**Tadeusz Szymczak**
tadeusz.szymczak@its.waw.pl
Instytut Transportu Samochodowego
**Zbigniew L. Kowalewski**
zbigniew.kowalewski@its.waw.pl
Instytut Podstawowych Problemów Techniki
Instytut Transportu Samochodowego

# ZMIANY NAPRĘŻENIA W STALI KONSTRUKCYJNEJ 10H2M W WARUNKACH MONOTONICZNO-CYKLICZNEGO ODKSZTAŁCENIA

W artykule omówiono wybrane stanowiska badawcze przeznaczone do określania zachowania się materiałów przy stałym odkształceniu. Przedstawiono wpływ temperatury na naprężenia resztkowe w połączeniach śrubowych, mających zastosowanie w różnego rodzaju środkach transportu. Zwrócono uwagę na obniżenie naprężenia w nowoczesnych materiałach - wielu gałęzi przemysłu, w tym motoryzacyjnego – stopy lekkie, superstopy oraz stopy tytanu. Zaprezentowano wpływ temperatury i prędkości deformacji na zmianę naprężenia normalnego. Przedstawiono rezultaty badań stali 10H2M (10CrMo9-10) uzyskane z prób realizowanych przy stałym odkształceniu wzdłużnym i zmiennym cyklicznie odkształceniu postaciowym. Omówiono wpływ amplitudy i częstotliwości cykli skrętnych, stosowanych jednocześnie przy występowaniu odkształcenia wzdłużnego o stałym poziomie, na przebieg naprężenia normalnego.

Słowa kluczowe: relaksacja, cykle skrętne, amplituda, częstotliwość, obniżenie naprężenia, odkształcenie efektywne, naprężenie efektywne;

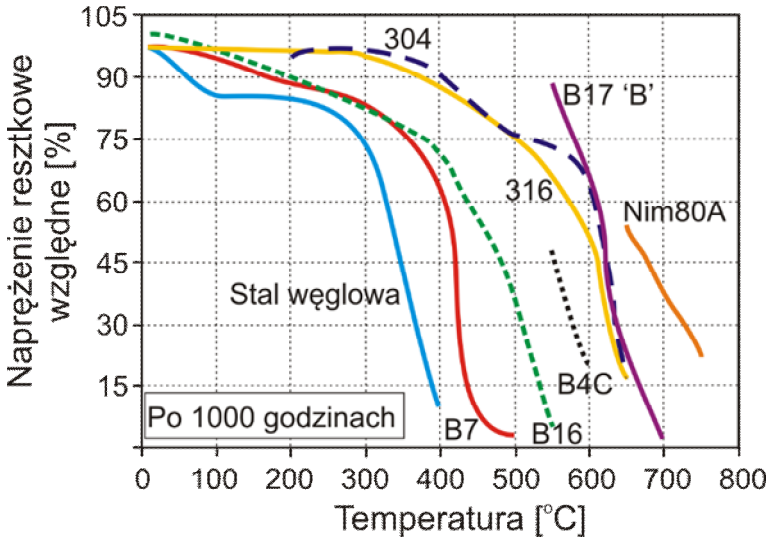
# *STRESS VARIATIONS IN THE 10H2M STEEL UNDER MONOTONIC-CYCLIC DEFORMATION*

*The paper reports selected testing machines recommended for investigations of material behaviour under constant deformation. An influence of temperature and strain rate on stress variations in screws' material applied in many types of transport is presented. Stress reduction in modern materials employed by many branches of industry including automotive, i.e. light alloys, super-alloy and titanium alloys is shown. Results from examination of the 10H2M (10CrMo9-10) steel at constant level of axial strain and cyclic shear strain are discussed. An influence of amplitude and frequency of torsion cycles on the axial stress under constant level of axial strain is studied.*

*Keywords: relaxation, torsion cycles, amplitude, frequency, stress reduction, equivalent strain, equivalent stress*

## 1. Wprowadzenie

Redukcja naprężenia w materiale lub elemencie konstrukcyjnym charakteryzuje się zazwyczaj nieliniowym przebiegiem i jest zależna od rodzaju materiału, typu obciążenia oraz wartości temperatury. Przykładem tego efektu mogą być zmiany naprężenia resztkowego w śrubach (rys. 1). W przypadku stali węglowej obniżenie naprężenia wstępuje już w temperaturze wynoszącej ok. 300°C. Podobne zachowanie wykazują stale B7 (42CrMo4) i B16. Inne rodzaje stali jak: 304 (X5CrNi18-10) i 316 (X5CrNiMo17-12-2) wykazują postępującą redukcję naprężenia w temperaturze przekraczającej 500°C. W przypadku nowoczesnych materiałów, jak stal B17'B' i nadstop Nimonic 80A (znajdujący zastosowanie w warunkach działania wysokiej temperatury, przede wszystkim na zawory wydechowe silników spalinowych [13], [14]), efekt ten jest widoczny w temperaturze o wartościach z zakresu od 600 do 750°C.




Rys. 1. Zmiany względnego naprężenia resztkowego w śrubach, wykonanych z różnych rodzajów materiałów konstrukcyjnych, w funkcji temperatury [1]
*Fig. 1. Variations of residual stress in screws made of various kinds of engineering materials versus temperature [1]*

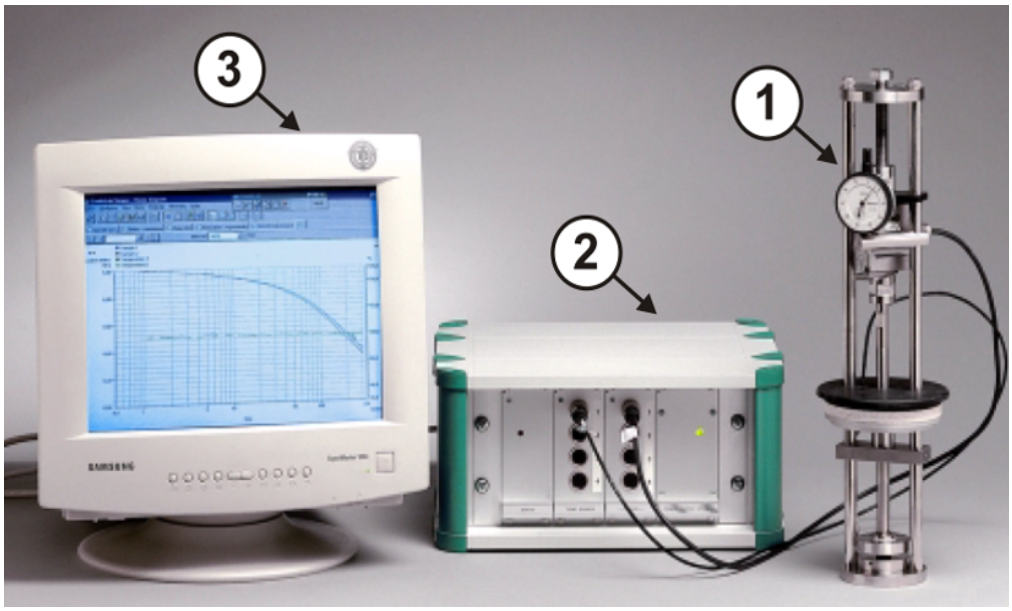
W zakresie badań znalazły się próby w warunkach działania monotoniczno-cyklicznej deformacji kontrolowanej przy użyciu tensometrów naklejanych w strefie pomiarowej próbki. Celem tych prób było określenie wpływu zmiennego cyklicznie odkształcenia postaciowego na zmianę odkształcenia wzdłużnego o stałej wartości.

## 2. Charakterystyka stanowisk badawczych do określania relaksacji naprężenia

Badania mechaniczne dotyczące określania efektu redukcji naprężenia realizowane są przy użyciu różnego rodzaju stanowisk badawczych. Jednym z nich są urządzenia przeznaczone do prowadzenia testów relaksacji (rys. 2, 3). Wyróżnić można zestawy stołowe (rys. 2), które składają się z przyrządu do zadawania obciążenia (1) wyposażonego w czujnik zegarowy, wzmacniacza pomiarowego ze specjalistycznym oprogramowaniem (2) oraz monitora (3). W tego typu urządzeniach sygnały pomiarowe wyprowadzone są

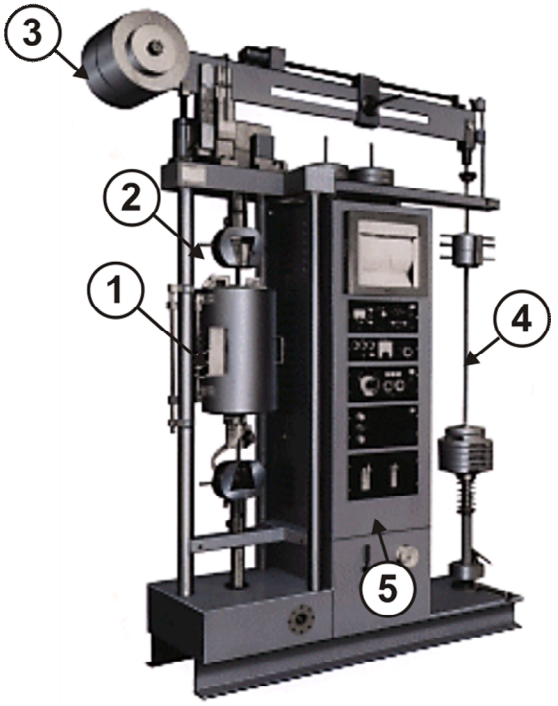
przewodami z czujników przyrządu do wzmacniacza. Wykorzystywane są także przyrządy, które są przeznaczone do badania relaksacji w warunkach ściskania (rys. 2). Istnieją również ich odmiany umożliwiające prowadzenie prób relaksacji w warunkach rozciągania. Zaletą tego rodzaju urządzeń jest możliwość ich instalacji w niewielkiej przestrzeni laboratoryjnej.

Oprócz urządzeń stołowych, w badaniach relaksacji wykorzystuje się specjalne maszyny (rys. 3a). Posiadają one przestrzeń badawczą o odpowiednich rozmiarach, w której mocuje się próbkę oraz, w zależności od celu badawczego, piec (1). Układ obciążający (2) tych stanowisk wyposażony jest w uchwyty oraz cięgna. Istotnym elementem maszyny jest dźwignia (3) z przeciwwagą i układem do zadawania obciążania (4). Komputer wraz z oprogramowaniem kontroluje działanie stanowiska badawczego, umożliwiając automatyczne dostosowanie obciążenia, aby można było zachować warunki badania relaksacji. Parametry techniczne stanowiska (rys. 3b) umożliwiają prowadzenie testów przy obciążeniu o wartościach do 200 kN. Maksymalne wydłużenie może być równe 10 mm. Temperatura badania może osiągać 800°C. Urządzenie zapewnia wysoką dokładność pomiaru obciążenia rzędu ±0.5%.




Rys. 2. Stanowisko do badania relaksacji naprężenia: 1- przyrząd do prowadzenia badań, 2 - wzmacniacz pomiarowy, 3 – monitor [1], [4]
*Fig. 2. Stand for examination of stress relaxation:*
*1 – main instrument, 2- amplifier, 3- monitor [1], [4]*

**(a)**




**(b)**

| Nazwa parametru | Zakres |
|---|---|
| Dopuszczalne obciążenie | 100～200 [kN] |
| Dokładność obciążenia | ±0.5% |
| Prędkość przesuwania się dźwigni w teście relaksacji | ok. $130\times10^{-15}$ [1/s] |
| Rodzaj systemu opuszczania i podnoszenia | Automatyczny lub manualny |
| Prędkość rozciągania | 0～50 [mm/min] |
| Pomiar odkształcenia | Czujnikiem cyfrowym |
| Rozdzielczość pomiaru odkształcenia | ±0.5 [μm] |
| Wydłużenie | 0～10 [mm] |
| Zakres temperatury | 150～800℃ |
| Kontrola temperatury | Kontroler Bethel-3A |
| Zasilanie | AC100/200V 3kW |

Rys. 3. Maszyna do badania relaksacji naprężenia: (a) widok ogólny: 1-zasadnicza przestrzeń badawcza z piecem, 2-uchwyty i cięgna, 3-belka z przeciwwagą, 4-układ do zadawania obciążenia; (b) parametry techniczne [2]

*Fig. 3. Testing machine for investigations of stress relaxation: (a) general view: 1 – testing space with high temperature furnace, 2 – grips and strings, 3 – counterweight beam, 4 - loading system; (b) technical parameters [2]*

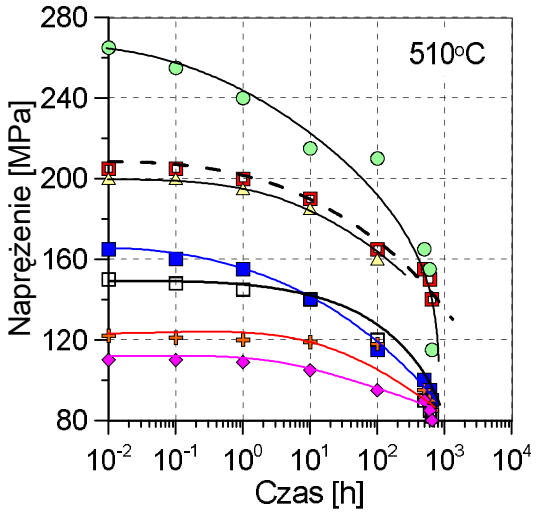
Ze względu na powszechne występowanie wytrzymałościowych maszyn serwohydraulicznych eksperymentatorzy próbują wykorzystywać te stanowiska nie tylko do prób przy obciążeniach monotonicznych czy zmęczeniowych, lecz również do badania relaksacji. Wynika to z możliwości stosowania tensometrów naklejanych na powierzchni pomiarowej próbki, których sygnały w postaci odkształcenia są wykorzystywane do sterowania maszyną wytrzymałościową w zamkniętej pętli sprzężenia zwrotnego.

## 3. Relaksacja naprężenia – przegląd wybranych wyników z literatury

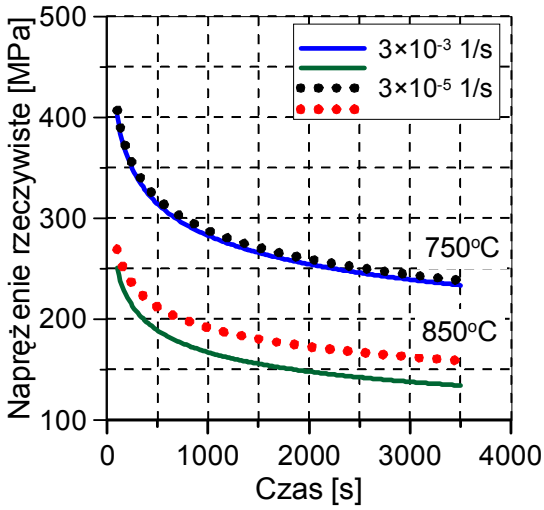
Relaksacja naprężenia może występować w różnych rodzajach materiałów konstrukcyjnych, jak: stale, stopy aluminium, nadstopy czy kompozyty. Programy badań, które są ukierunkowane na poznanie tego zjawiska, oprócz rozpatrywania wielu poziomów odkształcenia, uwzględniają również wpływ temperatury. Stanowi ona istotny czynnik, przy którym następuje obniżenie naprężenia.

Wyniki badań relaksacji stali 2 ¼ Cr-1 Mo (stosowanej w przemyśle energetycznym na rury o obniżonej grubości ścianek [16]) wstępnie odkształconej (rys. 4), reprezentują podobny przebieg zmian naprężenia. Jest on nieliniowy i po czasie wynoszącym ok. 1000 godzin naprężenia te przyjmują wartości zawierające się w przedziale od ok. 80 do 110 MPa [4].

Innego rodzaju przebieg naprężenia w czasie uzyskano w badania nadstopu CoCr22Ni22W14 (stosowanego w komorach spalania turbin silników lotniczych [15]), prowadzonych w temperaturze 750 i 850°C (rys. 5). Próby realizowano przy dwóch wartościach prędkości odkształcenia wzdłużnego tj.: $3\times10^{-3}$ oraz $3\times10^{-6}$ [1/s] aż do uzyskania wartości odkształcenia, odpowiadających poziomom naprężenia:  250 MPa i  400 MPa. Następnie materiał był wytrzymywany w wysokiej temperaturze przez około jedną godzinę. W rozpatrywanym przypadku, oprócz różnicy w uzyskiwanych wartościach naprężenia, nie zaobserwowano innych efektów [6].



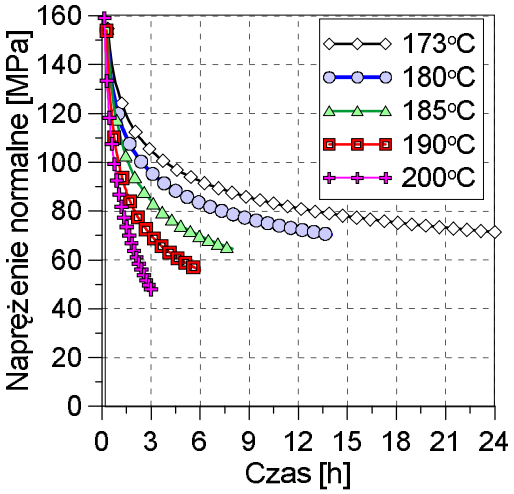

Rys. 4. Relaksacja naprężenia w stali 2 ¼ Cr-1 Mo w temperaturze 510°C [4][2]
*Fig. 4. Stress relaxation in the 2 1/4 Cr-1 Mo steel at temperature of 510°C [4]*



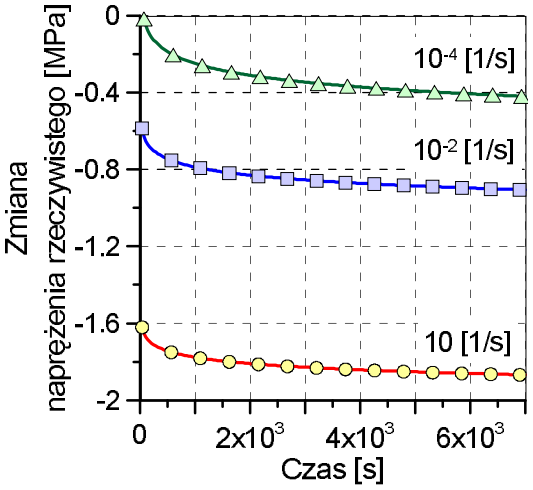

Rys. 5. Relaksacja naprężenia w zależności od prędkości odkształcenia i temperatury, materiał: nadstop CoCr22Ni22W14 [6]
*Fig. 5. Stress relaxation as a function of strain rate and temperature, material: the CoCr22Ni22W14 super alloy [6]*

Wpływ temperatury na zachowanie lotniczego stopu aluminium 2XU, odkształconego do poziomu deformacji odpowiadającej naprężeniu 160MPa, badali autorzy pracy [7] (rys. 6). Uzyskany przez nich wynik wskazuje na nieliniowe obniżanie naprężenia normalnego ze wzrostem temperatury. Wyraźnie również widać, że przy temperaturze 173 i 180°C redukcja naprężenia zmierza do ustalonego poziomu. Przy wyższych wartościach temperatury efekt ten zanika.

Prowadzone są również próby relaksacji naprężenia w warunkach ściskania. Autorzy pracy [9] badali zachowanie kompozytu poliestrowo-gumowego o oznaczeniu Adiprene-L100. Testy polegały na ściśnięciu próbki do określonej wartości odkształcenia i wytrzymaniu przez dwie godziny. Zastosowano trzy prędkości odkształcenia: 10, $10^{-2}$ i $10^{-4}$ [1/s]. Wyniki wykazały wzrost - w początkowym etapie próby - bezwzględnej wartości naprężenia ze wzrostem prędkości odkształcenia. Natomiast charakter zmian naprężenia w czasie, niezależnie od prędkości odkształcenia, był podobny (rys. 7).




Rys. 6. Wpływ temperatury na relaksację naprężenia w stopie aluminium 2XU [7]
*Fig. 6. Temperature influence on stress relaxation in the 2XU aluminium alloy [7]*




Rys. 7. Zmiany naprężenia rzeczywistego w funkcji czasu podczas testu relaksacji kompozytu polimerowo-gumowego prowadzonego przy deformacji 60% uzyskanej dla trzech wartości prędkości odkształcenia [9]
*Fig. 7. Variations of true stress versus time during relaxation test of polimer-rubber composite at 60% deformation achieved for three values of strain rate [9]*

Niektóre zespoły badawcze [8] rozpatrują problem obniżania się naprężenia średniego (rys. 8) w teście prowadzonym na stopie aluminium 7075 – stosowanym na elementy nośne pojazdów ciężarowych, przyczep, naczep oraz dźwigów i wagonów [16] – w warunkach zmiennego cyklicznie odkształcenia wzdłużnego. Wyniki tych prób wskazują na podobną tendencję zmian naprężenia w funkcji liczby cykli, jak obserwowane w typowym teście relaksacji naprężenia.

Inni badacze [10] analizowali zmiany naprężenia w materiale z historią obciążenia w postaci cykli odkształcenia i naprężenia wykonywanych przy różnych wartościach współczynnika asymetrii cyklu. W tym przypadku badanym materiałem był stop tytanu Ti–15Mo–3Al–2.7Nb–0.2Si o nazwie handlowej TIMETAL 21S (Ti21S). Stopy tej serii są wykorzystywane między innymi na sprężyny układów zawieszenia pojazdów [17]. Program badań [10] składał się z trzech etapów:

- **Etap 1:** sterowanie sygnałem odkształcenia; R = -1, prędkość odkształcenia $10^{-5}$ [1/s]; amplituda = ±0.5%;
- **Etap 2:** sterowanie sygnałem naprężenia; R = -1, prędkość naprężenia 0.39 MPa/s; amplituda = 87.5 MPa;
- **Etap 3:** sterowanie sygnałem odkształcenia; R = -0.5, prędkość odkształcenia $10^{-5}$ [1/s];amplituda = ~0.35%.

Po określonej liczbie cykli (Tab. 1) prowadzono przez 12 godzin badanie relaksacji naprężenia przy stałym poziomie odkształcenia wzdłużnego (rys. 9). W przypadku prowadzonej próby widoczny był brak wpływu rodzaju sygnału cykli osiowych i ich parametrów na relaksację naprężenia.

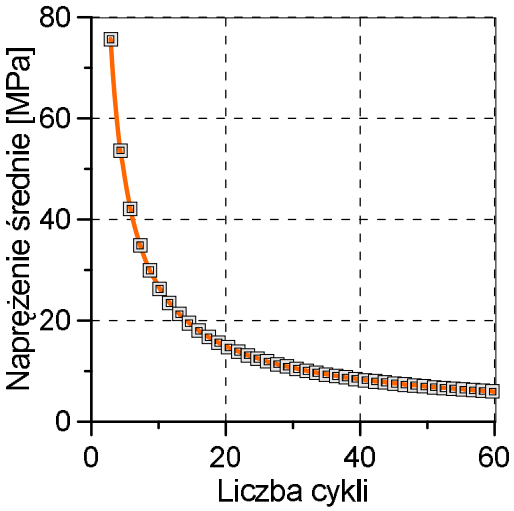
Tabela 1

Etapy programu badawczego stopu tytanu TIMETAL 21S [8]

*Table 1*

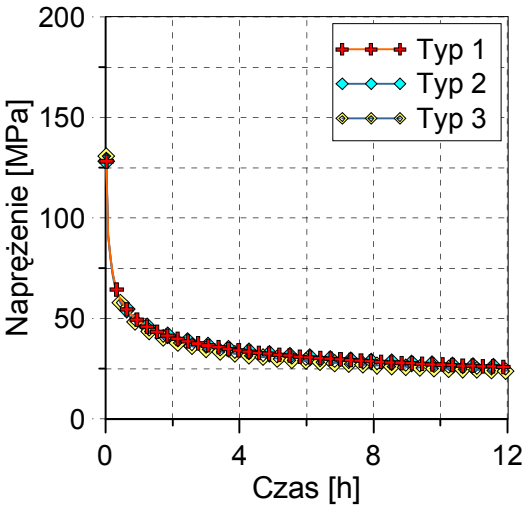
*Stages of research programme for examination of the 21S TIMETAL [8]*

| Etap | Liczba cykli | Poziom odkształcenia [mm/mm] | Naprężenie początkowe [MPa] |
|---|---|---|---|
| 1 | 155 | 0.005 | 154 |
| 2 | 150 | 0.027 | 117 |
| 3 | 197 | 0.004 | 130 |




Rys. 8. Zmiany naprężenia średniego w teście prowadzonym przy zmiennym cyklicznie rozciąganiu-ściskaniu o amplitudzie ±0.1%, materiał: stop aluminium 7075 [8]

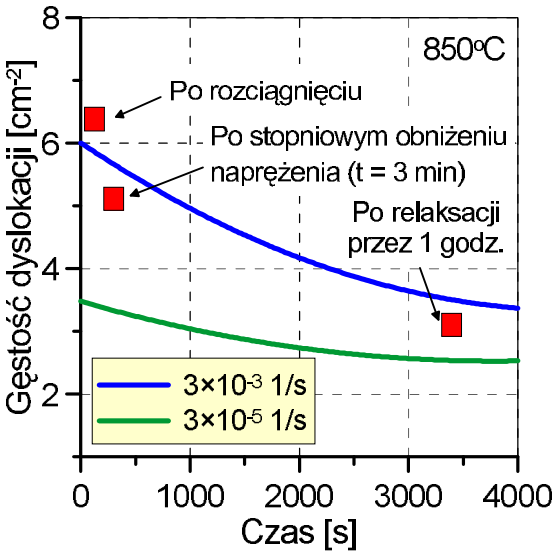
*Fig. 8. Variations of mean stress observed at tension-compression cycles at amplitude ±0.1%, material: the 7075 aluminium alloy [8]*




Rys. 9. Przebiegi relaksacji naprężenia w funkcji czasu z badania stopu tytanu TIMETAL 21S z historią deformacji w postaci cykli rozciąganie-ściskanie [10]

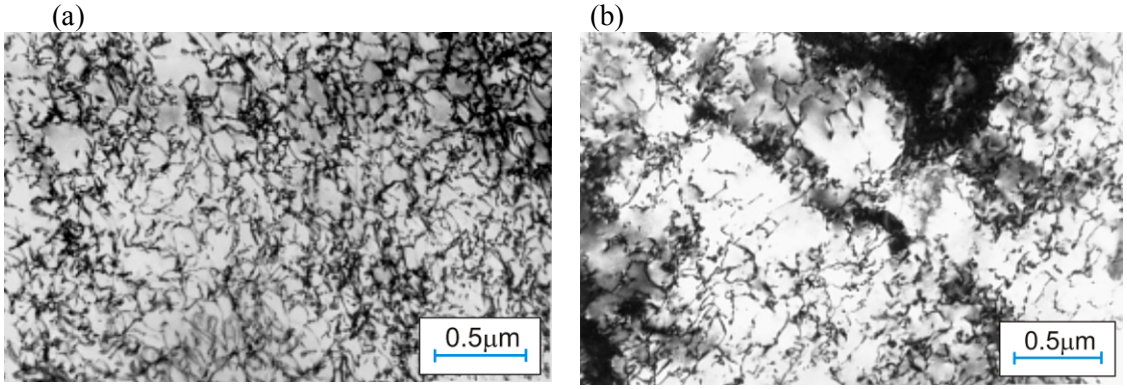
*Fig. 9. Stress relaxation versus time determined in test of the 21S TIMETAL with pre-deformation introduced by tension-compression cycles [10]*

Zjawisko relaksacji analizowane jest nie tylko na podstawie zmian naprężenia w czasie, lecz również efektów występujących w strukturze materiału - zmian gęstości dyslokacji [11, 12]. Jak wykazano w pracy [11], zwiększenie prędkości odkształcenia wzdłużnego skutkowało prawie dwukrotnym wzrostem gęstości dyslokacji w nadstopie CoCr22Ni22W14 (rys. 10). Wytrzymanie stopu przy zadanym odkształceniu przez 1 godzinę powodowało znaczne obniżenie gęstości dyslokacji. Redukcję tego parametru mikrostruktury potwierdzają wyniki badań mikroskopowych dla materiału przed i po relaksacji (rys. 11).




Rys. 10. Gęstość dyslokacji w funkcji czasu relaksacji naprężenia w nadstopie CoCr22Ni22W14 [11]

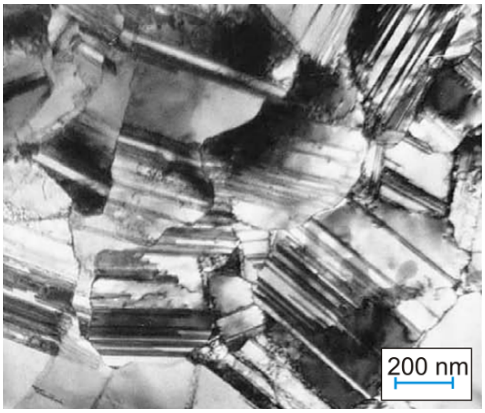
*Fig. 10. Dislocation density versus time of stress relaxation in the CoCr22Ni22W14 super alloy [11]*



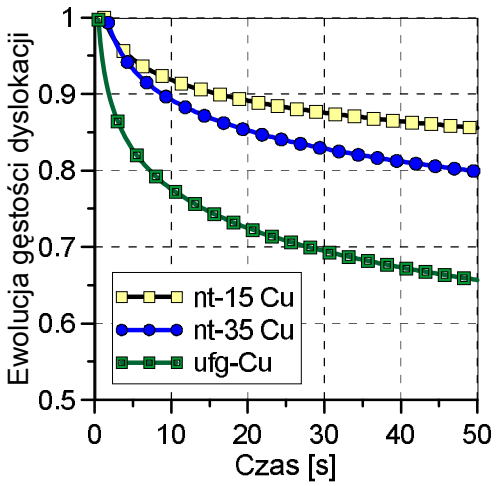

Rys. 11. Struktura dyslokacyjna stopu CoCr22Ni22W14: (a) przed relaksacją i (b) po relaksacji [9]

*Fig. 11. Dislocation structure of the CoCr22Ni22W14 alloy: (a), (b) before and after relaxation, respectively [9]*

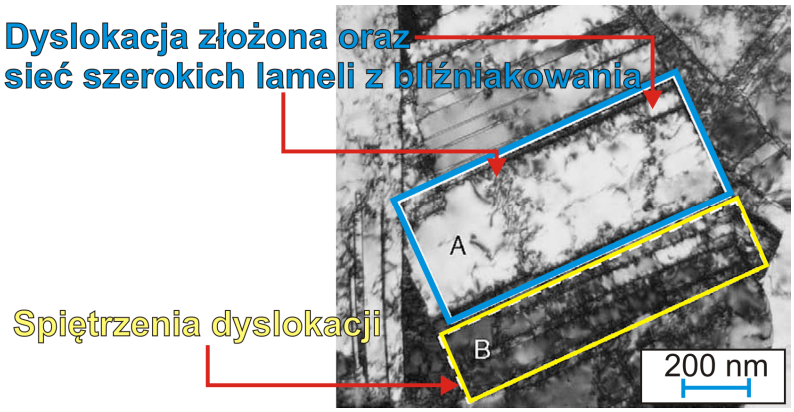
W pracy [12] prowadzono testy relaksacji dla trzech następujących odmian nano-miedzi: nt-15-Cu (rys. 12), nt-35-Cu, ufg-Cu, charakteryzujących się odpowiednio następującymi wartościami granicy plastyczności: 830, 660 i 200 MPa. Uzyskane wyniki wykazały obniżanie się gęstości dyslokacji ze zmniejszeniem granicy plastyczności (rys. 13). Obserwacje mikrostruktury przy użyciu techniki mikroskopii transmisyjnej (TEM) uwidoczniły występowanie dyslokacji złożonych oraz sieci szerokich lameli z bliźniakowania (rys. 14). Zaobserwowano również spiętrzenia dyslokacji.




Rys. 12. Mikrostruktura miedzi nt-15-Cu przed testem relaksacji [12]
*Fig. 12. Microstructure of the nt-15-Cu copper before relaxation test [12]*




Rys. 13. Ewolucja gęstości dyslokacji w czasie z badania trzech rodzajów nano-miedzi [12]
*Fig. 13. Evolution of density dislocation versus time for three kinds of nano-cooper [12]*



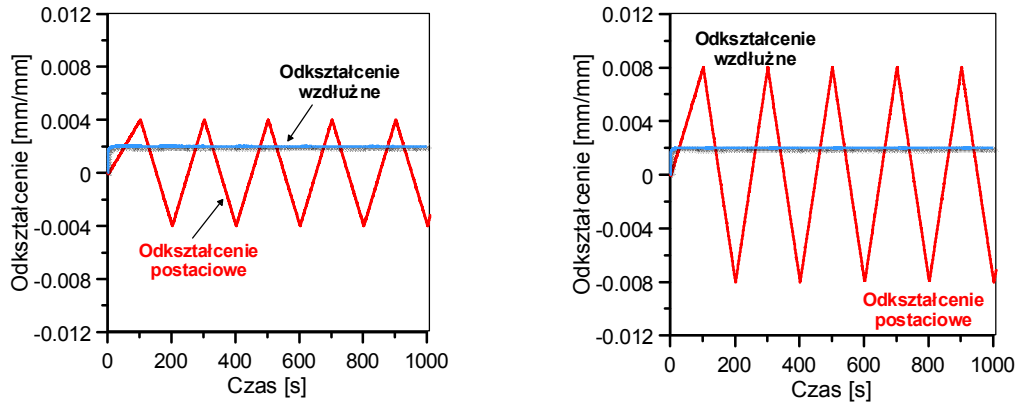

Rys. 14. Mikrostruktura nano-miedzi nt-15-Cu po teście relaksacji [12]
*Fig. 14. Microstructure of the nt-15-Cu copper after relaxation test [12]*

## 4. Wpływ parametrów cyklicznie zmiennego odkształcenia na relaksację naprężenia w kierunku poprzecznym

W tym punkcie pracy zamieszczono rezultaty własnych badań obniżania się naprężenia w stali 10H2M (10CrMo9-10) występującego w warunkach monotoniczno-cyklicznego odkształcenia. Materiał tego gatunku jest określany jako stal kotłowa do pracy w podwyższonej temperaturze, nieprzekraczającej 580°C [19]. Używana jest do produkcji odpowiedzialnych części maszyn, turbin parowych, wałów wirników, urządzeń ciśnieniowych oraz śrub i nakrętek [16], [19]. Próby prowadzono w temperaturze pokojowej stosując cienkościenne próbki rurkowe o grubości ścianki 0.75 mm oraz dwuosiową serwohydrauliczną maszynę wytrzymałościową, którą sterowano w zamkniętej pętli sprzężenia zwrotnego, wykorzystując sygnały odkształcenia wzdłużnego

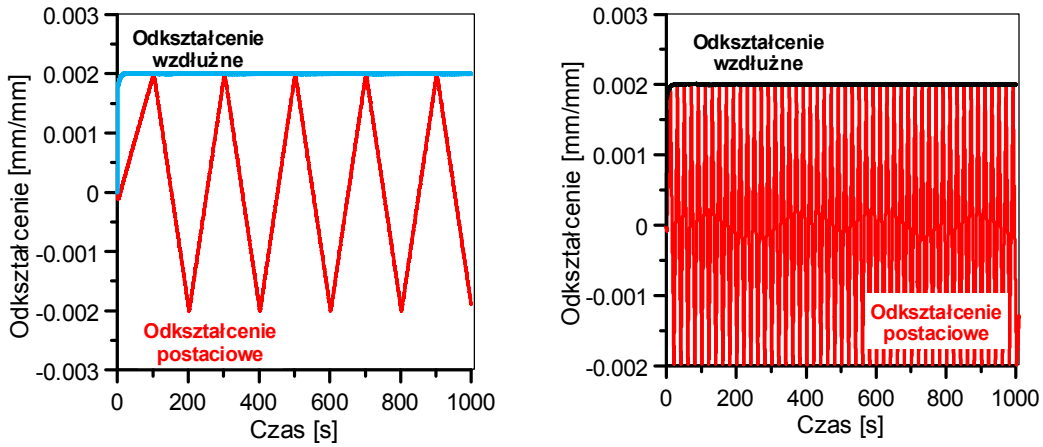
i postaciowego. Program badań zaprojektowano w taki sposób, aby można było określić wpływ parametrów cykli skrętnych na zmiany naprężenia normalnego. Zawierał on dwa etapy. Pierwszy z nich dotyczył określenia wpływu amplitudy cyklicznie zmiennego odkształcenia postaciowego na zmianę naprężenia w kierunku osiowym, w którym wprowadzono stałe odkształcenie wzdłużne o wartości 0.2% (rys. 15). Cykle skrętne miały następujące parametry: amplituda przyjmowała wartości ±0.2%, ±0.4% (rys. 15a) oraz ±0.8% (rys. 15b), częstotliwość była równa 0.005Hz.

Druga część programu badań dotyczyła oceny wpływu częstotliwości odkształcenia postaciowego cyklicznie zmiennego na przebieg naprężenia normalneg (rys. 16). Odkształcenie wzdłużne i amplituda cykli skrętnych były równe 0.2%. Częstotliwość odkształcenia postaciowego wynosiła: 0.005Hz (rys. 16a), 0.05Hz (rys. 16b) oraz 0.5Hz.




Rys. 15. Przebiegi sygnałów odkształcenia w teście oceny wpływu amplitudy cykli skrętnych o wartości: (a) ±0.4%, (b) ±0.8%

*Fig. 15. Courses of strain signals used in the test for evaluation of effect of torsion cycles amplitude of the following values: (a) ±0.4%, (b) ±0.8%*

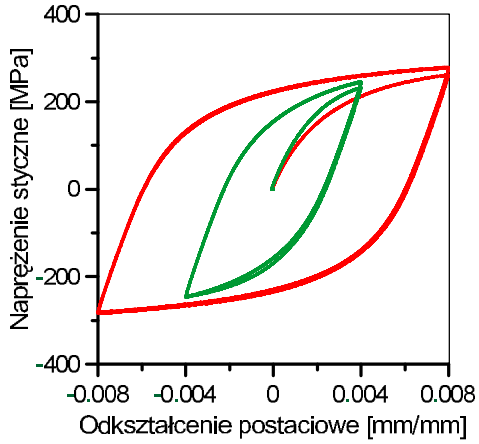



Rys. 16. Przebiegi sygnałów odkształcenia w teście oceny wpływu częstotliwości cykli skrętnych o wartościach: (a) 0.005Hz, (b) 0.05Hz

*Fig. 16. Courses of strain signals used in the test for determination of an influence of torsion cycles frequency of the following values: (a) 0.005Hz, (b) 0 0.05Hz*

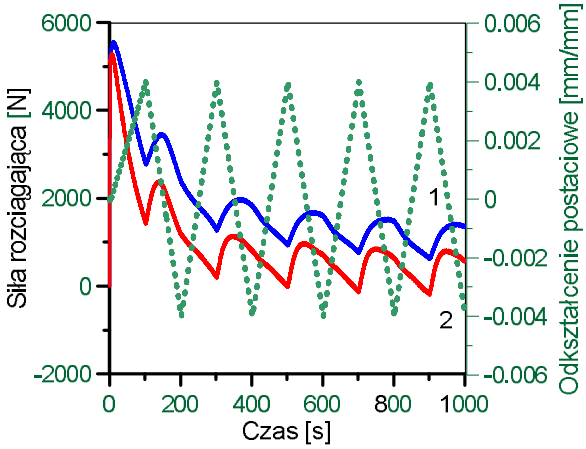
### 4.1. Wpływ amplitudy cykli skrętnych na obniżanie się naprężenia normalnego

Ocenę wpływu amplitudy cykli skrętnych na zachowanie się materiału odkształconego w kierunku osiowym do wartości 0.2% prowadzono na podstawie zmian pętli histerezy w kierunku stycznym (rys. 17), siły rozciągającej (rys. 18) oraz odkształcenia (rys. 19) i naprężenia efektywnego (rys. 20) w czasie.




Rys. 17. Pętle histerezy przy skręcaniu dla amplitudy odkształcenia postaciowego wynoszącego: ±0.4% i ±0.8%

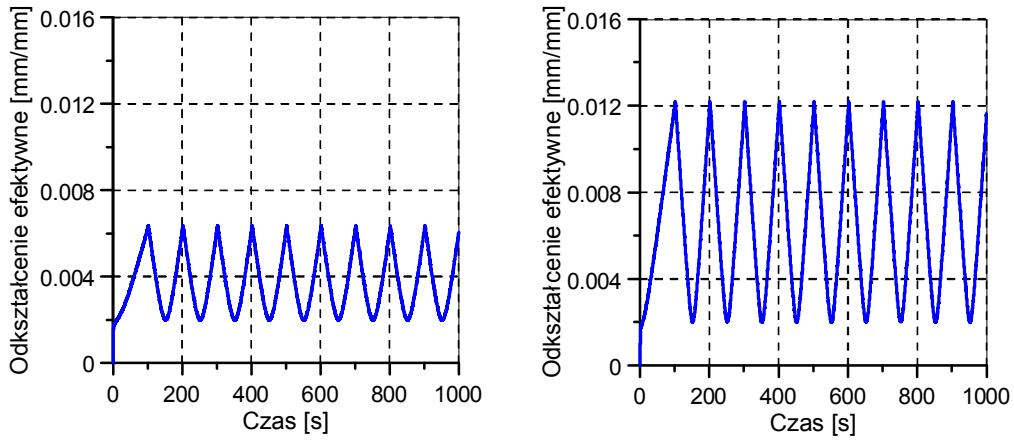
*Fig. 17. Hysteresis loops for torsion for shear strain amplitude equal to: ±0.4% and ±0.8%*




Rys. 18. Zmiany siły rozciągającej w czasie uzyskane z badania przy udziale cykli skrętnych o amplitudzie: (1) ±0.4% i (2) ±0.8%

*Fig. 18. Variations of tensile force versus time for tests conducted at presence of torsion cycles of amplitude equal to: (1) ±0.4% and (2) ±0.8%*

Analiza wyników z kierunku skręcania, oprócz cyklicznego umacniania badanej stali nie wykazała innych istotnych efektów (rys. 17). Rezultaty z kierunku osiowego (rys. 18) uwidoczniły obniżanie się siły rozciągającej przy obu zastosowanych wartościach amplitudy odkształcenia postaciowego. W przypadku cykli skrętnych o amplitudzie wynoszącej ±0.4% siła rozciągająca zrelaksowała od wartości 5.7 do 1 kN. Przy dwukrotnie większej amplitudzie odkształcenia postaciowego obniżenie siły osiągnęło poziom ok. 0.2 kN. Ponadto, przebiegi siły w funkcji czasu charakteryzowały się lokalnymi ekstremami. Zestawienie tych zmian z przebiegami cyklicznie zmiennego odkształcenia postaciowego ujawniło ich wzajemną zależność. Lokalne ekstrema w przebiegu siły rozciągającej występowały wtedy, gdy cykle skrętne zmieniały kierunek.




Rys. 19. Przebiegi odkształcenia efektywnego w czasie uzyskane w teście, w którym wykorzystywano cykle skrętne o amplitudzie:
(a) ±0.4%, (b) ±0.8%
*Fig. 19. The equivalent strain versus time from tests conducted for the following values of torsion cycles amplitude: (a) ±0.4%, (b) ±0.8%*

Wyjaśnienia efektu obniżenia siły/naprężenia poszukiwano bazując na przebiegach odkształcenia (rys. 19) i naprężenia efektywnego (rys. 20) w czasie. Do tego celu wykorzystano zależności:

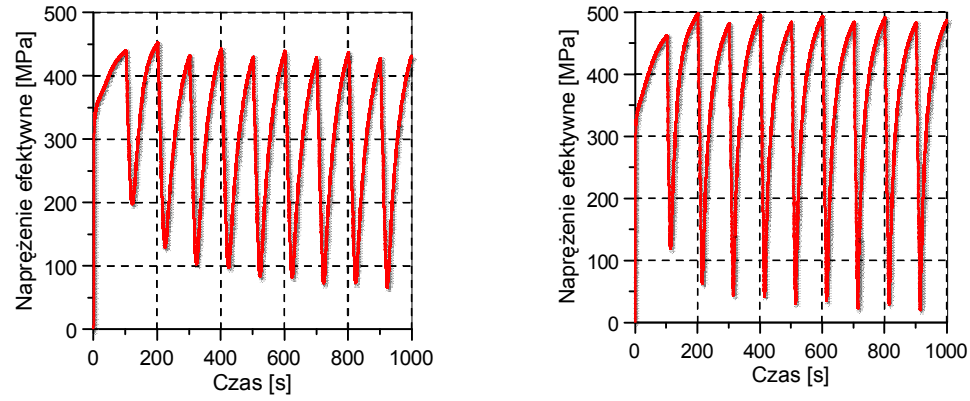
$$\sigma_e = \sqrt{\sigma_{xx}^2 + 3\tau_{xy}^2} \qquad (1)$$

gdzie: $\sigma_{xx}$ – naprężenie normalne, $\tau_{xy}$ – naprężenie styczne:

$$\varepsilon_e = \sqrt{\varepsilon_{xx}^2 + \frac{3}{(1+\nu)^2}\varepsilon_{xy}^2} \qquad (2)$$

gdzie: $\varepsilon_{xx}$ – odkształcenie wzdłużne, $\varepsilon_{xy}$ – odkształcenie postaciowe, $\nu$ – współczynnik Poissona.

Zmiany odkształcenia efektywnego z testu, w którym stosowano cykle skrętne o amplitudzie ±0.4% charakteryzowały się utrzymywaniem ich wartości w zakresie od 0.2% do 0.6% (rys. 19a). W przypadku dwukrotnie większej amplitudy sygnału odkształcenia postaciowego, znacznemu zwiększeniu uległa maksymalna wartość odkształcenia efektywnego (rys. 19b).

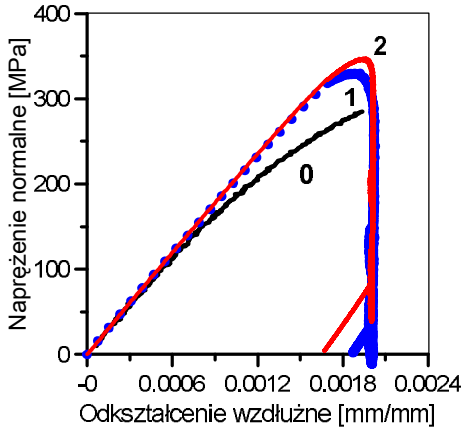



Rys. 20. Przebiegi naprężenia efektywnego w funkcji czasu z testu, w którym wykorzystywano cykle skrętne o amplitudzie: (a) ±0.4%, (b) ±0.8%

*Fig. 20. Equivalent stress versus time for tests where the following values of torsion cycles amplitude were applied :(a) ±0.4%, (b) ±0.8%*

Niezależnie od wartości amplitudy cykli skrętnych i sygnału odkształcenia efektywnego, przebiegi naprężenia efektywnego, oprócz cyklicznych zmian wartości - reprezentujących lokalne wzmacnianie oraz osłabianie materiału - wskazały również cykliczne osłabianie się materiału, przejawiające się obniżaniem maksymalnych i minimalnych wartości naprężenia w czasie (rys. 20).

Efekt relaksacji naprężenia jako skutek obecności cykli skrętnych zaprezentowano na rys. 21. Zawiera on porównanie charakterystyki rozciągania (0) badanej stali, uzyskanej w klasycznej próbie rozciągania, z krzywymi rozciągania określonymi z programu pokazanego na rys. 15. Analiza tych zależności wskazuje na gwałtowny spadek naprężenia w chwili wprowadzenia cykli skrętnych.



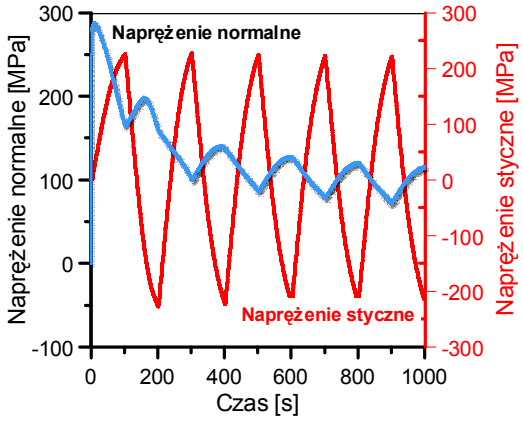

Rys. 21. Porównanie charakterystyki rozciągania (0) stali 10H2M (10CrMo9-10) z krzywymi naprężenie-odkształcenie określonymi w programie deformacji pokazanym na rys. 15a (1) i rys. 15b (2)

*Fig. 21. Comparison of tensile characteristic (0) of the 10H2M (10CrMo9-10) steel with stress-strain curves determined in tests performed according to deformation programme shown in Fig. 15a (1), 15b (2)*

### 4.2. Wpływ częstotliwości cykli skrętnych na relaksację naprężenia normalnego

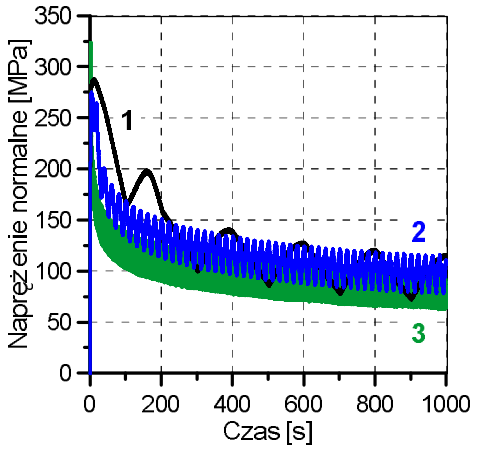
Wyniki badań wpływu częstotliwości zmiennego cyklicznie odkształcenia postaciowego, podobnie jak rezultaty badań wpływu amplitudy identyfikowały - niezależnie od wartości stosowanej częstotliwości (od 0.005 do 0.5Hz) - postępujące obniżanie naprężenia normalnego oraz miejsca występowania lokalnych ekstremów (rys. 22). Ich obecność była skorelowana ze zmianą kierunku cykli skrętnych.

Porównanie przebiegów naprężenia normalnego w funkcji czasu z prób realizowanych przy trzech wartościach częstotliwości cykli skrętnych, ujawniło niewielkie różnice w ich położeniu (rys. 23), wyrażając tym samym możliwość uzyskiwania redukcji naprężenia przy stosunkowo niskich parametrach odkształcenia postaciowego, tj. amplitudzie wynoszącej ±0.2% i częstotliwości równej 0.005Hz.




Rys. 22. Przebiegi naprężenia normalnego i stycznego w czasie uzyskane w programie pokazanym na rys. 16a

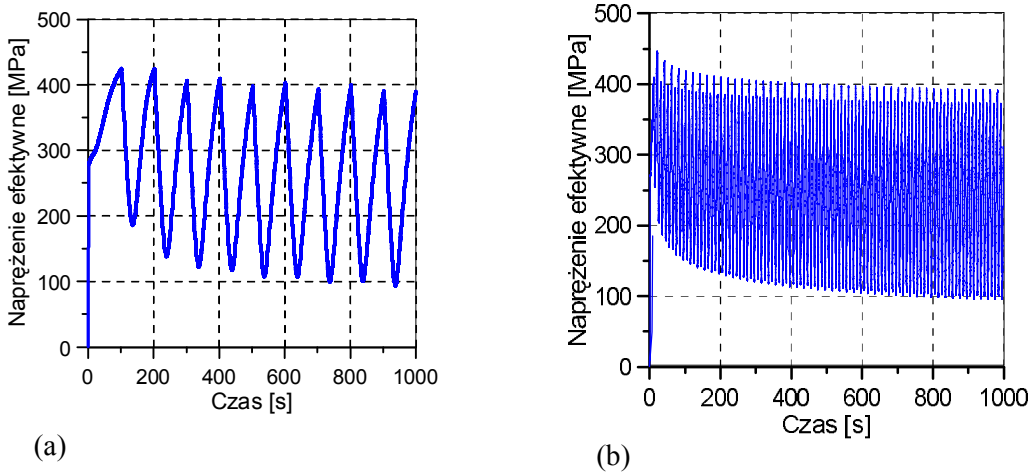
*Fig. 22. Courses of axial and shear stress versus time for the test program presented in Fig. 16a*




Rys. 23. Zmiany naprężenia normalnego w czasie dla trzech wartości częstotliwości cykli skrętnych: (1)-0.005Hz, (2)-0.05Hz, (3)-0.5Hz

*Fig. 23. Variations of normal stress versus time for three values of frequency: (1)-0.005Hz, (2)-0.05Hz, (3)-0.5Hz*

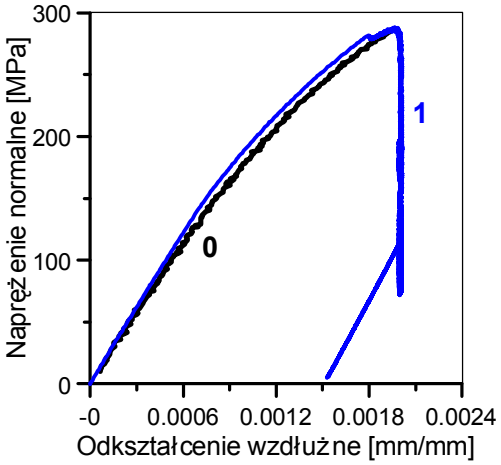
Przebiegi odkształcenia efektywnego nie miały innych cech niż te, które zostały wykazane w badaniu wpływu amplitudy cykli skrętnych. Podobnie było w przypadku zmian naprężenia efektywnego (rys. 24) – obserwowano lokalne wzrosty i spadki jego wartości oraz globalne cykliczne osłabianie materiału, charakteryzujące się postępującym obniżaniem naprężenia w czasie.




Rys. 24. Naprężenie efektywne w funkcji czasu w testach prowadzonych w celu oceny wpływu częstotliwości cykli skrętnych

*Fig. 24. The equivalent stress versus time from tests conducted for evaluation of an influence of torsion cycles frequency*

Wpływ cyklicznie zmiennego odkształcenia postaciowego o częstotliwości 0.005Hz na naprężenie normalne, podobnie jak zostało to określone w badaniu wpływu amplitudy, przejawiał się nagłym obniżeniem wartości naprężenia w chwili uruchomienia cykli skrętnych (rys. 25).




Rys. 25. Porównanie charakterystyki rozciągania (0) stali 10H2M (10CrMo9-10) z krzywą naprężenie-odkształcenie określoną w programu pokazanym na rys. 16a, w którym cykle skrętne miały częstotliwość równą 0.005Hz

*Fig. 25. Comparison of tensile characteristic (0) of the 10H2M (10CrMo9-10) steel to stress-strain curve determined by the use of loading programme shown in Fig. 16a; where: torsion cycles frequency was equal to 0.005Hz*

## 5. Podsumowanie

Omówione wyniki badań literaturowych wskazują, że:

a) badanie relaksacji w warunkach laboratoryjnych może odbywać się przy użyciu specjalnie zaprojektowanych przyrządów i maszyn,

b) określanie zachowania materiału w teście relaksacji powinno być prowadzone na podstawie zmian naprężenia oraz wyników badań mikrostrukturalnych. Gęstość dyslokacji oraz jej zmiana może stanowić wskaźnik do oceny stanu materiału, w którym wystąpiła relaksacja naprężenia.

Wyniki badań przeprowadzonych na stali 10H2M (10CrMo9-10) wykazały, że

a) występowanie cykli skrętnych w obecności stałego, co do wartości odkształcenia wzdłużnego, prowadzi do istotnego obniżenia naprężenia normalnego,
b) wzrost amplitudy i częstotliwości cykli skrętnych powodował nieznaczne zwiększenie redukcji naprężenia normalnego.

**LITERATURA**


[1] Boltight Data Sheet, DS-90, High Temperature Stress Relaxation, Boltight Limited, UK.
[2] Göran Spetz, Stress relaxation tests, Technical Report 98/1, 2nd edition, 6 pages, 1999.
[3] Swindeman R.W., Klueh R.L., Relaxation behaviour of 2 ¼ Cr-1 Mo steel under multiple loading, OAK Ridge National Laborator, 1977.
[4] Martin U, Muhle U, Oettel H., Stress Relaxation in superalloys due to microstrutural changes, Mechanics of Time Dependent Materials, 2, pp. 1-12, 1998.
[5] Robey R.F., Prangnell P.B., Dit R., A comparison of the stress relaxation behaviour of three aluminium aerospace alloys for use in age-forming applications, Materials Forum, Edited by J.F. Nie, A.J., Morton, B.C. Mudde, 28, pp. 132-138, 2004.
[6] Hu W., Wang C.H., Barter S., Analysis of cyclic mean stress relaxation and strain ratchetting behaviour of aluminium 7050, DSTO Aeronautical and Maritime Research Laboratory 506 Lorimer St, Fishermens Bend, Victoria, Australia 3207, 1999.
[7] Khan A.S., Lopez-Pamies O., Time and temperature dependents response and relaxation of a soft polymer, International Journal of Plasticity 18, pp. 135-1327, 2002.
[8] Lissenden C.J., Doraiswamy D., Steven M., Experimental investigation of cyclic and time-dependent deformation of titanium alloy at elevated temperature, International Journal of Plasticity 23, pp. 1-24, 2007.
[9] Martin U, Muhle U, Oettel H., Stress Relaxation in superalloys due to microstructural changes, Mechanics of Time Dependent Materials, 2, pp. 1-12, 1998.
[10] Lu L., Zhu T., Shen Y., Dao M., Lu K., Suresh S., Stress relaxation and the structure size-dependence of plastic deformation in nanotwinned copper, Acta Materialia, 37, pp. 5167-5173, 2009.
[11] Mindel A., Lang K.-H., Liihe D., Macherauch E., Creep-fatigue behavior of CoCr22Ni22W14 in the temperature range 850 °C < T < 1200 °C, Materials Science and Engineering A, 234-236, 1997, pp. 715-718.
[12] Sangdahl G.S., Semchyshen M. Appliction of 2 ¼ Cr-1 Mo steel for thick-wall pressure vessels, STP 755, 1982.
[13] Wagner L., Status of titanium and titanium alloys in auto applications, 23rd Annual ITS Conference & Exhibition, Orlando, FL, USA, October 7-9, 2007.
[14] www.axelproducts.com/downloads/Relax.pdf.
[15] www.bibusmetal.pl.
[16] www.hurtownia.tabal.pl
[17] www.rafstal.pl
[18] www.steelforge.com.
[19] www.toshinkogyo.com/rxe.html.
[20] www.vigamet.pl