównym celem niniejszej pracy było poddanie weryfikacji metody relaksacji naprężenia do analizy procesów rekrystalizacji zachodzących po odkształceniu. W artykule przedstawiono wyniki badań relaksacji naprężeń oraz ilościowego pomiaru struktury. W oparciu o uzyskane dane stwierdzono że metoda relaksacji naprężeń pozwala określić kinetykę rekrystalizacji po odkształceniu i wyeliminować wpływ zdrowienia w procesie odbudowy struktury.

Słowa kluczowe: odkształcenie plastyczne, zdrowienie, rekrystalizacja, relaksacja naprężeń

ANALYSIS OF RECRYSTALLISATION KINETICS AFTER DEFORMATION USING STRESS RELAXATION METHOD

The main objective of this work was to verify the stress relaxation method for the analysis of recrystallisation processes occurring after deformation. The article presents the results of stress relaxation and quantitative measurement of the structure. Based on the obtained data, it was found that the stress relaxation method allows to determine the kinetics of recrystallisation after deformation and to eliminate the impact of recovery in the process of structure rebuilding.

Keywords: plastic deformation, recovery, recrystallisation, stress relaxation

1. WPROWADZENIE

Odkształcenie materiału prowadzi do wzrostu gęstości dyslokacji. Bez odbudowy struktury stan materiału szybko osiąga wartość krytyczną, powodując utratę spójności. W wysokich temperaturach w materiale zachodzą procesy odbudowy struktury, zdrowienie i rekrystalizacja, które powodują obniżenie gęstości dyslokacji, co skutkuje wzrostem jego plastyczności. W wyniku rekrystalizacji tworzą się nowe ziarna charakteryzujące się niezdeformowaną siecią krystaliczną, natomiast w wyniku zdrowienia następuje anihilacja dyslokacji bez krystalograficznego zarodkowania nowych ziaren. Rozróżnienie tych procesów jest ważne, ponieważ tylko w wyniku rekrystalizacji powstają nowe ziarna.

Analizę procesu zdrowienia i rekrystalizacji w trakcie odkształcenia można stosunkowo łatwo przeprowadzić na podstawie krzywej naprężenie – odkształcenie. Trudniej jest wyznaczyć procesy rekrystalizacji zachodzące po odkształceniu. Do oceny kinetyki odbudowy struktury po odkształceniu wykorzystuje się metodę z podwójnym odkształceniem i relaksacji naprężenia. W odróżnieniu od metody z zastosowaniem podwójnego odkształcenia, metoda relaksacji naprężeń umożliwia wyodrębnienie procesów zdrowienia od rekrystalizacji.

Tabela 1. Skład chemiczny badanych stali, %

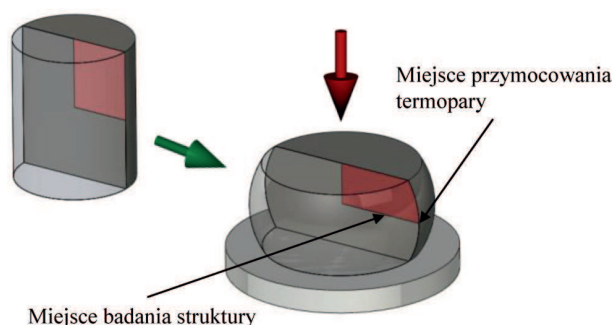
Table 1. Chemical composition of the tested steels, %

Material	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Ti	Mo	Al
16NCD13	0,142	0,50	0,29	0,008	<0,002	3,10	0,98	0,002	0,28	
Wytop S405	0,11	1,97	0,95	0,022	0,006	–	–	0,120	0,22	0,025

Weryfikacja przydatności tej metody w badaniach mających na celu opracowanie modeli rozwoju struktury jest głównym celem niniejszej pracy.

2. MATERIAŁ I METODYKA BADAŃ

Materiałem do badań były stale o składzie chemicznym podanym w tabeli 1. Wytop S405 otrzymano z wykorzystaniem laboratoryjnego pieca indukcyjnego.



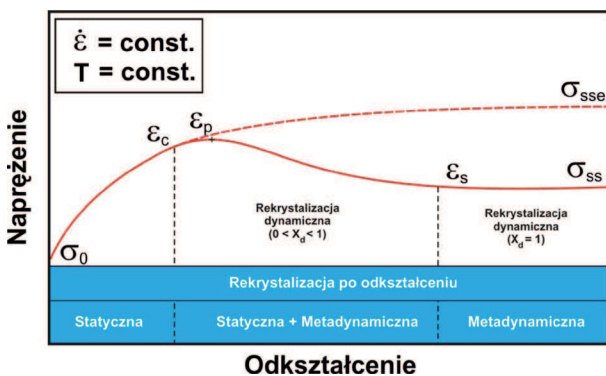
Rys. 1. Schemat odkształcenia próbki walcowej

Fig. 1. Deformation scheme for cylindrical sample

Badania plastometryczne dla analizowanej stali wykonano za pomocą symulatora Gleeble 3800. Na rysunku 1 przedstawiono ogólny schemat próby plastometrycznej. Próbkę do badań o wymiarach $\varnothing 10 \times 12$ mm pobrano z walcówki.

3. METODY WYZNACZENIA KINETYKI REKRYSALIZACJI

Opracowanie modelu kinetyki rekrysalizacji statycznej lub metadynamicznej jest częścią badań wykonywanych w celu opracowania modelu rozwoju mikrostruktury. Na rysunku 2 przedstawiono ogólny schemat identyfikujący różne rodzaje rekrysalizacji na podstawie kształtu krzywej naprężenie-odkształcenie. Dla określenia kinetyki rekrysalizacji statycznej analizuje się zmiany zachodzące w materiale po odkształceniu, wartość którego nie przekracza ϵ_c ($\epsilon_c = 0,6 \div 0,9 \epsilon_p$). Istota badań dla wyznaczenia kinetyki rekrysalizacji metadynamicznej jest podobna, z zachowaniem warunku, że wartość odkształcenia jest większa od minimalnego dla zajścia pełnej rekrysalizacji dynamicznej – ϵ_s . W obydwu przypadkach zjawiska zachodzące w materiale są podobne.



ϵ_c – wartość odkształcenia krytycznego po przekroczeniu której zachodzi proces rekrysalizacji dynamicznej;

ϵ_p – wartość odkształcenia, przy którym naprężenie osiąga wartość maksymalną;

ϵ_s – wartość odkształcenia do osiągnięcia stanu ustalonego;

σ_0 , σ_{sse} , σ_{ss} – granica plastyczności, maksymalna wartość naprężenia przy braku rekrysalizacji dynamicznej, wartość naprężenia dla stanu ustalonego

Rys. 2. Zależność rodzaju rekrysalizacji od krzywej płynięcia materiału

Fig. 2. Dependency of recrystallisation type on material flow curve

W celu wyznaczenia stopnia mięknięcia materiału po odkształceniu stosuje się następujące metody:

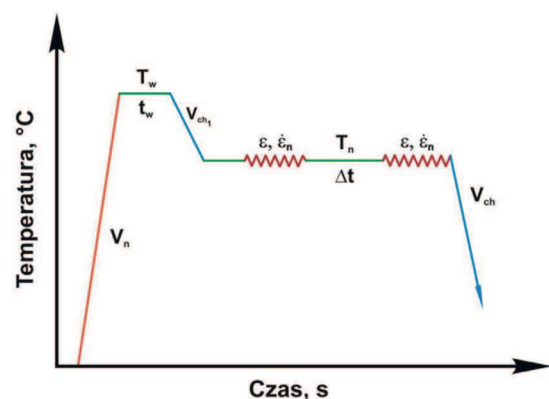
- obserwacje zmian mikrostruktury w próbkach hartowanych po upływie różnych czasów od momentu odciążenia,
- metoda z podwójnym odkształceniem [1],
- metoda relaksacji naprężenia [2].

W literaturze najczęściej spotykane są dwie metody, tj. metoda z podwójnym odkształceniem oraz relaksacji naprężenia. Obie metody wspomagane są badaniami metalograficznymi. Pierwsza z nich jest używana do wyznaczenia udziału materiału, w którym zaszła rekrysalizacja. Druga metoda służy do wyznaczenia tzw. ułamka mięknięcia [3], który charakteryzuje sumaryczny wpływ zdrowienia i rekrysalizacji. Trzecia,

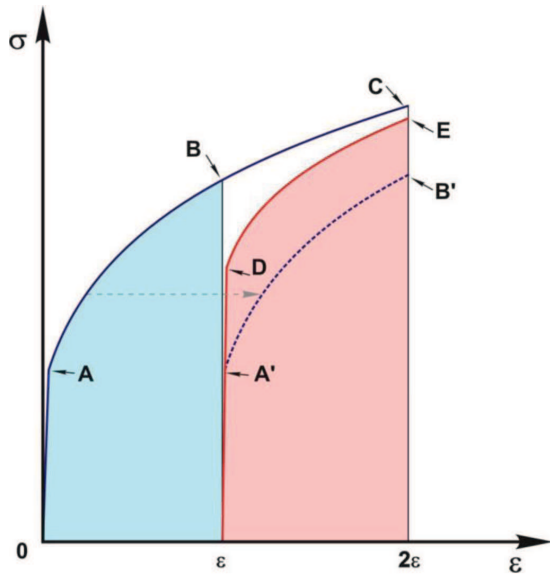
umożliwia wyznaczenie tylko kinetyki rekrysalizacji w procesach odbudowy struktury [4]. Porównanie tych metod przedstawiono w pracach [5, 6]. Dlatego w niniejszym artykule pominięto ich szczegółową charakterystykę. Wszystkie dotychczasowe badania zakładały jednorodne pole odkształcenia w próbce, co wprowadza duży błąd w ocenie wpływu parametrów odkształcenia na kinetykę rekrysalizacji. W pracy [7] zastosowano analizę odwrotną do interpretacji wyników uzyskanych w próbie podwójnego odkształcenia. Pozwala to uwzględnić niejednorodny rozkład parametrów odkształcenia w próbce na postępek rekrysalizacji statycznej.

3.1. METODA PODWÓJNYCH ODKSZTAŁCEN

Metodę tę stosuje się przede wszystkim do określenia stopnia mięknięcia materiału podczas procesów statycznej rekrysalizacji i/lub statycznego zdrowienia. Metoda podwójnych odkształceń polega na wykonaniu dwóch identycznych odkształceń (ϵ , $\dot{\epsilon}_n$ i T_n) ze stopniowanym odstępem czasowym. Na rysunku 3 przedstawiono schemat odkształcenia wykorzystywany w tej metodzie. Dla wybranych warunków odkształcenia zdefiniowanych przez ϵ , $\dot{\epsilon}_n$ i T_n , odkształca się kilka próbek ze zróżnicowanym czasem przerwy pomiędzy odkształceniami – Δt . Liczba testów zależy od kinetyki odbudowy struktury. Z góry nie ma możliwości określić ilości wykonywanych testów, możliwe jest to w trakcie wykonywania badań w oparciu o analizę postępu odbudowy struktury. W tym celu po każdym odkształceniu wykonuje się wykres przedstawiony na rysunku 4. Najpierw przenosi się krzywą z pierwszego odkształcenia etap **AB** w zakres drugiego odkształcenia – etap **A'B'**. Następnie ekstrapoluje się krzywą z pierwszego odkształcenia bez uwzględnienia rekrysalizacji dynamicznej w strefę drugiego odkształcenia – etap **BC**. Można wykorzystać do tego celu krzywą płynięcia dla większego odkształcenia, jeżeli nie zaobserwowano rekrysalizacji dynamicznej. W pierwszym teście dla zidentyfikowanych warunków odkształcenia zadaje się czas przerwy 0 sekund. Dla tego czasu spodziewa się pokrycie krzywej **DE** z **BC**, charakteryzuje się to brakiem odbudowy struktury. Zwiększając czas przerwy powodujemy zajście procesów odbudowy struktury, której zakończenie manifestuje się pokryciem krzywej **DE** z **A'B'**. Metoda ta jest bardzo prosta i łatwa w wykonaniu. Dotychczas powstało wiele modyfikacji umożliwiających wyznaczenie ułamka mięknięcia. Na przykład do określenia ułamka mięknięcia wykorzy-



Rys. 3. Ogólny schemat metody podwójnych odkształceń
Fig. 3. General scheme of double deformation tests

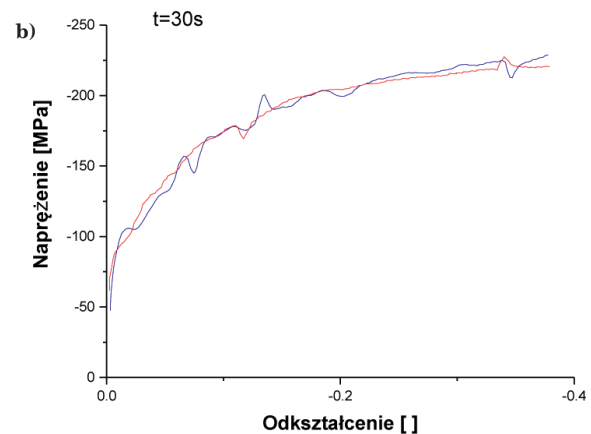
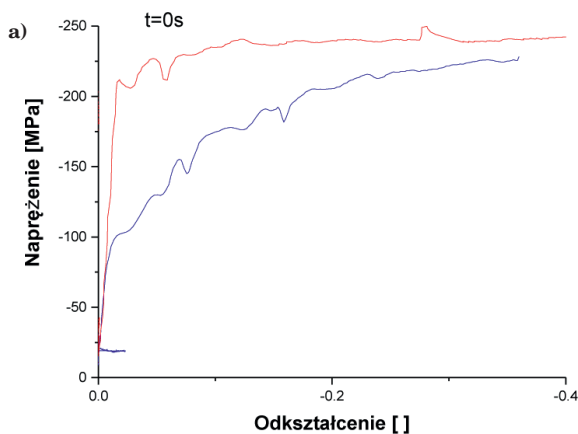


Rys. 4. Schemat oceny ułamka mięknięcia z wykorzystaniem metody podwójnego odkształcenia

Fig. 4. Scheme of analysis of softening fraction with double-deformation method

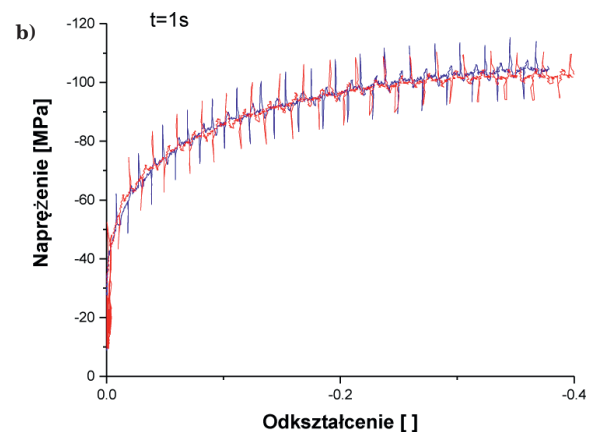
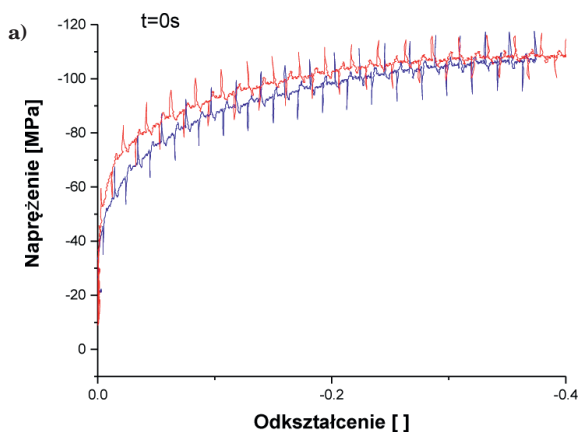
stuje się wyniki pomiaru umownej granicy plastyczności wyznaczonej dla odkształcenia 0,2% lub 2% lub średnią wartość naprężenia [1].

Jednak metoda ta jest pracochłonna i wymaga dużej ilości próbek oraz testów plastometrycznych. Dodatkową niekorzystną cechą tej metody jest niemożliwość określenia rozpoczęcia mięknięcia materiału w przypadku krótkich czasów do zajścia rekrytalizacji. Na rysunku 5 przedstawiono przykład rejestracji rozpoczęcia i zakończenia procesu odbudowy struktury po odkształceniu. Natomiast w przypadku innych warunków odkształcenia (Rys. 6) nie było możliwości wyznaczenia momentu rozpoczęcia odbudowy struktury. Związane jest to z ograniczeniami technicznymi symulatora Gleeble 3800. Dla drugiego odkształcenia wymagany jest dodatkowy czas do uzyskania zadanej prędkości narzędzia. Ten czas jest uzależniony od prędkości odkształcenia i dla podanych na rysunkach 5 i 6 wyników wynosił odpowiednio 0,18 s i 1,22 s. Zmniejszenie prędkości odkształcenia powoduje wzrost tego czasu. Dlatego, rutynowo, w Zakładzie Symulacji Procesów technologicznych IMŻ do wyznaczenia kinetyki rekrytalizacji statycznej stosuje się metodę relaksacji naprężenia.



Rys. 5. Rejestracje rozpoczęcia (a) i zakończenia (b) odbudowy struktury uzyskane dla stali 16NCD13 dla warunków odkształcenia: $T_d = 900^\circ\text{C}$, $\varepsilon = 0,4$, $\dot{\varepsilon} = 20 \text{ s}^{-1}$. Linia niebieska – pierwsze odkształcenie, czerwona – drugie odkształcenie

Fig. 5. Record of the start of (a) and the end (b) of structure restoration obtained for the 16NCD13 steel with deformation conditions: $T_d = 900^\circ\text{C}$, $\varepsilon = 0,4$, $\dot{\varepsilon} = 20 \text{ s}^{-1}$. Blue line – first deformation, red – second deformation

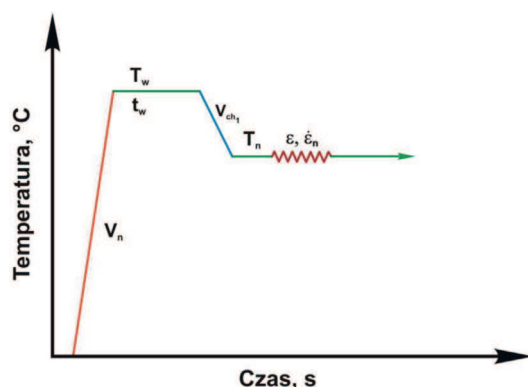


Rys. 6. Brak rejestracji rozpoczęcia (a) i rejestracja zakończenia (b) odbudowy struktury uzyskane dla stali 16NCD13 dla warunków odkształcenia: $T_d = 1100^\circ\text{C}$, $\varepsilon = 0,4$, $\dot{\varepsilon} = 1 \text{ s}^{-1}$. Linia niebieska – pierwsze odkształcenie, czerwona – drugie

Fig. 6. No record of the start (a) and successful record of the end (b) of structure restoration obtained for the 16NCD13 steel with deformation conditions: $T_d = 1100^\circ\text{C}$, $\varepsilon = 0,4$, $\dot{\varepsilon} = 1 \text{ s}^{-1}$. Blue line – first deformation, red – second deformation

3.2. METODA RELAKSACJI NAPRĘŻEŃ

Metoda relaksacji naprężeń wykorzystywana była głównie do zbadania procesów wydzieleniowych [8], ponieważ umożliwiała w prosty sposób określenia wpływu wydzielenia cząstek na procesy odbudowy struktury. W pracy [2] metoda ta została wykorzystana do określenia kinetyki rekrytalizacji statycznej. Dzięki tej metodzie jest możliwe odseparowanie różnych procesów odbudowy struktury. Na rysunku 7 przedstawiono ogólny schemat metody relaksacji naprężeń. Idea jest podobna jak w metodzie podwójnych odkształceń. Odkształcana jest próbka dla wybranych warunków odkształcenia ε , $\dot{\varepsilon}_n$ i T_n . W przypadku testów relaksacji naprężeń drugie odkształcenie zastąpione jest utrzymaniem położenia kowadeł w momencie osiągnięcia zadanej wartości odkształcenia w pierwszym odkształceniu. W wyniku zajścia procesów odbudowy struktury, obserwuje się spadek naprężenia w czasie po odkształceniu. Dlatego dla badania kinetyki odbudowy struktury wystarcza pojedynczy test dla ustalonych warunków odkształcenia: ε , $\dot{\varepsilon}_n$ i T_n . Ważnym elementem jest zadanie odpowiednio długiego czasu utrzymywania kowadeł w stałej pozycji w celu rejestracji całego przebiegu odbudowy struktury.



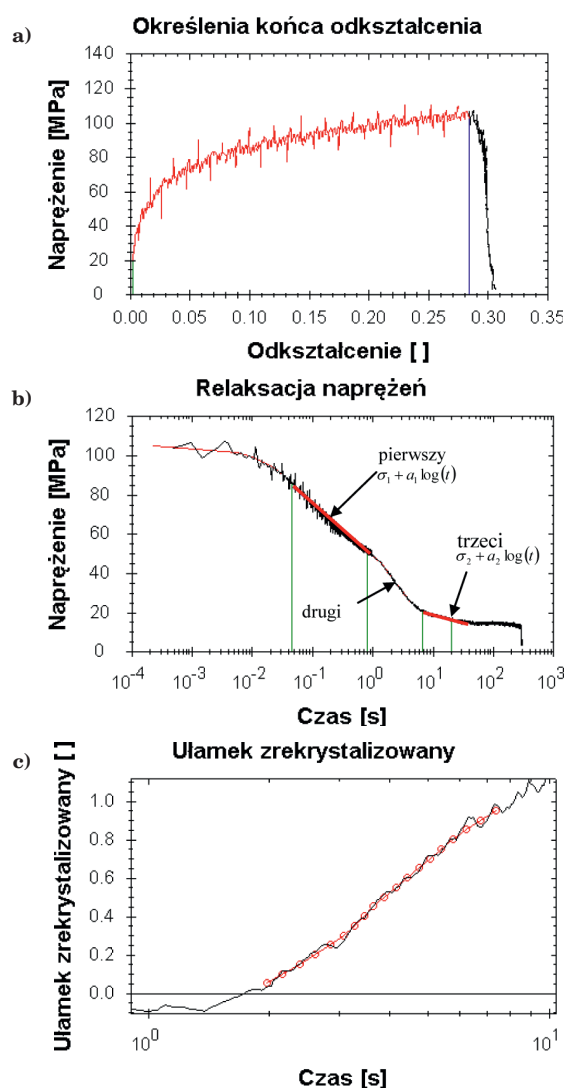
Rys. 7. Ogólny schemat metody relaksacji naprężeń
Fig. 7. General scheme of relaxation tests

Po odkształceniu i wytrzymaniu następuje obróbka danych. Na rysunku 8 przedstawiono schemat obróbki danych uzyskanych w teście relaksacji naprężeń. Najpierw określane jest zakończenie odkształcenia, następnie dla zakresu utrzymywania kowadeł wykonywany jest wykres zmiany naprężenia w funkcji czasu. Określone są dwa liniowe etapy (pierwszy i trzeci). Przy czym etap pierwszy jest traktowany jako etap odbudowy struktury związany tylko ze zdrowieniem. Natomiast etap drugi jest odpowiedzią na zajście rekrytalizacji statycznej (lub metadynamicznej). Następnie etap pierwszy i trzeci zostaje zaproksymowany liniowym równaniem. Ułamek rekrytalizacji statycznej wyznaczamy stosując równanie:

$$X = \frac{[\sigma_1 = a_1 \log(t)] - \sigma}{(\sigma_1 - \sigma_2) - (a_1 - a_2) \log(t)} \quad (1)$$

gdzie σ_1 , σ_2 , a_1 , a_2 – współczynniki aproksymacji liniowej wyznaczone dla etapu pierwszego i trzeciego (Rys. 8b).

Jak widać metoda relaksacji naprężeń jest prostsza od metody podwójnych odkształceń i wymaga mniejszej liczby próbek w porównaniu do metody z podwójnym odkształceniem. Czy ta metoda jest skuteczna do



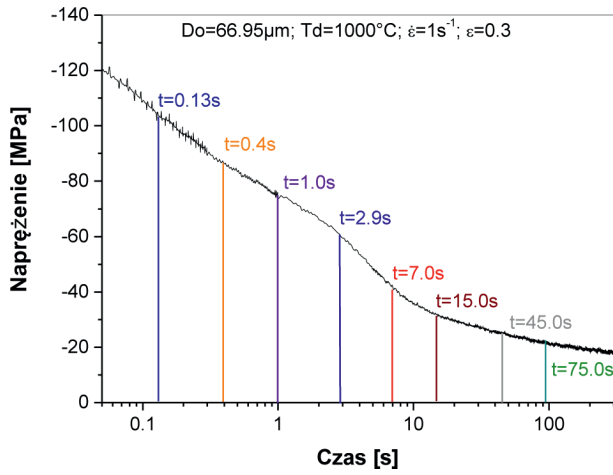
Rys. 8. Etapy obróbki w metodzie relaksacji naprężeń: a) zaznaczenie zakończenia odkształcenia; b) wskazanie pierwszego i trzeciego etapu na krzywej; c) ułamek rekrytalizacji

Fig. 8. Stages of the stress relaxation method: a) marking the end of the deformation; b) first and third stage on the curve; c) recrystallised fraction

określenia kinetyki rekrytalizacji statycznej jest zagadnieniem niniejszej pracy i opisana jest w kolejnym rozdziale.

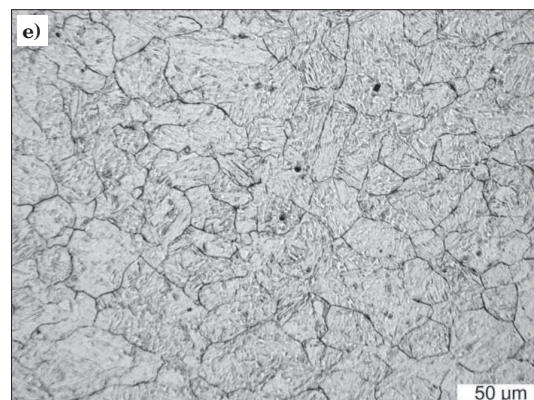
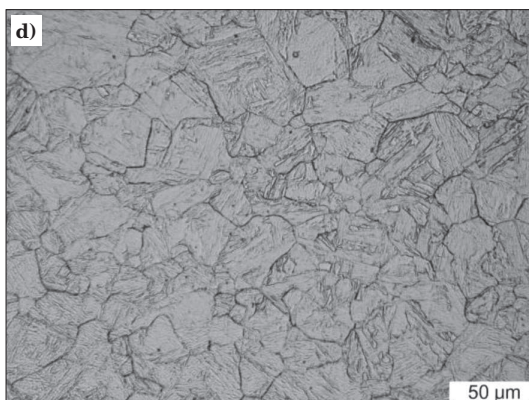
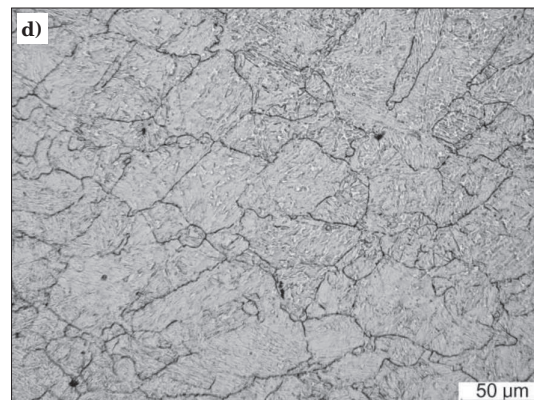
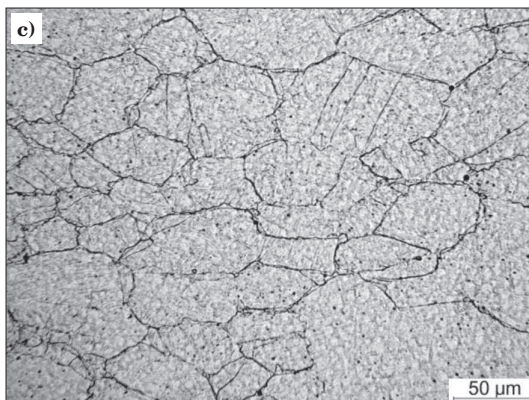
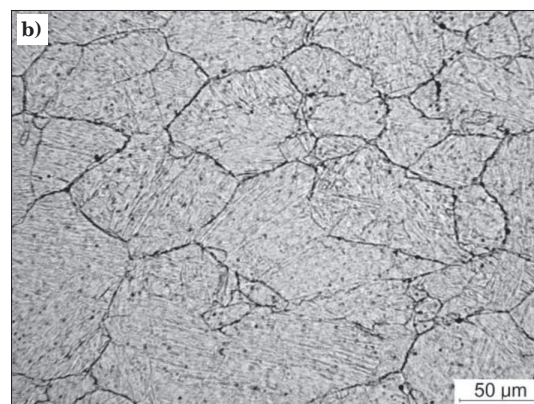
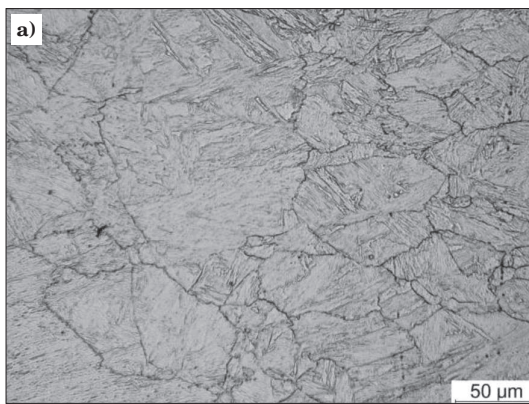
4. WYNIKI BADAŃ

W ramach niniejszej pracy skupiono się na interpretacji wyników testów relaksacji naprężeń uzyskanych dla wytopu S-405. W ramach projektu wykonano szereg badań i część tych wyników przedstawiono w niniejszej pracy. W celu opracowania kinetyki rekrytalizacji statycznej wykonano szereg testów plastometrycznych, w których zmiennymi były wielkość ziarna początkowego D_0 , wartość ε i prędkość $\dot{\varepsilon}_n$ odkształcenia oraz temperatura T_n . Na rysunku 9 przedstawiono uzyskany przebieg zmiany naprężenia po odkształceniu z identyfikacją czasów, po których struktury próbki chłodzono wodą. Na rysunku 10 przedstawiono zdjęcia uzyskanej struktury dla różnych czasów wytrzymania po odkształceniu. Dla ułatwienia analizy wyników na



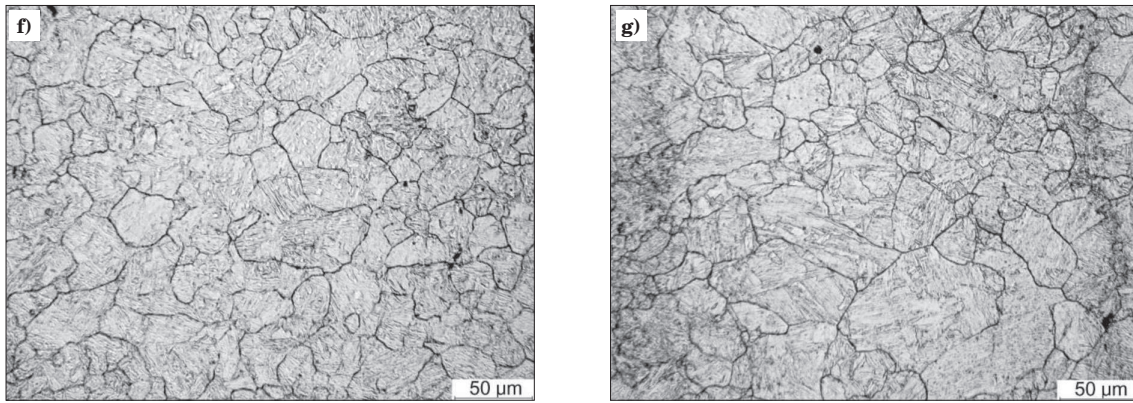
Rys. 9. Wynik relaksacji naprężeń uzyskany dla warunków odkształcenia: $T_h = 1200^\circ\text{C}$, $T_d = 1000^\circ\text{C}$, $\epsilon = 0,3$, $\dot{\epsilon} = 1 \text{ s}^{-1}$

Fig. 9. Results of stress relaxation obtained for strain conditions: $T_h = 1200^\circ\text{C}$, $T_d = 1000^\circ\text{C}$, $\epsilon = 0,3$, $\dot{\epsilon} = 1 \text{ s}^{-1}$

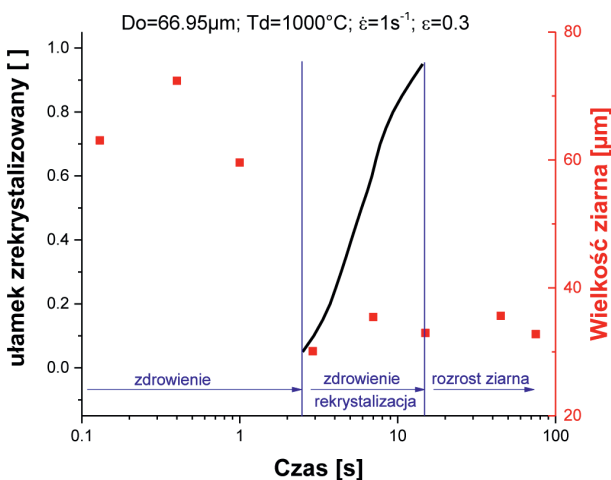


Rys. 10. Zdjęcia struktury uzyskane dla przebiegu scharakteryzowanego na rys. 9 po różnych czasach: a) 0,13 s; b) 0,4 s; c) 1 s; d) 2,9 s; e) 7 s; f) 15 s

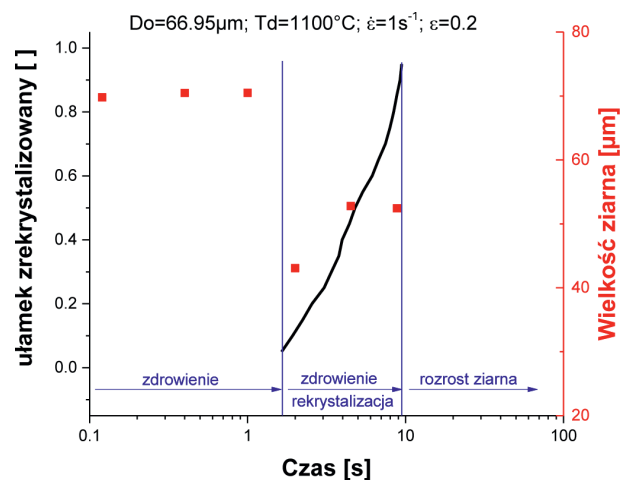
Fig. 10. Structure obtained for the time sequence characterised in Fig. 9: a) 0.13 s; b) 0.4 s; c) 1 s; d) 2.9 s; e) 7 s; f) 15 s



Rys. 10 cd. Zdjęcia struktury uzyskane dla przebiegu scharakteryzowanego na rys. 9 po różnych czasach: g) 45 s; h) 75 s
Fig. 10 cont. Structure obtained for the time sequence characterised in Fig. 9: g) 45 s; h) 75 s



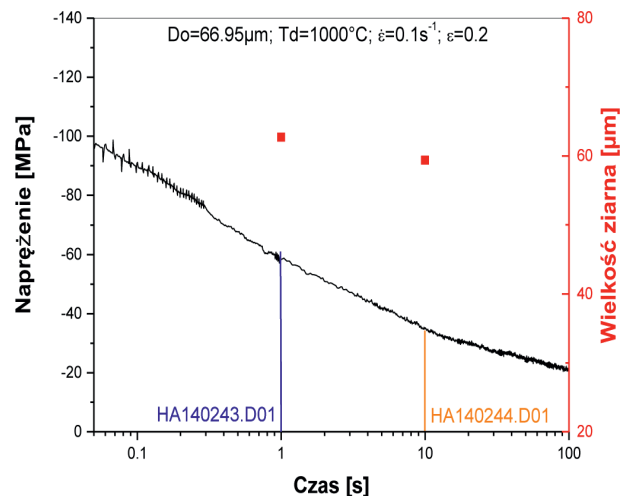
Rys. 11. Zmiana wielkości ziarna (symbole) w stosunku do rekrytalizacji statycznej (linia) wyznaczona dla warunków odkształcenia: $T_h = 1200^\circ\text{C}$, $T_d = 1000^\circ\text{C}$, $\varepsilon = 0,3$, $\dot{\varepsilon} = 1 \text{ s}^{-1}$
Fig. 11. Change in grain size (symbols) relative to static recrystallisation (line) determined for deformation conditions: $T_h = 1200^\circ\text{C}$, $T_d = 1000^\circ\text{C}$, $\varepsilon = 0,3$, $\dot{\varepsilon} = 1 \text{ s}^{-1}$



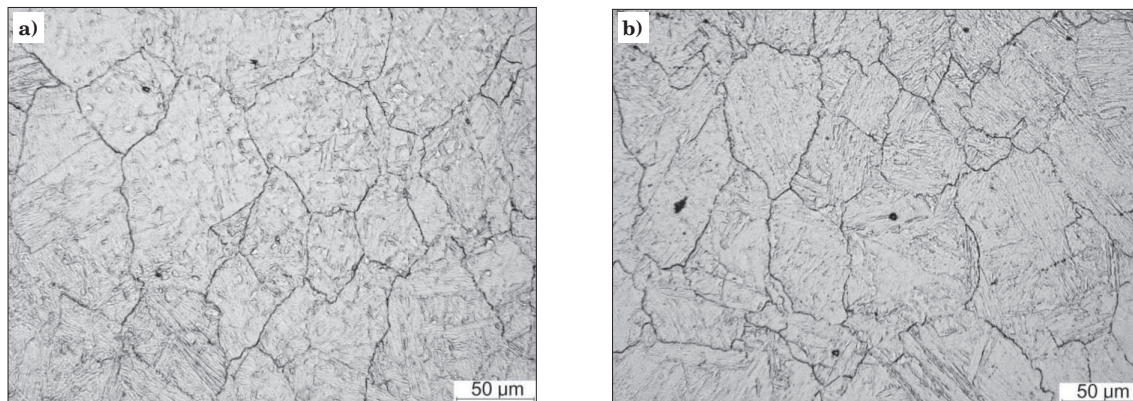
Rys. 12. Zmiana wielkości ziarna (symbole) w stosunku do rekrytalizacji statycznej (linia) wyznaczona dla warunków odkształcenia: $T_h = 1200^\circ\text{C}$, $T_d = 1100^\circ\text{C}$, $\varepsilon = 0,2$, $\dot{\varepsilon} = 1 \text{ s}^{-1}$
Fig. 12. Change in grain size (symbols) relative to static recrystallisation (line) determined for deformation conditions: $T_h = 1200^\circ\text{C}$, $T_d = 1100^\circ\text{C}$, $\varepsilon = 0,2$, $\dot{\varepsilon} = 1 \text{ s}^{-1}$

rysunku 11 przedstawiono zmianę wielkości ziarna wraz ze zmianą ułamka zrekrystalizowanego. Należy dodać, iż czas do chłodzenia wodą określany był jako moment rozpoczęcia spadku temperatury w miejscu mocowania termopary (Rys. 1). W rzeczywistości, wewnątrz próbki następuje przesunięcie czasu, w którym rozpoczyna się spadek temperatury w porównaniu z obszarem przy powierzchni. Analizując zmiany struktury określone wielkością ziarna byłego austenitu można stwierdzić, że ziarno austenitu rozpoczyna rekrytalizację po osiągnięciu drugiego etapu na krzywej relaksacyjnej. Na rysunku 12 przedstawiono wyniki uzyskane dla kolejnego przypadku. We wszystkich badanych przypadkach w ramach projektu wyznaczona kinetyka rekrytalizacji statycznej została potwierdzona w wyniku badania struktury.

Jak wspomniano wcześniej etap drugi odpowiada za rekrytalizację statyczną. W przypadku niektórych warunków odkształcenia nie obserwowano na krzywej relaksacyjnej drugiego etapu. W celu weryfikowania, czy dla danych warunków występowała rekrytalizacja, wykonano zamrożenie struktury. Na rysunku 13 przedstawiono uzyskany przebieg zmiany naprężenia



Rys. 13. Wynik relaksacji naprężeń (linia) oraz pomiar wielkości ziarna (symbole) uzyskane dla warunków odkształcenia: $T_h = 1200^\circ\text{C}$, $T_d = 1000^\circ\text{C}$, $\varepsilon = 0,3$, $\dot{\varepsilon} = 0,1 \text{ s}^{-1}$
Fig. 13. Result of stress relaxation (line) and measurement of grain size (symbols) obtained for deformation conditions: $T_h = 1200^\circ\text{C}$, $T_d = 1000^\circ\text{C}$, $\varepsilon = 0,3$, $\dot{\varepsilon} = 0,1 \text{ s}^{-1}$



Rys. 14. Zdjęcia struktury uzyskane dla przebiegu podanym na rysunku 13 po czasach: a) 1,0 s; b) 10,0 s

Fig. 14. Structure obtained for the course given in Figure 13 for different periods of time: a) 1.0 s; b) 10.0 s

po odkształceniu bez inicjacji rekrytalizacji statycznej. Uzyskane w badaniach struktury (Rys. 14) potwierdzają brak zmiany w strukturze w postaci rekrytalizacji statycznej.

Jak widać w oparciu o przedstawione wyniki badań, można stwierdzić, że metoda relaksacji naprężeń skutecznie identyfikuje przedział czasowy dla procesów odbudowy struktury. Pozwala również określić, czy dla danych warunków odkształcenia w materiale po odkształceniu zachodzi rekrytalizacja statyczna. Jest to istotne przy opracowaniu modelu rekrytalizacji statycznej z uwzględnieniem odkształcenia krytycznego dla zajścia tego procesu. Zagadnienie to jest przedmiotem bieżących badań w Zakładzie Symulacji Procesów Technologicznych. Dotychczasowe badania skupiały się głównie na analizie wpływu temperatury na przebieg rekrytalizacji statycznej [9].

5. PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiono wyniki badań otrzymanych w testach relaksacji naprężeń. Z przeprowadzonych badań wynika, że metoda relaksacji naprężeń pozwala na rozróżnienie procesów odbudowy struktury. Dzięki temu w łatwy sposób można wyznaczyć kinetykę rekrytalizacji, odejmując wcześniej efekty związane z procesami zdrowienia. Badania strukturalne, wykonane dla różnych czasów przerwy, potwierdziły skuteczność metody relaksacji naprężeń do wyznaczenia kinetyki rekrytalizacji statycznej. Najważniejszym etapem oceny jest poprawne wyznaczenie na krzywej relaksacji czasu, w którym rozpoczyna się rekrytalizacja.

Wyniki prezentowane w niniejszej pracy zostały uzyskane w ramach projektu: nr umowy RFSR-CT-2013-00007, dofinansowanego przez Research Fund for Coal and Steel.

LITERATURA

1. Laasraoui A., Jonas J.J.: Recrystallization of Austenite after Deformation at High Temperatures and Strain Rates-Analysis and Modelling. *Metall. Trans.*, 1991, 22A (1), 151–160
2. Karjalainen L.P., Perttula J.: Characteristics of static and metadynamic recrystallization and strain accumulation in hot-deformed austenite as revealed by the stress relaxation method, *ISIJ International*, 1996, 36, 729–736
3. Elwazri A.M., Essadiqi E., Yue S.: The Kinetics of Static Recrystallization in Microalloyed Hypereutectoid Steels, *ISIJ International*, 2004, 44(1), 162–170
4. Kliber J., Schindler I.: Recrystallization/Precipitation Behaviour in Microalloyed Steels, *Journal of Materials Processing Technology*, 1996, 60, 597–602
5. Dzubinsky M., Husain Z., Haafte W.M.V.: Comparison of recrystallisation kinetics determined by stress relaxation, double hit, optical metallography and EBSD approaches, *Materials Characterization*, 2004, 52 (2), 93–102
6. Vervynckt S., Verbeken K., Thibaux P., Houbaert Y.: Characterization of the austenite recrystallization by comparing double deformation and stress relaxation tests, *Steel Res. Int.* 81, 234–244 (2010)
7. Szeliga D., Kuziak R., Kopp R., Smyk G., Pietrzyk M.: Accounting for the Inhomogeneity of Deformation in Identification of Microstructure Evolution Model / Niejednorodność Odkształcenia W I Dentyfikacji Modelu Rozwoju Mikrostruktury, *Archives of Metallurgy and Materials*, 2015, 60 (4), 3087–3094
8. Liu W.J., Jonas J.J.: A stress relaxation method for following carbonitride precipitation in austenite at hot working temperatures, *Metallurgical Transactions A*, 1988, 19A, 1403–1413
9. Homsher C.N.: Determination of the non-recrystallization Temperature (T_{nr}) in multiple Microalloyed steels, PhD Thesis, Colorado school of mines, USA, 2013