

**Wydział Mechaniczny
Politechniki Wrocławskiej**

PRACA DOKTORSKA

**Wpływ złożonego odkształcania
plastycznego na właściwości i strukturę
wybranych stopów miedzi**

Karol Jaśkiewicz

Promotor

Dr hab. inż. Zbigniew Gronostajski

WROCŁAW, 2004

Publikacja nie zawiera
nowego rozwiązania technicznego
nadającego się do opatentowania.



Spis treści

1. Wstęp.....	4
2. Dotychczasowy stan zagadnienia.....	6
2.1. Wprowadzenie.....	6
2.2. Parametry decydujące o reakcji materiału na zmiany drogi odkształcania.....	10
2.3. Odkształcanie złożone dla którego kąt między wektorami prędkości przemieszczeń w kolejnych etapach odkształcania wynosi około 90°.....	16
2.4. Posumowanie.....	29
3. Cel badań i teza pracy.....	30
4. Materiały i metodyka badań	32
4.1. Analiza zachowania się materiałów w złożonych procesach odkształcania.....	32
4.2. Wyznaczanie naprężenia uplastyczniającego i odkształcenia w złożonych procesach doksztalcania.....	39
4.3. Opis aparatury badawczej.....	46
4.4. Opis badanych materiałów oraz sposobów i warunków odkształcania.....	52
5. Wyniki badań w próbach monotonicznych i ich omówienie.....	58
5.1. Brąz krzemowy CuSi3,5.....	58
5.1.1. Badania brązu krzemowego CuSi3,5 w temperaturze pokojowej.....	58
5.1.2. Badania brązu krzemowego CuSi3,5 w temperaturze 600 °C	62
5.2. Brąz aluminiowy CuAl8.....	66
5.2.1. Badania brązu aluminiowego CuAl8 w temperaturze pokojowej.....	66
5.2.2. Badania brązu aluminiowego CuAl8 w temperaturze 650 °C.....	69
6. Wyniki badań w próbach złożonych i ich omówienie.....	74
6.1. Brąz krzemowy CuSi3,5.....	74
6.1.1. Badania brązu krzemowego CuSi3,5 w temperaturze otoczenia.....	74
6.1.2. Badania brązu krzemowego CuSi3,5 w temperaturze 600 °C.....	96
6.2. Brąz aluminiowy CuAl8.....	111
6.2.1. Badania brązu aluminiowego CuAl8 w temperaturze otoczenia.....	111
6.2.2. Badania brązu aluminiowego CuAl8 w temperaturze 650 °C.....	123
7. Podsumowanie.....	131
8. Wnioski.....	138
Literatura.....	141

Ważniejsze symbole stosowane w pracy

- b – wektor Burgersa dyslokacji
 F – siła osiowa
 G – moduł sprężystości poprzecznej
 M – moment skręcający
 m – współczynnik czułości na prędkość odkształcania
 n – współczynnik umocnienia
 W_s – praca odkształcenia plastycznego pochodząca od momentu skręcającego
 W_r – praca odkształcenia plastycznego pochodząca od siły rozciągającej
 W_c – całkowita praca odkształcenia plastycznego
 W_o – praca oscylacyjnego odkształcenia plastycznego
 W_m – praca monotonicznego odkształcenia plastycznego
 ε – odkształcenie
 ε_a – amplituda odkształcenia
 ε_{ac} – amplituda odkształcenia całkowitego
 ε_{ap} – amplituda odkształcenia plastycznego
 ε_{as} – amplituda odkształcenia sprężystego
 ε_{pr} – odkształcenie plastyczne wywołane siłą rozciągającą
 ε_{ps} – odkształcenie plastyczne wywołane momentem skręcającym
 ε_{pz} – plastyczne odkształcenie zastępcze
 γ_p – średnie plastyczne odkształcenie postaciowe wywołane momentem skręcającym M
 σ_{pa} – naprężenie amplitudy
 σ_{pz} – zastępcze naprężenie uplastyczniające
 σ_{ps} – naprężenie uplastyczniające wywołane momentem skręcającym w procesie złożonym
 σ_{pr} – naprężenie uplastyczniające wywołane siłą rozciągającą w procesie złożonym
 τ – naprężenie styczne
 $\dot{\varepsilon}_{pz}$ – prędkość plastycznego odkształcenia zastępczego
 $\dot{\varepsilon}_{ps}$ – prędkość odkształcenia liniowego pochodzącego od momentu skręcającego
 $\dot{\varepsilon}_{pr}$ – prędkość plastycznego odkształcenia rozciągającego
 $\dot{\gamma}_p$ – średnia prędkość plastycznego odkształcenia postaciowego

WSTĘP

Materiały metaliczne stosowane w technice i przemyśle poddawane są różnorodnym sposobom kształtowania plastycznego, które mają na celu nie tylko nadanie wyrobomżądanego kształtu, ale także z góry określonych właściwości użytkowych w możliwie wysokoenergooszczędnych procesach kształtowania. Wymaga to właściwego sterowania parametrami procesu, co nie zawsze jest możliwe, bowiem konieczne jest do tego posiadanie informacji o wpływie różnorodnych czynników na mechanizm deformacji plastycznej, na strukturę i zjawiska zachodzące podczas odkształcania oraz na właściwości formowanego wyrobu. Rozwój konkurencyjności przedsiębiorstw w ostatnich latach zmusza, więc do poszukiwania coraz bardziej energooszczędnych technologii [30, 41, 63, 64].

Rokującym duże korzyści rozwiązaniem, z jednej strony prowadzącym do zmniejszenia energochłonności procesu i związanego z tym uzyskiwania efektów ekologicznych, a z drugiej strony umożliwiającym uzyskiwanie określonych właściwości gotowego wyrobu, jest sterowanie umocnieniem odkształcanego materiału, a nawet doprowadzenie do jego osłabienia, uwarunkowanego parametrami procesu i sposobem kształtowania. Osłabienie materiału, zachodzące podczas odkształcania w podwyższonych temperaturach, jest zwykle przypisywane procesom zdrowienia i rekrytalizacji dynamicznej. Istnieje tymczasem jeszcze inna przyczyna tego zjawiska, powiązana z rozwojem poślizgu. Początkowy, homogeniczny wielosystemowy poślizg wewnątrz ziaren w miarę odkształcania może przekształcać się w mikropasma ścinania, które z dalszym wzrostem odkształcenia grupują się w makroskopowe pasma ścinania w postaci cienkich transkrytalicznych warstewek [1, 7-9, 42-44]. Można zatem oczekiwać, że w zakresie odkształceń, realizowanych poprzez mikro- i makropasma ścinania występuje osłabienie materiału. Zaobserwowano również, że w tych obszarach dochodzi najwcześniej do rekrytalizacji dynamicznej.

Potwierdzają to badania przeprowadzone na monokryształach, które wykazały, że spadek naprężenia podczas rozciągania związany jest z niestabilnością mechaniczną w postaci lokalizacji odkształceń. W niskich temperaturach strukturalna i mechaniczna niestabilność może być wywołana samorzutną [43] bądź zewnętrznie wymuszoną zmianą drogi odkształcania. Wymuszenie zmiany drogi odkształcania wywiera znaczący efekt osłabienia, bowiem przeszkody blokujące poślizg w poszczególnych ziarnach są łatwiej pomijane i dochodzi do utworzenia nowych korzystnie energetycznie zorientowanych mikro- i makropasm ścinania. Mikropasma ścinania mogą współdziałać z mechanizmami krytalograficznego poślizgu, przejmując często kontrolę nad procesem plastycznego

płynięcia.

Badania zmierzające do opracowania energooszczędnych procesów kształtowania plastycznego, szczególnie intensywnie rozwijane są w kraju w kilku liczących się ośrodkach naukowych. U podstaw tych badań leżą obserwacje strukturalne wskazujące na możliwości znacznego obniżenia naprężenia uplastyczniającego, a tym samym energii odkształcenia poprzez zmianę drogi odkształcania. W przypadku tłoczenia blach wpływ drogi odkształcania na odkształcenia graniczne określane utratą stateczności jest od dość dawna znany [2]. W przypadku plastycznej obróbki objętościowej problem drogi odkształcania jest znacznie bardziej złożony, bowiem istnieją dużo większe możliwości sterowania zachowaniem się materiałów poprzez zmianę drogi odkształcania.

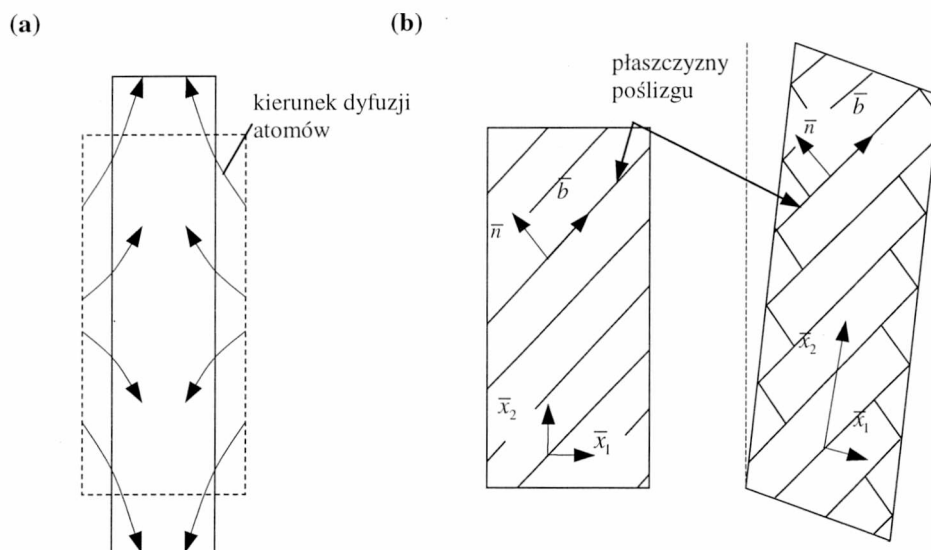
Sprawą otwartą pozostaje interpretacja wpływu drogi odkształcania, czy analiza powinna dotyczyć energii odkształcenia plastycznego, czy całkowitego, czy tylko zmiany poziomu naprężenia uplastyczniającego, bez uwzględnienia zmiany kształtu wyrobu czy z uwzględnieniem takiej zmiany, czy odkształcenia graniczne powinny być również uwzględnione. W każdym z tych przypadków ocena wpływu drogi odkształcania może się znacznie różnić.

Celem pracy jest wyznaczenie przebiegów zastępczych naprężeń uplastyczniających oraz poznanie zjawisk zachodzących podczas odkształcania plastycznego dwóch stopów miedzi: brązu krzemowego CuSi3,5 i brązu aluminiowego CuAl8 w złożonych warunkach odkształcania obejmujących różne stany odkształcenia i naprężenia w szerokim zakresie odkształceń, temperatur oraz prędkości odkształcania.

2. DOTYCHCZASOWY STAN ZAGADNIENIA

2.1 Wprowadzenie

Koncentrując się na mikrostrukturalnych aspektach odkształcenia plastycznego można wyróżnić dwa podstawowe mechanizmy odkształcania plastycznego ciała stałego: poślizg oraz transport materii poprzez dyfuzję. Za pomocą tych mechanizmów możliwa jest zmiana kształtu przy zachowaniu stałej objętości materiału bądź bardzo niewielkiej jej zmianie, którą nie uwzględnia się w teorii plastyczności. W wyniku procesu dyfuzji atomy mogą się przemieszczać w określonym kierunku powodując zewnętrzną zmianę kształtu materiału (rys. 2.1.1a), natomiast poprzez poślizg dochodzi do przesunięcia się płaszczyzn poślizgu względem siebie, przy czym odległość między przemieszczonymi płaszczyznami nie zmienia się (rys. 2.1.1b). Różnica w prędkości przebiegu obu mechanizmów odkształcania powoduje, że dominującym mechanizmem w przemysłowych warunkach odkształcania jest poślizg. Proces dyfuzji odgrywa istotną rolę głównie w wysokich temperaturach i przy bardzo małych prędkościach odkształcania oraz podczas procesów relaksacyjnych [7, 44].



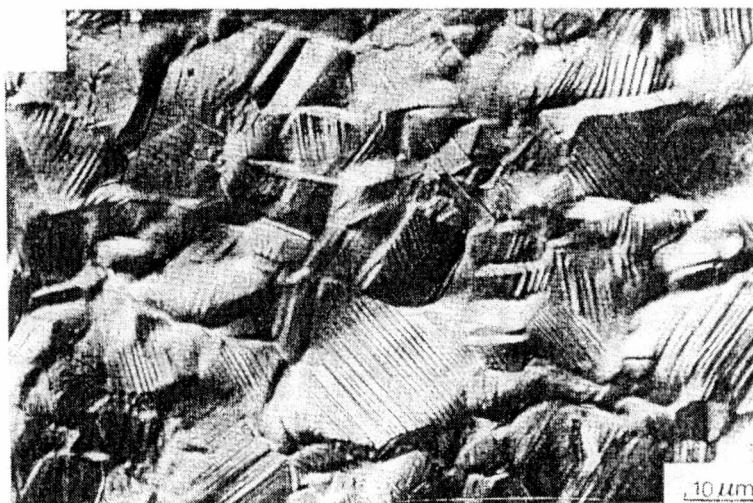
Rys. 2.1.1. Podstawowe mechanizmy odkształcenia plastycznego a) dyfuzja i b) poślizg [44]

Poślizg w materiale może wystąpić, jeżeli w sieci krystalograficznej odkształcanego materiału osiągnięta zostanie krytyczna wartość naprężenia stycznego. Wartość ta odzwierciedla opór sieci na poślizg i jest własnością wysoce anizotropową. Potencjalnymi płaszczyznami poślizgu są płaszczyzny najgęściej upakowane. Kierunek poślizgu określony jest przez wektor Burgersa b dyslokacji. Zgodnie z drugą zasadą dynamiki (minimum energii swobodnej) wektor ten powinien mieć jak najmniejszą wartość i mieć kierunek bliski

kierunkowi najgęstszego upakowania atomów. Z powodów wzajemnych więzów sieci krystalograficznej poślizg najłatwiej zachodzi w płaszczyźnie, która stawia najmniejsze opory i wzdłuż kierunku, który pokrywa się z wektorem Burgersa. Taki system odkształcenia nazywa się łatwym systemem poślizgu w przeciwieństwie do pozostałych systemów poślizgu, w których poślizg nie zachodzi tak łatwo i które są nazywane wtórnymi systemami. Jeżeli znany jest system poślizgu oraz wartość poślizgu w tym systemie, to poprzez analityczne obliczenia można określić wkład tego poślizgu w globalną deformację sieci. Wynika z tego, że czynniki, które kontrolują rozkład poślizgów również decydują o homogeniczności odkształcenia plastycznego. Jest oczywiste, że aby zapewnić jednorodną globalną deformację poślizg musi zajść w kilku systemach równocześnie i rozkład tych poślizgów powinien być jednorodny. Liczba aktywnych systemów poślizgu, wielkość poślizgu, kolejność ich aktywacji są jednymi z najważniejszych czynników kontrolujących strukturę materiału i w konsekwencji również właściwości materiału [7, 44, 58].

Tak jak na wstępie stwierdzono w pierwszej kolejności poślizg zachodzi w tym systemie, w którym osiągnięta zostaje krytyczna wartość naprężenia stycznego, prowadzi to do zmiany kształtu ziaren odkształcanego materiału. Ten aspekt geometryczny poślizgu jest dobrze widoczny na swobodnej powierzchni próbki w postaci licznych reliefów na jej powierzchni po małym odkształceniu (rys. 2.1.2). Płaska powierzchnia dobrze wypolerowanej próbki już po małym odkształceniu staje się chropowata. Powstała chropowatość ma różne nasilenie w różnych obszarach próbki, co odzwierciedla różną orientację systemów krystalograficznych w poszczególnych ziarnach w stosunku do kierunku działania naprężenia. Odkształcenie poszczególnych ziaren nie może przebiegać w dowolny sposób ze względu na ograniczenia pochodzące od otaczających je ziaren, niektóre składowe tensora odkształceń są zablokowane. Prowadzi to do dodatkowej akomodacji w postaci elastycznej i plastycznej deformacji we wtórnych systemach poślizgu i jest to związane z generowaniem naprężeń wewnętrznych (rys. 2.1.3a,b). W atomowej skali poślizg polega na generowaniu i przemieszczaniu dyslokacji. Związek pomiędzy odkształceniem postaciowym γ a swobodną drogą ruchu dyslokacji λ wyraża zależność Orowana $\gamma = b\rho\lambda$ (gdzie: ρ - gęstość dyslokacji). Do wywołania odkształcenia musi być dostarczona energia dla wygenerowania dyslokacji, jest ona magazynowana w materiale oraz energia niezbędna do przemieszczenia dyslokacji na drodze λ , energia ta jest wydzielana w postaci ciepła. Całkowita praca odkształcenia obejmuje więc, energię zgromadzoną w utworzonych dyslokacjach, energię sprężystej akomodacji sieci

krystalograficznej oraz energię cieplną wygenerowaną podczas ruchu dyslokacji (rys 2.1.3c,d) [7, 58, 44].

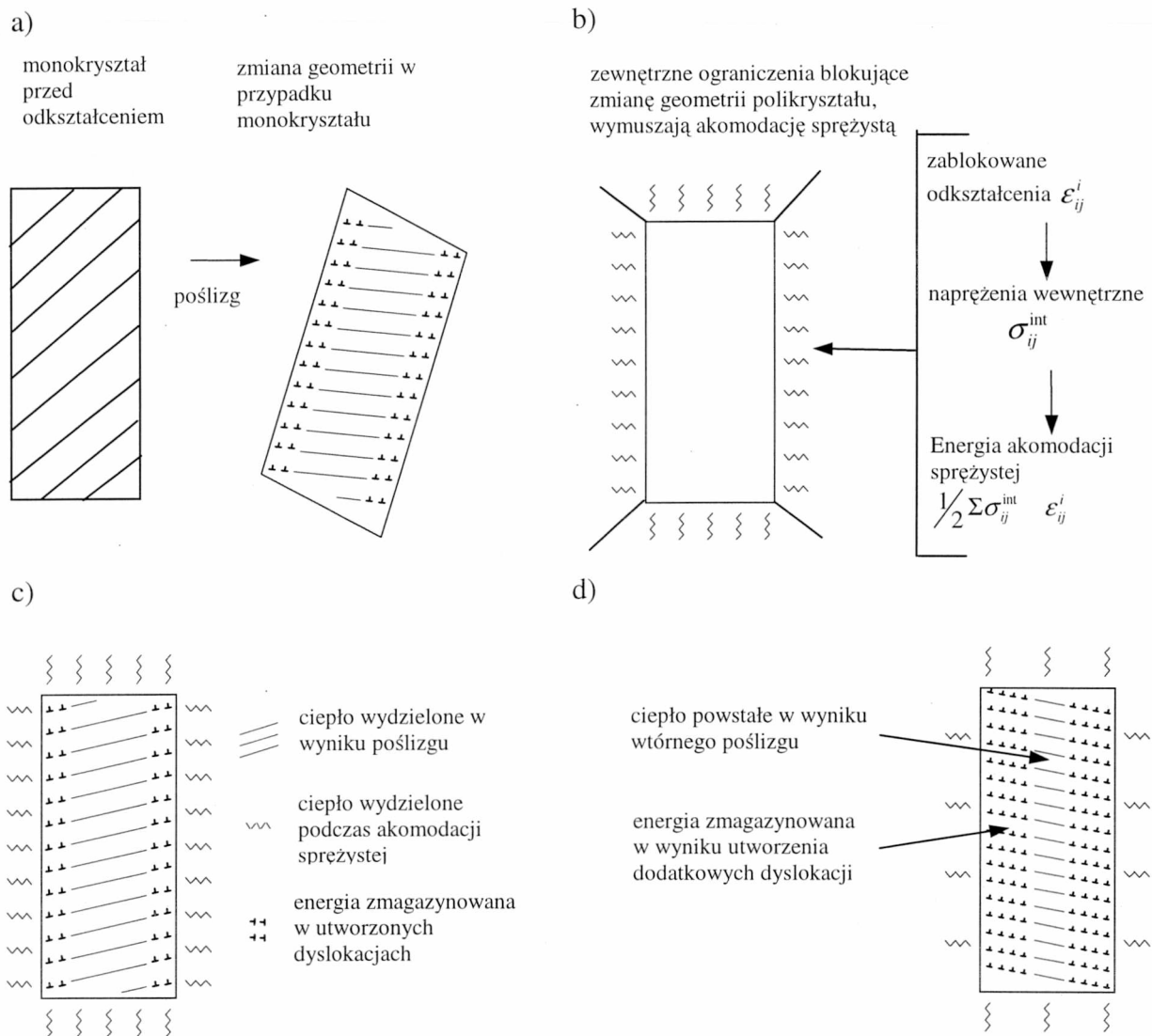


Rys.2.1.2. Powierzchnia próbki polikrystalicznego metalu po małym odkształceniu plastycznym [60]

Procesowi poślizgu w materiale przeciwstawia się szereg przeszkód powstających w trakcie procesu odkształcania prowadzących do akumulacji zablokowanych dyslokacji. Taka akumulacja jest najważniejszą przyczyną ograniczającą zasięg poślizgu i wywołującą umocnienie odkształceniowe materiału. W konsekwencji swobodna droga ruchu dyslokacji λ gwałtownie ulega zmniejszeniu wraz ze wzrostem gęstości dyslokacji podczas odkształcania. Efektem zewnętrznym jest szybki wzrost naprężenia uplastyczniającego i coraz większe zużycie energii koniecznej do dalszego odkształcania plastycznego. Okazuje się jednak, że nie zawsze musi dojść do umocnienia odkształceniowego materiału. Istnieje, bowiem możliwość zmniejszenia pracy odkształcania plastycznego poprzez destabilizację struktury odkształcanego materiału. Istnieją obecnie dwa sposoby na doprowadzenie do takiej destabilizacji [5, 7, 44, 58,].

- Wzrost temperatury podczas odkształcania, który powoduje osłabienie odkształceniowe w wyniku powstania grubych pasm poślizgu lub mikropasm ścinania oraz w następstwie tego, procesów rekrytalizacji i zdrowienia dynamicznego.
- Zmiana drogi odkształcania (nagła zmiana systemów poślizgu), która prowadzi do powstania makroskopowych pasm ścinania, które powodują mechaniczną destabilizację struktury dyslokacyjnej. Badania [8] dowodzą, że zmiana drogi odkształcania, spowodowana zmianą schematu obciążenia, wywołuje natychmiastową aktywację wtórnych systemów poślizgu, prowadzi to do uformowania grubych pasm poślizgu, przechodzących w materiale polikrystalicznym w makroskopowe pasma ścinania. Mechanizm ten ma dominujący wpływ

na zmianę mechanicznych właściwości i jego uwzględnienie ma podstawowe znaczenie dla poprawnego opisu zachowania się metalu. Poślizg przyjmuje wówczas formę transkrystalicznych pasm ścinania jak to pokazano na rys. 2.1.4. Wówczas przemieszczenie materiału wzdłuż tych pasm przechodzących przez wiele ziaren niezależnie od ich układu krystalograficznego jest jednorodne i nie wymaga ono sprężystoplastycznej akomodacji.



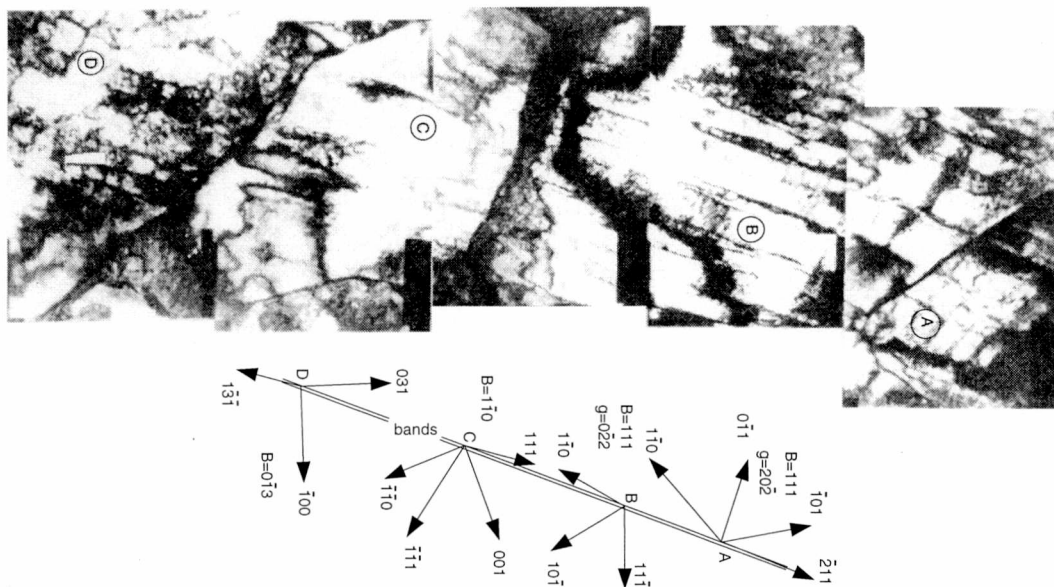
Rys.2.1.3. Bilans energetyczny w odkształconym materiale: a) odkształcenie plastyczne bez ograniczeń zewnętrznych, b) akomodacja sprężysta, c) bilans cieplny dla początkowego stadium odkształcania, d) bilans cieplny dla odkształceń we wtórnych systemach poślizgu [7]

Dokładne badania nad morfologią pasm ścinania prowadzą do następujących wniosków:

- Mikro pasma ścinania reprezentują proste ścinanie podobne do pojedynczego poślizgu w ziarnie, z tą różnicą, że przechodzi przez wiele ziaren.

- Ta forma poślizgu jest możliwa w przypadku, gdy lokalne naprężenie na froncie rozwijającego się poślizgu aktywuje poślizg we wtórnych systemach poślizgu.
- Katastroficzny ruch dyslokacji może prowadzić do bardzo wysokich i bardzo lokalnych koncentracji naprężenia na granicy ziaren. Może to aktywować poślizg we wtórnych systemach poślizgu pokrywający się z kierunkiem początkowego łatwego systemu poślizgu.
- Katastroficzny ruch dyslokacji wynika z niestabilności podstruktury metalu i warunki tej destabilizacji zostały określone w badaniach Cottrella-Stockesa [11] i Jacksona-Basinskiego [38]

Podsumowując można stwierdzić, że osłabienie odkształceniowe może być wywołane zarówno zmianą orientacji składowych stanu naprężenia i lokalizacją odkształceń [19, 22, 26, 27, 30, 44, 52] jak i procesami zdrowienia i rekrytalizacji dynamicznej [3, 12, 13, 17, 21, 26, 28, 47, 53].



Rys. 2.1.4. Mikro pasmo ścinania przechodzące przez kilka ziaren dla żelaza [44]

2.2. Parametry decydujące o reakcji materiału na zmiany drogi odkształcania

Większość materiałów podczas różnych sposobów odkształcania monotonicznego zachowuje się podobnie, o czym świadczy podobny kształt krzywych naprężenie uplastyczniające – odkształcenie uzyskane w próbach ściskania, rozciągania czy skręcania. Poddając natomiast materiał odkształcaniu złożonemu zauważono bardzo duże różnice w przebiegach naprężenia uplastyczniającego pomiędzy różnymi sposobami odkształcania złożonego jak i w stosunku do przebiegów naprężenia w próbach monotonicznych [8, 20, 21, 24-26, 48-52].

Reakcja materiału na zmianę drogi odkształcania zależy od wielu czynników i jest procesem bardzo złożonym. Izotropowe umocnienie związane jest z formowaniem się lasu dyslokacji i wzrostem ich gęstości. Stout i Rollet [61] uważają, że pomimo tego, że mechanizmy te nie wykazują żadnego ukierunkowania to sploty dyslokacji powstałe podczas odkształcania mają pewną polaryzację, która ma wpływ na odpłytywanie ich podczas zmiany kierunku odkształcania. Odwracalność splotów dyslokacyjnych, zależy od morfologii mikrostruktury dyslokacyjnej, która natomiast zależy od drogi odkształcenia. Na przykład rozciąganie/ściskanie prowadzi do aktywacji większej liczby systemów poślizgu w porównaniu do skręcania, a więc podczas procesu rozciągania/ściskania struktura dyslokacyjna jest bardziej rozmyta.

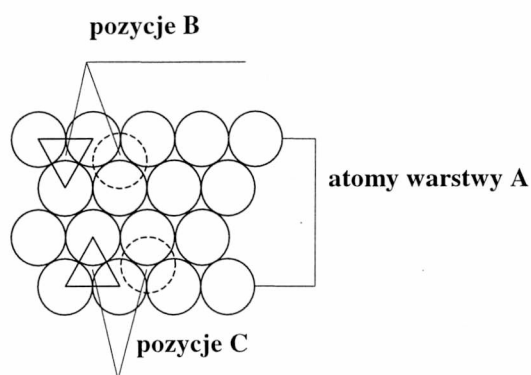
Największy wpływ na zachowanie się materiału podczas odkształcania wzdłuż złożonej drogi mają: energia błędu ułożenia (EBU), mikrostruktura, historia odkształcania, tekstura oraz rodzaj i stopień odkształcenia [26].

Energia błędu ułożenia

Błąd ułożenia jest defektem płaskim i jest to lokalne zakłócenie kolejności ułożenia warstw atomów w kryształach. Ponieważ dotyczy on warstw najgęściej upakowanych występuje tylko w sieci regularnie ściennie centrowanej (A1) oraz w sieci heksagonalnej (A3). W strukturze ściennie centrowanej kolejność tych płaszczyzn jest ABCABC..., a w sieci heksagonalnej zwarcie wypełnionej ABABAB.... Każda warstwa może zajmować dwa różne położenia względem warstw sąsiednich (rys. 2.2.1). Jeżeli nastąpi zaburzenie stanu równowagi i atomy kolejnych płaszczyzn przyjmą inną kolejność niż wynika to z ich prawidłowego ułożenia tworzy się błąd ułożenia. Jeżeli np. w sieci regularnej ściennie centrowanej utworzy się następująca kolejność warstw, ABCACABC..., to ułożenie czterech warstw atomów jest wówczas takie jak w sieci heksagonalnej, czyli błąd ułożenia w sieci typu A1 jest cienką warstwą materiału o sieci A3. W przypadku, gdy błąd ułożenia pojawia się w sieci A3 sytuacja jest odwrotna – tworzy się cienka warstwa materiału o sieci A1. Powstanie błędu ułożenia powoduje zaburzenie sieci krystalicznej, z którą związana jest dodatkowa energia, jej wartość przypadająca na jednostkę powierzchni jest nazywana energią błędu ułożenia (EBU) [37].

Badania nad wpływem EBU na naprężenie uplastyczniające, odkształcenie graniczne i strukturę materiałów podczas odkształcania małowyciskowego były prowadzone przez Gronostajskiego i Misiołka [26]. Do badań zastosowano dwa materiały: brąz aluminiowy CuAl8 i stop aluminium AlMg0,45. Brąz aluminiowy CuAl8 ma niską, natomiast stop

AlMg0,45 wysoką EBU. Zaobserwowano duże różnice w zachowaniu się obu materiałów zarówno podczas odkształcania oscylacyjnego na gorąco, jaki i na zimno. Zastosowanie symetrycznego odkształcania małowykłowego dla stopu aluminium AlMg0,45, charakteryzującego się dużą energią błędu ułożenia, powoduje bardzo nieduży spadek naprężenia uplastyczniającego i tylko 2 – 3-krotny wzrost odkształcenia granicznego w stosunku do tych właściwości, określonych w procesie monotonicznym, zarówno w niskich jak i w wysokich temperaturach. Natomiast dla brązu aluminiowego CuAl8 szczególnie w niskich temperaturach odkształcania zaobserwowano znacznie większy wpływ odkształcania małowykłowego na obniżenie naprężenia uplastyczniającego i zwiększenie odkształcenia granicznego niż dla stopu aluminium AlMg0,45. Zaobserwowane różnice można wytłumaczyć inną ich podatnością do procesów odbudowy zdeformowanej struktury.



Rys. 2.2.1 Miejsca na płaszczyźnie atomowej zwarcie wypełnionej, które mogą zajmować sąsiednie warstwy atomów [37]

W przypadku odkształcania materiałów o wysokiej energii błędu ułożenia (AlMg0,45), które są mniej skłonne do rekrytalizacji dynamicznej i w których dominuje odbudowa odkształconej struktury poprzez zdrowienie dynamiczne, dodatkowe odkształcanie cykliczne powoduje jedynie wzmocnienie tego procesu, co nie wpływa istotnie na naprężenie uplastyczniające i odkształcenie graniczne. Poza tym wyniki uzyskane dla stopu aluminium AlMg0,45 w wysokich temperaturach, wskazują na to, że przebieg naprężenia uplastyczniającego ze spadkiem typowym dla rekrytalizacji dynamicznej nie zawsze świadczy o zajściu takiego procesu. Spadek naprężenia może być wywołany również dużą niejednorodnością odkształcenia i jego lokalizacją w pasmach ścinania [26, 32].

W materiałach o niskiej energii błędu ułożenia (CuAl8), dla których dominującym sposobem usuwania umocnienia materiału jest rekrytalizacja dynamiczna, zastosowanie skręcania oscylacyjnego powoduje intensyfikację zdrowienia dynamicznego prowadzącą do

poprawy jego odkształcalności i zmniejszenia naprężenia uplastyczniającego. Rekrytalizacja dynamiczna przebiega wówczas głównie w pasmach zlokalizowanego odkształcenia [27, 31].

Mikrostruktura

Mikrostruktura odkształcanego materiału zależy bardzo silnie od energii błędu ułożenia, dlatego jest ona również bardzo istotnym parametrem decydującym o reakcji materiału na zmianę drogi odkształcania. Badania prowadzone przez Stouta i Rolletta [61] wykazały, że efekt zmiany drogi odkształcenia zależy silnie od podstruktury dyslokacyjnej powstającej podczas odkształcania. Bate [3] pokazał, że zmiana drogi odkształcania nie ma istotnego wpływu na zachowanie się materiału, jeśli odkształcenie początkowe nie prowadzi do utworzenia wyraźnej podstruktury dyslokacyjnej. Również wtrącenia wpływają istotnie na stabilność podstruktury i podczas zmiany drogi odkształcenia mogą występować interakcje między nimi a dyslokacjami.

Historia odkształcenia

Reakcja materiału na zmianę drogi odkształcania zależy bardzo istotnie od jego historii odkształcania. Wewnętrzny stan materiału odkształcanego sekwencyjnie różni się od stanu wewnętrznego materiału odkształcanego w inny sposób, pomimo że oba materiały w ostatnim etapie odkształcania uzyskują taką samą temperaturę i odkształcenie [26].

Tekstura

Tekstura krystalograficzna, która rozwija się podczas odkształcania jest funkcją drogi odkształcania. Tekstura istniejąca w materiale na początku odkształcania ma wpływ na reakcję materiału na dany sposób odkształcania. Wpływ tekstury jest widoczny na krzywych naprężenie – odkształcenie, gdzie w zależności od jej rodzaju materiał charakteryzuje się różnymi przebiegami. Rozwój tekstury pod wpływem odkształcenia cyklicznego w podobnych warunkach odkształcania był badany przez Vatnena i in. [62] i Rolletta i in. [59]. Vatnen i in. zauważyli, że po zmianie kierunku odkształcenia w próbie skrećania można było dostrzec podobieństwo tekstury końcowej do tekstury początkowej, co wskazywałoby na odwracalność mechanizmów odkształcania prowadzących do uzyskania określonej tekstury. Natomiast Rollet zasugerował, że zmiana struktury podziarn podczas odkształcania z dezorientacją ich granic może prowadzić do zablokowania zmian w teksturze podczas odkształcania w przeciwnym kierunku. Jest to zgodne z wynikami badań przeprowadzonych przez Becka i Panchanadeeswarana [4], którzy twierdzą, że interakcja między sąsiednimi

ziarnami podczas odkształcania prowadzi do lokalnych odkształceń i obrotu sieci. Mało prawdopodobne jest, aby takie zachowanie było całkowicie odwracalne pod wpływem zmiany drogi odkształcania na przeciwną.

Powstawanie tekstury jest złożonym zjawiskiem, a jej zmiana podczas odkształcania zależy od wielu czynników np. obecności drugiej fazy, temperatury odkształcania i wygrzewania. Dokładne poznanie zależności między teksturą, a drogą odkształcania wymaga dalszych dokładnych badań.

Rodzaj i stopień odkształcenia

Prowadzone badania wykazały, że w aspekcie reakcji mikrostruktury na zmianę drogi odkształcenia, kąt między wektorami prędkości przemieszczeń w poszczególnych etapach odkształcania odgrywa istotną rolę. Musi on być na tyle duży, aby miał wpływ na strukturę dyslokacyjną [3]. W badaniach nad wpływem zmiany drogi odkształcenia na zachowanie się odkształcanego materiału, można wyróżnić dwa następujące charakterystyczne zakresy zmiany kąta między wektorami prędkości przemieszczenia w poszczególnych etapach odkształcenia.

- *Kąt między wektorami prędkości przemieszczeń w kolejnych etapach odkształcania zmienia się o około 180°* – odpowiada temu odkształcanie zwrotne (przemienne), które także nazywane jest odkształcaniem cyklicznym. W pracach [23, 25, 26] wyróżniono dwa rodzaje odkształcania cyklicznego w zależności od stosunku amplitudy odkształcenia w kierunku podstawowym ε_{a1} do amplitudy odkształcenia w kierunku przeciwnym do podstawowego ε_{a2} , stosunek ten nazywano współczynnikiem asymetrii cyklu

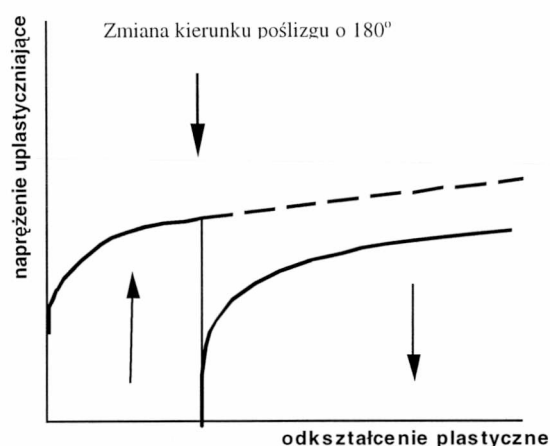
$$S_c = \frac{\varepsilon_{a1}}{\varepsilon_{a2}} \quad (2.1)$$

W badaniach laboratoryjnych rozróżnia się najczęściej odkształcania cykliczne symetryczne, gdy współczynnik asymetrii jest równy 1 oraz kroczące, gdy współczynnik ten jest różny od 1.

Powszechnie znanym zjawiskiem towarzyszącym zmianie kierunku odkształcania o 180° jest obniżenie granicy plastyczności, nazywane *efektem Buschinger*.

Zjawisko to jest spowodowane spiętrzeniem się dyslokacji przed przeszkodami i wynikającym z tego pojawieniem się naprężenia wstecznego pochodzącego od spiętrzonych dyslokacji. Efekt ten przedstawiono na rys. 2.2.2. W wyniku odwrócenia kierunku odkształcania, wytwarzane są dyslokacje o przeciwnych znakach względem tych, które

znajdują się w spiętrzeniach utworzonych podczas początkowego odkształcania. Stwarza to warunki do ich anihilacji. Zmienia się również kierunek ruchu spiętrzonych dyslokacji, który odbywa się przy mniejszym wstecznym naprężeniu [58].



Rys 2.2.2. Efekt Buschingera

Odształcanie cykliczne jest obecnie najdokładniej przebadanym sposobem odkształcania złożonego. Obecnie rozróżniane są trzy rodzaje odkształcania cyklicznego w zależności od ilości cykli do momentu zniszczenia materiału. **Odształcanie wysokocyklowe**, w którym zniszczenie materiału występuje przy większej liczbie cykli niż $10^5 - 10^7$, przy zanikających odkształceniach plastycznych w skali makro. Jeżeli materiał ulega pęknięciu po $10^4 - 10^5$ cyklach, mamy wówczas do czynienia z **odkształcaniem niskocyklowym**, w którym pękanie zachodzi przy dość dużych naprężeniach i w materiale pojawiają się w skali makro odkształcenia plastyczne. Odształcanie wysokocyklowe i niskocyklowe dotyczą wytrzymałości zmęczeniowej i raczej nie są one stosowane w procesach przeróbki plastycznej. W przypadku, gdy w kolejnych cyklach odkształcania występują znaczne odkształcenia plastyczne materiał ulega zniszczeniu przy mniejszej liczbie cykli niż 10^4 , taki sposób odkształcania nazywany jest **odkształcaniem małowykłowym**. Obecnie ten sposób odkształcania jest szczegółowo badany w różnych ośrodkach naukowych zajmujących się kształtowaniem plastycznym w Polsce i na świecie, gdyż oczekuje się, że poprzez ten sposób odkształcania można znacznie poprawić odkształcalność materiałów [22, 26, 30, 48, 49, 52].

Badania prowadzone przez Gronostajskiego i Misiółka [27, 31, 32] wykazały, że podczas odkształcania małowykłowego symetrycznego można uzyskiwać dużo większe odkształcenia plastyczne oraz znacznie mniejsze naprężenie uplastyczniające niż w próbach monotonicznych, jednakże nie uzyskuje się w tych procesach tak dużych przemieszczeń materiału, jakie występują w większości przemysłowych procesów odkształcania

plastycznego. Przemieszczenia w małowykłowym odkształcaniu symetrycznym zdeterminowane są wartością stosowanych amplitud. Dlatego wydaje się, że trudno będzie wykorzystać poprawę odkształcalności, jaką uzyskuje się stosując symetryczne odkształcanie oscylacyjne, w rzeczywistych procesach kształtowania plastycznego. Znacznie większe przemieszczenia można uzyskać dla małowykłowego odkształcania krocącego. Jednakże w tym przypadku jak wykazały badania [26, 28, 31, 32] uzyskuje się głównie wzrost odkształceń granicznych bez istotnych zmian naprężenia w stosunku do monotonicznych sposobów odkształcania. Ponadto duża część pracy odkształcenia plastycznego w małowykłowym odkształcaniu jest przeznaczona na odkształcenia zwrotne. Należy, więc sadzić, że zarówno odkształcanie małowykłowe krocące jak i symetryczne nie znajdują praktycznego zastosowania o ile nie zostaną one połączone z innymi sposobami odkształcania.

- ***Kąt między wektorami prędkości przemieszczeń w kolejnych etapach odkształcania wynosi około 90°*** - są to obecnie najmniej poznane sposoby odkształcania złożonego w procesach obróbki objętościowej. U podstaw tych badań leżą obserwacje strukturalne wskazujące na możliwości znacznego obniżenia naprężenia uplastyczniającego a tym samym energii odkształcenia poprzez zmianę drogi odkształcania.

2.3. Odkształcanie złożone, dla którego kąt między wektorami prędkości przemieszczeń w kolejnych etapach odkształcania wynosi około 90°

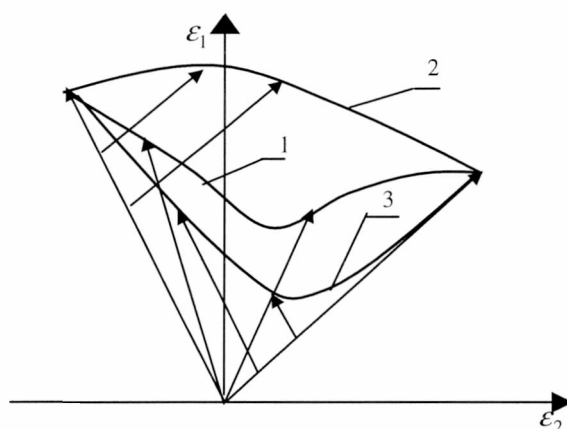
W przypadku tłoczenia blach gdzie możliwości zmiany drogi odkształcenia są znacznie mniejsze niż w obróbce objętościowej wpływ takich zmian kierunku odkształcania na odkształcenia graniczne określane utratą stateczności jest już dość dobrze poznany.

W wielooperacyjnych procesach tłoczenia podczas kolejnych operacji zachodzi zwykle wyraźna zmiana drogi odkształcenia wpływająca na końcowy efekt procesu [2, 18]. Wpływ zmiany drogi odkształcania najlepiej można przedstawić na wykresie odkształceń granicznych, szczególnie wtedy, gdy proces jednoosiowego rozciągania jest poprzedzony dwuosiowym rozciąganiem, bądź dwuosiowe rozciąganie jest poprzedzone procesem jednoosiowego rozciągania. Na podstawie dotychczasowych badań zostały ustalone następujące zasady stosowane w procesach tłoczenia blach [15]:

- jeżeli po początkowej drodze odkształcania w której $\varepsilon_2 < 0$ (próba jednoosiowego rozciągania) następuje taka zmiana drogi, że $\varepsilon_2 > 0$ (dwuosiowe rozciąganie) to uzyskuje się większe odkształcenie graniczne od tego jakie odpowiada liniowej drodze odkształcania,

i odwrotnie jeżeli po początkowej drodze odkształcania, w której $\varepsilon_2 > 0$ (dwuosiowe rozciąganie) następuje taka zmiana drogi, że $\varepsilon_2 < 0$ (próba jednoosiowego rozciągania) to uzyskuje się mniejsze odkształcenie graniczne od tego jakie odpowiada liniowej drodze odkształcania.

Zależności te zobrazowane są na poniższym rys. 2.3.1. Krzywa odkształceń granicznych oznaczona numerem 1 odpowiada prostoliniowym drogom odkształcania, krzywa oznaczona numerem 2 odpowiada pierwszemu wariantowi złożonej drogi odkształcania, leży ona powyżej krzywej 1, krzywa oznaczona numerem 3 odpowiada natomiast drugiemu wariantowi złożonej drogi odkształcania i leży poniżej krzywej 1. Taki wpływ drogi odkształcania na odkształcenie graniczne blach jest wykorzystywany w praktyce przemysłowej.

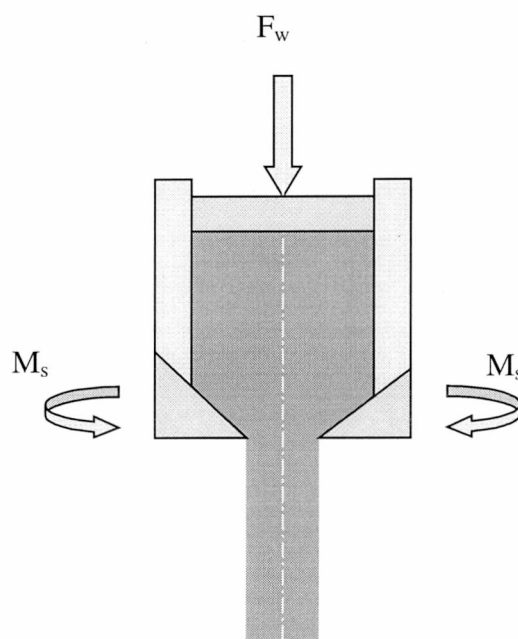


Rys. 2.3.1. Wpływ drogi odkształcania na odkształcenia graniczne w procesach tłoczenia blach

W procesach obróbki objętościowej takich jak wyciskanie, walcowanie czy kucie wpływ złożonych dróg odkształcania jest dopiero poznawany. Badania wpływu drogi odkształcania na właściwości i strukturę materiałów odkształcanych objętościowo są trudniejsze niż w przypadku blach. Wynika to z dużej liczby różnych możliwych dróg odkształcania. Również interpretacja uzyskanych wyników stwarza bardzo duże problemy.

Jednymi z pierwszych badań dotyczących wpływu złożonej drogi odkształcania w plastycznej obróbce objętościowej, były badania prowadzone przez Korblą i Bochniaka [9, 44]. Przeprowadzili oni analizę mechanizmu odkształcania plastycznego metali pod wpływem zmiany warunków zewnętrznych, polegających na nałożeniu na cykliczne odkształcenia plastyczne dodatkowego sposobu odkształcania, którego wektor prędkości przemieszczenia był zorientowany pod kątem 90° do wektora prędkości przemieszczenia odkształcania oscylacyjnego. W oparciu o te badania opracowano oryginalną metodę wyciskania zwaną KOBO, która polega na wyciskaniu materiałów na zimno poprzez matrycę, która wykonuje

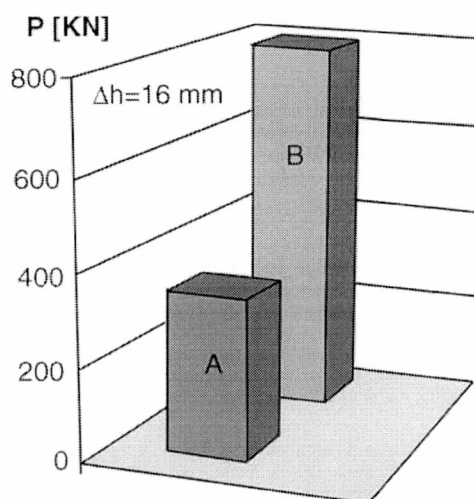
cykliczne ruchy obrotowe (rys. 2.3.2) [41]. Prowadzi to do znacznego obniżenia sił kształtowania oraz uzyskania znacznych odkształceń plastycznych, nieosiągalnych w tradycyjnych metodach wyciskania. Poprzez nagłą zmianę kierunku obciążenia, energia odkształcenia plastycznego jest w mniejszym stopniu gromadzona w materiale w porównaniu do konwencjonalnych sposobów kształtowania. Pozytywne rezultaty przeprowadzonych testów przemysłowych dowodzą słuszności przedstawionej metody. Jest ona obecnie dalej rozwijana i prowadzone są badania nad możliwością zastosowania tej technologii do procesów kucia.



Rys. 2.3.2. Uproszczony schemat procesu wyciskania metodą KOBO

W celu wykazania korzyści, jakie ta metoda może przynieść w procesie kucia Bochniak i Korbel przeprowadzili porównawczą analizę zastosowania konwencjonalnego kucia z kuciem metodą KOBO [6]. Badania dotyczyły wykonania różnych wyrobów z czystej miedzi w procesie kucia w matrycach zamkniętych oraz otwartych w temperaturze otoczenia. W procesie kucia metodą KOBO zastosowano dodatkowy ruch oscylacyjny stempla z częstotliwością 14 Hz o kąt $\pm 11^\circ$. Na czołowych powierzchniach stempla i matrycy wykonano stopniowane rowki w kształcie kwadratu, które zapewniały dobre przyleganie odkształcanego materiału do narzędzi oraz umożliwiały przeniesienie momentu skręcającego z narzędzi na odkształcany materiał. Podczas odkształcania rejestrowana była siła kucia oraz moment skręcający. Gotowa odkuwka poddana była badaniom strukturalnym oraz pomiarom

twierdzenia jej powierzchni. Na rys. 2.3.3 przedstawiono wartości maksymalnej siły kucia próbek miedzianych o początkowej wysokości 28 mm i średnicy 18 mm przy redukcji ich wysokości o 16 mm w procesie kucia w otwartej matrycy mającej formę prostokątnego pryzmatu dla złożonego procesu odkształcania z oscylacyjnym ruchem stempla (wariant A) oraz dla konwencjonalnej metody kucia (wariant B). W procesie kucia metodą KOBO uzyskano około trzykrotnie mniejsze siły kucia niż w metodzie konwencjonalnej.

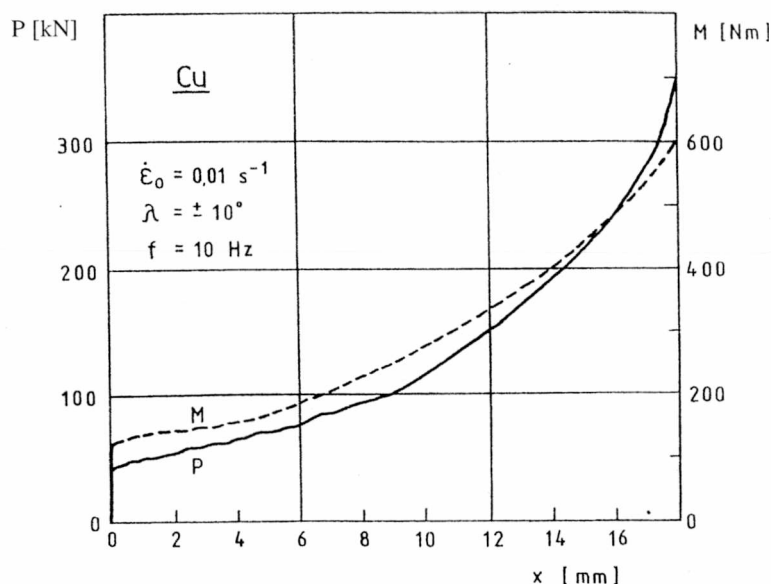


Rys. 2.3.3. Maksymalna siła kucia w otwartej matrycy w kształcie prostokątnego pryzmatu próbek miedzianych przy redukcji ich wysokości z 28 mm do 16 mm: A) dla złożonego procesu odkształcania z oscylacyjnym ruchem stempla, B) dla konwencjonalnej metody kucia [6]

Natomiast na rys. 2.3.4 przedstawione przebieg siły kucia P i momenty skręcającego M_s w funkcji drogi stempla. Obie wielkości wzrastają proporcjonalnie wraz z odkształceniem. Odmienny ich przebieg w końcowym etapie procesu wynika z gwałtownego wzrostu powierzchni styku stempla i odkształcanego materiału, co powodowało, że coraz mniejsza część próbki była odkształcana rewersyjnie. Autorzy uważają, że aby uzyskać w całym zakresie drogi stempla podobny efekt odkształcania rewersyjnego należy wraz z wypełnianiem się matrycy zwiększać kąt obrotu stempla.

Badania procesu kucia pokazały, że efekt zastosowania rewersyjnego odkształcania w matrycach zamkniętych jest większy niż w przypadku kucia w matrycach otwartych. Pomiar twardości wykazały również, że w procesie kucia metodą KOBO uzyskano w większości przypadków mniejszą twardość niż w metodach konwencjonalnego kucia. Zastosowanie procesu kucia metodą KOBO pozwala uzyskać oprócz znacznie mniejszych sił kształtowania

plastycznego również mniejsze umocnienie odkształceniowe oraz bardziej jednorodną strukturę.



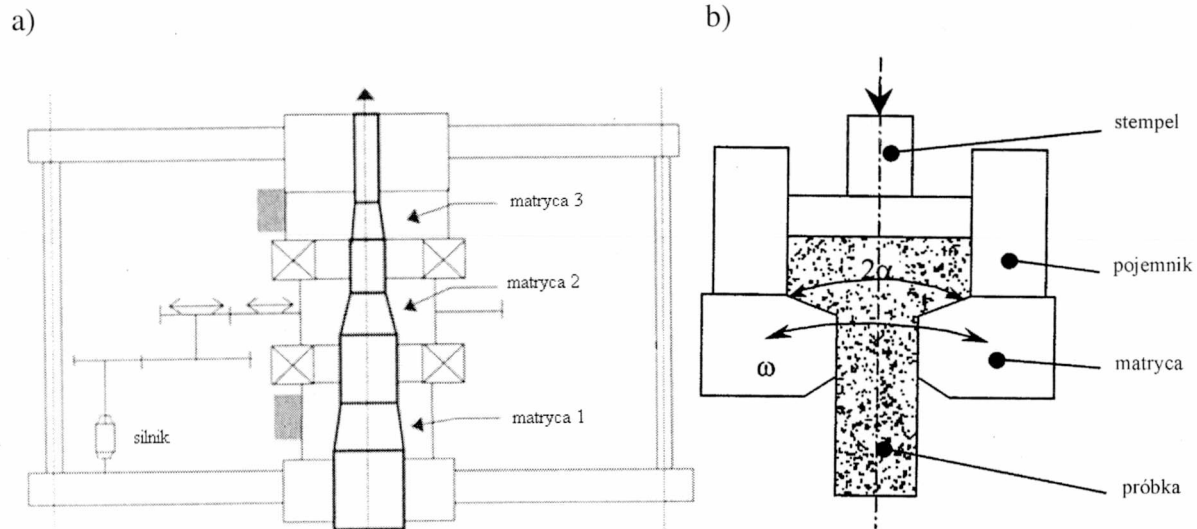
Rys. 2.3.4. Przebieg siły i momentu skręcającego na stemple w funkcji jego drogi w procesie kucia metodą KOBO [6]

Badania nad wykorzystaniem osłabienia wywołwanego dodatkowym cyklicznym odkształcaniem w aplikacjach przemysłowych były prowadzone również przez Konga i in [39, 40]. Przeprowadzili oni próby wyciskania i ciągnięcia, w których wprowadzono dodatkowy cykliczny ruch obrotowy matrycy. Na rys. 2.3.5 przedstawiono schematy obu przeprowadzonych eksperymentów. W przypadku procesu ciągnięcia zostały zastosowane trzy matryce. Matryca nr 2 wykonuje oscylacyjny ruch obrotowy wokół swojej osi, podczas gdy matryce nr 1 i 3 są nieruchome. Układ ten powoduje, że materiał w matrycy nr 2 jest równocześnie rozciągany i skręcany. Poprzez zmianę średnicy matrycy nr 1 można regulować wstępne umocnienie materiału.

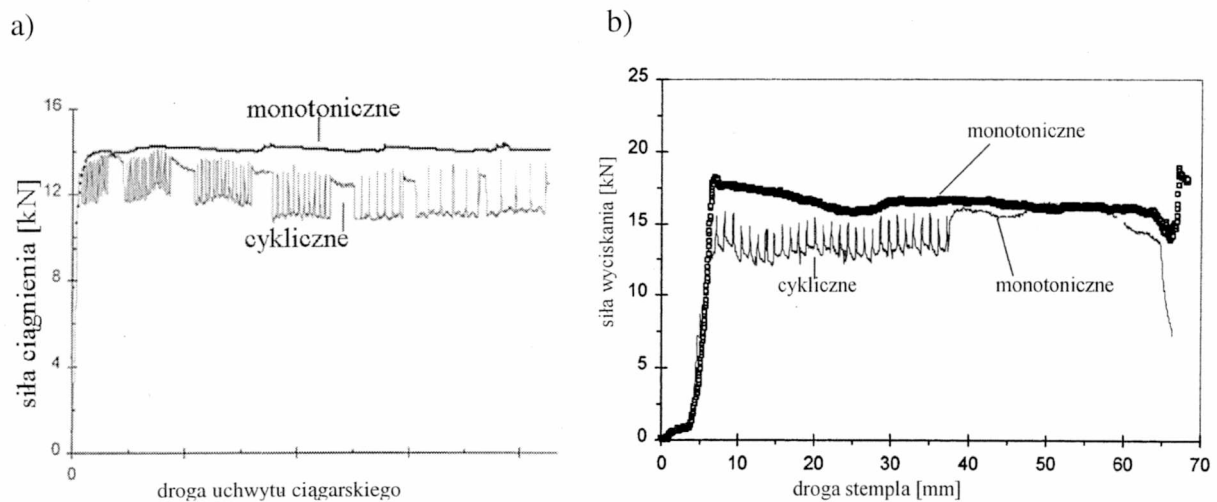
Proces wyciskania natomiast jest zbliżony do wyciskania metodą KOBO, matryca wykonuje obrotowy ruch oscylacyjny wokół swojej osi. W proces ciągnięcia odkształcano miedź, natomiast w procesie wyciskania ołów.

Na rys. 2.3.6a przedstawiono uzyskane przebiegi siły ciągnięcia w funkcji drogi uchwytu ciągarskiego, a na rys. 2.3.6b siłę wyciskania w funkcji drogi stempla. W obu procesach zaobserwowano podobne zjawiska. Zastosowanie dodatkowego skręcania oscylacyjnego matrycy powoduje obniżenie siły osiowej procesu kształtowania. Obniżenie to występuje tylko wtedy, gdy matryce wykonują ruch oscylacyjny. W momencie zatrzymania tego ruchu siła wyciskania/ciągnięcia wzrasta do wartości sił rejestrowanych w procesach

monotonicznych. Zaobserwowano również, że zwiększenie prędkości obrotowej matrycy prowadzi do zmniejszenia siły wyciskania/ciągnięcia.



Rys. 2.3.5 Schemat przeprowadzonych badań: a) ciągnięcia i b) wyciskania [39, 40]



Rys. 2.3.6. Przebiegi siły w procesie a) ciągnięcia, b) wyciskania [39, 40]

W przedstawionych powyżej aplikacjach przemysłowych zastosowanie kontrolowanej zmiany drogi odkształcania pozwoliło zmniejszyć siłę kształtowania, zwiększyć odkształcenia graniczne oraz uzyskać lepszą strukturę w stosunku do procesów konwencjonalnych. Jednakże w procesach rzeczywistych dużym problemem jest kontrolowanie wszystkich parametrów odkształcania materiału takich jak: temperatura, odkształcenie i prędkość odkształcania, trudne jest również wyznaczenie składowych stanu naprężenia i odkształcenia oraz ich zastępczych wielkości, które są niezbędne do określenia energochłonności danego procesu. Powszechnie jest wiadome, że około 90% pracy odkształcania plastycznego jest

zamieniane na ciepło. Przy dużych prędkościach odkształcania, gdy prędkość generowania ciepła jest znacznie szybsza od prędkości odprowadzania jego z materiału odkształcanego do otoczenia może dojść do bardzo dużego wzrostu temperatury. Sytuacja taka może wystąpić w przypadku zastosowania dodatkowego odkształcania małowykonawczego z dużymi częstotliwościami, gdy przemieszczenie materiału jest bardzo małe, natomiast zastępcze odkształcenia plastyczne bardzo duże przy dużej prędkości odkształcania. W procesach rzeczywistych dla złożonej drogi odkształcenia trudno jest zbudować układy pomiarowe, które niezależnie mierzyłyby na przykład, w procesie wyciskania z cyklicznie obracającą się matrycą moment skręcający i siłę osiową. Następnym problemem jest poprawne przejście od pomierzonych wielkości do naprężeń i odkształceń zastępczych. Znajomość ich pozwala poprawnie porównywać różne procesy pod względem ich energochłonności.

W celu szerszego świadomego zastosowania złożonych dróg odkształcania do rzeczywistych procesów kształtowania plastycznego niezbędne są oprócz udoskonalania istniejących przemysłowych rozwiązań wykorzystujących złożone drogi odkształcania, badania eksperymentalne. Takie badania są już częściowo prowadzone, jednakże nadal dużym problemem jest poprawna interpretacja wyników.

W Politechnice Śląskiej prowadzone są badania eksperymentalne, których celem jest określenie charakterystyk naprężenia uplastyczniającego materiałów metalicznych w zmiennych warunkach obciążania oraz analiza teoretyczna zmierzająca do opracowania metody identyfikacji modelu płynięcia plastycznego w warunkach zmiany drogi odkształcenia w zastosowaniu do numerycznej symulacji procesów kształtowania plastycznego [49-51]. Ma to istotne znaczenie dla symulacji komputerowej procesów przeróbki plastycznej charakteryzujących się niemonotonicznym i nieproporcjonalnym przebiegiem odkształcenia.

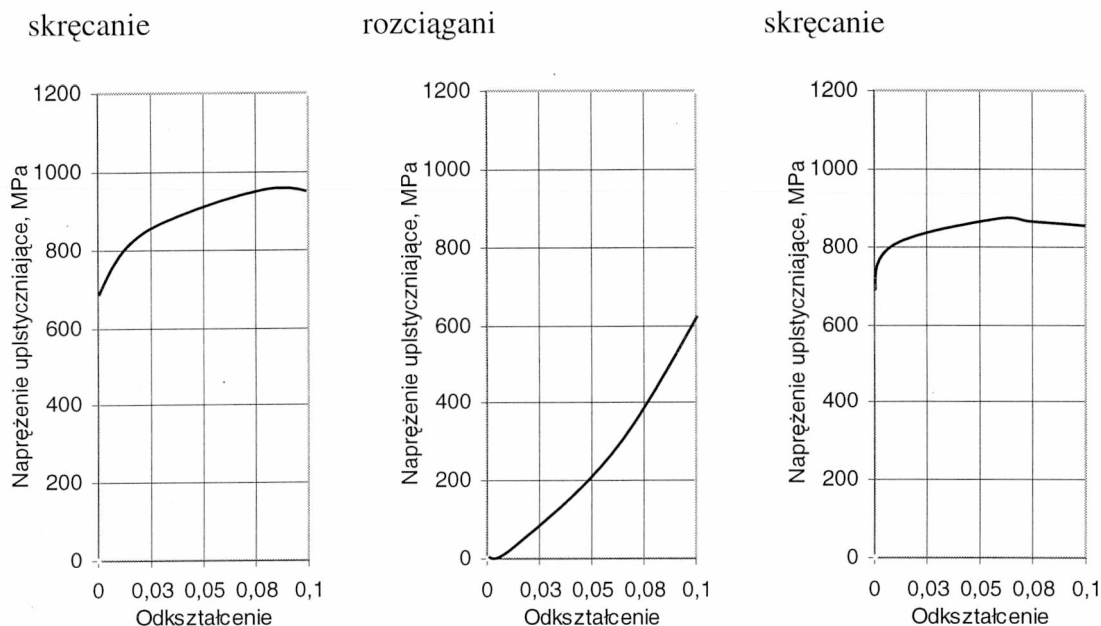
Badania wpływu nagłej zmiany orientacji osi głównych stanu naprężenia na przebieg odkształcania miedzi elektrolitycznej M1E, stopu tytanu Ti-3,5Al-1,5Mn i wysokostopowej stali OH18N9 potwierdziły istotny wpływ zmiany schematu obciążenia na wartość sił niezbędnych do realizacji odkształcenia, a tym samym na przebieg krzywych umocnienia [48].

Wyniki badań wariantowego odkształcania przedstawiono w postaci zależności naprężenie uplastyczniające - odkształcenie. Stosowano następujące warianty odkształcania:

- 1) skręcanie-rozciąganie-skręcanie w tym samym kierunku co w pierwszym etapie odkształcania (rys. 2.3.7),
- 2) skręcanie-rozciąganie-skręcanie w przeciwnym kierunku niż w pierwszym etapie odkształcania,

3) skręcanie-skręcanie-skręcanie ze zmianą kierunku skręcania w kolejnych cyklach.

W badaniach tych we wszystkich wariantach odkształcania przyjęto jednakową wartość odkształcenia całkowitego równą 0,3 oraz odkształcenia pojedynczego cyklu równe 0,1.

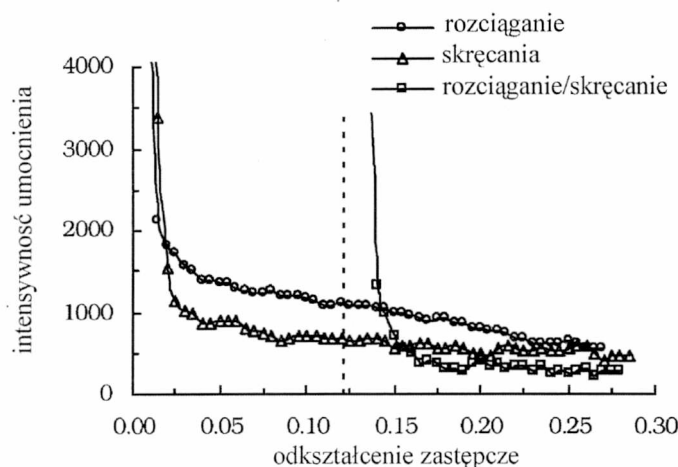


Rys. 2.3.7. Zależności napężenia uplastyczniającego od odkształcenia stopu tytanu dla wariantu pierwszego [48]

W pierwszym wariantcie odkształcania (rys. 2.3.7) po umocnieniu wywołanym skręcaniem, charakterystyka napężenia uplastyczniającego w cyklu rozciągania jest zbliżona do liniowej, przy czym obserwuje się wyraźne obniżenie napężenia uplastyczniającego w całym zakresie odkształceń w porównaniu do napężenia uplastyczniającego w pierwszym cyklu skręcania. Ponowne skręcanie w tym samym kierunku, co poprzednio wywołuje dalszy wzrost napężenia uplastyczniającego w porównaniu do rozciągania, lecz w porównaniu z pierwszym cyklem skręcania obserwuje się niewielki spadek napężenia uplastyczniającego. W przypadku pozostałych wariantów odkształcania zastosowane zmiany drogi odkształcania, prowadzą również do obniżenia napężenia uplastyczniającego.

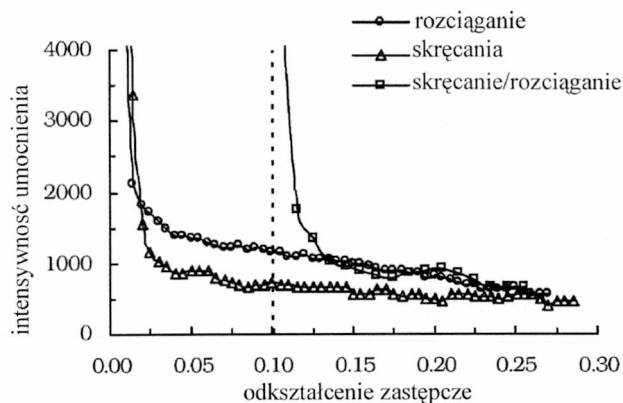
Badania wpływu zmiany drogi odkształcania rozciąganie/skręcanie na umocnienie mosiądzu były prowadzone przez Correa i in. [10]. Badania te dotyczyły wpływu sekwencyjnej zmiany drogi odkształcania na stopień umocnienia odkształcanego mosiądzu. Prowadzone badania polegały na tym, że próbka, która w pierwszym etapie odkształcania była skręcana, w drugim etapie odkształcania rozciągana, natomiast w przypadku, gdy próbka w pierwszym etapie była rozciągana w drugim etapie była skręcana. Uzyskane z tych prób przebiegi napężenia były porównywane z przebiegami monotonicznego skręcania i

rozciągania oraz wyznaczone zostały dla tych przebiegów intensywności umocnienia materiału. W próbie monotonicznego skręcania uzyskano znacznie mniejsze naprężenia uplastyczniające niż w próbie rozciągania. Dla próbek, które wstępnie były rozciągane zmiana drogi odkształcania na skręcania powoduje, że uzyskane naprężenie pochodzące od tego skręcania jest znacznie większe niż naprężenie, gdy próbka od samego początku była monotonicznie skręcana. Wraz ze wzrostem odkształcenia po zmianie drogi odkształcania naprężenie dla złożonego sposobu odkształcania zbliża się do naprężenia uplastyczniającego dla monotonicznego skręcania. Intensywność umocnienia dla próby złożonej po zmianie drogi odkształcania jest znacznie mniejsza niż dla prób monotonicznych (rys. 2.3.8).



Rys. 2.3.8. Wpływ zmiany drogi odkształcania skręcanie/rozciąganie na intensywność umocnienia odkształcanego materiału [10]

Sytuację całkiem odwrotną uzyskano w przypadku, gdy próbka w pierwszym etapie złożonego odkształcania była skręcana. Po zmianie drogi odkształcania, gdy wstępnie skręcona próbka była rozciągana uzyskano naprężenie mniejsze niż dla próbki, która od samego początku była monotonicznie rozciągana. Wraz ze wzrostem odkształcenia naprężenie dla złożonego sposobu odkształcania bardzo szybko zbliża się do naprężenia uplastyczniającego dla monotonicznego rozciągania. W tym przypadku dla próby złożonej po zmianie drogi odkształcania uzyskano intensywność umocnienia materiału zbliżoną do próby monotonicznego rozciągania (rys. 2.3.9). Przedstawione wyniki świadczą o bardzo dużym wpływie drogi odkształcenia na zachowanie się materiału podczas kolejnych schematów odkształcania.

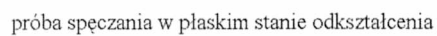


Rys. 2.3.9. Wpływ zmiany drogi odkształcania rozciąganie/skręcanie na intensywność umocnienia odkształcanego materiału [10]

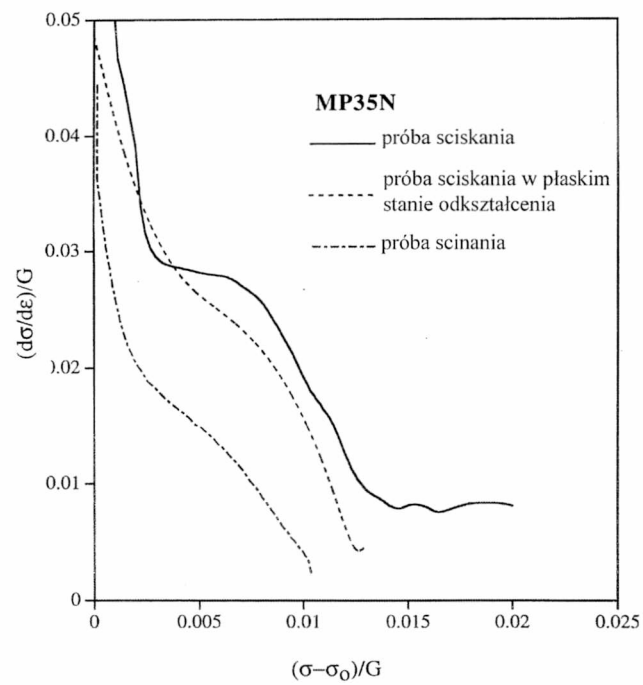
Podobne badania dotyczące wpływu drogi odkształcenia na intensywność umocnienia odkształceniowego i ewolucję struktury dla materiałów o niskiej energii błędu na przykładzie mosiądzu 70/30 i stopu MP35N prowadzone były przez El-Danafa i in. [14]. Autorzy przeprowadzili trzy rodzaje monotonicznych prób plastometrycznych: próbę ściskania, próbę ściskania w płaskim stanie odkształcenia oraz próbę ścinania. Schematy dwóch ostatnich prób przedstawiono na rys. 2.3.10. Wyznaczone w tych próbach przebiegi naprężenie uplastyczniające – odkształcenie zostały numerycznie przeliczone na zależność pomiędzy intensywnością umocnienia wyrażoną funkcją $(d\sigma/d\varepsilon)/G$, a znormalizowanym naprężeniem opisanym równaniem $(\sigma - \sigma_0)/G$, gdzie G – moduł sprężystości poprzecznej i σ_0 – granica plastyczności. Otrzymane zależności dla stopu MP35N przedstawiono na rys. 2.3.11.

Okazało się, że największe umocnienie uzyskano w próbie ściskania, trochę mniejsze w próbie ściskania w płaskim stanie odkształcenia a najmniejsze umocnienie odkształceniowe w próbie ścinania. Autorzy tłumaczą to faktem, że w próbie ściskania w płaskim stanie odkształcenia w wyniku narzuconych zewnętrznych ograniczeń powstaje więcej mikro pasm ścinania niż w próbie ściskania, co prowadzi do zmniejszenia umocnienia odkształceniowego. W próbie czystego ścinania natomiast powstające bliźniaki odkształcenia w przeważającej mierze są ułożone równoległe do narzuconego kierunku ścinania i dlatego nie stanowią dużych barier dla najaktywniejszych systemów poślizgu w ziarnach.

W ramach tych badań przeprowadzono również odkształcanie złożone, w którym próbka wstępnie ścinana była następnie ściskana. Eksperymenty wykazały, że niezależnie od stopnia wstępnego odkształcenia, podczas wtórnego procesu ściskania naprężenie uplastyczniające próbki osiągało bardzo szybko wartość naprężenia uplastyczniającego określonego w próbie monotonicznego ściskania (rys. 2.3.12). Wyniki te wskazywałyby na niewielką czułość tego materiału na historię odkształcania, co w świetle pozostałych badań jest dość zastanawiające.

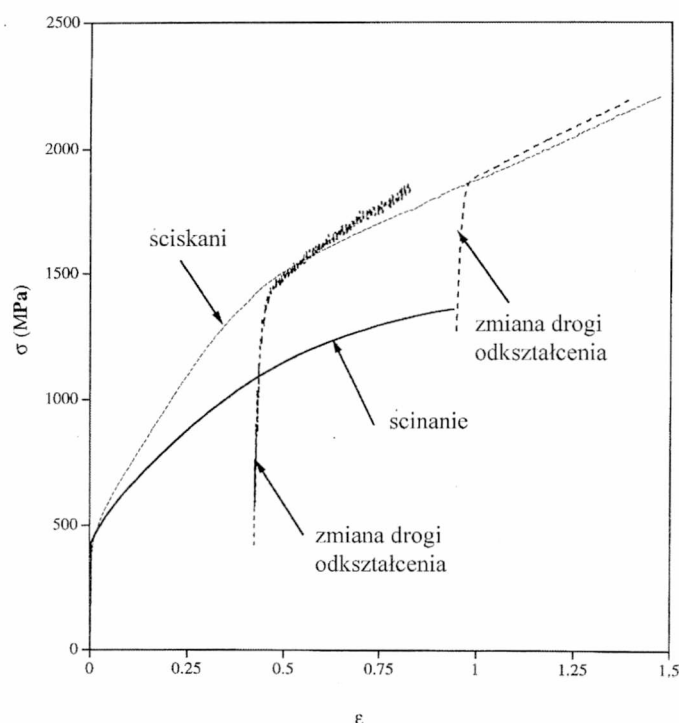


Rys.2.3.10. Schematy prób: a) ścinania i b) ściskania w płaskim stanie odkształcenia [14]



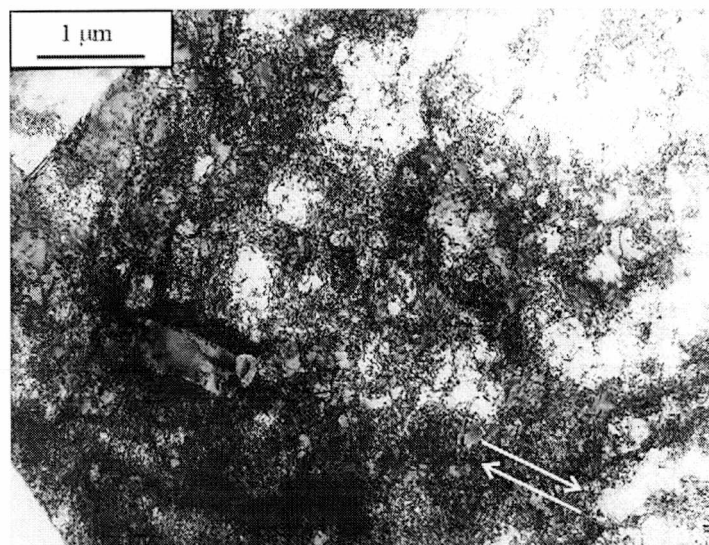
Rys.2.3.11. Zależność pomiędzy intensywnością umocnienia a znormalizowanym naprężeniem uplastyczniającym [14]

Przedstawione badania wykazały, że droga odkształcenia wpływa bardzo istotnie na przebiegi naprężenia uplastyczniającego. Należy się, więc również spodziewać wpływu drogi odkształcenia na strukturę odkształcanego materiału. Badania dotyczące tego zagadnienia są jednak bardzo trudne, gdyż już dla niewielkich odkształceń uruchamiane są wtórne systemy poślizgu, co utrudnia poprawną interpretację zjawisk strukturalnych. Doświadczenia nad wpływem drogi odkształcenia na strukturę odkształcanego materiału prowadzone były między innymi przez Lewandowską [46]. Badania dotyczyły dwóch przemysłowych stopów aluminium 5182 i 6016. Próbkki wykonane z tych materiałów odkształcane były trzema różnymi sposobami: w pierwszym zastosowano 30 % monotoniczne odkształcanie, w drugim 15 % odkształcanie w jednym kierunku i następnie 15 % odkształcanie powrotne i w trzecim 10 % odkształcenie w kierunku walcowania i następnie 20 % odkształcenie w kierunku prostopadłym do kierunku walcowania.

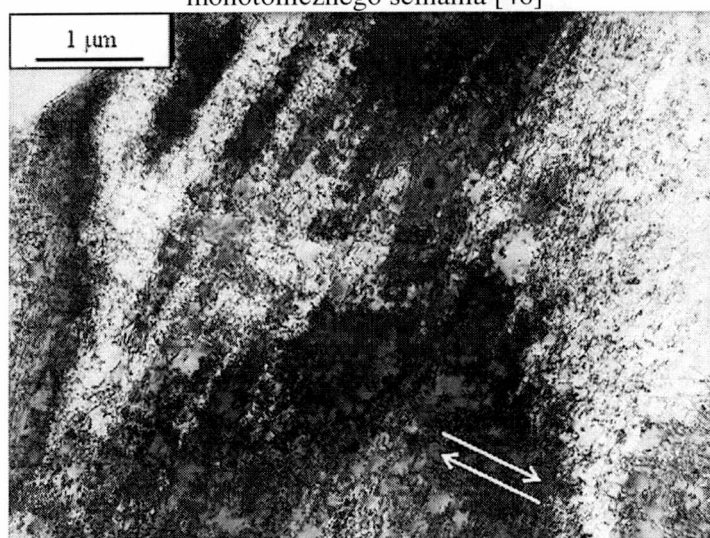


Rys. 2.3.12. Wpływ zmiany drogi odkształcenia ze ścinania na ściskanie na naprężenie uplastyczniające [14]

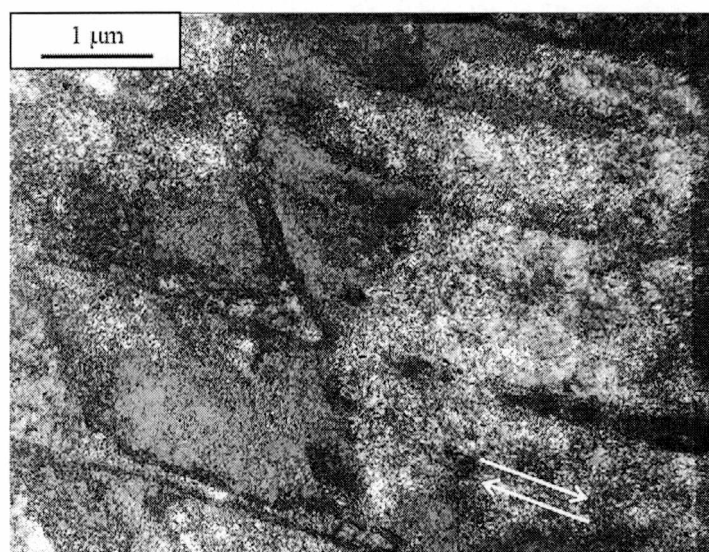
W pierwszym przypadku zaobserwowano równomierne rozłożone sploty dyslokacyjne oraz formowanie się ścianek dyslokacyjnych (rys. 2.3.13). Struktura po odkształcaniu zwrotnym jest bardziej rozmyta, co świadczy o tym, że odkształcenie zwrotne prowadzi do zniszczenia wcześniej utworzonej struktury komórkowej (rys. 2.3.14). W trzecim sposobie odkształcenia zaobserwowano tworzenie się mikropasm ścinania (rys. 2.3.15).



Rys. 2.3.13. Jednorodna struktura komórkowa po odkształceniu wynoszącym 30% w próbie monotonicznego ścinania [46]



Rys. 2.3.14. Częściowo zniszczone ściany komórek przez odkształcenie zwrotne [46]



Rys. 2.3.15. Mikropasma ścinania powstałe podczas ortogonalnej zmiany kierunku odkształcania [46]

2.4. Podsumowanie

Analiza stanu zagadnienia wykazała, że prowadzi się obecnie dużo badań nad wpływem drogi odkształcania na zachowanie się materiałów podczas odkształcania. Poprzez zmianę drogi odkształcania można sterować strukturą odkształcanego materiału, uzyskiwać znacznie większe odkształcenia graniczne niż w procesach monotonicznych, natomiast nadal nie ma jasnej odpowiedzi na pytanie czy można poprzez nagłą zmianę drogi odkształcania uzyskiwać mniejszą pracę odkształcenia plastycznego. W przypadku odkształcania małowyciskowego taki efekt można uzyskać, jednakże metoda ta nie znajdzie najprawdopodobniej zastosowania w rzeczywistych procesach kształtowania plastycznego, gdyż w procesie tym nie występują duże przemieszczenia, które są niezbędne w rzeczywistych procesach kształtowania plastycznego. W celu uzyskania większych przemieszczeń materiału próbuje się połączyć odkształcanie małowyciskowe z innymi sposobami odkształcania. Praktycznym przykładem takiego rozwiązania jest opracowana metoda KOBO. Ponieważ, w procesie przemysłowym nie ma możliwości pomiaru wszystkich parametrów siłowych oraz warunków temperaturowych procesu, w celu dobrania optymalnych warunków kształtowania poprzez złożoną drogę odkształcania, niezbędne są badania eksperymentalne.

Z badań literaturowych wynika, że dotychczasowe informacje o zachowaniu się materiałów w złożonych procesach kształtowania objętościowego są bardzo fragmentaryczne, dotyczą one głównie badań prowadzonych w temperaturze pokojowej przy jednej prędkości odkształcania i to tylko w niektórych złożonych procesach odkształcania. Brak jest eksperymentów, w których materiał byłby równocześnie odkształcany w różnych kierunkach i określone byłyby naprężenia i odkształcenia w trakcie procesu odkształcania. Główną tego przeszkodą, był brak odpowiedniej aparatury. Urządzenie takie powinno posiadać, oprócz rozdzielonego układu napędowego, który mógłby odkształcać próbkę w różnych kierunkach, również układ pomiarowy, który pozwalałby dokonywać niezależnych pomiarów parametrów siłowych oraz przemieszczeń w tych różnych kierunkach. Drugą bardzo istotną barierą w badaniach plastometrycznych złożonych dróg odkształcania jest poprawne przeliczanie zmierzonych przemieszczeń i parametrów siłowych na odkształcenia i naprężenia.

3. CEL BADAŃ I TEZA PRACY

Praca dotyczy analizy wpływu złożonych dróg odkształcania na naprężenie uplastyczniające i odkształcenie graniczne oraz pracę odkształcania materiałów w różnych warunkach odkształcania.

Celem pracy jest wyznaczenie przebiegów zastępczego naprężenia uplastyczniającego, odkształcenia granicznego oraz poznanie zjawisk zachodzących podczas odkształcania plastycznego dwóch stopów miedzi: brązu krzemowego $CuSi_{3,5}$ i brązu aluminiowego $CuAl_{18}$ w złożonych warunkach odkształcania obejmujących różne stany odkształcenia i naprężenia w szerokim zakresie odkształceń, temperatur oraz prędkości odkształcania

Otrzymane wyniki powinny przyczynić się do:

- ustalenia sposobów odkształcania zapewniających obniżenie poziomu naprężenia uplastyczniającego oraz zwiększenia odkształcenia granicznego, wpływających jednocześnie na obniżenie energochłonności procesów oraz zużycia narzędzi itp.,
- wygenerowania sposobów i warunków odkształcania prowadzących do uzyskania żądanych końcowych właściwości i struktury materiału.

Przedstawione cele pracy opierają się na następującej tezie: *Reakcja odkształcanego materiału zależy od drogi odkształcenia. Poprzez zastosowanie określonych złożonych warunków odkształcania, w których zachodzi zmiana orientacji składowych głównych stanu odkształcenia, można doprowadzić do zmiany zastępczego naprężenia uplastyczniającego oraz odkształcenia granicznego, a także można sterować strukturą odkształcanych stopów miedzi o budowie jednofazowej.*

Praca będzie realizowana głównie poprzez wzajemne porównywanie przebiegów zastępczego naprężenia uplastyczniającego w funkcji zastępczego odkształcenia plastycznego oraz odkształceń granicznych otrzymanych dla różnych dróg odkształcania złożonych z jednoczesnego jak i sekwencyjnego skręcania z rozciąganiem, małowyprężonego skręcania z rozciąganiem oraz monotonicznych procesów skręcania i rozciągania. Interpretacja uzyskanych zależności będzie prowadzona w oparciu o badania strukturalne.

W nowoczesnych procesach kształtowania plastycznego takich jak: kucie przy zastosowaniu kowarek, kształtowanie wahającą matrycą, przeginanie, walcowanie w walcarkach uniwersalnych, kantowanie walcownicze itp. coraz częściej stosuje się złożone drogi odkształcania, dlatego dokładniejsze poznanie omawianych zależności obok poszerzenia wiedzy teoretycznej ma duże znaczenie praktyczne.

Rezultaty przedstawionych badań w powiązaniu z modelowaniem i komputerowym projektowaniem mogą być użyte do optymalizacji dotychczasowych rozwiązań technologicznych kształtowania plastycznego metali oraz do opracowania nowych, technologii wytwarzania wyrobów z miedzi i jej stopów.

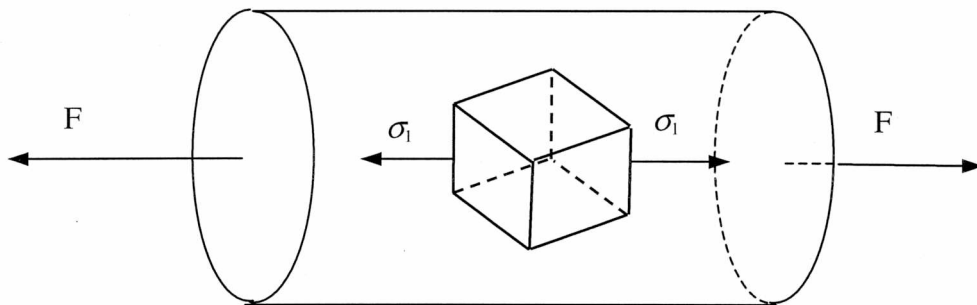
4. MATERIAŁY I METODYKA BADAŃ

4.1. Analiza zachowania się materiałów w złożonych procesach odkształcania

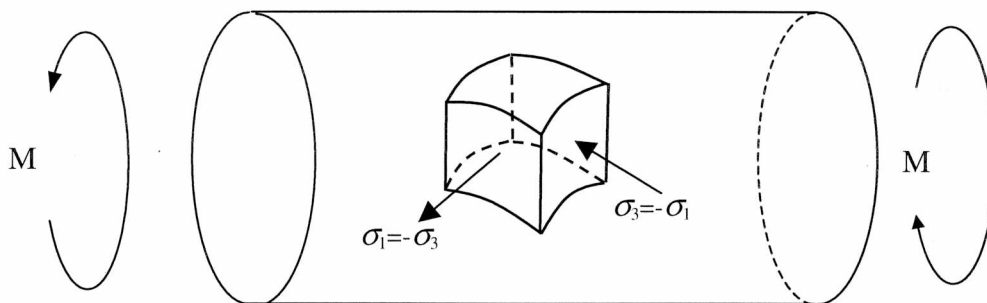
Eksperymenty, w których bada się wpływ złożonego sposobu odkształcania blach na ich odkształcalność polegają najczęściej na jednoczesnym dwuosiowym rozciąganiu, rozciąganiu sekwencyjnym bądź rozciąganiu oscylacyjnym w różnych kierunkach leżących w płaszczyźnie blachy. Przy założeniu, że w materiale blachy występuje płaski stan naprężenia wyznaczenie składowych stanu naprężenia i odkształcenia nie następuje istotnych trudności.

W przypadku obróbki objętościowej możliwości zmian drogi odkształcania jest znacznie więcej niż dla blach. Do opisu oddziaływania złożonych dróg odkształcania stosowane są często właściwości materiału określone w prostych próbach rozciągania, ściskania czy skręcania. Takie rozwiązanie jest bardzo uproszczone, bowiem w takim przypadku powinny być użyte właściwości materiałów określone w złożonych stanach odkształcenia.

Na rys. 4.1.1 i 4.1.2 przedstawiono kierunki działania naprężeń głównych odpowiednio dla rozciągania i skręcania.



Rys. 4.1.1. Kierunek naprężenia głównego dla jednoosiowego rozciągania

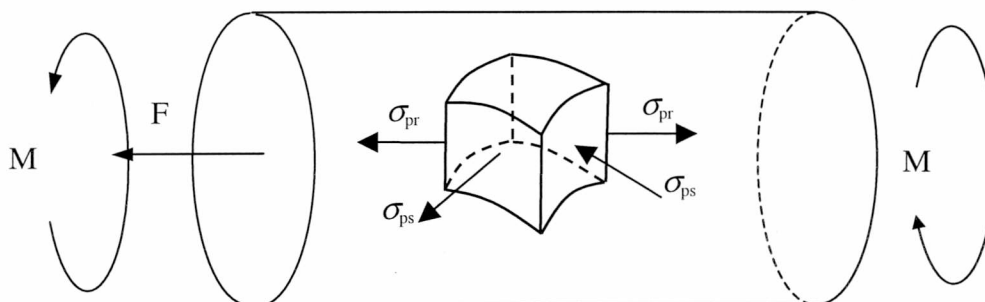


Rys. 4.1.2. Kierunki naprężeń głównych dla monotonicznego skręcania

W przypadku, gdy zmiana kierunku wektora prędkości przemieszczeń odkształcania wynosi 180° , a więc dla procesów oscylacyjnych w materiale nie występuje zmiana kierunku działania naprężeń głównych, lecz jedynie zmiana ich zwrotów. W procesach oscylacyjnego odkształcania nie uzyskuje się jednak dużych przemieszczeń materiału takich, jakie występują w rzeczywistych procesach kształtowania plastycznego, w związku z tym trudno oczekiwać, że takie sposoby odkształcania znajdą szersze praktyczne zastosowanie. Dlatego obecnie coraz częściej bada się bardziej złożone sposoby odkształcania, gdzie zmiana kierunku wektora prędkości przemieszczeń wynosi 90° . Dotyczą one złożonych sposobów obciążania, w których zmiana orientacji osi głównych stanu naprężenia zachodzi w wyniku łączenia procesu skręcania z procesem rozciągania lub ściskania. Zwykle są to następujące procesy odkształcania:

- skręcanie z równoczesnym ściskaniem bądź rozciąganiem,
- przemienne skręcanie ze ściskaniem bądź rozciąganiem,
- ściskanie bądź rozciąganie z równoczesnym symetrycznym lub krocącym małowykłowym skręcaniem.

Na rys. 4.1.3 przedstawiono stan naprężenia w pełnej próbce cylindrycznej poddanej jednocześnie monotonicznemu skręcaniu i rozciąganiu.



Rys. 4.1.3. Schemat obciążenia próbki poddanej skręcaniu z jednoczesnym rozciąganiem

Wprowadzenie dodatkowego obciążenia w postaci siły rozciągającej F powoduje zmianę kierunku naprężeń głównych z rys. 4.1.2. Kierunek ten, zależy od wielkości naprężeń pochodzących od siły rozciągającej i momentu skręcającego.

Bardzo dużym problemem jest, więc poprawne wyznaczenie składowych stanu naprężenia i odkształcania w procesach złożonego odkształcania. Rozkład naprężenia i odkształcania w przekroju poprzecznym próbek pochodzących od siły rozciągającej można

przyjąć za równomierny w zakresie odkształceń nie przekraczających pojawienia się rozproszonej utraty stateczności. W badaniach wstępnych zaobserwowano, że pojawienie się rozproszonej utraty stateczności w złożonych stanach odkształcenia, gdy na rozciąganie nałożony jest proces skręcania prowadzi do bardzo szybkiego zniszczenia próbki.

Rozkład naprężeń i odkształceń pochodzących od siły ściskającej zależy od tarcia występującego na powierzchni styku próbki z narzędziami wywierającymi na nią nacisk. W przypadku, gdy zastosuje się na powierzchni styku jako smar grafit lub teflon można uzyskać współczynnik tarcia bliski zeru, i wówczas można przyjąć, że rozkład składowej naprężenia i odkształcenia pochodzącej od siły ściskającej jest niemal tak równomierny jak w przypadku siły rozciągającej. W przypadkach badania złożonej drogi odkształcenia, gdy materiał nie jest odkształcany sekwencyjnie, lecz poprzez równoczesne np. skręcanie i ściskanie ze względów technologicznych nie ma możliwości wyeliminowania tarcia na powierzchni styku próbka – narzędzie, gdyż w takim przypadku powierzchnia styku musi dodatkowo przenieść moment skręcający. W takim przypadku sytuacja jest jeszcze bardziej złożona, gdyż w kolejnych przekrojach poprzecznych próbki, określonych względem jej długości, występuje nierównomierny rozkład odkształceń i prędkości odkształcania, co praktycznie uniemożliwia poprawne określenie naprężeń.

Złożony sposób odkształcania, tak jak wcześniej podkreślono ma posłużyć obniżeniu energochłonności procesów przeróbki plastycznej. Porównywanie energii różnych sposobów odkształcania wymaga wprowadzenia wskaźnika syntetycznego. Wydaje się, że najbardziej wymiernym parametrem określającym energochłonność danego procesu, jest praca odkształcenia plastycznego. Jednakże wyznaczenie takiej pracy w procesach złożonych zwłaszcza dla losowego sposobu odkształcenia może stanowić dość poważny problem.

Rozważmy ciało o objętości v i powierzchni zewnętrznej A , obciążone siłami zewnętrznymi T_i oraz siłami masowymi X_i . Zakładając następnie, że spełniony jest następujący warunek równowagi oraz warunek brzegowy [45]

$$\sigma_{ij,j} + X_i = 0 \quad (4.1.1)$$

$$\sigma_{ij}n_j = T_i \quad (4.1.2)$$

otrzymujemy z kolei wyrażenie na przyrost pracy sił zewnętrznych dla odpowiednio małych przemieszczeń du_i

$$\partial W = \int_v X_i du_i dv + \int_A T_i du_i dA. \quad (4.1.3)$$

Po przekształceniach równania (4.1.3) otrzymujemy wzór na przyrost pracy sił zewnętrznych.

$$\partial W = \int_V \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij} dV \quad (4.1.4)$$

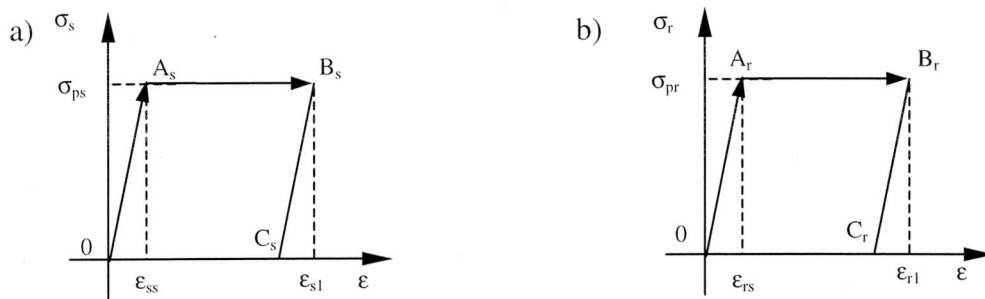
Wyrażenie to obejmuje zarówno pracę odkształcenia plastycznego jak i sprężystego. W dalszej części tego rozdziału przedstawiony zostanie sposób wyodrębnienia odkształceń plastycznych z odkształceń całkowitych, konieczny do wyznaczenia pracy odkształcenia plastycznego.

Ponieważ w stosunku do pracy można zastosować zasadę superpozycji, pracę odkształcenia plastycznego w złożonych procesach odkształcania można wyznaczyć dwoma sposobami albo poprzez wyznaczenie naprężenia i odkształcenia zastępczego i dla tych wielkości obliczyć następnie całkowitą pracę odkształcenia plastycznego lub poprzez wyznaczenie oddzielnie prac dla poszczególnych składowych złożonego sposobu odkształcania i następnie ich zsumowanie. Wydaje się, że metoda druga jest znacznie łatwiejsza, gdyż matematyczne funkcje opisującą poszczególne składowe złożonego sposobu odkształcania mają prostsze postacie aniżeli funkcje opisujące związki pomiędzy naprężeniem zastępczym i odkształceniem zastępczym. Całkę równania (4.1.4) dla takich prostszych funkcji można wyznaczyć analitycznie. Dla złożonych sposobów odkształcania obliczenie pracy z równania (4.1.4) wymagałoby najprawdopodobniej zastosowania całkowania numerycznego.

Najprostszym przykładem odkształcania złożonego ze zmianą drogi odkształcania o 90° ze względu na możliwość wyznaczenia pracy odkształcenia jest równoczesne rozciąganie ze skręcaniem materiału sprężysto - idealnie plastycznego. Przebiegi naprężenia pochodzące od momentu skręcającego i siły osiowej dla takiego materiału przedstawiono na rys. 4.1.4.

Całkowita praca odkształcenia plastycznego W_c jest sumą pracy odkształcenia plastycznego pochodzącej od momentu skręcającego W_s i pracy odkształcenia plastycznego pochodzącej od siły rozciągającej W_r .

$$W_c = W_s + W_r \quad (4.1.5)$$



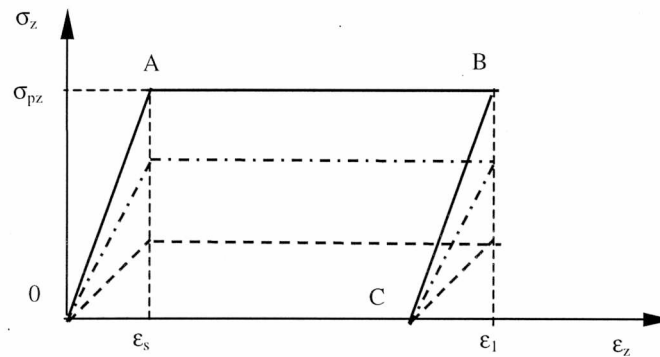
Rys. 4.1.4. Przebiegi naprężenia uplastyczniającego pochodzące od: a) momentu skręcającego i b) siły osiowej dla materiału sprężysto - idealnie plastycznego

Obie składowe pracy wyrażają powierzchnie pól $0A_sB_sC_s$ i $0A_rB_rC_r$, które można opisać wzorami

$$W_s = \sigma_{ps}(\varepsilon_{s1} - \varepsilon_{ss}) \quad (4.1.6)$$

$$W_r = \sigma_{pr}(\varepsilon_{r1} - \varepsilon_{rs}) \quad (4.1.7)$$

Materiały odkształcane w wysokich temperaturach mają przebieg naprężenia zbliżony do omawianej charakterystyki sprężysto – idealnie plastycznej, zwłaszcza, gdy w materiale występuje zjawisko zdrowienia dynamicznego. Ponieważ taka charakterystyka materiału, jest prosta do opisu matematycznego, nie ma potrzeby stosowania w takim przypadku zasady superpozycji. Pracę całkowitą można wyznaczyć bezpośrednio z zależności naprężenia i odkształcenia zastępczego (rys. 4.1.5)



Rys. 4.1.5. Zależność między naprężeniem i odkształceniem zastępczym dla materiału równocześnie rozciąganego i skręcanego

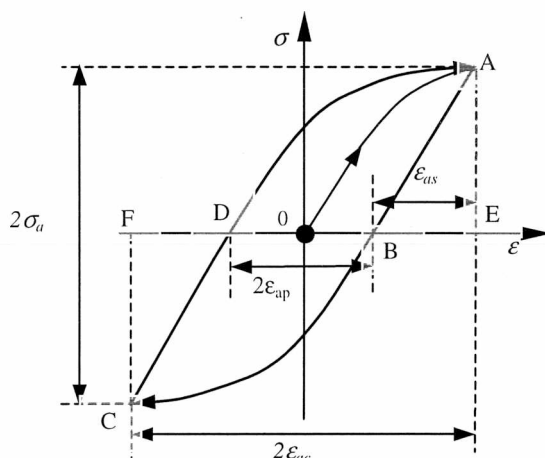
Dla takiej charakterystyki, materiał ulega odkształceniu według drogi 0ABC i pole tego czworokąta odpowiada pracy odkształcenia plastycznego, można je opisać równaniem

$$W_c = \sigma_{pz}(\varepsilon_1 - \varepsilon_s) \quad (4.1.8)$$

Na rys. 4.1.5 linią kreska kropka zaznaczono przebieg naprężenia pochodzący od momentu skręcającego, natomiast linią kreskowaną zaznaczono naprężenia rozciągające.

Z przedstawionej analizy wynika, że dla niezbyt złożonych sposobów odkształcania i sprężysto idealnie plastycznego modelu materiału wyznaczenie pracy odkształcenia plastycznego z zależności naprężenie - odkształcenie zastępcze, bądź poprzez zastosowanie metody superpozycji, jest mniej więcej tak samo pracochłonne. Zalety stosowania metody superpozycji są szczególnie wyraźne w przypadkach wyznaczania całkowitej pracy procesu odkształcania złożonego, gdy jedna ze składowych zmienia się cyklicznie np. w procesie rozciągania z równoczesnym cyklicznym skręcaniem.

Plastyczno-sprężyste cykliczne odkształcanie powoduje powstanie pętli histerezy w każdym cyklu obciążeniowym (rys. 4.1.6).

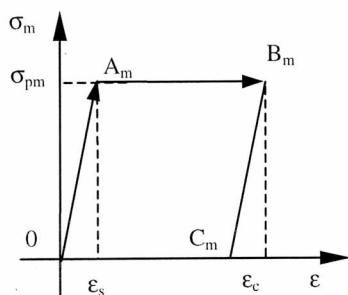


Rys. 4.1.6. Pętla histerezy dla materiału sprężysto-plastycznego z umocnieniem krzywoliniowym bez uwzględnienia efektu Bauschingera: ϵ_{ac} – amplituda odkształcenia całkowitego, ϵ_{ap} – amplituda odkształcenia plastycznego, ϵ_{as} – amplituda odkształcenia sprężystego, przy czym $\epsilon_{ac} = \epsilon_{as} + \epsilon_{ap}$, σ_a – amplituda naprężenia

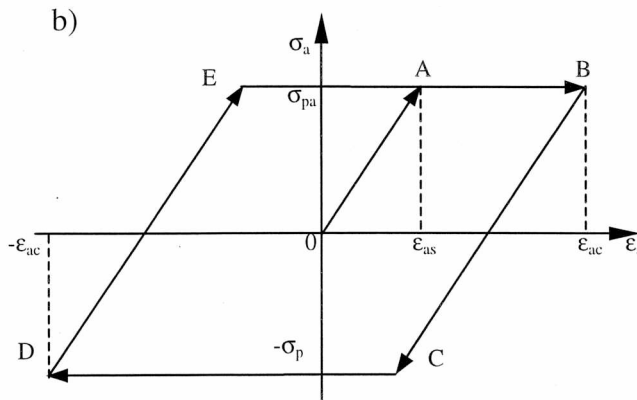
Pole objęte pętlą ABCD jest miarą pracy odkształcenia plastycznego doprowadzonej do materiału podczas jednego cyklu obciążenia. Co oznacza, że całkowitą pracę wyznacza się z sumy pól wszystkich pętli histerezy. Na rys. 4.1.6 można wyróżnić pole ABD odpowiadające pracy odkształcenia plastycznego podczas skręcania lewostronnego, pole BCD powstałe podczas skręcania prawostronnego, pole AEB odpowiadające pracy odkształcenia sprężystego podczas odciążania po skręceniu lewostronnym oraz pole DCE powstałe podczas odciążania po skręceniu prawostronnym.

Rozpatrzmy przypadek zachowanie się materiału sprężysto-idealnie plastycznego podczas jednoczesnego monotonicznego i oscylacyjnego odkształcania. W rozważaniach odkształcania oscylacyjnego pominięto efekt Bauschingera.

a)



b)



Rys. 4.1.7. Rozdzielenie odkształcenia złożonego na obciążenia: a) monotoniczne i b) oscylacyjne

W przedstawionym na rys. 4.1.7 przypadku, rozdzielono złożone procesy odkształcania na obciążenie monotoniczne (rys. 4.1.7a), oraz oscylacyjne (rys. 4.1.7b). Pracę odkształcania plastycznego w procesie monotonicznym wyraża powierzchnia pola $OA_mB_mC_m$

$$W_m = \sigma_{pm}(\varepsilon_c - \varepsilon_s) \quad (4.1.9)$$

Natomiast pracę plastycznego odkształcania oscylacyjnego opisuje wielokrotność pola pętli histerezy A, B, C, D, E, przy czym, proces odkształcania rozpoczyna się od środka układu współrzędnych O.

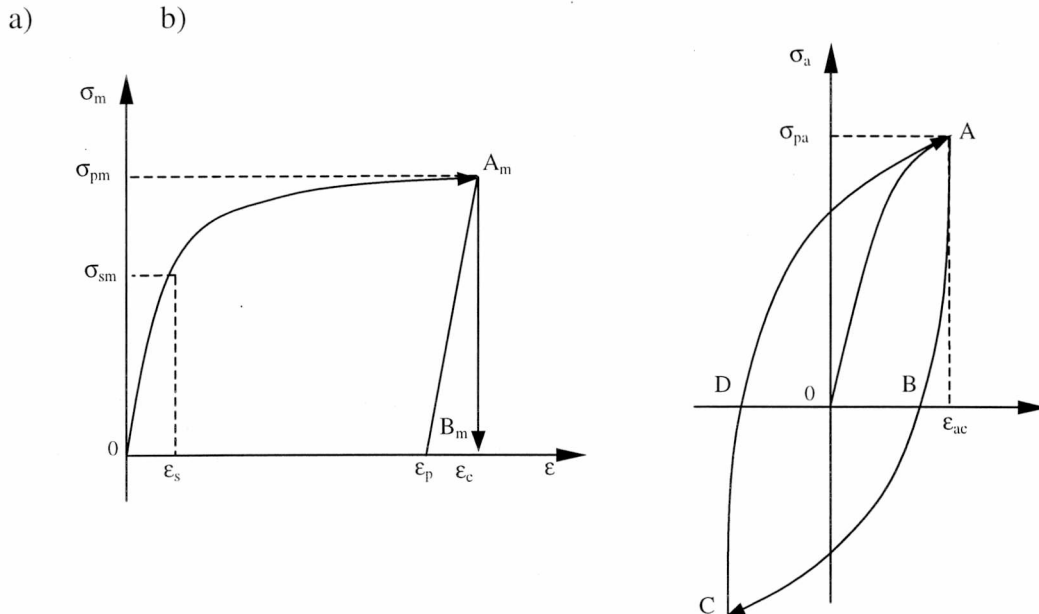
$$W_o = n4\sigma_{pa}(\varepsilon_{ac} - \varepsilon_{as}) \quad (4.1.10)$$

gdzie, n – liczba cykli.

Całkowita praca odkształcania plastycznego jest równa sumie pracy odkształcania monotonicznego i oscylacyjnego

$$W_c = W_m + W_o = \sigma_{pm}(\varepsilon_c - \varepsilon_s) + n4\sigma_{pa}(\varepsilon_{ac} - \varepsilon_{as}) \quad (4.1.11)$$

Rozpatrzmy z kolei zachowanie się materiału z umocnieniem krzywoliniowym opisanym zależnością pomiędzy naprężeniem a odkształceniem w postaci $\sigma = C\varepsilon^n$ z pominięciem odkształceń sprężystych podczas jednoczesnego małowykłowego odkształcania w połączeniu z monotonicznym odkształcaniem w innym kierunku.



Rys. 4.1.8. Rozdzielenie odkształcania złożonego na obciążenia: a) monotoniczne i b) oscylacyjne

W przedstawionym na rys. 4.1.8 przypadku, przedstawiono rozdzielenie złożonego procesu odkształcania na obciążenie monotoniczne (rys. 4.1.8a), oraz oscylacyjne (rys. 4.1.8b). Pracę plastycznego odkształcania monotonicznego wyraża powierzchnia pola $OA_m\epsilon_p$

$$W_m = \frac{\sigma_{pm}\epsilon_c}{n+1} - \frac{1}{2}\sigma_{pm}(\epsilon_c - \epsilon_p) \quad (4.1.12)$$

Natomiast pracę odkształcania oscylacyjnego opisuje wielokrotność pola pętli histerezy A, B, C, D, przy czym proces odkształcania rozpoczyna się od środka układu współrzędnych O.

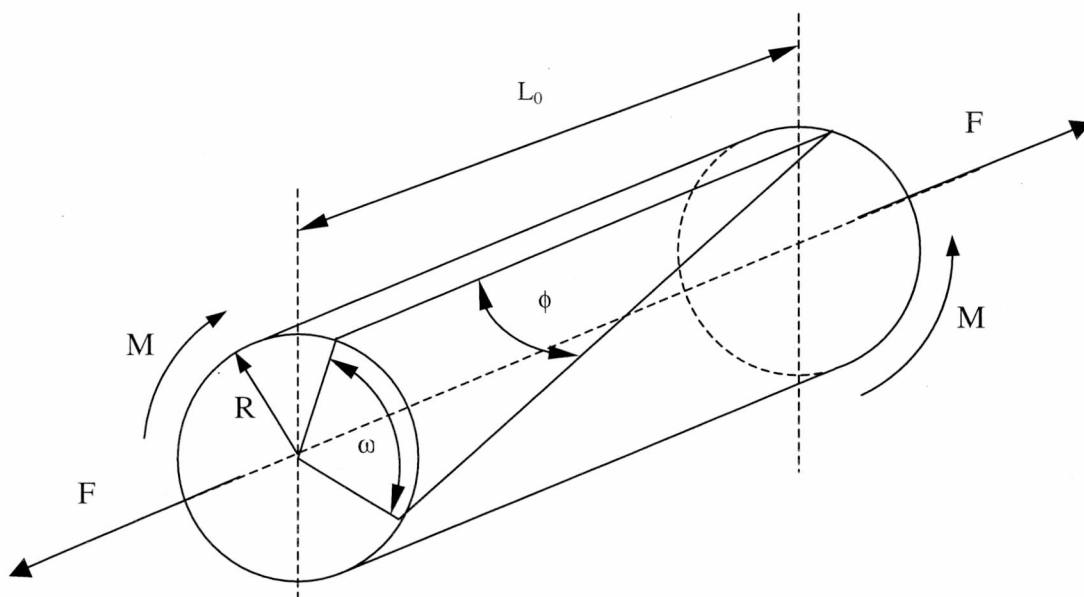
$$W_o = n4\sigma_{pa}\epsilon_{ac} \frac{1-n}{1+n} \quad (4.1.13)$$

Całkowita praca odkształcania plastycznego jest równa sumie pracy odkształcania monotonicznego i oscylacyjnego.

$$W_c = W_m + W_o = \frac{\sigma_{pm}\epsilon_c}{n+1} - \frac{1}{2}\sigma_{pm}(\epsilon_c - \epsilon_p) + n4\sigma_{pa}\epsilon_{ac} \frac{1-n}{1+n} \quad (4.1.14)$$

4.2. Wyznaczanie naprężenia uplastyczniającego i odkształcania w złożonych procesach odkształcania.

Na rys. 4.2.1 przedstawiono schemat obciążeń w próbce, wywołany stosowanymi w badaniach złożonymi drogami odkształcania.



Rys. 4.2.1. Schemat obciążenia próbki siłą osiową F oraz momentem skręcającym M

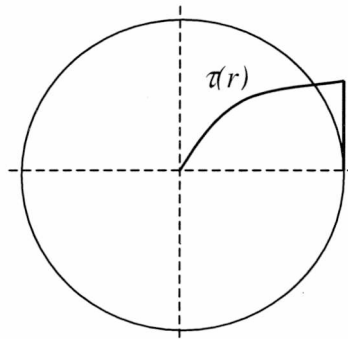
Naprężenie zastępcze σ_{pz} w próbie odkształcania złożonego określono wg hipotezy Hubere-Misesa równaniem

$$\sigma_{pz} = \sqrt{3\tau^2 + \sigma_{pr}^2} \quad (4.2.1)$$

gdzie: τ - naprężenie styczne pochodzące od momentu skręcającego,

σ_{pr} - naprężenie pochodzące od siły rozciągającej.

Poprawne przeliczenie momentu skręcającego M na naprężenie styczne jest trudne, gdyż w przekroju poprzecznym skręcanej próbki występuje niejednorodny rozkład odkształcenia, prędkości odkształcania i naprężeń (rys. 4.2.2).



Rys. 4.2.2. Rozkład naprężenia stycznego na promieniu próbki pochodzący od momentu skręcającego w zakresie odkształceń plastycznych

Dotychczas nie opracowano dokładnej metody wyznaczenia naprężenia stycznego pochodzącego od momentu skręcającego. Porównując przebiegi naprężenie - odkształcenie wyznaczone w oparciu o stosowane obecnie metody z przebiegami uzyskanymi z modelowania matematycznego [29] oraz uwzględniając fakt, że metoda przeliczania musi być na tyle prosta, aby można było ją zastosować dla małocyklowego odkształcania, w pracy przyjęto następujące zależności do przeliczenia momentu skręcającego na naprężenie styczne

$$\tau = \frac{(3 + n + m)M}{2\pi R^3} \quad (4.2.2)$$

gdzie: M – moment skręcający,

$$n = \frac{N}{M} \frac{\delta M}{\delta N} \text{ - współczynnik umocnienia,}$$

$$m = \frac{\dot{N}}{M} \frac{\delta M}{\delta \dot{N}} \text{ - współczynnik czułości na prędkość odkształcania,}$$

R – promień próbki,

N – liczba obrotów próbki.

Napężenie styczne τ przeliczano zgodnie z hipotezą Hubera-Misesa na napężenie normalne σ_{ps} , które w procesach złożonego odkształcania nazwane zostało napężeniem pochodzącym od momentu skręcającego

$$\sigma_{ps} = \sqrt{3}\tau \quad (4.2.3)$$

W temperaturze otoczenia równanie (4.2.2) pozwalała dość dobrze wyznaczyć napężenie pochodzące od momentu skręcającego, natomiast w warunkach obróbki plastycznej na gorąco wyznaczone wartości obarczone są błędem wynikającym z faktu, że współczynniki: umocnienia n i czułości na prędkość odkształcania m , w takich warunkach zmieniają się wraz z odkształceniem, czego nie uwzględnia zastosowane równanie.

Napężenie rozciągające σ_{pr} , w procesach złożonego odkształcania nazwane zostało napężeniem pochodzącym od siły rozciągającej i określone jest wzorem

$$\sigma_{pr} = \frac{F}{\pi R^2} \quad (4.2.4)$$

gdzie: F – siła rozciągająca.

Zastępcze odkształcenie plastyczne ε_{pz} w próbie odkształcania złożonego określano równaniem

$$\varepsilon_{pz} = \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{3\varepsilon_{pr}^2 + \gamma_p^2} \quad (4.2.5)$$

gdzie: γ_p jest odkształceniem postaciowym wywołanym momentem skręcającym M w procesie złożonym, ε_{pr} jest liniowym odkształceniem plastycznym spowodowanym siłą rozciągającą F w procesie złożonym.

Ponieważ odkształcenie wywołane momentem skręcającym zmienia się od zera w osi próbki do wartości maksymalnej w warstwie zewnętrznej, w pracy przyjęto średnią wartość odkształcenia postaciowego na przekroju próbki wyznaczoną z równania

$$\gamma_p = \frac{1}{\pi R^2} \int_0^R \frac{r\omega}{L} 2\pi r dr = \frac{2}{3} \frac{R\omega}{l} \quad (4.2.6)$$

$$\gamma_p = \frac{2R2\pi N}{3l} \quad (4.2.7)$$

gdzie: N – liczba obrotów próbki,

l – długość rzeczywista próbki,

ω – plastyczny kąt skręcenia próbki.

Porównując tą zależność z wyrażeniem stosowanym na odkształcenie postaciowe w metodzie konwencjonalnej $\gamma_p = \frac{R2\pi N}{l}$ można zauważyć, że odkształcenie średnie występuje na $2/3$ promienia odkształcanej próbki.

Plastyczne odkształcenie postaciowe γ_p przeliczano na odkształcenie liniowe pochodzące od momentu skręcającego M_s wg wzoru

$$\varepsilon_{ps} = \frac{\gamma_p}{\sqrt{3}} \quad (4.2.8)$$

Natomiast liniowe odkształcenie plastyczne ε_{pr} spowodowane siłą rozciągającą F wyraża zależność

$$\varepsilon_{pr} = \ln \frac{l}{l_p} \quad (4.2.9)$$

gdzie: l_p – początkowa długość próbki

Prędkość plastycznego odkształcenia zastępczego w złożonych procesach odkształcania określano następująco

$$\dot{\varepsilon}_{pz} = \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{3\dot{\varepsilon}_p^2 + \dot{\gamma}_p^2} \quad (4.2.10)$$

gdzie: $\dot{\gamma}_p$ – średnia prędkość plastycznego odkształcenia postaciowego

$$\dot{\gamma}_p = \frac{2R2\pi N}{3lt} \quad (4.2.11)$$

gdzie t – czas.

Średnia prędkość odkształcenia postaciowego $\dot{\gamma}_p$ przeliczano na prędkość odkształcenia liniowego pochodzącego od momentu skręcającego M wg wzoru

$$\dot{\varepsilon}_{ps} = \frac{\dot{\gamma}_p}{\sqrt{3}} \quad (4.2.12)$$

natomiast prędkość plastycznego odkształcenia rozciągającego wyznaczono ze wzoru

$$\dot{\varepsilon}_{pr} = \frac{d\varepsilon_p}{dt} \quad (4.2.13)$$

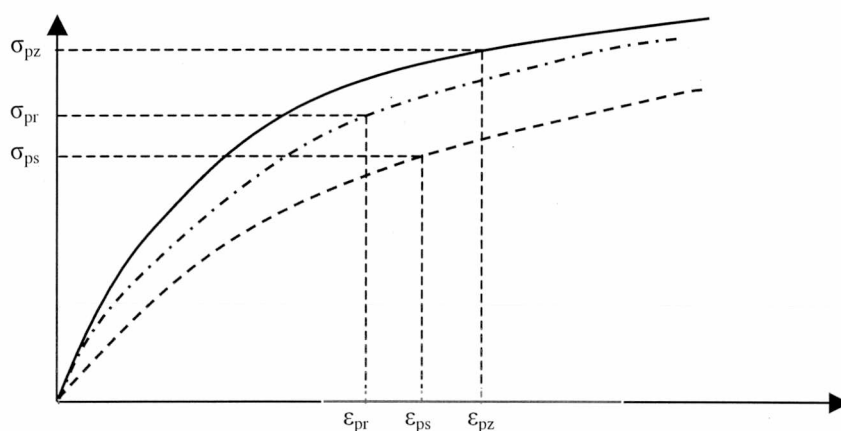
Związki pomiędzy naprężeniem pochodzącym od siły rozciągającej σ_{pr} oraz naprężeniem pochodzącym od momentu skręcającego σ_{ps} a odkształceniem plastycznym można przedstawiać dwoma sposobami.

W pierwszym przypadku naprężeniu σ_{pr} pochodzącemu od siły rozciągającej przyporządkowano jedynie plastyczne odkształcenie liniowe ε_{pr} spowodowane siłą rozciągającą F , bez uwzględnienia plastycznego odkształcenia liniowego ε_{ps} pochodzącego od momentu skręcającego, zaś naprężeniu σ_{ps} pochodzącemu od momentu skręcającego przyporządkowano tylko plastyczne odkształcenie liniowe ε_{ps} pochodzące od tego momentu bez uwzględnienia plastycznego odkształcenia liniowego spowodowanego siłą rozciągającą F . Tak sporządzony wykres przedstawiony jest na rys. 4.2.3, nie oddaje on prawidłowego opisu zależności pomiędzy naprężeniami σ_{pr} i σ_{ps} a odkształceniami plastycznymi ε_{pr} i ε_{ps} w złożonym procesie odkształcania, bowiem naprężenie σ_{pr} jak i naprężenie σ_{ps} są wywołane skumulowanymi odkształceniami ε_{pr} i ε_{ps} .

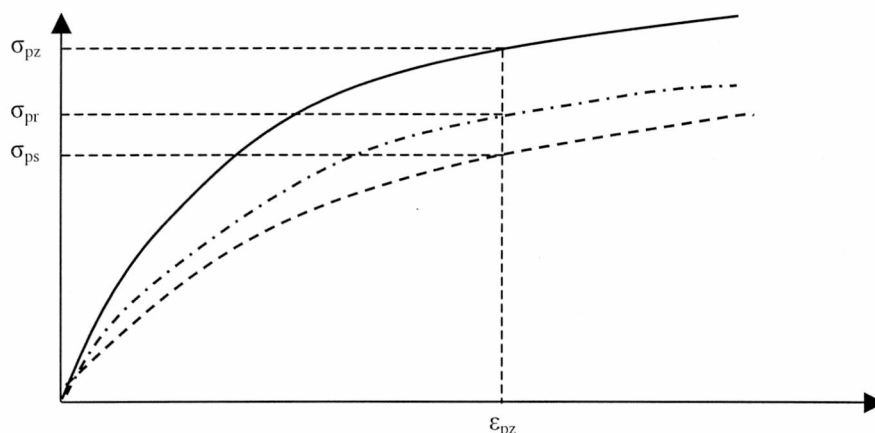
Drugi sposób różni się od pierwszego tym, że naprężeniu σ_{pr} pochodzącemu od siły rozciągającej oraz naprężeniu σ_{ps} pochodzącemu od momentu skręcającego przyporządkowano plastyczne odkształcenie zastępcze ε_{pz} . Tak sporządzony wykres przedstawiony jest na rys. 4.2.4, oddaje on poprawnie reakcję materiału na złożony proces odkształcania, bowiem naprężenia σ_{pr} i σ_{ps} odpowiadają materiałowi, w którym zaszła kumulacja odkształceń ε_{pr} i ε_{ps} pochodzących od tych naprężeń.

Oba te sposoby analizy naprężeń, pochodzących od siły rozciągającej i momentu skręcającego, nie wpływają na końcową zależność pomiędzy naprężeniem zastępczym i plastycznym odkształceniem zastępczym, która w obu przypadkach jest jednakowa.

Dotychczasowe prace [54-57] dotyczące badania zachowania się materiału podczas cyklicznego skręcania nie uwzględniały podziału odkształceń na odkształcenia sprężyste i plastyczne. W odkształcaniu złożonym, w którym jednym ze sposobów odkształcania jest cykliczne odkształcania bardzo ważne jest rozdzielenie odkształceń sprężystych od plastycznych. Istotny błąd można popełnić porównując przebiegi monotoniczne, w których udział odkształceń sprężystych jest bardzo mały, tym mniejszy im większe są odkształcenia plastyczne, z przebiegiem złożonym z przebiegów cyklicznych, w których udział odkształceń sprężystych jest znacznie większy. Każda amplituda odkształcania cyklicznego składa się z odkształcenia sprężystego i plastycznego, im amplituda jest mniejsza tym udział odkształceń sprężystych jest większy w porównaniu do odkształceń plastycznych. Odkształcenie określane jako suma całkowitych amplitud zawiera znaczny udział odkształceń sprężystych i nie może być porównywane z odkształceniem plastycznym w próbie monotonicznej. Również w celu wyznaczenia poprawnie energii odkształcenia plastycznego czy krzywych umocnienia konieczna jest znajomość odkształceń sprężystych i plastycznych w złożonych procesach odkształcania.



Rys. 4.2.3. Zależność pomiędzy naprężeniem zastępczym a odkształceniem zastępczym, gdy naprężeniu σ_{pr} przyporządkowywano odkształcenie ε_{pr} i naprężeniu σ_{ps} przyporządkowywano odkształcenie ε_{ps}



Rys. 4.2.4. Zależność pomiędzy naprężeniem zastępczym a odkształceniem zastępczym, gdy naprężeniom σ_{pr} i σ_{ps} przyporządkowywano odkształcenie zastępcze ε_{pz}

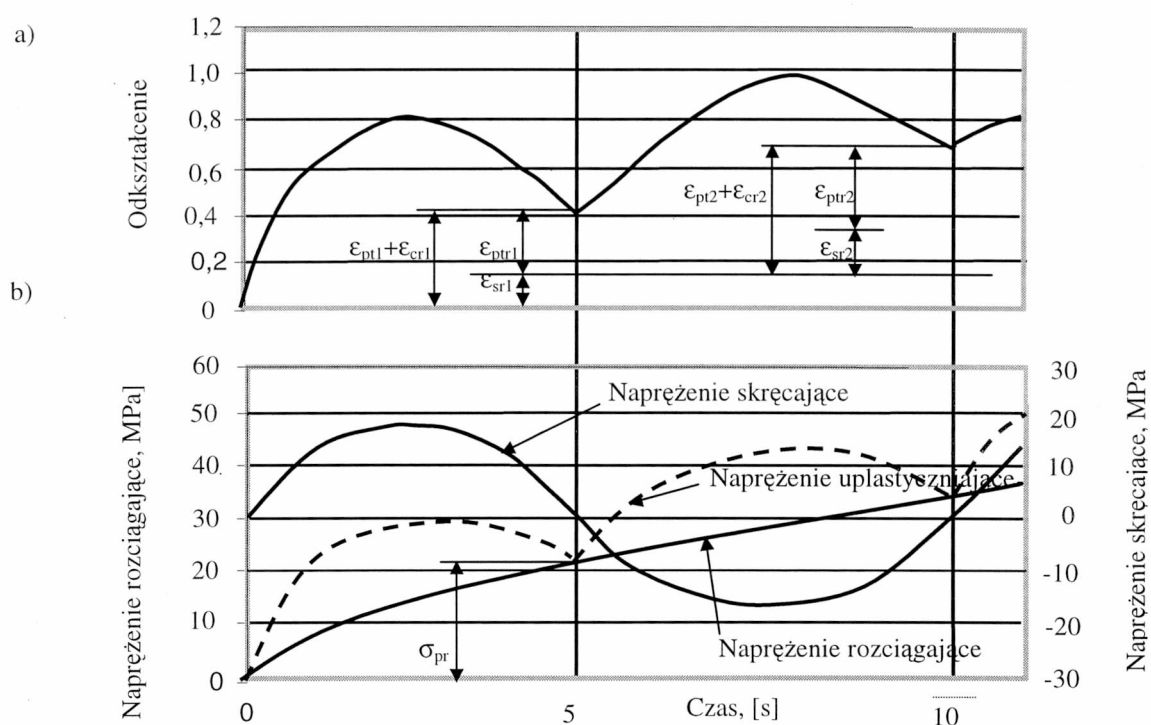
Dla odkształcania złożonego z monotonicznego rozciągania i skręcania cyklicznego symetrycznego bądź krokowego opracowano sposób określania odkształceń plastycznych. Sposób ten przedstawiony jest na rys. 4.2.5, wymaga on sporządzenia dwóch niezależnych przebiegów, jednego dla odkształcenia w funkcji czasu i drugiego dla naprężenia pochodzącego od rozciągania oraz naprężenia pochodzącego od skręcania w funkcji tego samego czasu. W momencie, gdy naprężenie pochodzące od skręcania wykazuje poziom zerowy, próbka obciążona jest jedynie naprężeniem rozciągającym. W tym momencie jej odkształcenie składa się z odkształcenia plastycznego wywołanego skręcaniem ε_{pt1} i całkowitego odkształcenia spowodowanego rozciąganiem ε_{cr1} . Znając moduł Younga E nie trudno obliczyć odkształcenie sprężyste wywołane naprężeniem rozciągającym $\varepsilon_{sr1} = \sigma_{pr}/E$. Ostatecznie odkształcenie plastyczne wywołane zarówno skręcaniem jak i rozciąganiem ε_{ptr1}

w kolejnych połowicznych cyklach odkształcania wyraża się następującą zależnością $\epsilon_{pt1} + \epsilon_{cr1} - \epsilon_{sr1}$ (rys. 4.2.5a).

Wartości naprężeń i odkształceń podane na rys. 4.2.5 są zupełnie dowolnie przyjęte w celu jedynie zobrazowania sposobu obliczania odkształceń plastycznych dla małocyklowych i złożonych procesów odkształcania. Całkowite odkształcenie plastyczne stanowi sumę poszczególnych odkształceń plastycznych określonych dla połowicznych cykli odkształcania, zaznaczonych odpowiednimi strzałkami na rys. 4.2.5a.

W przypadku zmiany orientacji składowych stanu naprężenia dla kolejnych przemiennych procesów odkształcania obejmujących monotoniczne skręcanie i monotoniczne rozciąganie odkształcenia plastyczne określano korzystając ze znanych wartości modułu Younga.

Na rys. 4.2.5b przedstawiono także, linią kreskowaną, przybliżony przebieg zastępczego naprężenia uplastyczniającego wyznaczonego ze wzoru (4.2.1). Na podstawie przedstawionego sposobu wyznaczania odkształceń plastycznych w dalszej części pracy sporządzano zależności zastępczego naprężenia uplastyczniającego od zastępczego odkształcenia plastycznego



Rys. 4.2.5. Zestawione małocyklowe przebiegi: a – odkształcenia i b – naprężenia w funkcji czasu dla złożonego procesu odkształcania obejmującego cykliczne skręcanie z monotonicznym rozciąganiem.

Strzałkami zaznaczono wartości odkształceń plastycznych w kolejnych połowicznych cyklach odkształcania

Do obliczania odkształceń plastycznych dla małowykłowego jak i złożonego odkształcania opracowano specjalny program w Visual Basic.

Postępując zgodnie z przedstawionymi sposobami można określić odkształcenia plastyczne dla dowolnie złożonych odkształceń obejmujących procesy skręcania i rozciągania i w efekcie końcowym poszukiwać zależności określonych wielkości w funkcji odkształcenia plastycznego.

Wyeliminowanie odkształceń sprężystych z odkształceń całkowitych ma wpływ również na prędkość odkształcania, która różni się od prędkości wyznaczonej dla odkształceń całkowitych. Do przedstawienia różnic prędkości odkształcania wykorzystano poniższe zależności:

$$\dot{\varepsilon}_p = \frac{d\varepsilon_p}{dt}; \quad (4.2.14)$$

$$\dot{\varepsilon}_c = \frac{d\varepsilon_c}{dt}; \quad (4.2.15)$$

$$\Delta\dot{\varepsilon}_{cp} = \dot{\varepsilon}_c - \dot{\varepsilon}_p; \quad (4.2.16)$$

gdzie: ε_p – odkształcenie plastyczne

ε_c – odkształcenia całkowite

t – czas

Różnice pomiędzy prędkością obliczoną dla odkształcenia całkowitego a odkształcenia plastycznego zależą od udziału odkształceń sprężystych w odkształceniach całkowitych. Ponieważ w procesach monotonicznego skręcania i monotonicznego rozciągania udział odkształceń sprężystych jest niewielki, istotną rolę odgrywają odkształcenia sprężyste w procesach małowykłowego odkształcania, bowiem sumują się w każdym cyklu odkształcania. Dlatego wystarczy rozpatrzyć proces odkształcania małowykłowego. Najmniejsze różnice uzyskuje się dla najmniejszej amplitudy, różnice te zwiększają się wraz ze wzrostem amplitudy. Przykładowo dla amplitudy odkształcenia $A=0,053$ różnica prędkości odkształcania wynosi $\Delta\dot{\varepsilon}_{cp}=0,009 \text{ s}^{-1}$, natomiast dla amplitudy odkształcenia $A=0,22$ wynosi ona $\Delta\dot{\varepsilon}_{cp}=0,034 \text{ s}^{-1}$.

4.3. Opis aparatury badawczej

Jednym z podstawowych celów pracy było zbudowanie urządzenia, które pozwoliłoby równocześnie skręcać i rozciągać bądź ścisnąć próbkę. Wymagało to rozwiązania wielu problemów na etapie projektowym, przy czym trzy zagadnienia okazały się najistotniejsze dla

całej konstrukcji plastometru. Układ napędowy musiał zostać tak zaprojektowany, aby można było uzyskać bardzo duże zmiany stabilnych prędkości odkształcania oraz łatwą możliwość sterowania tymi prędkościami. Równoczesne realizowanie różnych dróg odkształcania wymagało rozdzielenia układu napędowego, odpowiedzialnego za skręcanie od układu realizującego ścisnienie bądź rozciąganie. Również sposoby pomiarów momentu skręcającego i siły osiowej musiały być tak rozwiązane, aby wzajemnie się nie zakłócały. Innym bardzo ważnym elementem decydującym o konstrukcji plastometru było dobranie odpowiednich wymiarów i kształtu części pomiarowej próbki oraz części uchwytowej, która musi zapewnić możliwość przenoszenia zarówno momentu skręcającego jak i siły osiowej. W celu zmniejszenia sił bezwładności występujących podczas odkształcania próbek, poruszające się masy elementów plastometru zostały zminimalizowane zarówno poprzez zaprojektowanie odpowiedniego ich kształt jak i dobranie stosownego materiału na te elementy.

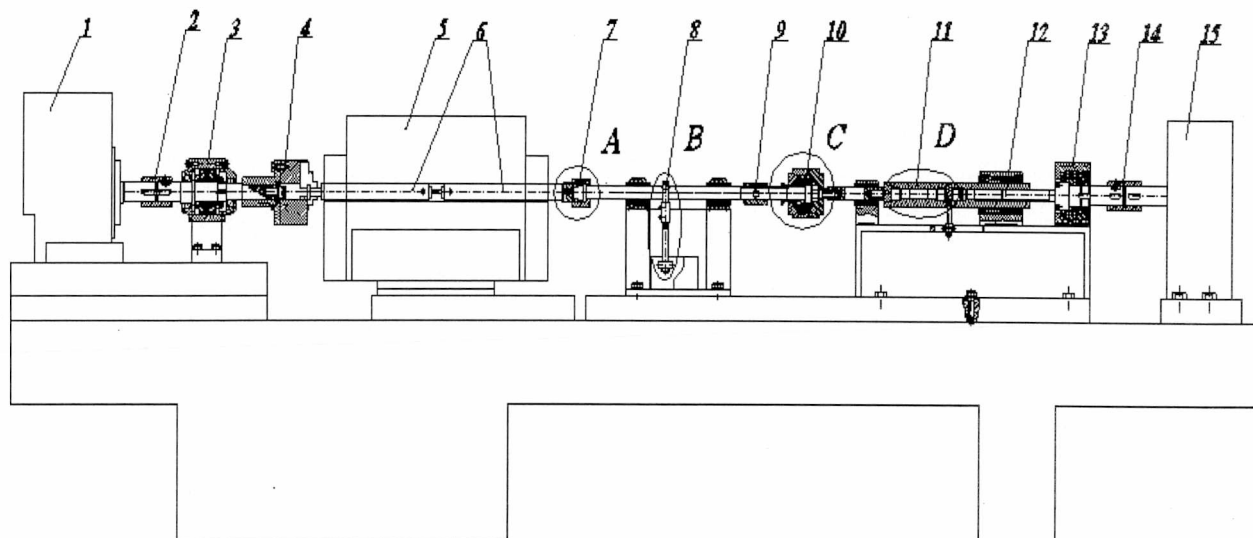
Na rys. 4.3.1 przedstawiono widok urządzenia stosowanego w badaniach, a na rys. 4.3.2 jego schemat działania. Najważniejsze podzespoły plastometru zostały opisane na rys. 4.3.3 - 4.3.7 [16].

Układ napędowy

Proces skręcania jest realizowany za pomocą obrabiarkowego elektrycznego silnika asynchronicznego firmy „Lenze” (1) o mocy 13 kW, który przekazuje moment skręcający za pomocą sprzęgła tulejowego (2). Podpora stała (3) z łożyskami stożkowymi ma za zadanie zabezpieczyć silnik przed działaniem sił osiowych. Lewa strona uchwytu (6) odkształcanej próbki, mocowana w tokarskim uchwycie samocentrującym (4), przenosi moment skręcający na próbkę, który poprzez prawy uchwyt samocentrujący (7) przekazywany jest na momentomierz (8).



Rys. 4.3.1. Widok plastometru



Rys. 4.3.2. Schemat plastometru: 1-silnik obrabiarkowy asynchroniczny o mocy 13 kW, 2-sprzęgło tulejowego, 3-podpora stała, 4-głowica tokarska, 5-piec, 6-uchwyty próbki, 7-uchwyt samocentrujący, 8-momentomierz, 9-sprzęgło, 10-głowica obrotowa, 11-dynamometr, 12-mechanizm śrubowy, 13-podpora stała, 14-sprzęgło tulejowe, 15- silnik obrabiarkowy asynchroniczny o mocy 11 kW [16]

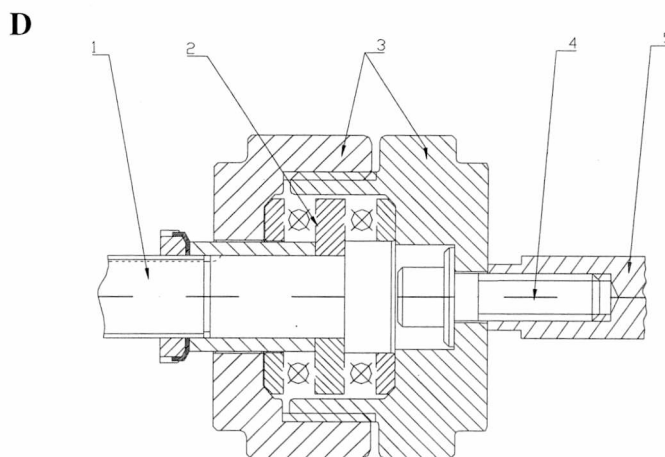
Napęd strony ściskająco-rozciągającej realizowany jest za pomocą obrabiarkowego elektrycznego silnika asynchronicznego firmy „Lenze” (15) o mocy 11 kW, który przekazuje moment skręcający za pomocą sprzęgła tulejowego (14) na mechanizm śrubowy (12). Do zmiany ruchu obrotowego silnika na postępowy wykorzystano mechanizm śrubowy, który wywołuje siły ściskające lub rozciągające próbkę. Podpora stała (13) podobnie jak podpora (3) zabezpiecza silnik przed działaniem sił osiowych, które mogłyby go uszkodzić. Pomiar siły osiowej realizowany jest poprzez siłomierz (11).

Aby pomiary momentu skręcającego i siły osiowej wzajemnie się nie zakłócały zastosowano głowicę (10). Głowica ta zabezpiecza siłomierz (11) przed działaniem momentu skręcającego pochodzącego od odkształcanej próbki. Zasadę działania głowicy przedstawiono na rys. 4.3.3 (szczegół C na rys. 4.3.2), polega ona na rozdzieleniu momentu obrotowego skręcającego próbkę przenoszonego przez wałek (1) od siły osiowej przenoszonej przez wałek (5). Silniki (1) i (15) spełniają wymagania związane ze stabilnością prędkości obrotowej, która w zakresie od 0.5 do 1000 obr/min wynosi $\pm 0.1\%$ i z czasem narastania prędkości od 0 do 1000 obr/min nie dłuższym niż 100 ms.

Pomiar siły i momentu

Do pomiaru momentu skręcającego zastosowano momentomierze zbudowane z belki pomiarowej (1) z naklejonymi mostkami tensometrycznymi TF – 3/120 (3), wraz z układem tensometrów kompensacyjnych (rys. 4.3.4) (szczegół B na rys. 4.3.2). W celu

wyeliminowania oporów pochodzących od sił tarcia występujących między belką (1) a szyną prowadzącą (5), w czasie przemieszczania się całego układu podczas rozciągania lub ściskania, na dolnym końcu belki zamocowano kulkowe łożysko toczne (4), natomiast górny koniec belki przymocowany jest do wałka przenoszącego mierzony moment za pomocą nakładki (2). Momentomierze wykonane są dla trzech zakresów pomiaru od $0\div 3$ Nm, $0\div 7$ Nm, $0\div 40$ Nm. Do pomiaru prędkości i drogi kątowej wykorzystano układ pomiarowy serwonapędu silnika.



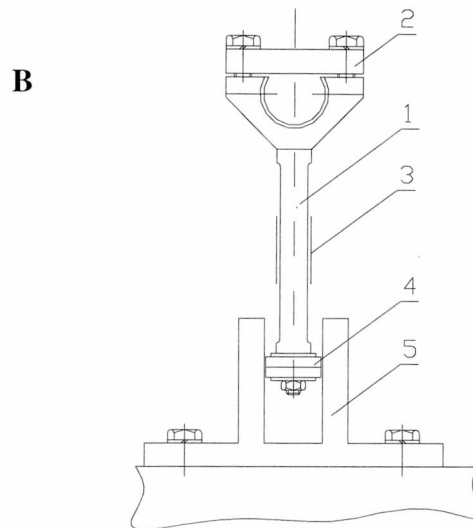
Rys. 4.3.3. Głowica: 1-walek, 2-łożysko, 3-oprawa łożyska, 4-śruba mocująca, 5-walek

Do pomiaru sił poosiowych zastosowano dynamometr (rys. 4.3.5 szczegół D na rys. 4.3.2), który zbudowany jest z tulei (4) wykonanej ze stali sprężynowej 50S2, z naklejonymi tensometrami. W celu uzyskania większe czułości pomiaru zastosowano trzy wymienne czujniki o następujących średnicach: 16,5, 18, 20 mm, których zakres pomiarowy jest następujący: $0\div 3$ kN, $0\div 7$ kN Nm, $0\div 20$ kN.

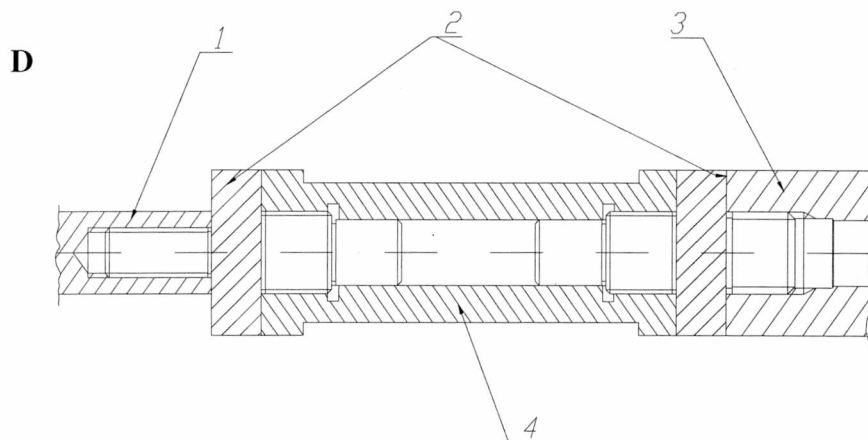
Próbie skręcania można przeprowadzać z tzw. „swobodnym końcem” skręcanej próbki, co oznacza, że poosiowy przesuw próbki nie jest blokowany i w próbce nie występują siły poosiowe. Próbie można przeprowadzić również z blokadą przesuwu poosiowego końca próbki w takim przypadku w próbce mogą wystąpić siły poosiowe, które są mierzone przez czujnik (11).

Pomiar przemieszczeń

Kąt skręcenia próbki był wyznaczany z obrotów silnika elektrycznego, gdyż układ przenoszący moment skręcający posiadał dużą sztywność na skręcanie. Pomiar wydłużenia próbki wymagał natomiast zastosowania ekstensometru, gdyż układ przenoszenia napędu, od silnika realizującego rozciąganie, składał się z kilku elementów, których odkształcenia sprężyste musiały być wyeliminowane.



Rys.4.3.4. Momentomierz: 1-belka pomiarowa, 2-nakładka, 3-tensometry, 4-kulkowe łożysko toczne, 5-szyna prowadząca



Rys.4.3.5. Dynamometr: 1-wałek, 2-adaptery, 3-wałek, 4-tuleja

Układ grzewczy

Układ grzewczy składa się z dwóch zamiennych pieców oporowych. Pierwszy to piec, w którym elementem oporowym jest tantal i w którym istnieje możliwość stosowania osłony gazu obojętnego, co uniemożliwia utlenianie się próbek. Drugi piec to piec rurowy, w którym można uzyskiwać bardzo szybkie schładzanie próbek za pomocą wtryskiwanej do niego wody. Poprzez zaprojektowanie odpowiedniego kształtu elementu grzewczego uzyskano równomierny rozkład temperatury na znacznej długości rury.

Układ sterowania

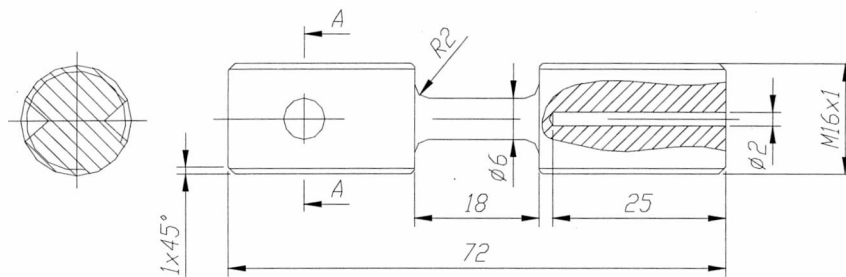
W plastometrze wykorzystano system zbierania danych oparty na module i karcie pomiarowej firmy Beckhoff. Zastosowano tu technikę określaną w automatyce jako "feld

bus” system. W systemie tym jednostką centralną jest komputer typu IBM PC, którego zadaniem jest:

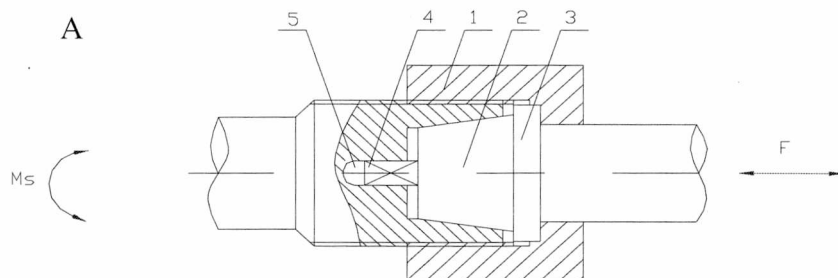
- komunikacja z operatorem doświadczenia,
- realizacja algorytmu sterowania i pomiaru,
- archiwizacja i prezentacja danych pomiarowych,
- konwersja danych pomiarowych do pliku dostępnego pod programem Excel.

Kształt i wymiary próbek

Na rys. 4.3.6 przedstawiono kształt i wymiary stosowanych w badaniach próbek. Próbki są wkręcane w uchwyty (6) na rys. 4.3.2 oraz zabezpieczane przed wykręceniem za pomocą poprzecznego sworznia, takie rozwiązanie zapewnia zarówno łatwe połączenie próbki z uchwytem (6) jak i przenoszenie momentu skręcającego i siły osiowej. W celu zapewnienia szybkiego i sprawnego montażu oraz demontażu uchwyty mocujących próbkę oprócz obrotowego pieca (5 na rys. 4.3.2) zastosowano uchwyt samocentrujący (7 na rys. 4.3.2) pokazany na rys. 4.3.7. Uchwyt ten przenosi moment skręcający za pośrednictwem płetwy (4), oraz siłę osiową poprzez nakrętkę tulejową (1) i kołnierz (3). Zastosowanie uchwyty samocentrującego zapewniało ponadto współosiowość poszczególnych elementów, którą uzyskano dzięki zastosowaniu stożka centrującego (2).



Rys.4.3.6. Schemat próbki stosowanej w badaniach



Rys.4.3.7. Uchwyt samocentrujący: 1-nakrętka tulejowa, 2-stożek centrujący, 3-kołnierz, 4-płetwa, 5-wpust na płetwę

W urządzeniu, na którym przeprowadzano badania, proces odkształcania jest realizowany za pomocą elektrycznych silników obrabiarkowych, które mają bardzo krótki czas rozruchu i dużą stabilność prędkości. Dla prędkości odkształcania próbki $0,1 \text{ s}^{-1}$, przy zastosowanych jej wymiarach, prędkość obrotowa wynosi około $6 \text{ obr}/\text{min}$. Wstępne eksperymenty wykazały, że prędkość taką silnik uzyskuje po około 70 ms, co odpowiada bardzo małym odkształceniom, bliskim odkształceniom sprężystym. W pracy założono, więc, że przy tak krótkim czasie narastania prędkości obrotowej silnika, prędkość odkształcania próbki w kolejnych cyklach jest stała. Przy takim założeniu błąd względny prędkości odkształcania wynosił około 4 %.

Dzięki zastosowaniu powyżej przedstawionych nowych rozwiązań konstrukcyjnych, udało się zbudować urządzenie, który pozwala realizować, założone w badaniach, złożone drogi odkształcania.

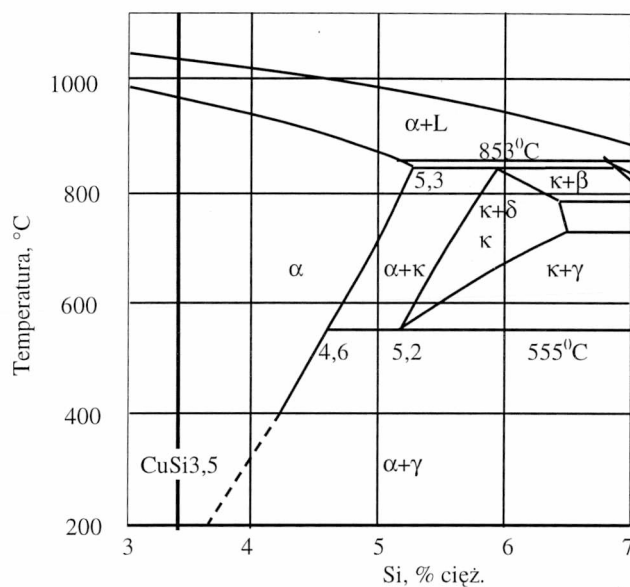
4.4. Opis badanych materiałów oraz sposobów i warunków odkształcania

Do badań wybrano dwa brązy krzemowy CuSi3,5 oraz brąz aluminium CuAl8 o składzie chemicznym bardzo zbliżonym do brązów przemysłowych. Skład chemiczny badanych brązów podano w tab. 4.4.1. Materiały posiadają niemal taką samą EBU, brąz CuSi3,5 około 15 mJ/mm^2 i brąz CuAl8 około 7 mJ/mm^2 . Badane materiały są materiałami jednofazowymi, co ułatwiało interpretację zjawisk zachodzących podczas odkształcania (rys. 4.4.1 i 4.4.2).

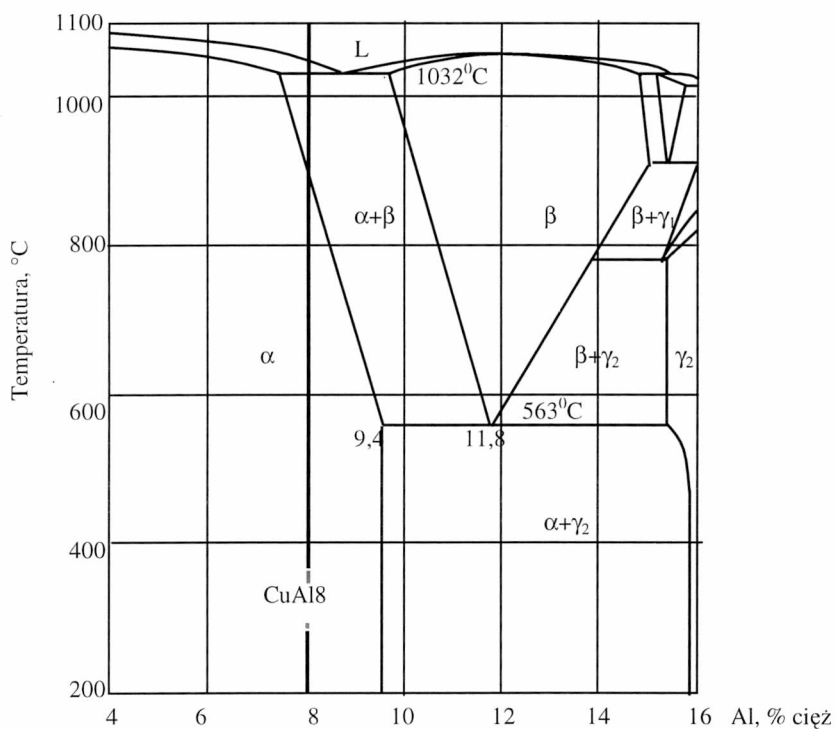
Tabela. 4.4.1. Skład chemiczny materiałów zastosowanych do badań

Materiał	Al	Cu	Pb	Zn	Fe	Mg	Mn	Si	Sn	Sb	P	Inne
CuAl8	8,23	91,57	0,005	0,016	0,03	–	0,007	0,001	0,01	0,001	0,001	0,129
CuSi3,5	0,001	96,37	0,005	0,02	0,01	–	0,008	3,39	0,01	0,001	0,005	0,180

Brązy CuSi3,5 i CuAl8 zostały odlane w postaci wlewków z czystej miedzi i odpowiednio krzemu i aluminium. Nie zawierały, więc one dodatków, których obecność mogłaby utrudniać prawidłową interpretację zjawisk zachodzących podczas odkształcania. Wlewki te zostały następnie wyciśnięte na gorąco w zakresie temperatur od 750 do 850°C na pręty o średnicy 20 mm w Zakładach Hutniczo-Przetwórczych Metali Nieżelaznych „Hutmen” we Wrocławiu.



Rys.4.4.1. Fragment wykresu równowagi układu podwójnego Cu-Si [36]

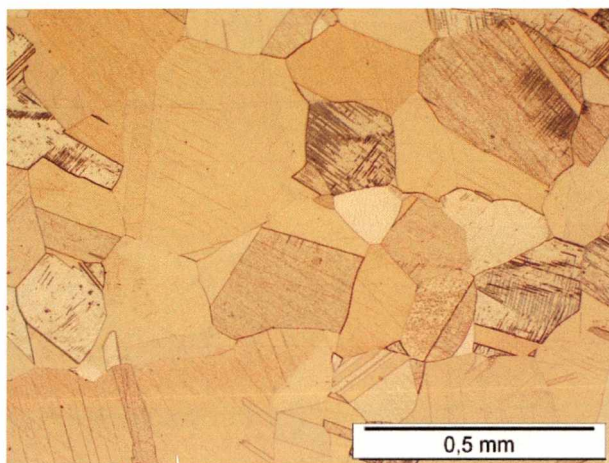


Rys.4.4.2. Fragment wykresu równowagi układu podwójnego Cu-Al [36]

Wszystkie brązy wykazywały dużą niejednorodność struktury. W celu jej ujednorodnienia brązy $\text{CuSi}_{3,5}$ i CuAl_8 poddano wygrzewaniu odpowiednio w temperaturze 800 °C w ciągu 2 godzin i 700 °C w ciągu 3 godzin.

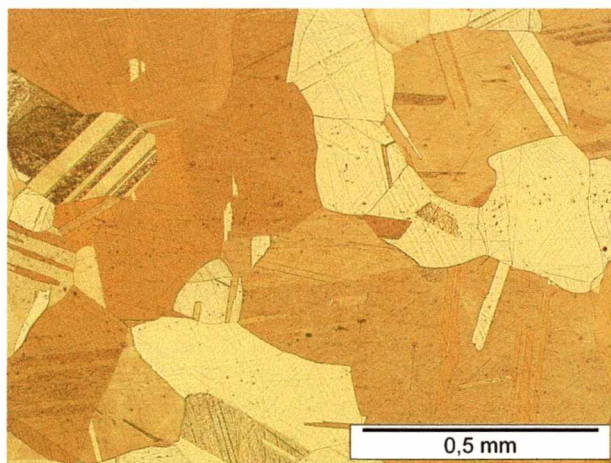
Na rys. 4.4.3 przedstawiono strukturę brązu krzemowego $\text{CuSi}_{3,5}$ o średniej wielkości ziaren wynoszącej 250 μm uzyskaną po takiej obróbce cieplnej. Brąz krzemowy $\text{CuSi}_{3,5}$

posiada strukturę jednofazową roztworu α (rys.4.4.1), która zapewnia mu dobre właściwości plastyczne i wytrzymałościowe w temperaturze pokojowej i podwyższonej do około 300 °C, dużą wytrzymałość zmęczeniową i dobre właściwości ślizgowe. Jest on stosowany na elementy aparatury, siatki, sprężyny, łożyska i części samochodowe.



Rys. 4.4.3. Struktura wyjściowa brązu krzemowego CuSi3,5 po wstępnej obróbce cieplnej

Strukturę brązu aluminiowego CuAl8 po obróbce cieplnej o średniej wielkości ziaren wynoszącej 260 μm przedstawiono na rys 4.4.4. Brąz ten jest zbudowany jedynie z fazy α (rys.4.1.2), charakteryzuje się on dobrymi właściwościami plastycznymi na zimno i gorąco. Wykazuje on dobrą odporność na korozję w środowisku wody morskiej i kwasów utleniających, dzięki tworzeniu się warstewki Al_2O_3 na ich powierzchni. Charakteryzują się dobrymi własnościami mechanicznymi w temperaturze pokojowej i podwyższonej oraz wysoką odpornością na ścieranie.



Rys. 4.4.4. Struktura wyjściowa brązu aluminiowego CuAl8 po wstępnej obróbce cieplnej

Każdy pręt określonego stopu pochodził z tego samego wytopu, co zapewniało jednakowy skład poszczególnych prętów przynależnych do danego stopu. Ponieważ wszystkie materiały były przygotowane w ten sposób, iż wygrzewano je ujednoladniająco w temperaturach wyższych lub równych najwyższej ze stosowanych temperatur odkształcania, ich struktury wyjściowe w całym zakresie zastosowanych temperatur były jednakowe.

Z ujednoladnionych prętów wykonano próbki o kształcie i wymiarach podanych na rys. 4.3.6. Część pomiarowa próbek była szlifowana papierem ściernym o ziarnistości 800. Tak przygotowane próbki były odkształcane na plastometrze, którego zdjęcie przedstawiono na rys. 4.3.1 oraz schemat na rys. 4.3.2 [16].

Zbudowany plastometr umożliwia realizowanie następujących prostych i złożonych dróg odkształcania:

- skręcanie monotoniczne,
- rozciąganie monotoniczne,
- ściskanie monotoniczne,
- cykliczne skręcanie ze stałą bądź zmienną amplitudą,
- skręcanie w dowolnym kierunku połączone z monotonicznym lub cyklicznym rozciąganiem,
- skręcanie w dowolnym kierunku połączone z monotonicznym lub cyklicznym ściskaniem,
- skręcanie w dowolnym kierunku połączone z rozciąganiem i ściskaniem w sposób stały bądź przemienny,

Poszczególne warianty odkształcania charakteryzują się odkształceniem całkowitym, plastycznym i sprężystym w pojedynczych cyklach, w procesach złożonego i procesach monotonicznego odkształcania, odkształceniami pochodzącymi od momentu skręcającego i siły rozciągającej oraz odkształceniem zastępczym. Poszczególne rodzaje odkształcania wywołane są odpowiednimi naprężeniami. W próbach odkształcania parametrami zmiennymi niezależnymi były: rodzaj obciążeń, wartość i prędkość odkształcania oraz amplituda odkształceń w kolejnych cyklach. Bazą odniesienia są wyniki uzyskiwane w monotonicznych próbach odkształcania.

Na podstawie wstępnych badań wybrano następujące złożone sposoby odkształcania:

- jednoczesne skręcanie z rozciąganiem,
- przemienne rozciąganie z skręcaniem,
- jednoczesne rozciąganie z symetrycznym małowykwym skręcaniem,

W celu odniesienia efektów złożonych sposobów odkształcania w stosunku do prostych prób przeprowadzono również:

- monotoniczne skręcanie,
- monotoniczne rozciąganie.

Badania prowadzone w jednakowych warunkach powtarzano tyle razy, aby uzyskać dwa podobne przebiegi.

Dla jednoczesnego monotonicznego rozciągania z małocyklowym skręcaniem stosowano następujące amplitudy odkształcania $\varepsilon_{ac} = 0,027, 0,054, 0,11$ i $0,22$. Badania prowadzono w temperaturze otoczenia oraz w temperaturach obróbki plastycznej na gorąco dla prędkości odkształcania w zakresie od $0,01 \text{ s}^{-1}$ do 1 s^{-1} .

Badane materiały były wstępnie odkształcane w zakresie temperatur od 20°C do 800°C , przy prędkościach odkształcania od 10^{-3} do 10 s^{-1} . Górna temperatura była bliska temperaturze topnienia badanych brązów. Badania te wykazały, że wpływ drogi odkształcania w bardzo wysokich temperaturach dochodzących do 800°C , jest praktycznie tak mały, że nie stosowano w dalszych badaniach tak wysokich temperatur.

Stosowanie prędkości odkształcania powyżej 1 s^{-1} powoduje w wyniku zamiany pracy odkształcenia plastycznego na ciepło wzrost temperatury odkształcanej próbki, szczególnie jest on nierównomierny na jej długości wskutek intensywnego odprowadzania ciepła przez uchwyty próbki [29, 30, 33-35]. Rezultatem takiego rozkładu temperatury jest osłabienie próbki w części środkowej, która ulega większemu odkształceniu niż obszary próbki leżące bliżej uchwytów. Ponieważ odkształcenia postaciowe określa się na podstawie obrotów uchwytu próbki, to jedynie przy założeniu równomiernego odkształcenia części pomiarowej próbki można dokładnie ustalić jej odkształcenie. Z tego powodu prędkość odkształcania ograniczono do takiej, która nie powoduje wyraźnego wzrostu temperatury odkształcanej próbki, tj. 1 s^{-1} .

Do badań strukturalnych zastosowano mikroskop optyczny f-my Olympus GX 51 z kamerą cyfrową Olympus DO12. Obraz struktury był zapisywany za pomocą kamery cyfrowej na komputerze PC. Badania przeprowadzono również na transmisyjnym mikroskopie elektronowym JRM 2010 ARP, wyposażonym w system do mikroanalizy składu chemicznego OXFORD w Katedrze Struktury i Mechaniki Ciała Stałego Akademii Górniczo Hutniczej w Krakowie. Próbki do badań przy użyciu mikroskopu optycznego wykonane z brązu krzemowego CuSi3,5 i brązu aluminium CuAl8 trawiono w 10% wodnym roztworze nadsiarczanu amonu przez 3,5 min.

Badania strukturalne przeprowadzano na próbkach chłodzonych bezpośrednio po odkształceniu strumieniem wody. Zgłady metalograficzne wykonywano w płaszczyźnie równoległej do osi próbek. Ponieważ w próbie skręcania na promieniu próbki jest

nierównomierny rozkład odkształcenia, przyjęto tak samo jak dla określania wartości średniego odkształcenia postaciowego (wzór (4.2.7)), że najbardziej reprezentatywny dla badań strukturalnych jest obszar leżący w odległości $2/3$ promienia od osi próbki i z tych miejsc pobierane były próbki do badań strukturalnych. Badania te skoncentrowane były na identyfikacji i opisie zjawisk zachodzących podczas i po odkształceniu oraz makroskopowych zmian struktury i zachowania się materiałów w złożonych procesach kształtowania.

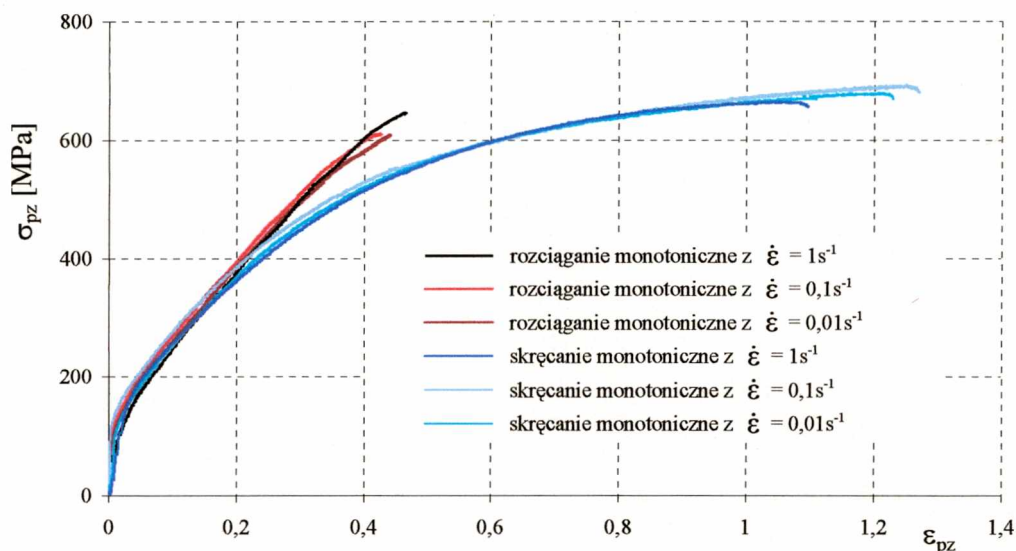
5. WYNIKI BADAŃ W PRÓBACH MONOTONICZNYCH I ICH OMÓWIENIE

W badaniach nad złożonymi drogami odkształcania wyznaczane były przebiegi naprężenia uplastyczniającego od odkształcenia plastycznego, odkształcenia graniczne oraz struktury odkształconych materiałów. Ponieważ wyniki te porównywano z rezultatami otrzymanymi w monotonicznych próbach odkształcania, w pierwszym etapie pracy przeprowadzono próby monotoniczne, a dopiero następnie, próby złożone.

5.1. Brąz krzemowy CuSi3,5

5.1.1. Badania brązu krzemowego CuSi3,5 w temperaturze pokojowej

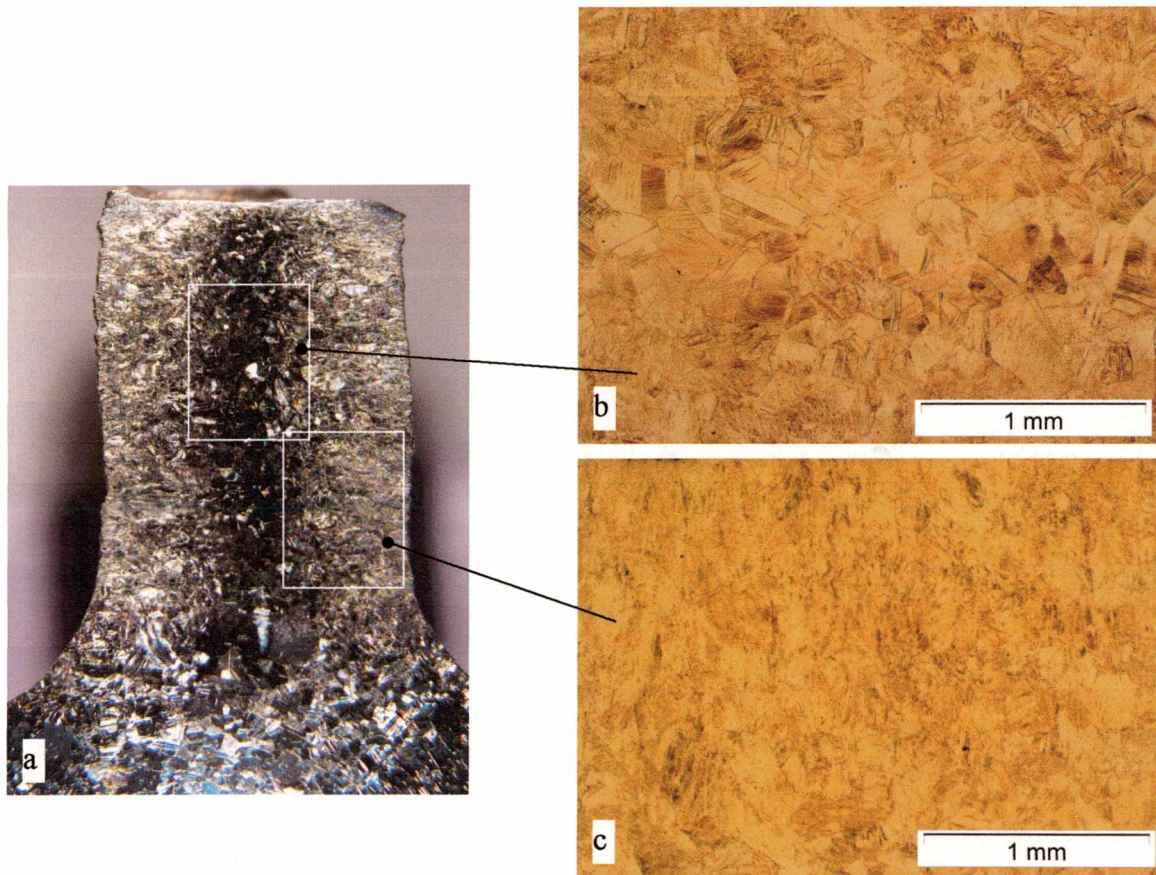
Przebiegi naprężenia zastępczego w funkcji odkształcenia dla brązu krzemowego CuSi3,5 uzyskane w temperaturze otoczenia w próbie monotonicznego skręcania i rozciągania przedstawiono na rys. 5.1.1.1.



Rys. 5.1.1.1. Przebiegi naprężenia zastępczego uzyskane w próbach monotonicznego skręcania i rozciągania dla brązu krzemowego CuSi3,5 przy różnych prędkości odkształcania w temperaturze otoczenia

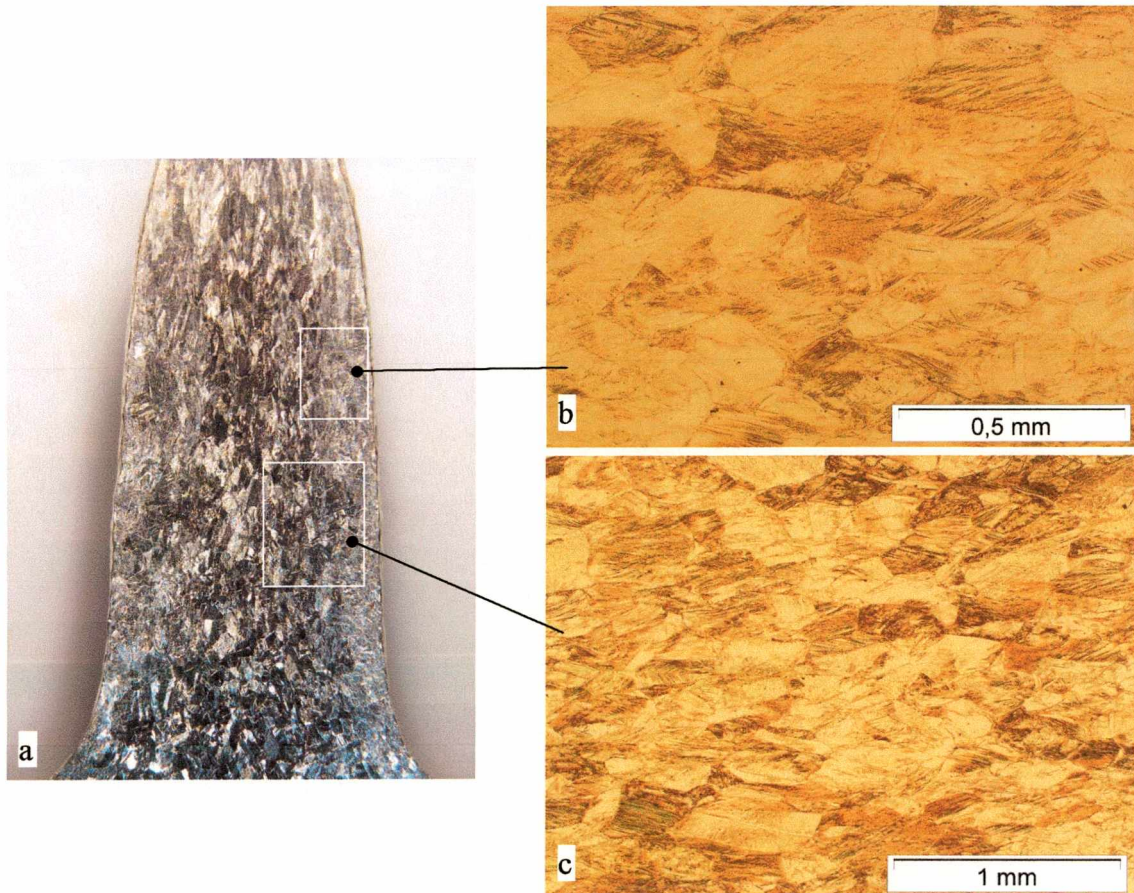
Przebiegi naprężenia zastępczego uzyskane w próbie monotonicznego rozciągania i skręcania są bardzo do siebie zbliżone, szczególnie w zakresie odkształceń mniejszych od 0,25, dla odkształceń większych materiał nieznacznie szybciej umacnia się w próbie rozciągania niż skręcania. Ponadto odkształcenie graniczne w próbie skręcania jest około 2,5 razy większe niż w próbie rozciągania. W temperaturze otoczenia brąz krzemowy CuSi3,5 charakteryzuje się wyraźnym umocnieniem, nie osiąga on stanu nasycenia, gdyż wcześniej

ulega zniszczeniu w wyniku osiągnięcia odkształceń granicznych. Zarówno w procesie skręcania (rys. 5.1.1.2) jak i rozciągania (rys. 5.1.1.3) uzyskano wyraźnie zdeformowaną strukturę. W próbce skręconej można zaobserwować duże różnice w stopniu deformacji między warstwami zewnętrznymi i wewnętrznymi, świadczące o dużym gradiencie odkształcenia na promieniu próbki, dlatego w prowadzonych badaniach przyjęto, że obszar leżący w odległości $2/3$ promienia próbki od jej osi jest dla niej reprezentatywny.

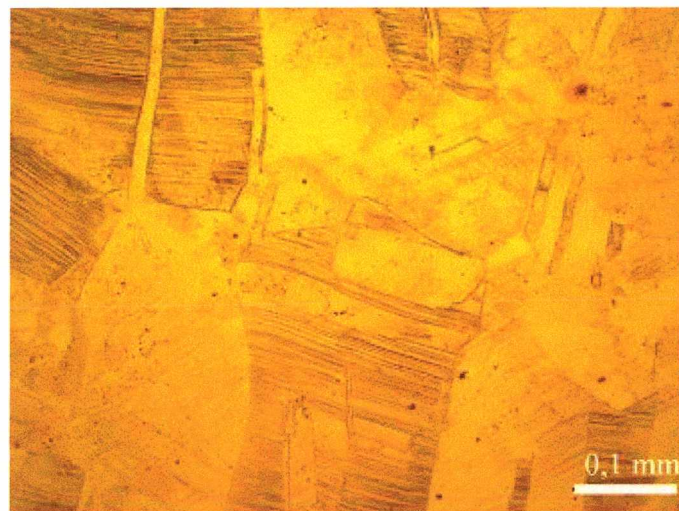


Rys. 5.1.1.2. Struktura brązu krzemowego $\text{CuSi}_{3,5}$ odkształconego w próbce skręcania w temperaturze otoczenia do $\varepsilon_{pz} = 1$ z prędkością odkształcania $0,1 \text{ s}^{-1}$: a) widok całej odkształconej próbki, b) struktura wewnętrznych warstw odkształconej próbki, c) struktura próbki w odległości $2/3$ promienia próbki od jej osi

Na rys. 5.1.1.3 przedstawiającym strukturę brązu krzemowego po monotonicznym rozciąganiu również widać różnice w stopniu deformacji między warstwami zewnętrznymi i wewnętrznymi. Niejednorodność ta nie jest tak duża jak w próbce skręcania i jest spowodowana powstaniem rozproszonej utraty stateczności w ostatnim etapie odkształcania. Aby tego uniknąć proces rozciągania w temperaturze otoczenia był przerywany w momencie pojawienia się tej utraty stateczności, czyli w chwili uzyskania maksimum siły rozciągającej.

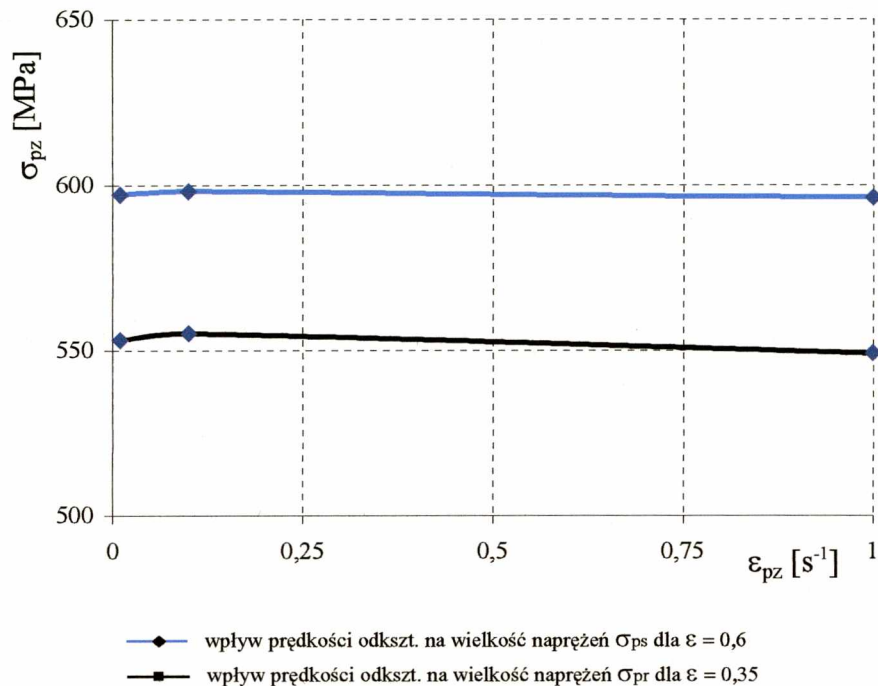


Rys. 5.1.1.3. Struktura brązu krzemowego $\text{CuSi}_{3,5}$ odkształconego w próbie rozciągania w temperaturze otoczenia do $\varepsilon_{pz} = 0,45$ z prędkością odkształcania $0,1 \text{ s}^{-1}$: a) widok odkształconej próbki, b,c) struktura zewnętrznych warstw odkształconej próbki



Rys. 5.1.1.4. Struktura brązu $\text{CuSi}_{3,5}$ w temperaturze otoczenia po monotonicznym rozciąganiu z prędkością odkształcania $0,1 \text{ s}^{-1}$ do $\varepsilon_{pz} = 0,45$

Podstawowym mechanizmem odkształcenia brązu krzemowego CuSi3,5 w warunkach obróbki na zimno jest bliźniakowanie. Na rys. 5.1.1.4 przedstawiona jest struktura brązu CuSi3,5 po monotonicznym rozciąganiu z prędkością odkształcania $0,1\text{s}^{-1}$ do $\varepsilon_{pz} = 0,45$ z wyraźnie widocznymi płaszczyznami bliźniakowania, ułożonymi niemal w jednym kierunku, zbliżonym do kierunku największych naprężeń stycznych.

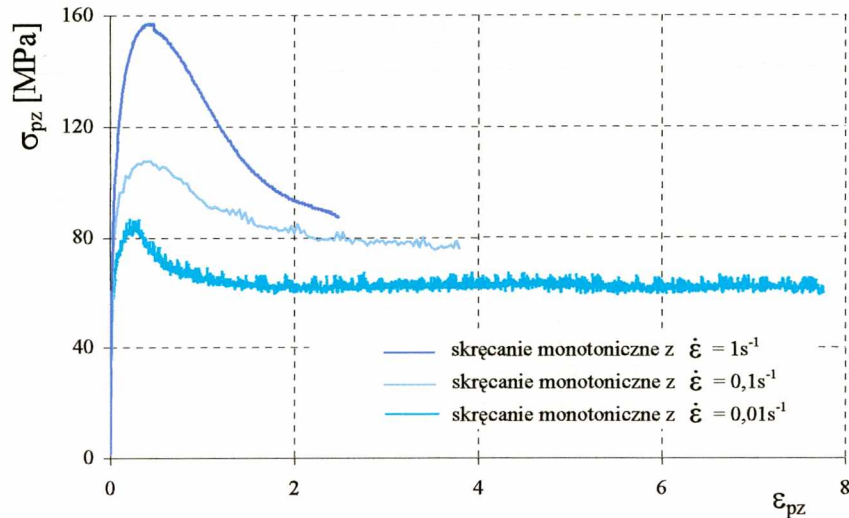


Rys. 5.1.1.5. Wpływ prędkości odkształcania na naprężenie zastępcze w próbach monotonicznego skręcania i rozciągania w temperaturze otoczenia dla brązu krzemowego CuSi3,5

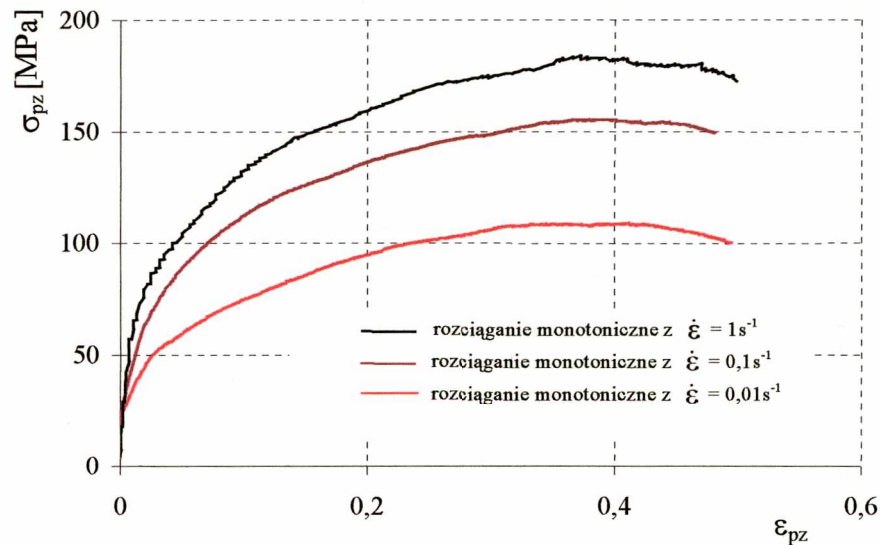
Zarówno w próbie skręcania jak i rozciągania w temperaturze otoczenia w zakresie prędkości odkształcania od $0,01$ do $0,1\text{ s}^{-1}$ nie zaobserwowano wyraźnego wpływu prędkości odkształcania na naprężenie zastępcze. Jedynie w próbie skręcania, dla prędkości odkształcania 1 s^{-1} , uzyskano nieznacznie niższe naprężenie niż dla mniejszych zastosowanych prędkości odkształcania (rys. 5.1.1.5). Dokładne pomiary temperatury próbki odkształcanej z taką prędkością wykazały, że ten niewielki spadek naprężenia, jest spowodowany niedużym wzrostem temperatury próbki w wyniku zmiany pracy odkształcenia plastycznego na ciepło. Należy przypuszczać, więc że dla warunków izotermicznych poziom naprężenia dla prędkości odkształcania 1 s^{-1} byłby bardzo zbliżony do poziomu naprężenia uzyskanego dla mniejszych prędkości odkształcania.

5.1.2. Badania brązu krzemowego CuSi_{3,5} w temperaturze 600 °C

W temperaturze 600 °C, zarówno dla monotonicznych procesów skręcania (rys. 5.1.2.1) jak i rozciągania (rys. 5.1.2.2) po początkowym wzroście naprężenia, następuje osłabienie materiału spowodowane procesem rekrytalizacji dynamicznej.



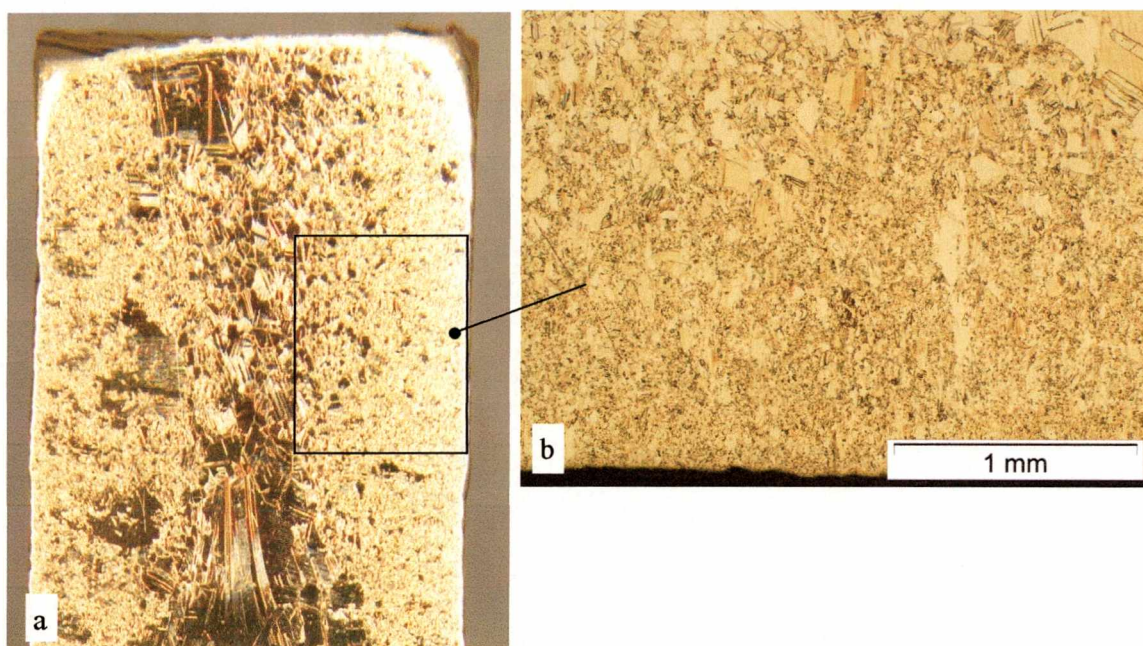
Rys. 5.1.2.1. Przebiegi naprężenia zastępczego w próbie monotonicznego skręcania dla brązu krzemowego CuSi 3,5 przy różnych prędkości odkształcania w temperaturze 600 °C



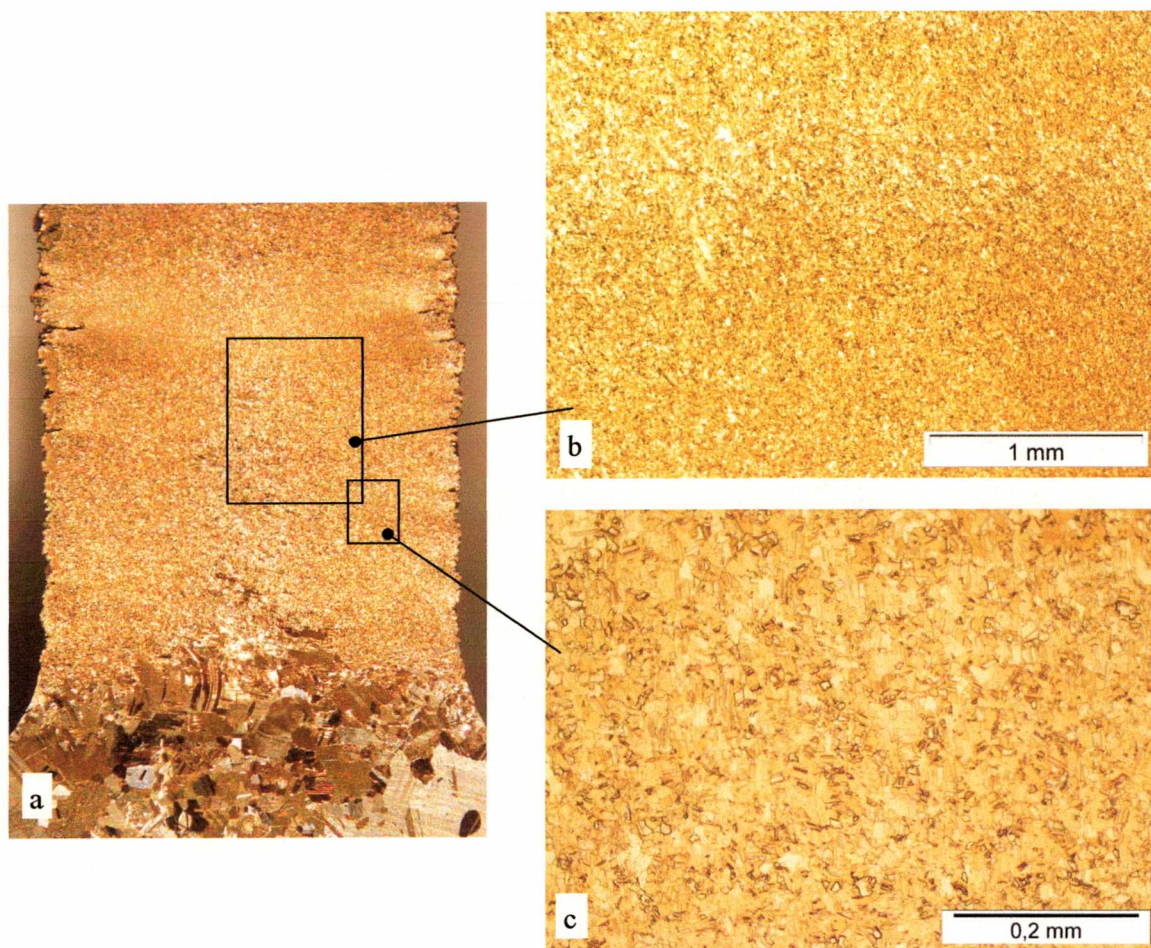
Rys. 5.1.2.2. Przebiegi naprężenia zastępczego w próbie monotonicznego rozciągania dla brązu krzemowego CuSi 3,5 przy różnych prędkości odkształcania w temperaturze 600 °C

W procesie skręcania monotonicznego naprężenie zastępcze szybko osiąga wartość maksymalną, po czym następuje jego spadek. Dla największej zastosowanej prędkości odkształcania 1 s^{-1} , naprężenie nie osiąga stanu stabilnego płynięcia plastycznego, gdyż wcześniej następuje zniszczenie próbki. Dla dwóch mniejszych prędkości odkształcania zostaje osiągnięty stan stabilnego płynięcia plastycznego, przy czym dla najmniejszej zastosowanej prędkości odkształcania $0,01\text{ s}^{-1}$, osiągnięto bardzo duże odkształcenie graniczne.

Strukturę brązu krzemowego $\text{CuSi}_{3,5}$ uzyskaną podczas skręcania monotonicznego w temperaturze $600\text{ }^{\circ}\text{C}$, w zakresie odkształceń leżących pomiędzy odkształceniem krytycznym, a odkształceniem początku ustalonego płynięcia plastycznego, przedstawiono na rys. 5.1.2.3. Jak widać z tego rysunku, rekrytalizacja dynamiczna zaszła głównie w bardziej odkształconych obszarach materiału, tzn. w warstwach zewnętrznych próbki. Na rys. 5.1.2.4. widoczna jest natomiast struktura po odkształceniu leżącym w obszarze ustalonego płynięcia plastycznego. W tym przypadku rekrytalizacja dynamiczna obejmuje wszystkie obszary próbki.

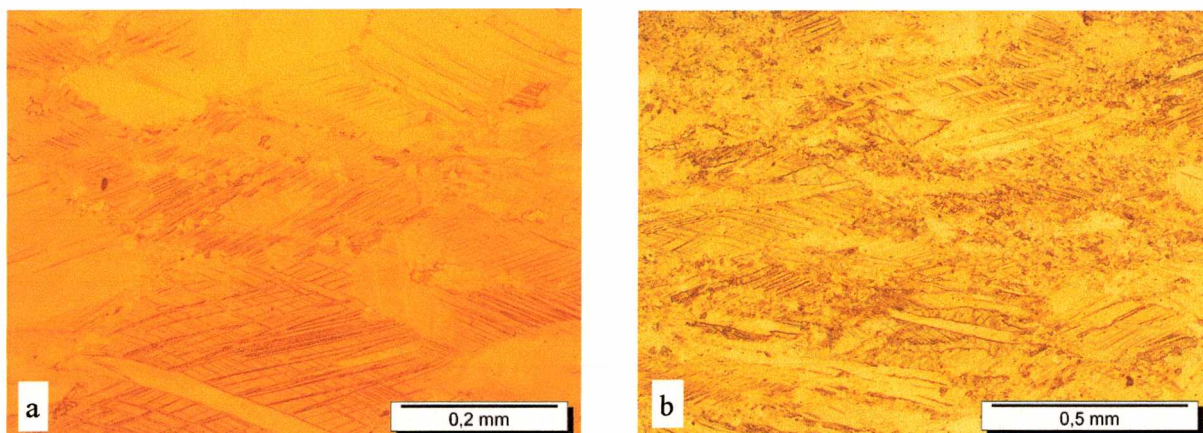


Rys. 5.1.2.3. Struktury brązu krzemowego $\text{CuSi}_{3,5}$, odkształconego w próbie skręcania w temperaturze $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $\varepsilon_{pz} = 1,2$ z prędkością odkształcania $0,1\text{ s}^{-1}$: a) widok całej odkształconej próbki, b) struktura w odległości $2/3$ promienia próbki od jej osi



Rys. 5.1.2.4. Struktury brązu krzemowego CuSi 3,5, odkształconego w próbie skręcania w temperaturze 600 °C do $\epsilon_{pz} = 3$ z prędkością odkształcania $0,1 s^{-1}$: a) widok całej odkształconej próbki, b) struktura wewnętrznych warstw odkształconej próbki, c) struktura w pełni zrekrystalizowana dynamicznie w odległości 2/3 promienia próbki od jej osi

Podczas rozciągania monotonicznego procesy rekrytalizacji dynamicznej nie zachodzą tak intensywnie jak w próbach skręcania, gdyż w wyniku pojawienia się lokalizacji odkształcenia, dochodzi do szybkiego zniszczenia badanego materiału, przez co uzyskuje się odkształcenie graniczne nie wiele większe od odkształceń odpowiadających odkształceniu krytycznemu, koniecznemu do zapoczątkowania rekrytalizacji dynamicznej. Na rys. 5.1.2.5. widoczna jest struktura brązu CuSi 3,5 uzyskana podczas rozciągania monotonicznego w temperaturze 600 °C. W zakresie odkształceń krytycznych widoczne są nieliczne obszary, w których pojawiają się zarodki rekrytalizacji dynamicznej na granicach ziaren (rys. 5.1.2.5a), natomiast dla odkształceń większych, ilość obszarów zrekrystalizowanych dynamicznie, znacznie zwiększa się (rys. 5.1.2.5b).



Rys. 5.1.2.5. Struktury brązu krzemowego CuSi 3,5, odkształconego w próbie rozciągania w temperaturze 600 °C z prędkością odkształcania $0,1 \text{ s}^{-1}$: a) po odkształceniu $\varepsilon_{pz} = 0,3$, b) po odkształceniu do $\varepsilon_{pz} = 0,45$

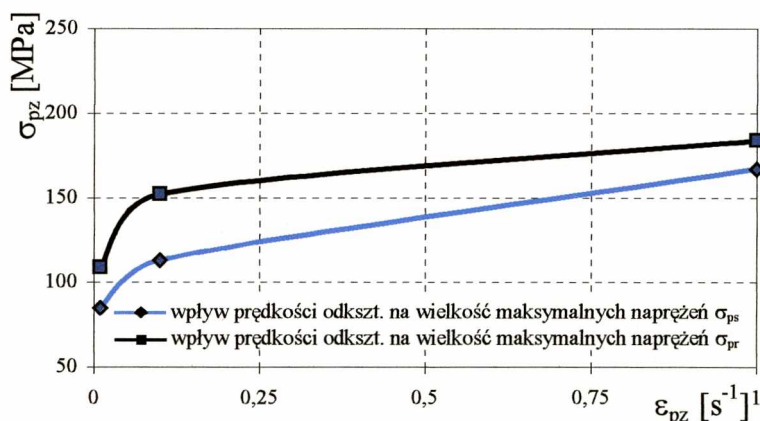
W temperaturze 600 °C, zarówno w próbie skręcania jak i rozciągania, w zakresie zastosowanych prędkości odkształcania od $0,01 \text{ s}^{-1}$ do 1 s^{-1} zaobserwowano wyraźny wpływ prędkości odkształcania na maksymalne naprężenia zastępcze (rys 5.1.2.6). Współczynnik czułości na prędkość odkształcania został wyznaczony ze wzoru

$$m = \frac{\ln \frac{\sigma_1}{\sigma_{0,01}}}{\ln \frac{\dot{\varepsilon}_1}{\dot{\varepsilon}_{0,01}}} \quad (5.1.2.1)$$

gdzie: σ_1 – naprężenie uplastyczniające dla prędkości odkształcania $\dot{\varepsilon}_1 = 1 \text{ s}^{-1}$

$\sigma_{0,01}$ – naprężenie uplastyczniające dla prędkości odkształcania $\dot{\varepsilon}_{0,01} = 0,01 \text{ s}^{-1}$

Dla obu sposobów odkształcania otrzymano podobny współczynnik czułości na prędkość odkształcania, dla próby rozciągania wynosi on $m_r = 0,122$ natomiast dla próby skręcania $m_s = 0,12$.

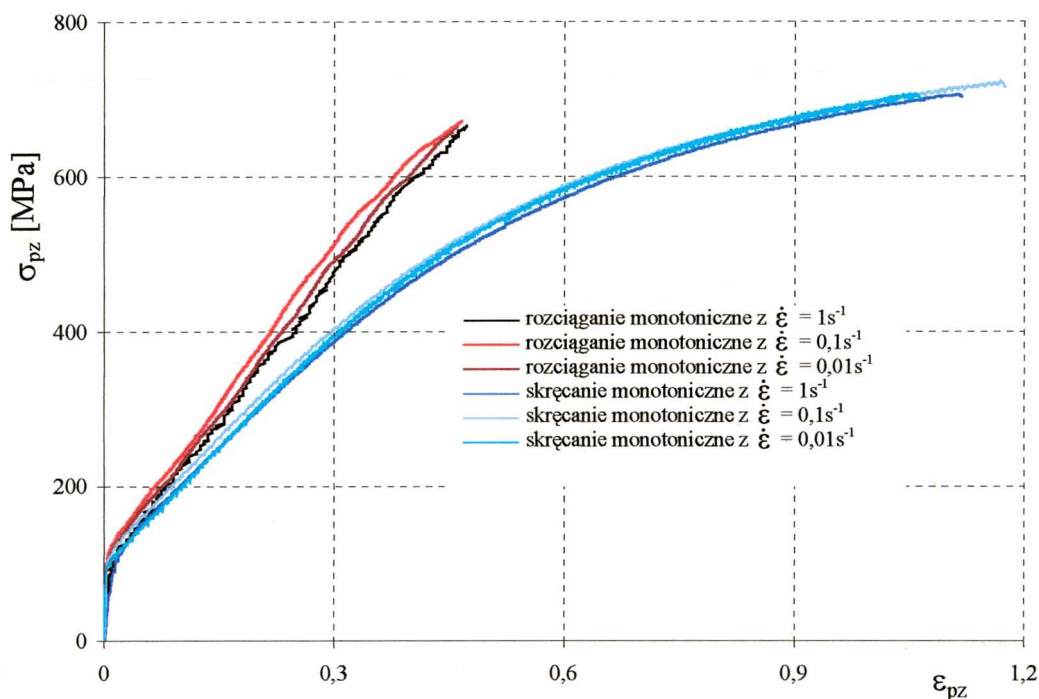


Rys. 5.1.2.6. Wpływ prędkości odkształcania na maksymalne naprężenie zastępcze w próbach monotonicznego skręcania i rozciągania w temperaturze 600 °C dla brązu krzemowego CuSi3,5

5.2. Brąz aluminiowy CuAl8

5.2.1. Badania brązu aluminiowego CuAl8 w temperaturze pokojowej

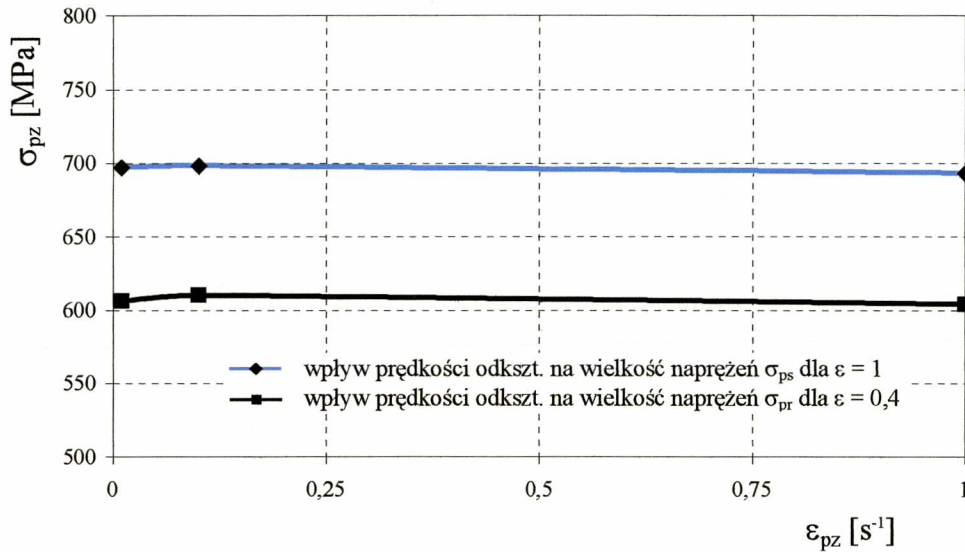
Na rys. 5.2.1.1 przedstawiono przebiegi naprężenia zastępczego w funkcji odkształcenia dla brązu aluminiowego CuAl8 w zależności od prędkości odkształcania uzyskane w monotonicznych próbach skrzywania i rozciągania w temperaturze otoczenia.



Rys. 5.2.1.1. Przebiegi naprężenia zastępczego otrzymane w próbach monotonicznego skrzywania i rozciągania dla różnych prędkości odkształcania dla brązu aluminiowego CuAl8 w temperaturze otoczenia

Zarówno w próbie skrzywania jak i rozciągania w temperaturze otoczenia w zakresie prędkości odkształcania od $0,01 \text{ s}^{-1}$ do $0,1 \text{ s}^{-1}$ zaobserwowano niewielki dodatni wpływ prędkości odkształcania na naprężenia uplastyczniające. Jedynie w próbie skrzywania, dla prędkości odkształcania 1 s^{-1} , uzyskano nieznacznie niższe naprężenie niż dla mniejszych zastosowanych prędkości odkształcania rys 5.2.1.2.

Podobnie jak w przypadku prób przeprowadzanych dla brązu krzemowego CuSi3,5, spadek naprężenia dla prób wykonanych z prędkością 1 s^{-1} , jest spowodowany niedużym wzrostem temperatury próbki w wyniku zmiany pracy odkształcania plastycznego na ciepło. Można, więc przypuszczać, że dla warunków izotermicznych, poziom naprężenia dla prędkości odkształcania 1 s^{-1} , byłby bardzo zbliżony do poziomu naprężenia uzyskanego dla mniejszych prędkości odkształcania.



Rys. 5.2.1.2. Wpływ prędkości odkształcania na naprężenie zastępcze w próbie monotonicznego skręcania i rozciągania w temperaturze otoczenia dla brązu aluminiowego CuAl8

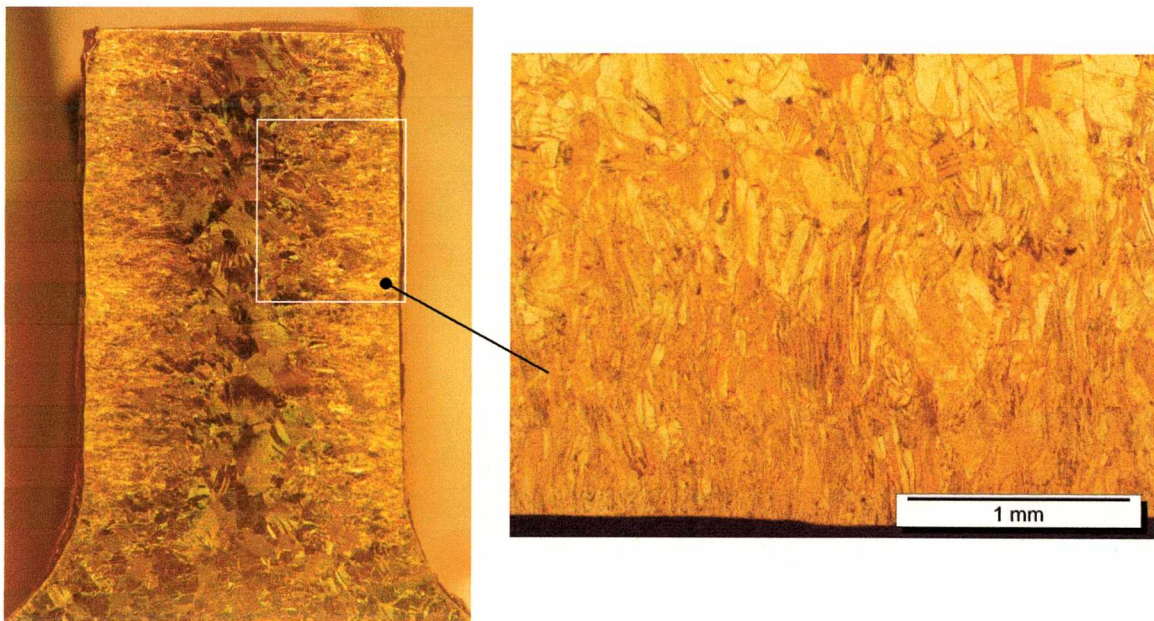
W zastosowanych warunkach odkształcania, brąz aluminiowy CuAl8, podobnie jak brąz krzemowy CuSi3,5 charakteryzuje się wyraźnym umocnieniem oraz brakiem stanu nasycenia, gdyż wcześniej próbki, w wyniku lokalizacji odkształcenia, ulegają zniszczeniu.

Wartości naprężenia zastępczego odpowiadające granicy plastyczności w próbie monotonicznego rozciągania i skręcania dla badanego materiału są bardzo zbliżone. Natomiast wraz ze wzrostem odkształcenia, naprężenie zastępcze w próbie rozciągania znacznie szybciej się zwiększa niż w próbie monotonicznego skręcania. Dla odkształcenia 0,3 różnica między naprężeniami zastępczymi wyznaczonym w obu próbach wynosi, już około 100 MPa i zwiększa się wraz z dalszym wzrostem odkształcenia. Trudno przypuszczać, aby występujące różnice w naprężeniach były wynikiem błędnej metodyki wyznaczania naprężenia zastępczego. W próbie rozciągania w zakresie odkształceń równomiernych, do maksimum siły, naprężenie zastępcze można poprawnie wyznaczyć ze wzoru 4.2.4 niezależnie od warunków odkształcania. W próbie skręcania natomiast występuje duża niejednorodność odkształceń i prędkości odkształcania na promieniu próbki, która może utrudniać poprawne wyznaczenie naprężenia zastępczego. Jednakże w temperaturze otoczenia można przyjąć, że równania 4.2.2 i 4.2.3 poprawnie wyznaczają naprężenie w próbie skręcania, gdyż w tych warunkach współczynnik umocnienia n – jest w przybliżeniu stały dla całego zakresu odkształceń oraz materiał wykazuje bardzo niewielką czułość na prędkość odkształcania. Sytuacja zmienia się w warunkach obróbki plastycznej na gorąco, kiedy

współczynniki m i n zmieniają się wraz z odkształceniem i stosowanie równań 4.2.2 i 4.2.3 jest obarczone pewnym błędem.

Różnice w poziomie naprężeń w próbie skręcania i rozciągania w temperaturze otoczenia należy, więc tłumaczyć prawdopodobnie, wpływem schematu odkształcania na stopień umocnienia materiału. Ponieważ rozciąganie prowadzi do aktywacji większej liczby systemów poślizgu w porównaniu do skręcania, można przypuszczać, że podczas procesu rozciągania brązu aluminiowego CuAl8, szybciej dochodzi do umocnienia materiału. Schemat odkształcania ma również wpływ na odkształcenia graniczne. W próbie skręcania uzyskano około 2,5 razy większe odkształcenia niż w próbie rozciągania.

Monotoniczne skręcanie brązu aluminiowego CuAl8 w temperaturze pokojowej, powoduje dużą deformację ziaren zwłaszcza w warstwach zewnętrznych próbki (rys. 5.2.1.3). Podobnie jak dla brązu krzemowego CuSi3,5, przyjęto, że najbardziej reprezentatywny dla badań strukturalnych, jest obszar leżący w odległości $2/3$ promienia od osi próbki.



Rys. 5.2.1.3. Struktura brązu CuAl8 odkształconego w monotonicznej próbie skręcania w temperaturze pokojowej z prędkością $0,1 \text{ s}^{-1}$ dla $\varepsilon_{pz} = 1,1$

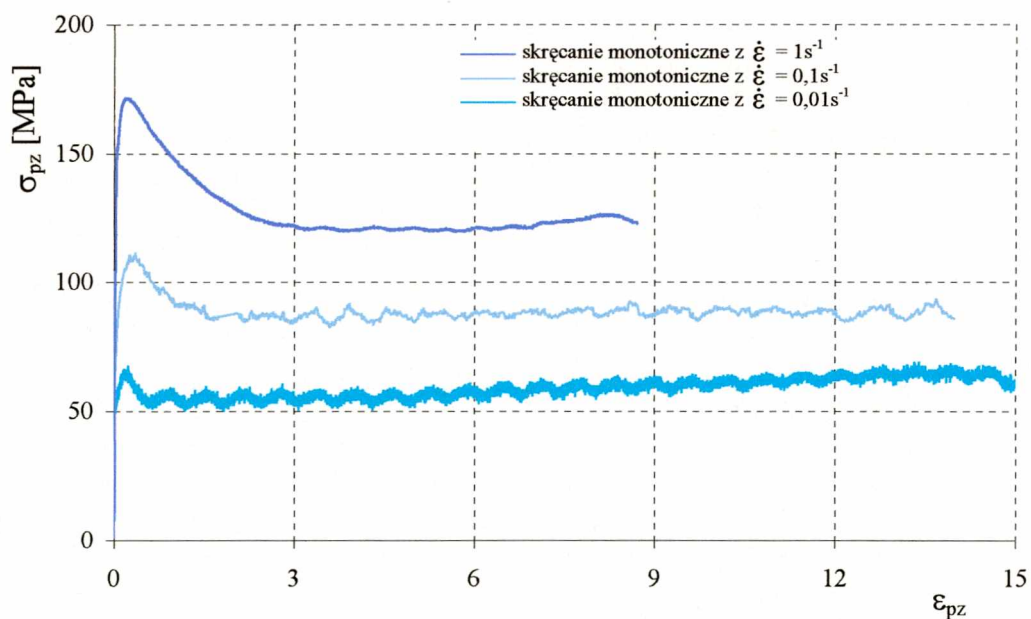
Na rys. 5.2.1.4. przedstawiono struktury brązu aluminiowego CuAl8 po monotonicznym rozciąganiu. Deformacja struktury nie jest tak duża jak w przypadku skręcania monotonicznego, gdyż podczas rozciągania dochodzi do wcześniejszej lokalizacji odkształcenia, przez co, uzyskuje się o wiele mniejsze odkształcenie niż w przypadku skręcania monotonicznego.



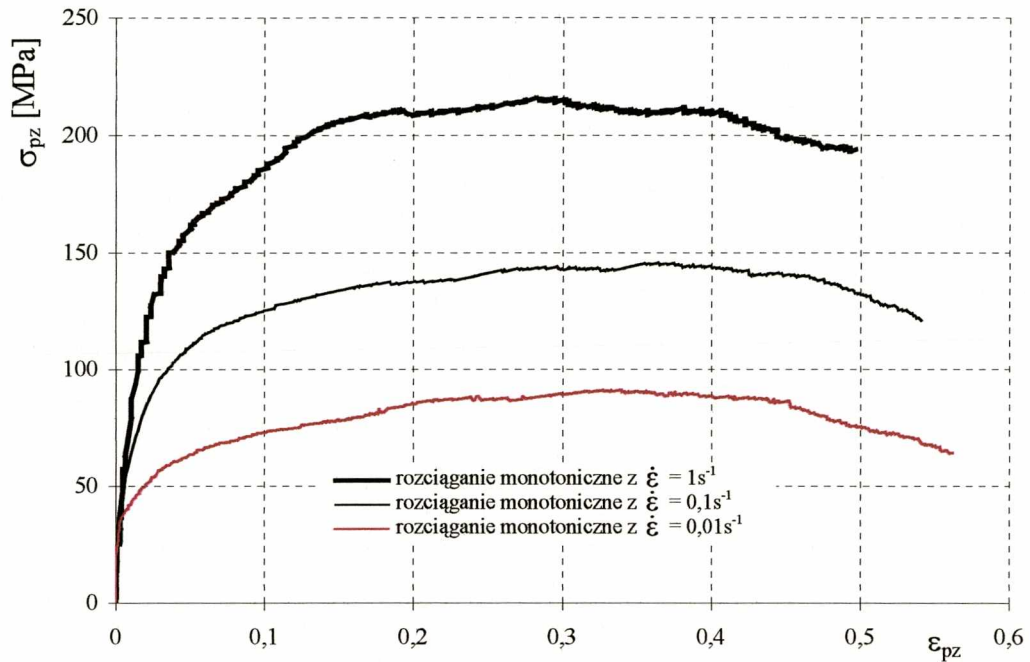
Rys. 5.2.1.4. Struktura brązu CuAl8 odkształconego w monotonicznej próbie rozciągania w temperaturze pokojowej z prędkością $0,1 \text{ s}^{-1}$ dla $\epsilon_{pz} = 0,48$

5.2.2. Badania brązu aluminium CuAl8 w temperaturze $650 \text{ }^{\circ}\text{C}$

W temperaturze $650 \text{ }^{\circ}\text{C}$, zarówno dla monotonicznych procesów skręcania (rys. 5.2.2.1) jak i rozciągania (rys. 5.2.2.2) po początkowym wzroście naprężenia, następuje osłabienie materiału spowodowane procesem rekrytalizacji dynamicznej.

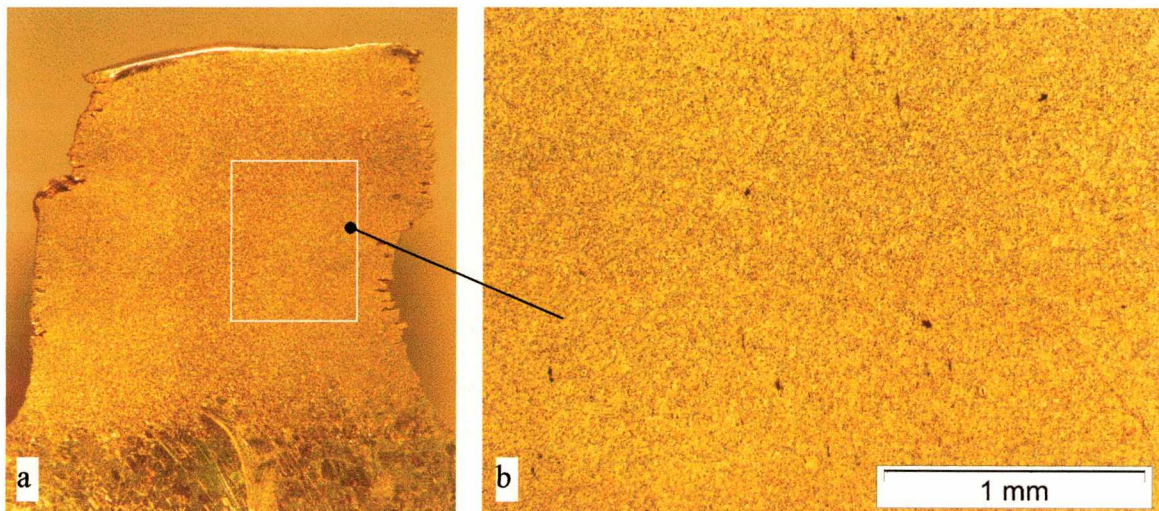


Rys. 5.2.2.1. Przebiegi naprężenia zastępczego w próbie monotonicznego skręcania dla brązu aluminium CuAl8 przy różnych prędkości odkształcania w temperaturze $650 \text{ }^{\circ}\text{C}$



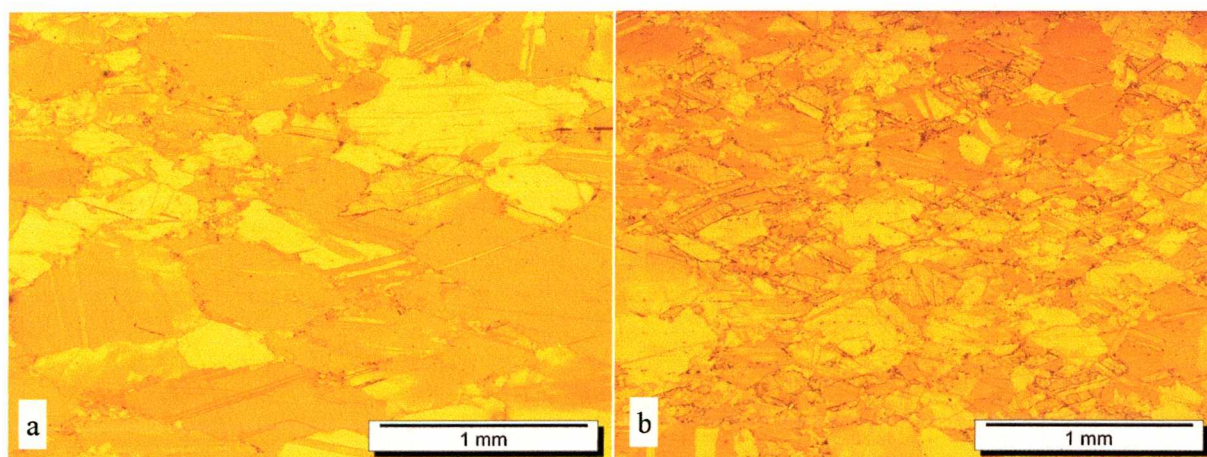
Rys. 5.2.2.2. Przebiegi naprężenia zastępczego w próbie monotonicznego rozciągania dla brązu aluminiowego CuAl8 przy różnych prędkości odkształcania w temperaturze 650 °C

W procesie skręcania monotonicznego naprężenie zastępcze szybko osiąga wartość maksymalną, po czym następuje jego spadek. Strukturę brązu aluminiowego CuAl8 uzyskaną podczas skręcania monotonicznego w temperaturze 650 °C, w zakresie odkształceń odpowiadających ustalonemu płynięciu plastycznemu przedstawiono na rys. 5.2.2.3. W próbie tej w całej objętości próbki zaszedł proces rekrytalizacji dynamicznej.

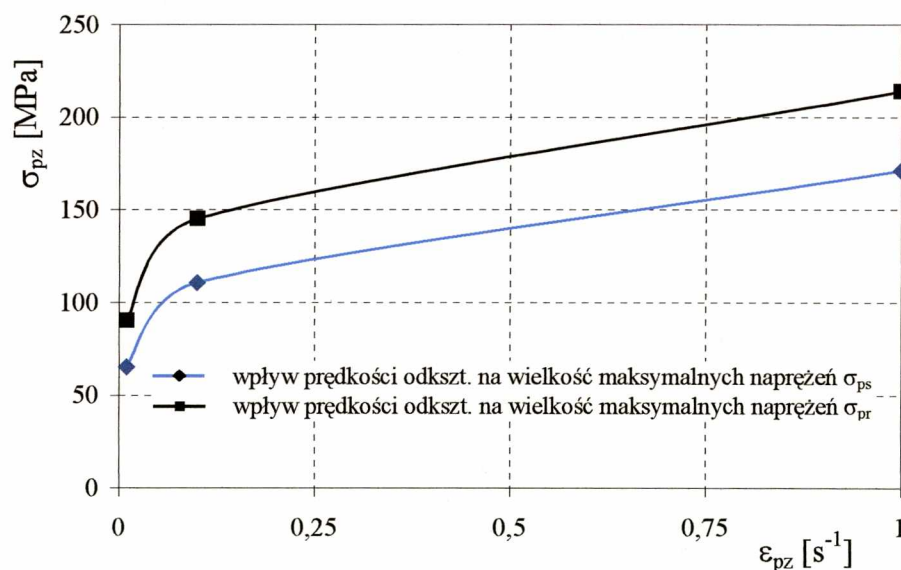


Rys. 5.2.2.3. Struktura brązu CuAl8 skręcanego monotonicznie w temperaturze 650°C z prędkością $0.1 s^{-1}$ dla $\epsilon_{pz} = 6$, a) widok odkształconej próbki, b) struktura w odległości 2/3 promienia od jej osi

Podczas rozciągania monotonicznego procesy rekrytalizacji dynamicznej nie zachodzą tak intensywnie jak w próbie skręcania, gdyż w wyniku pojawienia się lokalizacji odkształcenia, dochodzi do szybkiego zniszczenia badanego materiału, przez co uzyskuje się odkształcenie graniczne niewiele większe od odkształceń odpowiadających odkształceniu krytycznemu, koniecznemu do zapoczątkowania rekrytalizacji dynamicznej. W zakresie odkształceń zbliżonych do odkształcenia krytycznego, widoczne są nieliczne obszary, w których pojawiają się zarodki rekrytalizacji dynamicznej, głównie na granicach ziaren (rys. 5.2.2.4a). Natomiast dla odkształceń większych proces rekrytalizacji przebiega również wewnątrz ziaren (rys. 5.2.2.4b).



Rys. 5.2.2.4. Struktura brązu CuAl8 rozciąganego monotonicznie w temperaturze 650°C z prędkością 0,1 s⁻¹ o odkształcenia: a) $\epsilon_{pz} = 0,35$ b) $\epsilon_{pz} = 0,5$



Rys. 5.2.2.5. Wpływ prędkości odkształcania na maksymalne naprężenie zastępcze w próbach monotonicznego skręcania i rozciągania w temperaturze 650 °C dla brązu aluminowego CuAl8

W temperaturze 650 °C, zarówno w próbie skręcania jak i rozciągania, w zakresie zastosowanych prędkości odkształcania od 0,01 s⁻¹ do 1 s⁻¹ zaobserwowano wyraźny wpływ prędkości odkształcania na naprężenia zastępcze (rys 5.2.2.5). Współczynniki czułości na prędkość odkształcania wyznaczone z równania (5.1.2.1), dla maksymalnych naprężeń, są bardzo podobne dla obu prób monotonicznego odkształcania i wynoszą odpowiednio dla próby rozciągania $m_r = 0,188$ oraz dla próby skręcania $m_s = 0,202$.

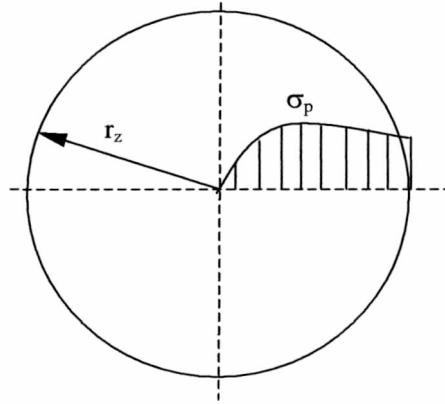
Podsumowanie wyników uzyskanych podczas monotonicznego odkształcania

W temperaturze otoczenia szczególnie dla brązu krzemowego CuSi3,5 uzyskano zbliżone przebiegi naprężenia zastępczego w próbie monotonicznego skręcania i rozciągania, Natomiast w przypadku brązu aluminiowego CuAl8 podobne przebiegi naprężenia uplastyczniające uzyskuje się do odkształcenia około 0,2 dalszy wzrost odkształcenia prowadzi do znacznie szybszego umocnienia w próbie rozciągania niż w próbie monotonicznego skręcania. Różnica pomiędzy naprężeniami uplastyczniającymi uzyskanym w próbie skręcania i rozciągania brązu aluminiowego CuAl8 dla odkształcenia 0,4 wynosi już około 150 MPa.

W warunkach obróbki plastycznej na gorąco, w próbie monotonicznego rozciągania uzyskano, dla obu badanych materiałów, znacznie większe maksymalne naprężenie uplastyczniające niż w próbie monotonicznego skręcania. Różnice te wynikają z niedoskonałości zastosowanych metod wyznaczania naprężeń i odkształceń zastępczych oraz wpływu sposobu odkształcenia na lokalizację odkształcenia w temperaturach obróbki plastycznej na gorąco. W przypadku skręcania próbek CuSi3,5 w temperaturze 600 °C, jak i CuAl8 w temperaturze 650 °C, w zakresie dużych odkształceń plastycznych w warstwach zewnętrznych próbki, w których odkształcenie jest największe, występuje osłabienie, a w warstwach bliższych osi próbki, w których odkształcenia są mniejsze, materiał nadal się jeszcze umacnia (rys. 5.2.2.6). Wówczas o wartości momentu skręcającego w istotnym stopniu decydują naprężenia pochodzące od warstw wewnętrznych. Aby równanie (4.2.2), z którego wyznaczano naprężenie zastępcze w próbie skręcania uwzględniało tę sytuację współczynniki m i n w tym równaniu powinny mieć różne wartości dla każdego odkształcenia. Ponieważ poprawne wyznaczenie tych współczynników jest praktycznie niemożliwe, na ogół przyjmuje się mniejsze wartości niż są w rzeczywistości, co prowadzi do obniżenia naprężenia zastępczego wyznaczonego w próbie skręcania.

W próbie rozciągania również szybciej dochodzi do lokalizacji odkształcenia niż w próbie skręcania. Powoduje to, że w materiale rozciągany nie gromadzi się wystarczająca

ilość energii, aby rekryształizacja zaszła w całej objętości materiału. Natomiast w próbie skręcania, w której odkształcenia są większe, w materiale akumuluje się wystarczająca ilość energii, aby rekryształizacja dynamiczna zaszła w całej jego objętości. W wyniku intensywnej rekryształizacji dynamicznej w próbie skręcania uzyskujemy mniejsze napężenie uplastyczniające i większe odkształcenie graniczne niż w próbie rozciągania.



Rys. 5.2.2.6. Rozkład napężenia wzdłuż promienia dla próbki, w której występuje osłabienie w warstwach zewnętrznych

6. WYNIKI BADAŃ W PRÓBACH ZŁOŻONYCH I ICH OMÓWIENIE

W złożonych schematach odkształcania dużym problemem jest poprawne wyznaczenie naprężeń zastępczych dla różnych złożonych sposobów odkształcania oraz określenie wzajemnego wpływu naprężeń pochodzących od składowych złożonego obciążenia. Dlatego pierwsze badania wpływu złożonej drogi odkształcania na naprężenie zastępcze, odkształcenie graniczne i strukturę przeprowadzono dla brązu krzemowego CuSi3,5 w temperaturze otoczenia. Założono, że w przypadku materiału, dla którego uzyskano podobne przebiegi naprężenia zastępczego w próbie monotonicznego skręcania i rozciągania analiza takich badań będzie bardziej wiarygodna.

6.1. Brąz krzemowy CuSi3,5

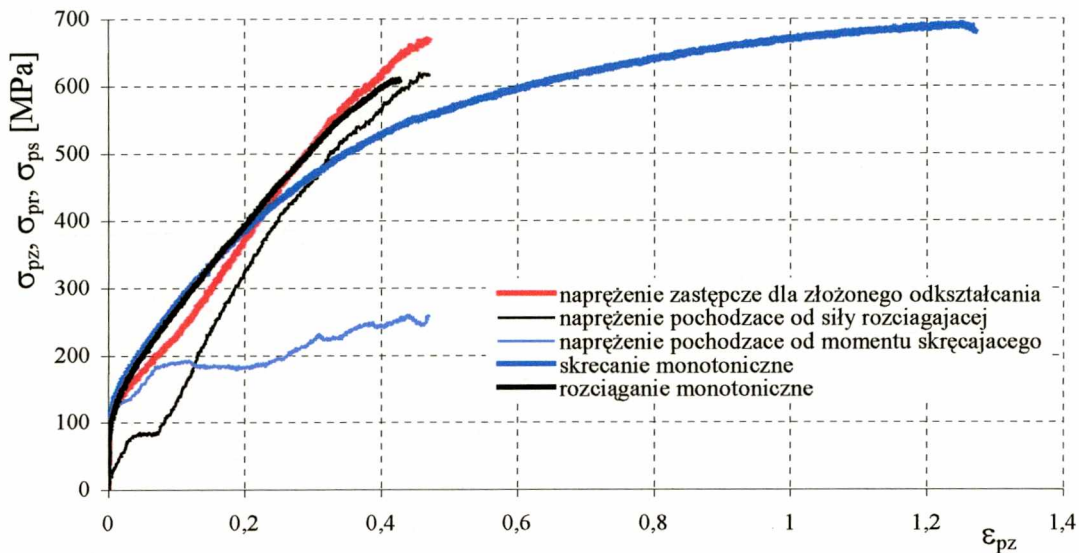
6.1.1. Badania brązu krzemowego CuSi3,5 w temperaturze otoczenia

W pracy przeprowadzono badania różnych schematów odkształcania złożonego na naprężenie uplastyczniające, odkształcenia graniczne i strukturę brązu krzemowego CuSi3,5 w temperaturze otoczenia.

Procesy jednoczesnego odkształcania brązu krzemowego CuSi3,5 momentem skręcającym i siłą rozciągającą w temperaturze pokojowej

Pierwsze eksperymenty badania złożonych dróg odkształcania dotyczyły jednoczesnego skręcania i rozciągania badanego materiału. Na rys. 6.1.1.1 przedstawiono przebieg naprężenia zastępczego σ_{pz} oraz przebiegi naprężenia pochodzące od siły rozciągającej σ_{pr} i momentu skręcającego σ_{ps} w funkcji odkształcenia zastępczego ε_{pz} dla temperatury otoczenia. Prędkość odkształcania pochodząca zarówno od momentu skręcającego jak i siły rozciągającej wynosiła $0,01s^{-1}$, co daje zastępczą prędkość odkształcania równą $0,014s^{-1}$. Wszystkie obliczenia przeprowadzono zgodnie z wzorami podanymi w rozdziale 4.2. W zakresie odkształceń mniejszych niż 0,13 naprężenie σ_{pr} pochodzące od siły rozciągającej leży znacznie poniżej naprężenia pochodzącego od momentu skręcającego σ_{ps} . Przy większych odkształceniach, wzajemne poziomy składowych naprężenia zastępczego ulegają zmianie. Naprężenie pochodzące od siły rozciągającej jest wtedy tylko o około 50 MPa mniejsze od naprężenia zastępczego. Natomiast naprężenie pochodzące od momentu skręcającego ma stosunkowo niewielką wartość w tym zakresie odkształceń. Przebieg naprężenia zastępczego uzyskany dla złożonej drogi odkształcania pokrywa się niemal

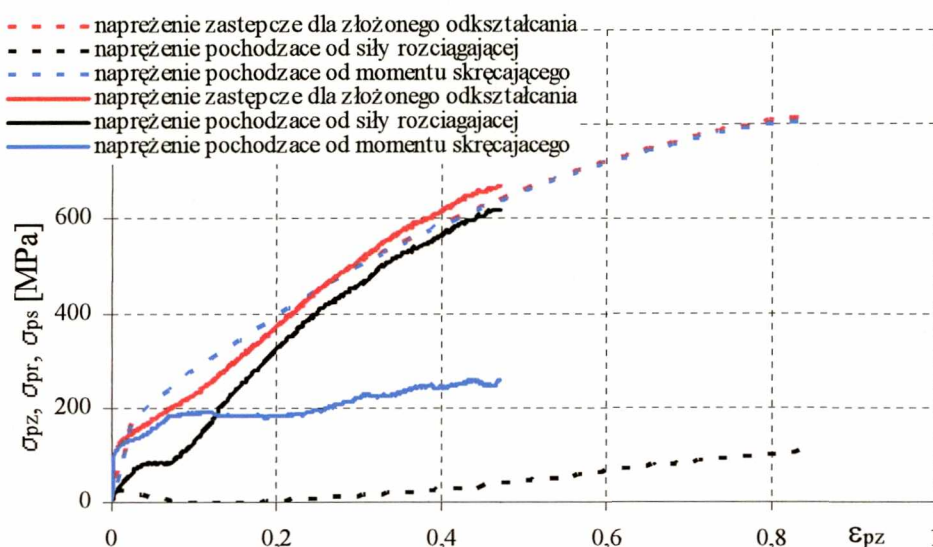
idealnie z przebiegiem dla próby monotonicznego rozciągania i nieznacznie różni się od przebiegu dla monotonicznego skręcania dla odkształceń większych od 0,35.



Rys. 6.1.1.1. Przebieg napężenia zastępczego oraz naprężeń pochodzących od siły rozciągającej i momentu skręcającego w funkcji odkształcenia zastępczego dla różnych procesów odkształcania przy prędkości odkształcania, pochodzącej od siły rozciągającej i momentu skręcającego, wynoszącej $0,01 \text{ s}^{-1}$ dla brązu krzemowego CuSi_{3,5} w temperaturze otoczenia

W celu zbadania, wpływu zmiany prędkości odkształcania na poziom naprężeń w omawianym sposobie odkształcania próbki, zwiększono prędkości odkształcania pochodzącej od momentu skręcającego z $0,01 \text{ s}^{-1}$ na $0,1 \text{ s}^{-1}$. Zmiana ta spowodowała bardzo duży wzrost naprężenia pochodzącego od momentu skręcającego oraz znaczne obniżenie naprężenia pochodzącego od siły rozciągającej (rys. 6.1.1.2). Naprężenie zastępcze natomiast nie uległo wyraźnej zmianie, pomimo że zastępcza prędkość odkształcania zwiększyła się z $0,014 \text{ s}^{-1}$ do $0,1005 \text{ s}^{-1}$. Potwierdza to zależność, przedstawioną na rys. 5.1.1.5, że brąz krzemowy CuSi_{3,5} w temperaturze pokojowej charakteryzuje się bardzo małą czułością na prędkość odkształcania. Stwierdzono również, że poprzez zmianę prędkości odkształceń pochodzących od jednej ze składowych obciążenia (w badaniach zmieniono prędkość odkształcania pochodzącą od momentu skręcającego) można wpływać na odkształcenia graniczne. Zwiększenie w odkształceniu zastępczym udziału odkształceń pochodzących od takiego sposobu odkształcania, które nie prowadzi do szybkiej lokalizacji odkształcenia, powoduje wzrost odkształcenia granicznego. W przypadku przedstawionych złożonych badań, procesem, który wolniej prowadzi do lokalizacji odkształcenia, jest proces skręcania, dlatego zwiększenie prędkości skręcania z $0,01 \text{ s}^{-1}$ do $0,1 \text{ s}^{-1}$ spowodowało zwiększenie udziału odkształceń pochodzących od skręcania w odkształceniu zastępczym. W ten sposób uzyskano

niemal dwukrotny wzrost odkształcenia granicznego. Przeprowadzone badania wykazały, że w przypadku, gdy nie zachodzą częste szybkie zmiany drogi odkształcenia, tak jak ma to miejsce na przykład podczas odkształcenia małowykłowego, to dla złożonych różnych sposobów jednoczesnego odkształcenia, uzyskuje się zbliżone przebiegi naprężenia zastępczego. W omawianych badaniach wykazano, że istnieje natomiast możliwość sterowania naprężeniami pochodzącymi od poszczególnych obciążeń poprzez zmianę prędkości odkształcenia wywołanego tymi obciążeniami. Zmiany te są zgodne z hipotezą Hubera-Misesa.

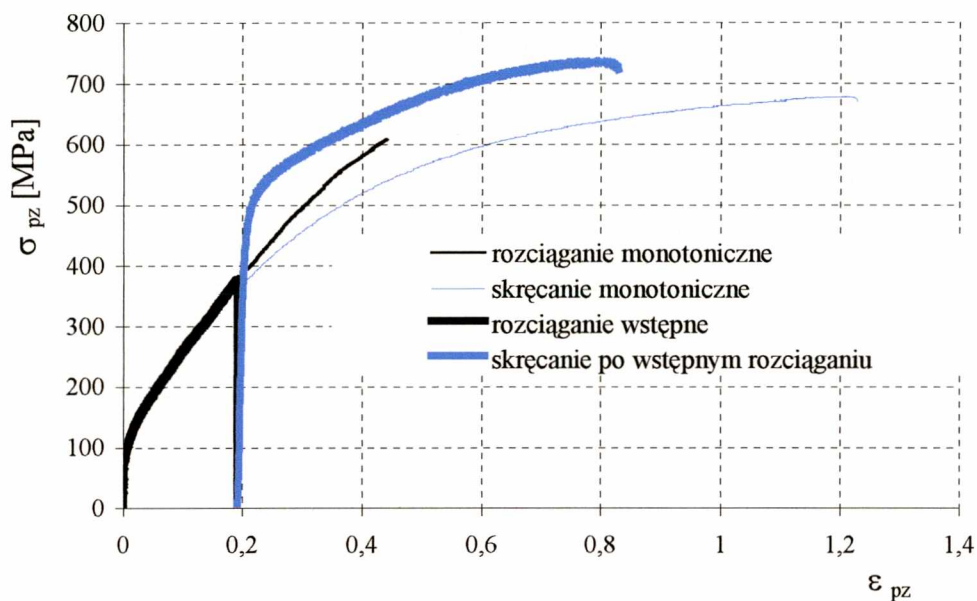


Rys. 6.1.1.2. Przebieg naprężenia zastępczego oraz naprężeń pochodzących od siły rozciągającej i momentu skręcającego w funkcji odkształcenia zastępczego dla złożonych procesów: linie ciągłe - prędkości odkształcenia pochodzące od siły rozciągającej i momentu skręcającego $0,01 \text{ s}^{-1}$, linie przerywane - prędkość rozciągania $0,01 \text{ s}^{-1}$ i skręcania $0,1 \text{ s}^{-1}$ dla brązu krzemowego CuSi3,5 w temperaturze otoczenia

Procesy sekwencyjnego odkształcenia brązu krzemowego CuSi3,5 momentem skręcającym i siłą rozciągającą w temperaturze pokojowej

Zgodnie z informacjami zawartymi w we wcześniejszym rozdziale, podczas jednoczesnego skręcania i rozciągania próbki nie występuje gwałtowna zmiana drogi odkształcenia, nie prowadzi to do zakłócania struktury dyslokacyjnej i taki proces nie intensyfikuje lokalizacji odkształcenia w pasmach ścinania a więc nie powinien prowadzić do osłabienia materiału poprzez wydłużenie swobodnej drogi ruchu dyslokacji. Dlatego w następnej kolejności przebadano zachowanie się materiału, gdy dochodzi do nagłej zmiany wektora prędkości przemieszczenia o kąt 90° . Przeprowadzono, więc eksperymenty sekwencyjnego odkształcenia próbki momentem skręcającym i siłą rozciągającą w temperaturze pokojowej. Na rys. 6.1.1.3 przedstawiono zależność pomiędzy naprężeniem

zastępczym a odkształceniem zastępczym dla próbki, która została wstępnie rozciągnięta do odkształcenia 0,2 a następnie skrzyta do zniszczenia. Na tym samym rysunku przedstawiono także, przebieg naprężenia dla monotonicznej próby skrzytania i rozciągania. Podczas skrzytania wstępnie rozciągniętej próbki, uzyskano znacznie wyższe naprężenie oraz mniejsze odkształcenie graniczne niż w próbie monotonicznego skrzytania. Sytuację tą należy tłumaczyć faktem, że rozciąganie próbki aktywuje więcej systemów poślizgu niż skrzytanie, co prowadzi do większego umocnienia materiału niż podczas skrzytania próbki. Zastanawiający jest fakt, że umocnienie to ujawnia się dopiero po zmianie drogi odkształcenia, do momentu tej zmiany naprężenie dla procesu rozciągania jest niemal na tym samym poziomie, co podczas próby monotonicznego skrzytania.



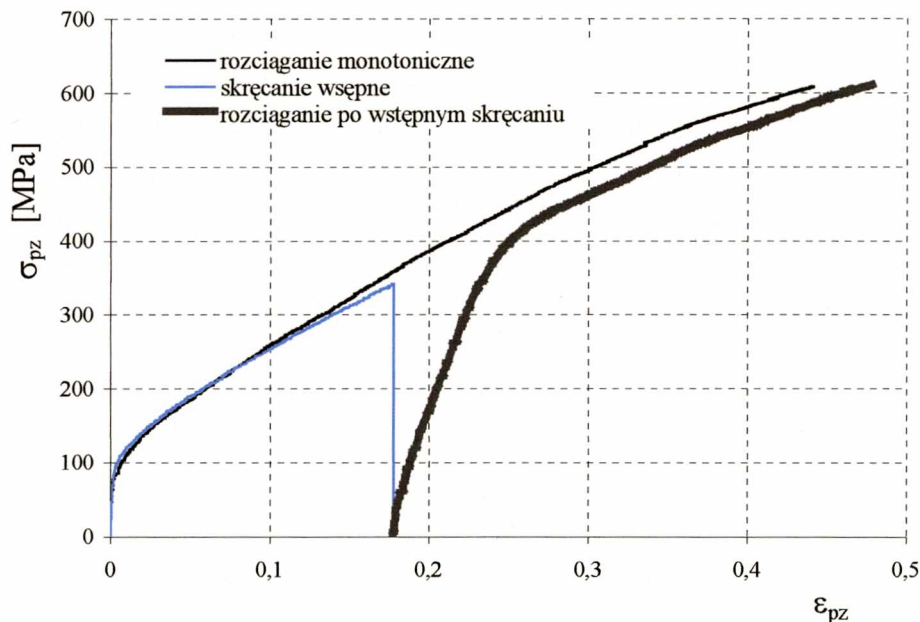
Rys. 6.1.1.3. Przebieg naprężenia zastępczego uzyskany w próbie skrzytania próbki wstępnie rozciągniętej do odkształcenia 0,2 na tle przebiegów naprężenia uzyskanych w próbach monotonicznych przy prędkościach odkształcenia wynoszących $0,1 \text{ s}^{-1}$ w temperaturze otoczenia dla brązu krzemowego CuSi3,5

W przypadku odwrotnym, gdy próbka jest wstępnie skrzyta, a następnie poddana rozciąganiu aż do pęknięcia, otrzymano niższe naprężenie zastępcze podczas rozciągania w porównaniu z naprężeniem zastępczym uzyskanym w monotonicznej próbie rozciągania (rys. 6.1.1.4). Zaobserwowano również, że podczas rozciągania próbki wstępnie odkształconej poprzez skrzytanie, otrzymano krzywą umocnienia, na której można wyróżnić dwa zakresy o różnym współczynniku umocnienia. W pierwszym zakresie, który występuje zaraz po zmianie drogi odkształcenia, zachodzi intensywne umacnianie się materiału, które świadczy o tym, że podczas wstępnego skrzytania materiał nie uległ silnemu umocnieniu

odkształceniowemu. Materiał w tym zakresie dąży do uzyskania podobnego stopnia umocnienia, jaki ma materiał monotonicznie rozciągany. Stan taki osiąga on po odkształceniu całkowitym wynoszącym około 0,28. Przy dalszym odkształceniu następuje zmniejszenie współczynnika umocnienia i staje się on zbliżony do współczynnika umocnienia w próbie monotonicznego rozciągania.

Pomimo szybkiego umocnienia się brązu krzemowego CuSi3,5 w pierwszym zakresie odkształceń naprężenia podczas wtórnego rozciągania jest nieznacznie mniejsze od wyznaczonego w próbie monotonicznego rozciągania. W złożonej sekwencyjnej próbie odkształcania uzyskano również nieznacznie większe odkształcenie graniczne niż w próbie monotonicznego rozciągania.

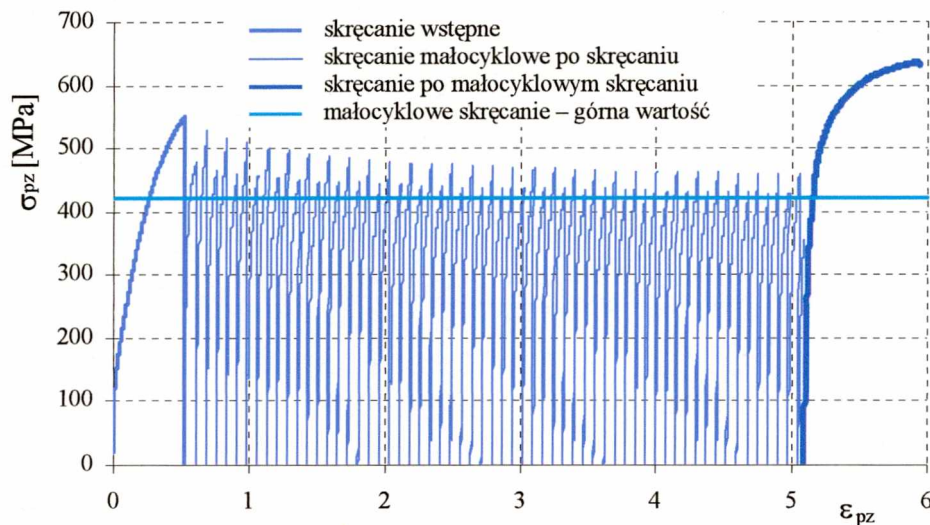
Przeprowadzone badania wykazały, że poprzez wprowadzenie nagłej zmiany wektora prędkości przemieszczenia można zmniejszyć lub zwiększyć naprężenia zastępcze, dlatego też dalsze badania dotyczyły wpływu dodatkowego małowykłowego skręcania na przebieg naprężenia zastępczego i odkształcenia granicznego w złożonych sposobach odkształcania.



Rys. 6.1.1.4. Przebieg naprężenia zastępczego uzyskany w próbie rozciągania próbki wstępnie skręconej do odkształcenia około 0,18 na tle przebiegu naprężenia uzyskanego w próbie monotonicznego rozciągania przy prędkościach odkształcania wynoszących $0,1 \text{ s}^{-1}$ w temperaturze otoczenia dla brązu krzemowego CuSi3,5

Procesy sekwencyjnego odkształcania brązu krzemowego CuSi3,5 cyklicznym momentem skręcającym i siłą rozciągającą lub momentem skręcającym w temperaturze pokojowej

W celu ustalenia wpływu małowykłowego skręcania na umocnienie wstępnie odkształconego materiału przeprowadzono następujące dwa eksperymenty. Pierwszy obejmowała wstępne skręcanie do odkształcenia wynoszącego 0,5, po którym następowało skręcanie małowykłowe z amplitudą 0,11 do odkształcenia 5,1 i ponowne skręcanie w tym samym kierunku, co w pierwszym etapie odkształcania, do zniszczenia próbki (rys. 6.1.1.5). Druga próba polegała na wstępnym rozciąganiu do odkształcenia plastycznego 0,2, po którym następowało skręcanie małowykłowe z amplitudą 0,11 do odkształcenia 5,6 i ponowne rozciąganie aż do zniszczenia próbki (rys. 6.1.1.6).

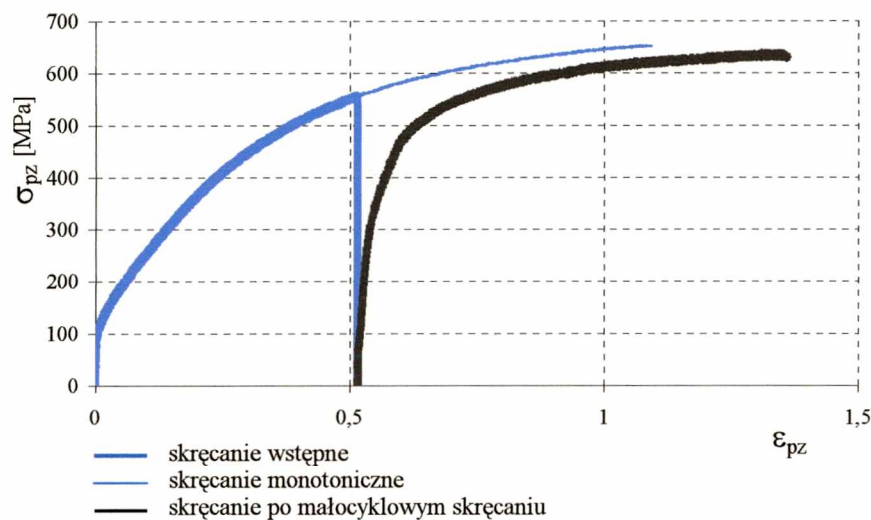


Rys. 6.1.1.5. Przebiegi naprężenia zastępczego uzyskanego podczas sekwencyjnego odkształcania obejmującego następujące procesy: wstępne monotoniczne skręcanie, małowykłowe skręcanie z amplitudą 0,11 oraz ponowne monotoniczne skręcanie w tym samym kierunku, co w pierwszym etapie odkształcania, na tle szczytowych wartości naprężeń uzyskanych w próbie małowykłowego skręcania realizowanego w całym zakresie odkształceń dla brązu krzemowego CuSi3,5 z prędkością odkształcania $0,1\text{ s}^{-1}$ w temperaturze otoczenia

Próbka wstępnie skręcona podczas odkształcania małowykłowego, w którym zmiana kierunku wektora prędkości przemieszczenie wynosi 180° charakteryzuje się wyraźnym efektem Bauchingera, oraz spadkiem naprężenia w kolejnych cyklach odkształcania. W wyniku tego spadku, naprężenie ulega obniżeniu z wartości 550 MPa w momencie zmiany kierunku odkształcania do 450 MPa po 25 cyklach skręcania. Podczas następnych cykli naprężenie to nie ulega już dalszemu obniżaniu. Osiągnięty poziom naprężenia odpowiada

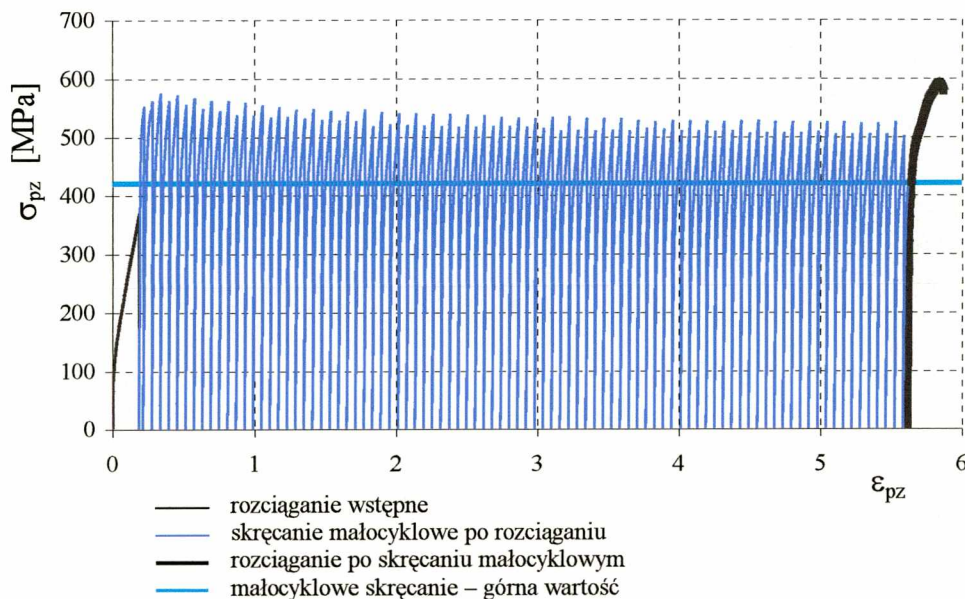
naprężeniu uzyskanemu podczas próby małowykłowego skręcania w całym zakresie odkształcania z taką samą amplitudą (Na rys. 6.1.1.5 linią poziomą zaznaczono szczytowe wartości naprężenia uzyskane w próbie małowykłowego skręcania próbki z amplitudą 0,11).

Na rys. 6.1.1.6 przedstawiono przebieg naprężenia z rys. 6.1.1.5 po wycięciu (tylko na wykresie) małowykłowego odkształcania na tle przebiegu naprężenia w próbie monotonicznego skręcania. Przebieg naprężenia, uzyskany po odkształcaniu małowykłowym, leży poniżej przebiegu uzyskanego dla monotonicznego skręcania w całym zakresie odkształceń, co potwierdza wcześniejsze spostrzeżenia, że odkształcanie małowykłowe prowadzi do osłabienia materiału.



Rys. 6.1.1.6. Przebieg z rys. 6.1.6.5 po wycięciu małowykłowego odkształcania na tle próby monotonicznego skręcania

Podczas drugiego eksperymentu zaobserwowano, że w momencie przejścia od wstępnego rozciągania do małowykłowego skręcania, następuje gwałtowny skok naprężenia uplastyczniającego o około 180 MPa, świadczący o tym, że podczas rozciągania nastąpiło intensywne umocnienie materiału (rys. 6.1.1.7). Podczas odkształcania małowykłowego, w kolejnych cyklach odkształcania, następuje obniżenie naprężenia uplastyczniającego, lecz spadek tego naprężenia nie jest tak duży, aby obniżyło się ono do poziomu naprężenia odpowiadającego naprężeniu uzyskanemu podczas cyklicznego skręcania o takiej samej amplitudzie od początku odkształcania (linia pozioma). Ponowne plastyczne rozciąganie rozpoczyna się od poziomu naprężenia uzyskanego w końcowym cyklu odkształcania małowykłowego. Podobnie jak w pierwszym eksperymencie, również w tym przypadku, zaobserwowano wystąpienie efektu Buschingera, jednak nie jest on tak wyraźny jak poprzednio.



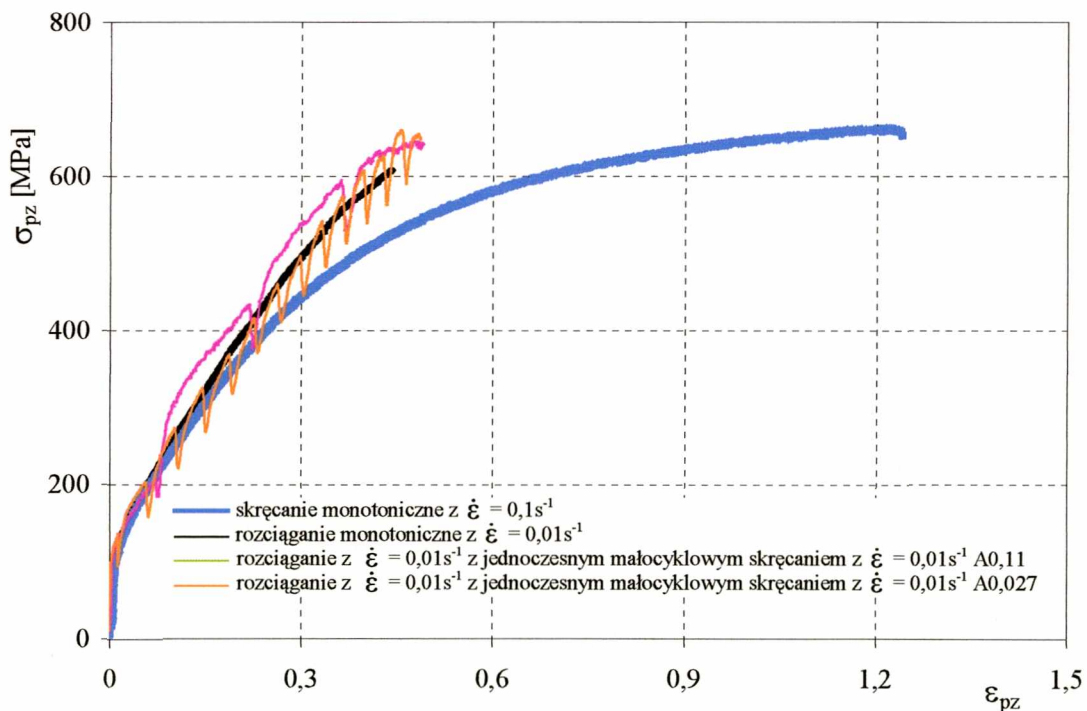
Rys. 6.1.1.7. Przebiegi naprężenia uplastyczniającego uzyskanego podczas sekwencyjnego odkształcania obejmującego następujące procesy: wstępne monotoniczne rozciąganie, małocyklowe skręcanie z amplitudą 0,11 oraz ponowne monotoniczne rozciąganie w temperaturze otoczenia na tle przebiegu naprężenia w monotonicznym rozciąganiu i małocyklowym odkształceniu w całym zakresie odkształceń dla brązu krzemowego CuSi_{3,5} z prędkością odkształcania 0,1 s⁻¹ w temperaturze otoczenia

Podsumowując przeprowadzone eksperymenty można stwierdzić, że w sekwencyjnym odkształcaniu dodatkowe odkształcanie małocyklowe prowadzi do osłabienia wstępnie odkształcanego materiału. Osłabienie to zależy silnie od rodzaju wstępnego odkształcenia. Dlatego w dalszej części pracy zajęto się badaniami nad równoczesnym rozciąganiem i skręcaniem małocyklowym próbki. Podczas tych badań realizowane są bardzo zbliżone drogi odkształcania, które wykorzystywane są w aplikacjach przemysłowych np. wyciskanie lub kucie metodą KOBO bądź w procesie ciągnięcia z obracającą się matrycą wokół własnej osi.

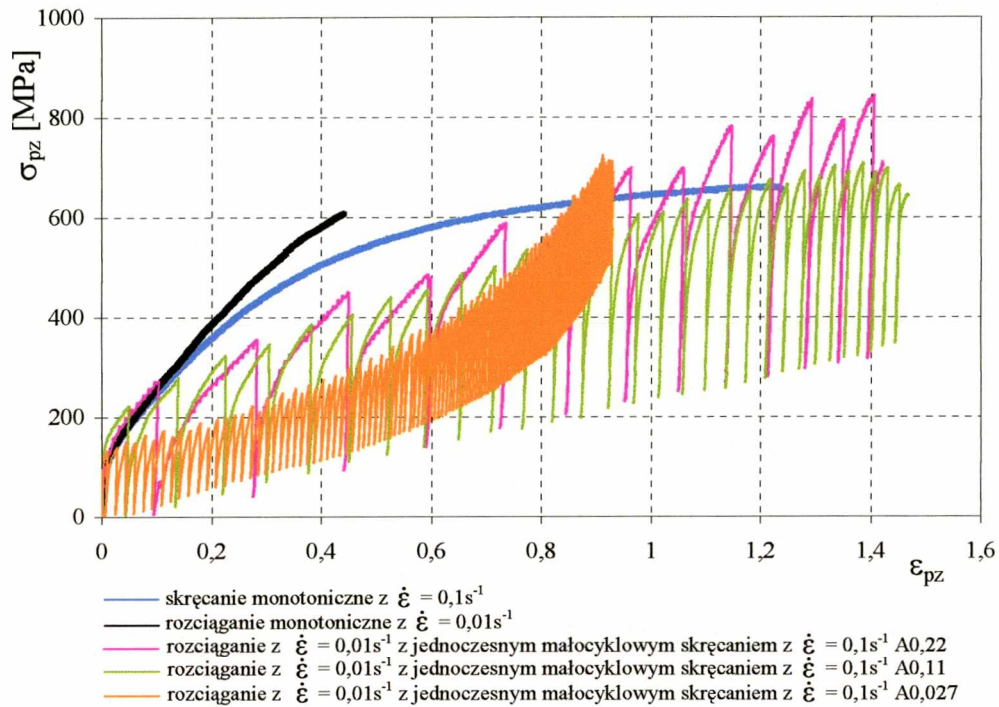
Proces jednoczesnego odkształcania brązu krzemowego CuSi_{3,5} oscylacyjnym momentem skręcającym i siłą rozciągającą w temperaturze pokojowej

Na rys. 6.1.1.8 - 6.1.1.10 przedstawiono przebiegi naprężenia zastępczego w funkcji odkształcenia zastępczego uzyskane w próbie jednoczesnego odkształcania próbki oscylacyjnym momentem skręcającym i siłą rozciągającą oraz przebiegi naprężenia dla monotonicznych prób skręcania i rozciągania w temperaturze pokojowej. W badaniach tych prędkość odkształcania pochodząca od siły rozciągającej była stała i wynosiła 0,01 s⁻¹, natomiast prędkość odkształcania pochodząca od momentu skręcającego zmieniana była w przedziale od 0,01 s⁻¹ do 1 s⁻¹. Z uzyskanych przebiegów wynika, że w przypadku, gdy

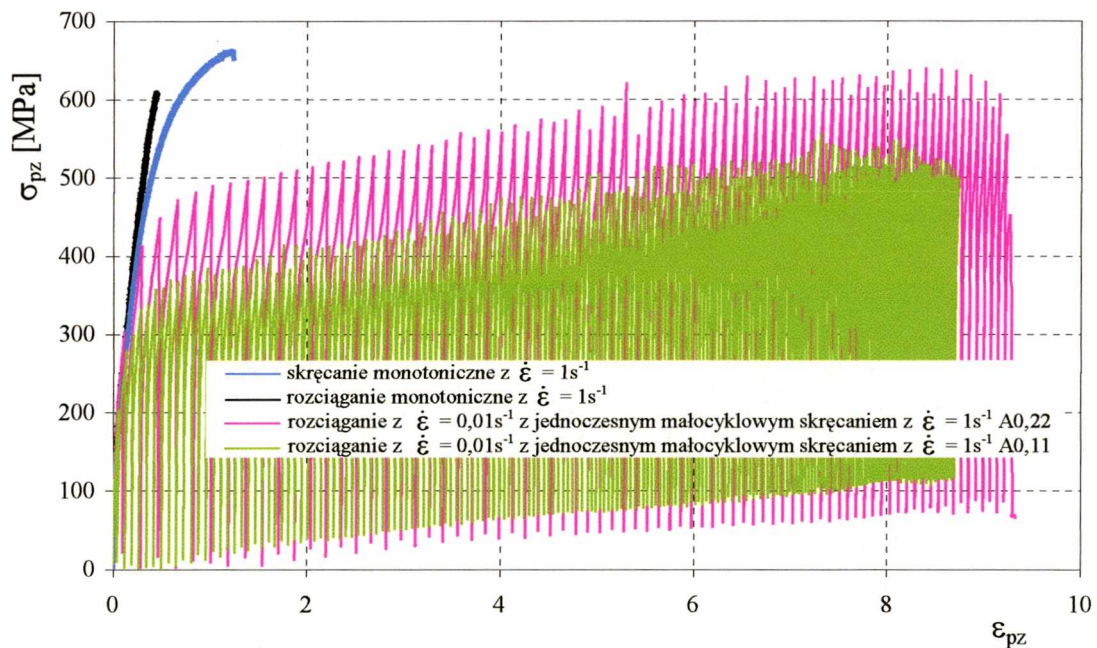
prędkości odkształcania pochodzącego od obu zastosowanych obciążeń są takie same to zarówno odkształcenie graniczne jak i naprężenie zastępcze są zbliżone do wartości uzyskanych w próbie monotonicznego rozciągania (rys. 6.1.1.8). Zwiększenie prędkości odkształcania pochodzącej od momentu skręcającego powoduje spadek naprężeń zastępczych i wzrost odkształceń granicznych (rys. 6.1.1.9). Dla największej zastosowanej prędkości odkształcania pochodzącego od momentu skręcającego 1 s^{-1} uzyskano około dwukrotny spadek naprężenia zastępczego oraz wzrost odkształceń granicznych około 7 krotny w porównaniu do monotonicznego skręcania i około 16 krotny dla monotonicznego rozciągania (rys. 6.1.1.10). Wzrost odkształceń granicznych dla tej próby należy tłumaczyć tym, że poprzez zwiększenie prędkości odkształcania pochodzącej od skręcania zwiększony został udział w odkształceniu zastępczym odkształceń pochodzących od sposobu odkształcania, który wolniej prowadzi do lokalizacji odkształcenia (próba skręcania). W skręcaniu małowykłowym zastosowano trzy wartości amplitudy 0,027, 0,11 i 0,22. Na podstawie przedstawionych wyników można wnioskować, że im mniejsza jest zastosowana amplituda w dodatkowym skręcaniu małowykłowym tym występuje większy spadek naprężenia zastępczego. Natomiast nie zaobserwowano prostej zależności, która by określała wpływ wielkości amplitudy na uzyskane odkształcenia graniczne.



Rys. 6.1.1.8. Przebiegi naprężenia zastępczego w funkcji odkształcenia zastępczego dla złożonego procesu odkształcania przy prędkościach odkształcania pochodzących od siły rozciągającej i od momentu skręcającego $0,01 \text{ s}^{-1}$ oraz dla prób monotonicznych dla brązu krzemowego CuSi3,5 w temperaturze otoczenia



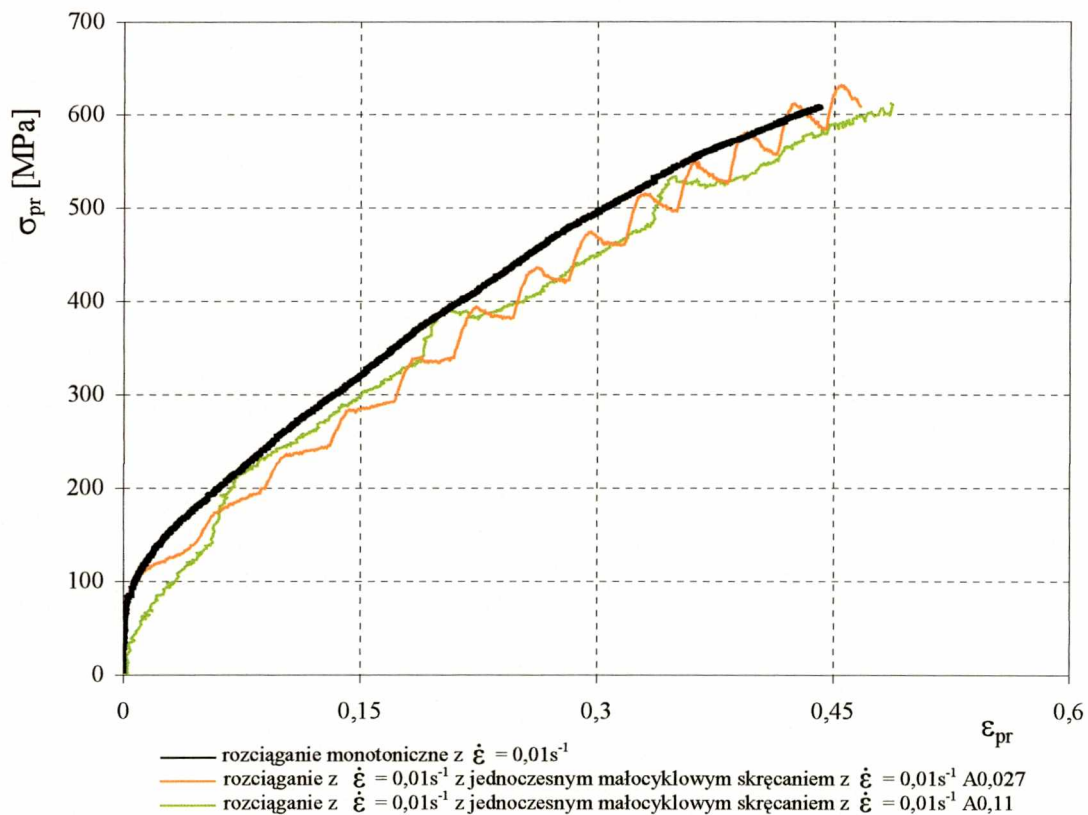
Rys. 6.1.1.9. Przebiegi naprężenia zastępczego w funkcji odkształcenia zastępczego dla złożonego procesu odkształcania przy prędkościach odkształcania pochodzących od siły rozciągającej $0,01 \text{ s}^{-1}$ i od momentu skręcającego $0,1 \text{ s}^{-1}$ oraz dla prób monotonicznych dla brązu krzemowego CuSi3,5 w temperaturze otoczenia



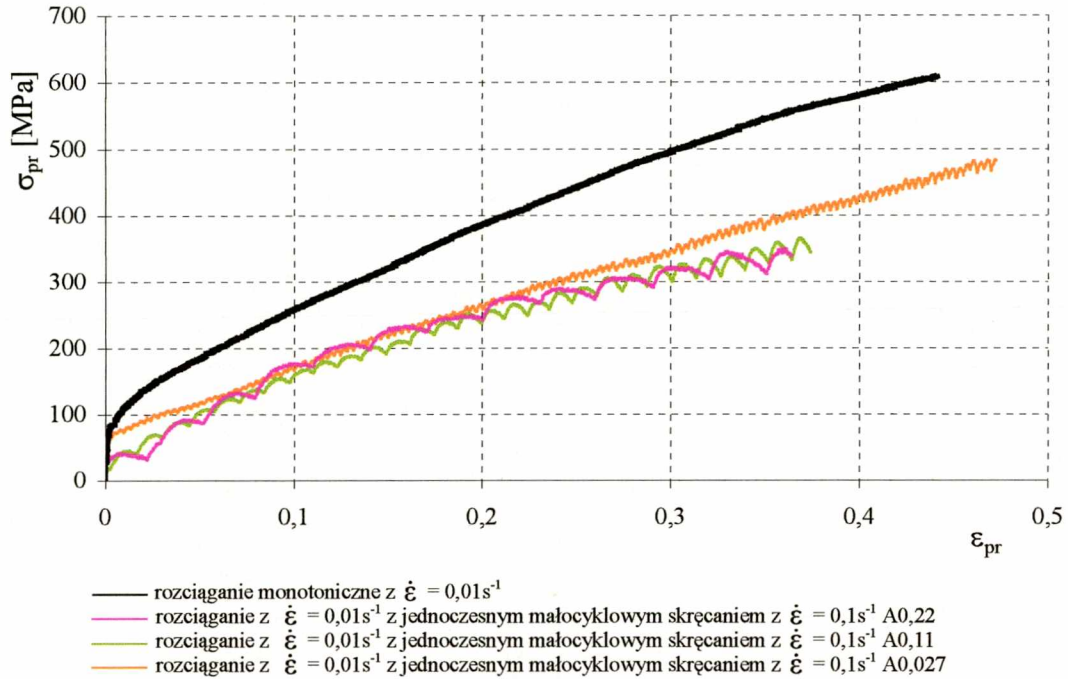
Rys. 6.1.1.10. Przebiegi naprężenia zastępczego w funkcji odkształcenia zastępczego dla złożonego procesu odkształcania przy prędkościach odkształcania pochodzących od siły rozciągającej $0,01 \text{ s}^{-1}$ i od momentu skręcającego 1 s^{-1} oraz dla prób monotonicznych dla brązu krzemowego CuSi3,5 w temperaturze otoczenia

Prowadzone badania są próbą symulacji w skali laboratoryjnej podobnych obciążeń, jakie występowały w rzeczywistych procesach ciągnięcia i wyciskania, w których materiał dodatkowo był odkształcany poprzez matrycę wykonującą ruch oscylacyjny wokół swojej osi. Siły ciągnięcia/wyciskania w takich procesach można oszacować na podstawie uzyskanych naprężeń w odkształcanej próbce pochodzących od siły rozciągającej w prowadzonych badaniach. Przeprowadzono, więc analizę wpływu dodatkowego skręcania małowykłowego na naprężenia pochodzące od siły rozciągającej w próbach, dla których zależności naprężeń i odkształceń zastępczych przedstawiono na rys. 6.1.1.8 – 6.1.1.10. Uzyskane zależności pomiędzy naprężeniem i odkształceniem pochodzącym od siły rozciągającej przedstawiona na rys. 6.1.1.11 – 6.1.1.13.

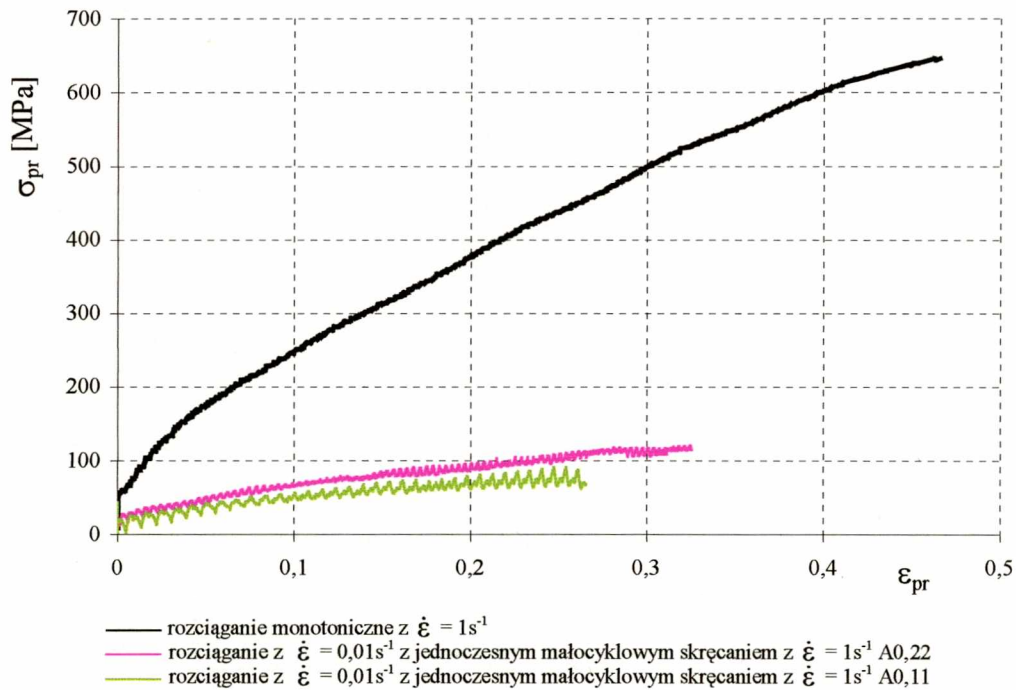
Z uzyskanych przebiegów wynika, że zwiększenie amplitudy dodatkowego skręcania małowykłowego nie wpływa istotnie na naprężenie pochodzące od siły rozciągającej natomiast nieznacznie obniża odkształcenia graniczne. Poziom tych naprężeń zależy natomiast istotnie od prędkości odkształcania pochodzącej od momentu skręcającego. Dla prędkości 1 s^{-1} można uzyskać około czterokrotne obniżenie naprężenia rozciągającego (rys. 6.1.1.13).



Rys. 6.1.1.11. Przebiegi naprężenia w funkcji odkształcenia pochodzące od siły rozciągającej przy prędkościach odkształcania pochodzących od siły rozciągającej i od momentu skręcającego $0,01 \text{ s}^{-1}$ oraz dla monotonicznej próby rozciągania brązu krzemowego CuSi3,5 w temperaturze otoczenia



Rys. 6.1.1.12. Przebiegi naprężenia w funkcji odkształcenia pochodzące od siły rozciągającej przy prędkościach odkształcania pochodzących od siły rozciągającej $0,01 \text{ s}^{-1}$ i od momentu skręcającego $0,1 \text{ s}^{-1}$ oraz dla monotonicznej próby rozciągania brązu krzemowego CuSi3,5 w temperaturze otoczenia



Rys. 6.1.1.13. Przebiegi naprężenia w funkcji odkształcenia pochodzące od siły rozciągającej przy prędkościach odkształcania pochodzących od siły rozciągającej $0,01 \text{ s}^{-1}$ i od momentu skręcającego 1 s^{-1} oraz dla monotonicznej próby rozciągania brązu krzemowego CuSi3,5 w temperaturze otoczenia

Przedstawione wyniki wskazywałyby na to, że dodatkowe małowykłowe odkształcenie skręcające zwiększa zastępcze odkształcenia graniczne oraz obniża naprężenie zastępcze i siłę osiową potrzebną do odkształcania plastycznego materiału. Jednakże, aby sprawdzić opłacalność stosowania badanych sposobów odkształcenia w praktyce należy przeanalizować je biorąc pod uwagę pracę odkształcenia plastycznego. Podczas odkształcania małowykłowego w każdym cyklu wykonujemy pewną pracę odkształcenia plastycznego, pomimo, że całkowite przemieszczenie po każdym cyklu wynosi zero, gdyż powracamy do położenia początkowego. Pomimo wykonania pracy odkształcenia plastycznego, która jest tym większa im większa jest ilość cykli, maksymalne przemieszczenie, które decyduje o zmianie kształtu, zależy od zastosowanej amplitudy. Maksymalne amplitudy odkształcenia, jakie są stosowane na ogół w procesach małowykłowych, w których uzyskujemy spadek naprężenia i wzrost odkształcenia granicznego, wynoszą około 0,3. Są to odkształcenia znacznie mniejsze od stosowanych w przemysłowych procesach obróbki objętościowej. Dlatego proces odkształcania małowykłowego może być zastosowany jedynie jako dodatkowe obciążenia, które jak wykazały badania może wpływać na poprawę odkształcalności materiału. O opłacalności zastosowania odkształcania złożonego należy, więc wnioskować raczej na podstawie pracy odkształcenia plastycznego a nie przebiegów naprężenia i odkształcenia zastępczego. Poniżej przeprowadzono analizę pracy odkształcenia plastycznego omawianych złożonych sposobów odkształcania. W tym celu określono pracę odkształcenia plastycznego konieczną do wydłużenia próbki o 0,2. Dla określenia tej pracy zastosowano zasadę superpozycji, oddzielnie określano prace pochodzące od momentu skręcającego i od siły rozciągającej. Uzyskane wartości prac dla poszczególnych sposobów odkształcania zostały umieszczone w tabeli 6.1.1. W tabeli tej przedstawiono również względny spadek naprężenia pochodzącego od siły rozciągającej dla różnych sposobów odkształcania wyznaczony ze wzoru

$$\Delta\sigma_p = \frac{\sigma_{prm} - \sigma_{prz}}{\sigma_{prm}} 100\% \quad (6.1.1.1)$$

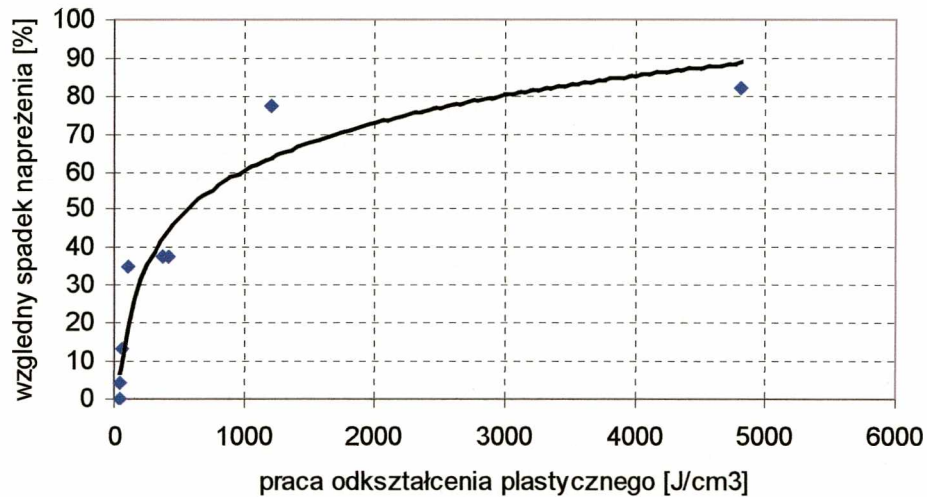
gdzie: σ_{prm} – naprężenie w próbie monotonicznego rozciągania

σ_{prz} – naprężenie pochodzące od siły rozciągającej w próbie złożonej

Tabela 6.1.1. Wartości prac odkształcenia plastycznego oraz względny spadek naprężenia pochodzącego od siły rozciągającej dla poszczególnych sposobów odkształcania przy wydłużeniu próbki do odkształcenia 0,2 dla brązu krzemowego CuSi3,5

Rodzaj próby	Praca odkształcenia plastycznego pochodząca od siły rozciągającej [J/cm ³]	Praca odkształcenia plastycznego pochodząca od momentu skręcającego [J/cm ³]	Całkowita praca odkształcenia plastycznego [J/cm ³]	$\Delta\sigma_p$ [%]
monotoniczne rozciąganie z prędkością odkształcania $\dot{\epsilon}_p = 0,01 \text{ s}^{-1}$	52		52	0
odkształcanie złożone rozciąganie ($\dot{\epsilon}_{pr} = 0,01 \text{ s}^{-1}$) i skręcania ($\dot{\epsilon}_{ps} = 0,01 \text{ s}^{-1}$) amplituda 0,027	43	11	54	4
odkształcanie złożone rozciąganie ($\dot{\epsilon}_{pr} = 0,01 \text{ s}^{-1}$) i skręcania ($\dot{\epsilon}_{ps} = 0,01 \text{ s}^{-1}$) amplituda 0,11	44	20	64	13,3
odkształcanie złożone rozciąganie ($\dot{\epsilon}_{pr} = 0,01 \text{ s}^{-1}$) i skręcania ($\dot{\epsilon}_{ps} = 0,1 \text{ s}^{-1}$) amplituda 0,027	32	83,5	115,5	34,8
odkształcanie złożone rozciąganie ($\dot{\epsilon}_{pr} = 0,01 \text{ s}^{-1}$) i skręcania ($\dot{\epsilon}_{ps} = 0,1 \text{ s}^{-1}$) amplituda 0,11	30	347,5	377,5	37,4
odkształcanie złożone rozciąganie ($\dot{\epsilon}_{pr} = 0,01 \text{ s}^{-1}$) i skręcania ($\dot{\epsilon}_{ps} = 0,1 \text{ s}^{-1}$) amplituda 0,22	30	380	410	37,4
odkształcanie złożone rozciąganie ($\dot{\epsilon}_{pr} = 0,01 \text{ s}^{-1}$) i skręcania ($\dot{\epsilon}_{ps} = 1 \text{ s}^{-1}$) amplituda 0,11	11	1200	1211	77,5
odkształcanie złożone rozciąganie ($\dot{\epsilon}_{pr} = 0,01 \text{ s}^{-1}$) i skręcania ($\dot{\epsilon}_{ps} = 1 \text{ s}^{-1}$) amplituda 0,22	9	4800	4809	82,4

Na rys. 6.1.1.14 przedstawiono zależność między pracą odkształcenia plastycznego dla różnych złożonych procesów a względnym spadkiem naprężenia.

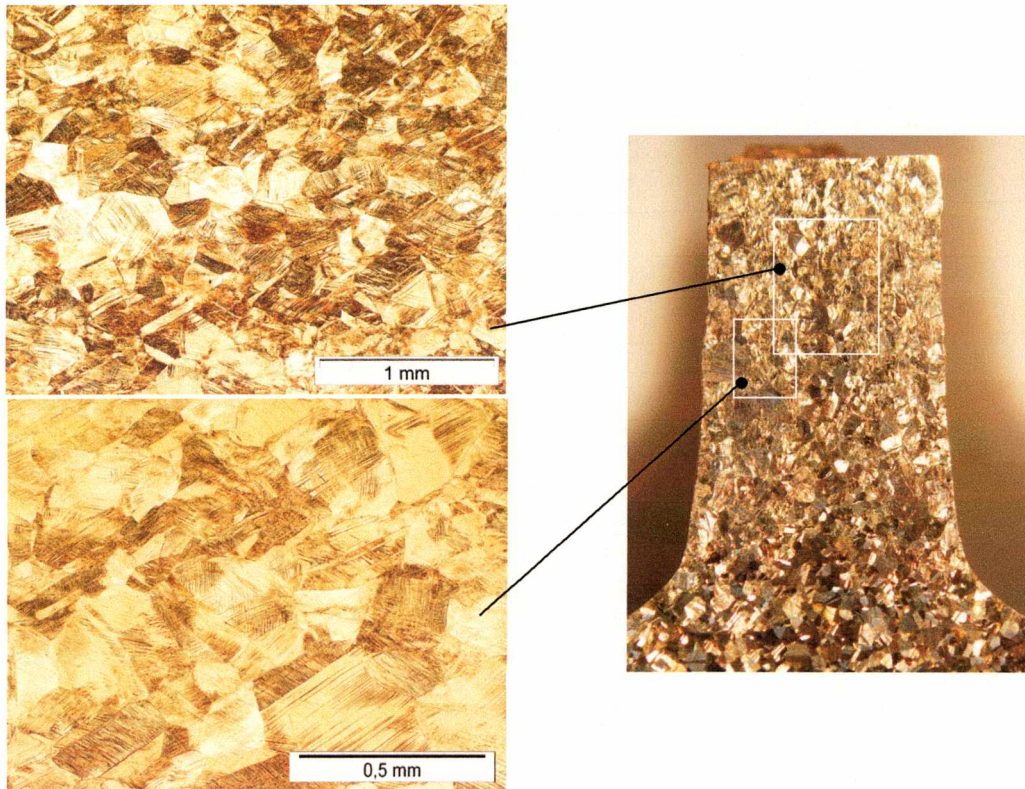


Rys. 6.1.1.14. Zależność między pracą odkształcenia plastycznego dla różnych procesów a względnym spadkiem naprężenia

Najmniejszą pracę odkształcenia plastycznego uzyskano dla monotonicznego rozciągania. Wprowadzenie dodatkowego małowykłowego skręcania we wszystkich przypadkach powoduje wzrost tej pracy. Najmniejszy wzrost uzyskano dla złożonego odkształcania, gdy prędkości odkształcania pochodzącego od obu zastosowanych obciążeń są takie same i równe $0,01 \text{ s}^{-1}$. Jednakże jak wynika z rys. 6.1.1.11. występuje wówczas bardzo niewielki spadek naprężenia rozciągającego. Natomiast największy wzrost uzyskano dla największej zastosowanej amplitudy i największej prędkości odkształcania małowykłowego, czemu odpowiada największy spadek naprężenia pochodzącego od siły rozciągającej. Ustalono zasadę, że im większa praca odkształcania małowykłowego, tym większy na ogół spadek naprężenia pochodzącego od siły rozciągającej. Również daje się zaobserwować, że zwiększenie amplitudy nie wpływa istotnie na pracę odkształcenia plastycznego pochodzącą od siły rozciągającej, natomiast powoduje wyraźny przyrost pracy odkształcenia plastycznego pochodzącej od momentu skręcającego.

Prowadzone badania wykazały, że istnieje możliwość znacznego zmniejszenia naprężenia pochodzącego od siły rozciągającej w złożonych procesach odkształcania poprzez wprowadzenie dodatkowego odkształcania małowykłowego, jednakże trzeba mieć wówczas świadomość, że prowadzi to do znacznego wzrostu pracy odkształcenia plastycznego.

Badania strukturalne brązu krzemowego CuSi3,5 po złożonym odkształceniu w temperaturze pokojowej



Rys. 6.1.1.15. Struktura brązu krzemowego CuSi3,5 po rozciąganiu ($\dot{\epsilon}_{pr} = 0,01 \text{ s}^{-1}$) z równoczesnym małowykwym skręcaniem ($\dot{\epsilon}_{ps} = 0,1 \text{ s}^{-1}$) z amplitudą 0,11 do odkształcenia zastępczego 1,3 w temperaturze otoczenia

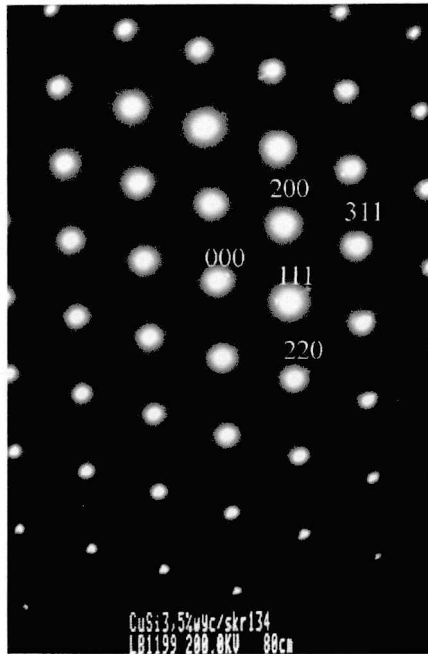
Na rys. 6.1.1.15 przedstawiono strukturę brązu krzemowego CuSi3.5 w temperaturze otoczenia po rozciąganiu ($\dot{\epsilon}_{pr} = 0,01 \text{ s}^{-1}$) z równoczesnym małowykwym skręcaniem ($\dot{\epsilon}_{ps} = 0,1 \text{ s}^{-1}$) z amplitudą 0,11 do odkształcenia zastępczego 1,3. Struktura ta jest bardzo podobna do struktur otrzymanych w innych złożonych procesach odkształcania gdzie zmiana wektora prędkości przemieszczenia wynosiła 90° . Natomiast w porównaniu do struktur otrzymanych zarówno podczas monotonicznego skręcania (rys. 5.1.1.2) jak i rozciągania (rys. 5.1.1.3) można zauważyć dość duże różnice. W strukturach próbek odkształcanych monotonicznie występuje typowa tekstura odkształcenia, tekstury takiej nie ma w próbkach po odkształceniu złożonym.

Różnice w strukturze odkształconego materiału w sposób złożony i monotoniczny są bardziej widoczne w badaniach na mikroskopie optycznym niż na mikroskopie elektronowym. Badania na mikroskopie elektronowym pozwoliły określić podstawowe mechanizmy odkształcania materiału, płaszczyzny bliźniakowania oraz rozkłady gęstości dyslokacji.

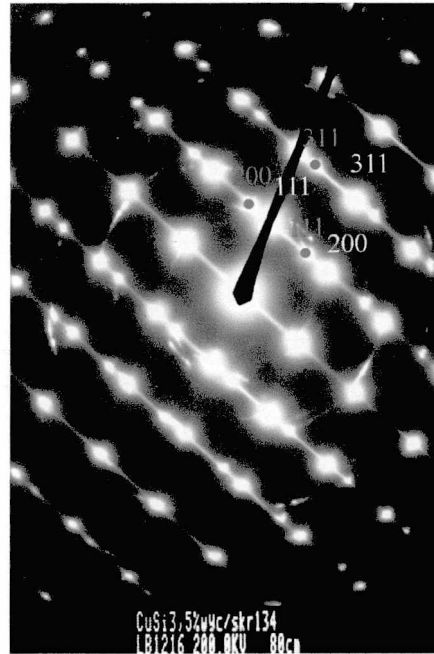
W badanych materiałach zaobserwowano dużą liczbę wzajemnie przecinających się grup bliźniaków odkształcenia pod kierunkiem zależnym od układu krystalograficznego (rys. 6.1.1.16). O tym, że w brązie krzemowym dominują bliźniaki odkształcenia świadczą uzyskane siatki dyfrakcyjne z obszaru osnowy bez bliźniaków (rys. 6.1.1.17) oraz z obszarów gdzie takie bliźniaki występują (rys. 6.1.1.18). Oba dyfraktogramy zostały zrobione z pasa krystalograficznego typu $\langle 110 \rangle$. W badanym materiale płaszczyznami bliźniakowania są płaszczyzny $\{111\}$. Refleksy zaznaczone na rys. 6.1.1.17 i 6.1.1.18 kolorem białym pochodzą do osnowy natomiast refleksy zaznaczone kolorem czerwonym od bliźniaka. W celu potwierdzenia tego wektor operujący przesunięto w miejsce refleksu pochodzącego od płaszczyzny bliźniaka (111) , na rys. 6.1.1.19 przedstawiono obraz struktury dla takiego ustawienia wiązki elektronów. Na zdjęciu widoczne są jasne bliźniaki odkształcenia dające refleks (111) oraz ciemna osnowa. Natomiast na rys 6.1.1.20 przedstawiono obraz struktury, gdy wiązka operująca została przesunięta w miejsce refleksu (200) pochodzącego od osnowy, spowodowało to wygaszenie bliźniaków odkształcenia i rozjaśnienie osnowy. Uzyskane bliźniaki odkształcenia są bardzo cienkie. Duże przesunięcie bliźniaków, w wyniku ich wzajemnego przecięcia się, świadczy o dużym odkształceniu materiału. Ponadto na podstawie otrzymanych obrazów struktur odkształconych, można określić kolejność przechodzenia bliźniaków przez materiał.



Rys. 6.1.1.16. Struktura brązu krzemowego $\text{CuSi}_{3,5}$ po rozciąganiu ($\dot{\epsilon}_{pr} = 0,01 \text{ s}^{-1}$) z równoczesnym małocyklowym skręcaniem ($\dot{\epsilon}_{ps} = 0,1 \text{ s}^{-1}$) z amplitudą 0,11 do odkształcenia zastępczego 1,3 w temperaturze otoczenia (TEM)



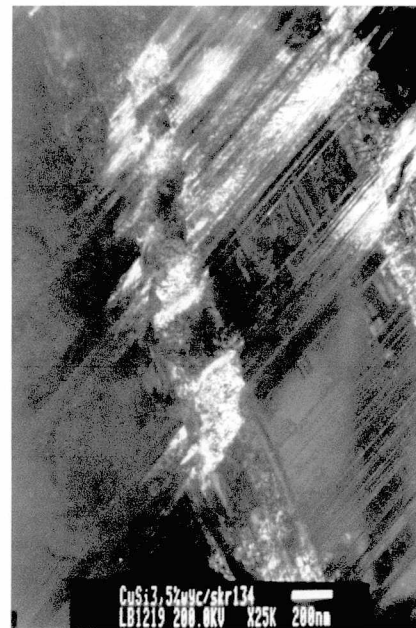
Rys. 6.1.1.17. Dyfraktogram z pasa krystalograficznego $\langle 110 \rangle$ dla brązu krzemowego CuSi_{3,5} po rozciąganiu ($\dot{\epsilon}_{pr} = 0,01 \text{ s}^{-1}$) z równoczesnym małowykłowym skręcaniem ($\dot{\epsilon}_{ps} = 0,1 \text{ s}^{-1}$) z amplitudą 0,11 do odkształcenia zastępczego 1,3 w temperaturze otoczenia z obszaru osnowy (TEM)



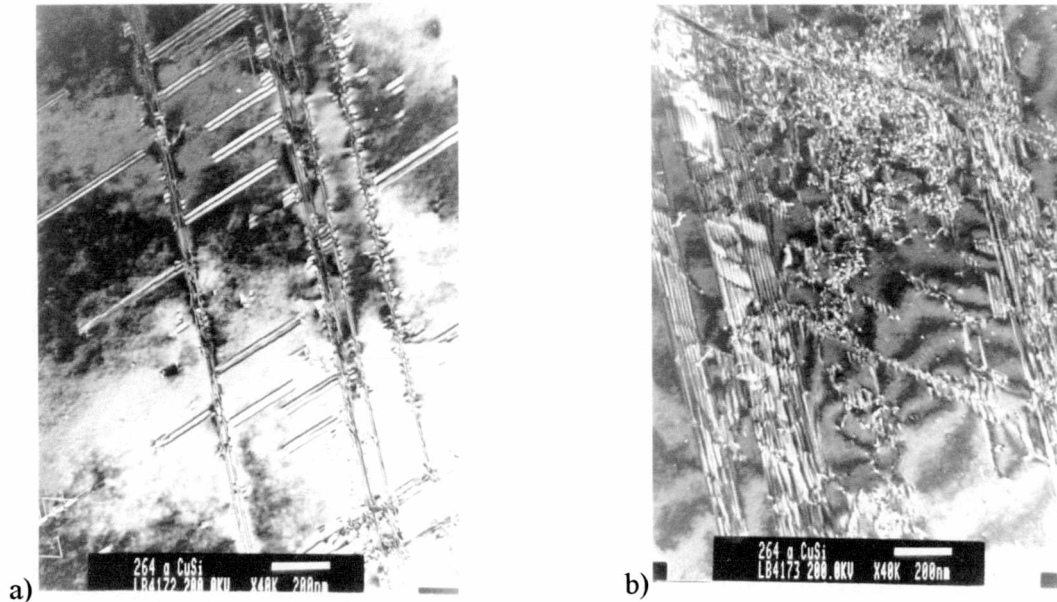
Rys. 6.1.1.18. Dyfraktogram z pasa krystalograficznego $\langle 110 \rangle$ dla CuSi_{3,5} po rozciąganiu ($\dot{\epsilon}_{pr} = 0,01 \text{ s}^{-1}$) z równoczesnym małowykłowym skręcaniem ($\dot{\epsilon}_{ps} = 0,1 \text{ s}^{-1}$) z amplitudą 0,11 do odkształcenia zastępczego 1,3 w temperaturze otoczenia z obszaru gdzie wystąpiła duża liczba bliźniaków odkształcenia (TEM)



Rys. 6.1.1.19. Obraz struktury brązu krzemowego CuSi_{3,5} dla wiązki elektronów równoległych do pasa krystalograficznego $[111]$ bliźniaka z dyfraktogramu przedstawionego na rys. 6.1.1.18. (TEM)

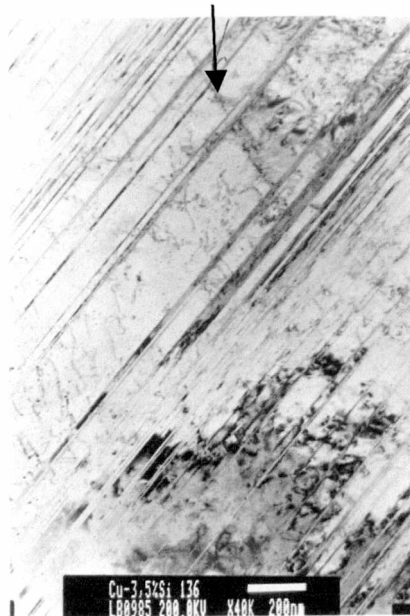


Rys. 6.1.1.20. Obraz struktury brązu krzemowego CuSi_{3,5} dla wiązki elektronów równoległych do pasa krystalograficznego $[200]$ osnowy z dyfraktogramu przedstawionego na rys. 6.1.1.18. (TEM)



Rys 6.1.1.21. Kolejne stadia tworzenia się bliźniaka odkształcenia podczas odkształcania złożonego brązu krzemowego CuSi_{3,5} po rozciąganiu ($\dot{\epsilon}_{pr} = 0,01 \text{ s}^{-1}$) z równoczesnym małowykwym skręcaniem ($\dot{\epsilon}_{ps} = 0,1 \text{ s}^{-1}$) z amplitudą 0,054 do odkształcenia zastępczego 0,15 a) powstawanie błędów ułożenia i b) nakładanie się błędów ułożenia (TEM)

W badanych materiałach bliźniaki odkształcenia powstają już przy bardzo małych odkształceniach. Na rys. 6.1.1.21 można przeanalizować kolejne stadia tworzenia się bliźniaków odkształcenia. Początkowo tworzą się błędy ułożenia, które są rozciągane przez migrującą dyslokację częściową. Poprzez nałożenie się kolejnych błędów ułożenia tworzy się bliźniak odkształcenia. W odkształcanym materiale można też zaobserwować pasma poślizgu przecinane bliźniakami odkształcenia (rys. 6.1.1.22).



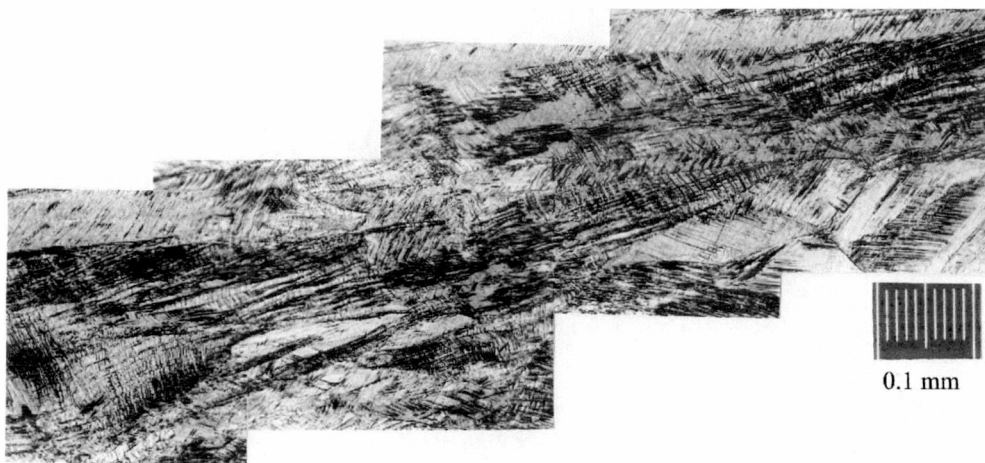
Rys. 6.1.1.22. Struktura brązu krzemowego CuSi_{3,5} po rozciąganiu ($\dot{\epsilon}_{pr} = 0,01 \text{ s}^{-1}$) z równoczesnym małowykwym skręcaniem ($\dot{\epsilon}_{ps} = 0,1 \text{ s}^{-1}$) z amplitudą 0,11 do odkształcenia zastępczego 0,8 w temperaturze otoczenia (TEM)

Wprowadzenie dodatkowego odkształcania w przypadku małowykłowego skręcania powoduje szybsze uruchamianie różnych systemów poślizgu. W znacznie większej ilości ziaren w próbkach odkształconych w sposób złożony niż w próbach monotonicznych widoczne są różne orientacje bliźniaków przecinających się pod kątem zależnym od kierunku obciążenia zewnętrznego oraz układu krystalograficznego ziaren (rys. 6.1.1.23).

Zaobserwowano również, że w złożonych schematach odkształcania częsta zmiana kierunku odkształcania wywołana małowykłowym skręcaniem sprzyja heterogenizacji odkształcenia, co prowadzi do tworzenia się pasm ścinania przebiegających przez wiele ziaren (rys. 6.1.1.24). Również grupy bliźniaków mogą tworzyć koncentrację naprężenia na granicach ziaren, które mogą wymuszać bliźniaki w sąsiednich ziarnach może to prowadzić do powstania grubych pasm odkształcenia przechodzących przez wiele ziaren tworząc makroskopowy efekt pasma ścinania prowadzący do lokalizacji odkształcenia.



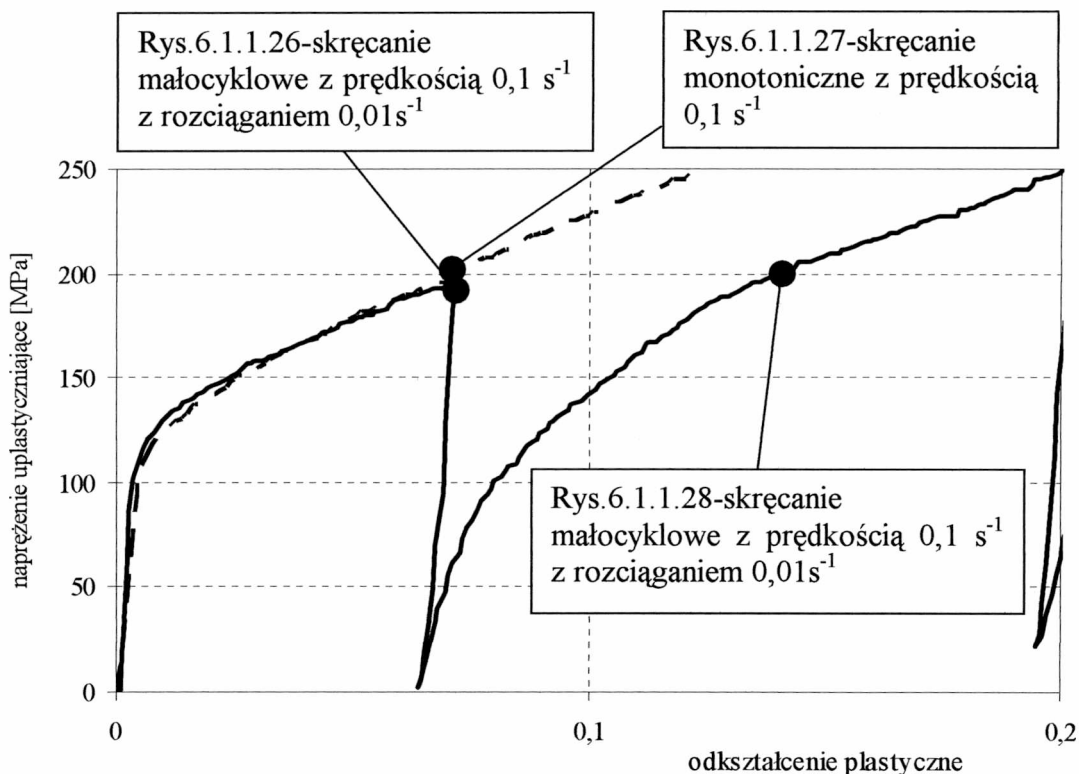
Rys. 6.1.1.23. Strukturę brązu krzemowego CuSi_{3,5} po rozciąganiu ($\dot{\epsilon}_{pr} = 0,01 \text{ s}^{-1}$) z równoczesnym małowykłowym skręcaniem ($\dot{\epsilon}_{ps} = 0,1 \text{ s}^{-1}$) z amplitudą 0,11 do odkształcenia zastępczego 0,8 w temperaturze otoczenia



Rys. 6.1.1.24. Pasma zlokalizowanego odkształcenia dla brązu CuSi_{3,5} w temperaturze otoczenia po rozciąganiu ($\dot{\epsilon}_{pr} = 0,01 \text{ s}^{-1}$) z równoczesnym małowykłowym skręcaniem ($\dot{\epsilon}_{ps} = 0,1 \text{ s}^{-1}$) z amplitudą 0,11 do odkształcenia zastępczego 0,8 w temperaturze otoczenia

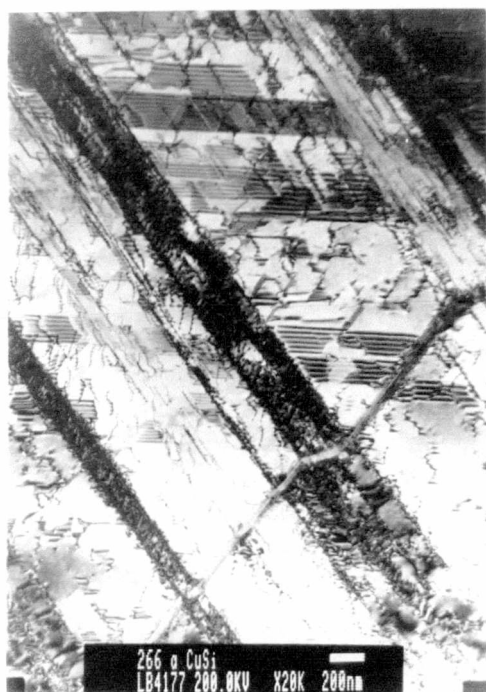
Na rys. 6.1.1.26-6.1.1.28 zamieszczono obrazy struktury uzyskane za pomocą elektronowego mikroskopu transmisyjnego dla różnych złożonych sposobów odkształcania przy małych odkształceniach plastycznych. Na rys. 6.1.1.25 przedstawiono historię odkształcania tych prób.

Strukturę monotonicznie skręcanych próbek po odkształceniu zastępczym 0,08 przedstawiono na rys. 6.1.1.26, strukturę po tym samym odkształceniu zastępczym lecz otrzymaną w próbce równoczesnego rozciągania z małocyklowym skręcania pokazano na rys. 6.1.1.27. Natomiast na rys. 6.1.1.28 przedstawiono dla tego samego złożonego odkształcania strukturę próbki po doksztalceniu zastępczym wynoszącym około 0,15. Charakterystyczne jest to, że pomimo dość dużych różnic w sposobie odkształcania nie wystąpiły duże różnice w strukturze dyslokacyjnej jedynie wraz ze wzrostem odkształcenia następuje nieznaczny wzrost gęstości dyslokacji. Przy odkształceniu 0,15 tworzą się już wyraźne sploty dyslokacji.

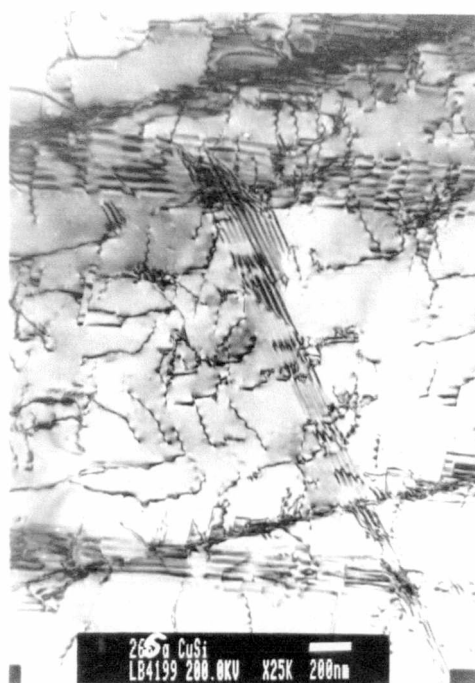


Rys. 6.1.1.25 Historia odkształcania próbek, dla których na rysunkach 6.1.1.26 -6.1.1.28 przedstawiono ich struktury, czarnym kółkiem zaznaczono moment przerwania odkształcanie dla poszczególnych próbek

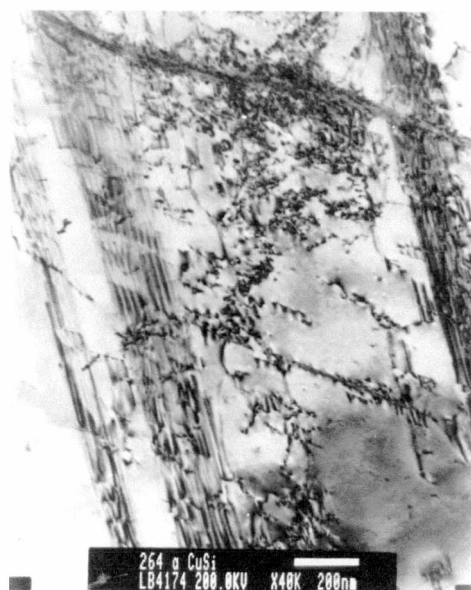
Dalsze odkształcenia powoduje, że w strukturze pojawiają się coraz częściej wzajemnie przecinające się grupy bliźniaków odkształcenia (rys. 6.1.1.29). Dla odkształceń większych od 1 uzyskano duże ścięcia pierwotnych bliźniaków odkształcenia (rys. 6.1.1.30).



Rys 6.1.1.26 Struktura z monotonicznego skręcania po odkształceniu zastępczym 0,08 (TEM) CuSi_{3,5} temperatura otoczenia



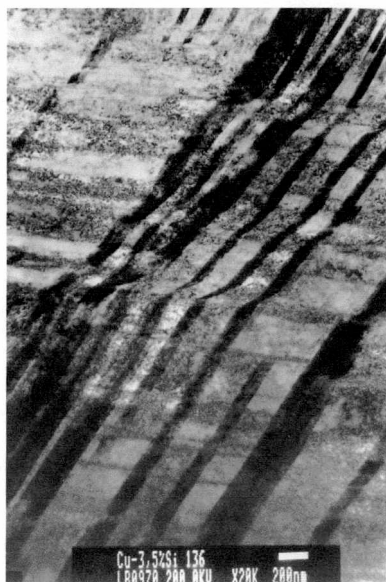
Rys 6.1.1.27 Struktura z odkształcania złożonego po odkształceniu zastępczym 0,08 (TEM) CuSi_{3,5} temperatura otoczenia



Rys 6.1.1.28. Struktura z odkształcania złożonego po odkształceniu zastępczym 0,15 (TEM) CuSi_{3,5} temperatura otoczenia

Różnice w strukturze odkształcanego materiału w sposób monotoniczny i złożony zaobserwowano głównie w badaniach na mikroskopie optycznym. W próbkach odkształcanych w sposób złożony występuje większa niejednorodność odkształcenia,

mniejsza tekstura odkształcenia oraz liczniejsze pasma ścinania. Ujawnienie tych różnic za pomocą mikroskopu elektronowego, ze względu na to, że za pomocą niego analizuje się bardzo małe obszary, wymagałoby bardzo czasochłonnych i kosztownych badań statystycznych na wielu próbkach.



Rys. 6.1.1.29. Obraz struktury CuSi_{3,5} po rozciąganiu ($\dot{\epsilon}_{pr} = 0,01 \text{ s}^{-1}$) z równoczesnym małowykłowym skręcaniem ($\dot{\epsilon}_{ps} = 0,1 \text{ s}^{-1}$) z amplitudą 0,11 do odkształcenia zastępczego 0,8 w temperaturze otoczenia (TEM)



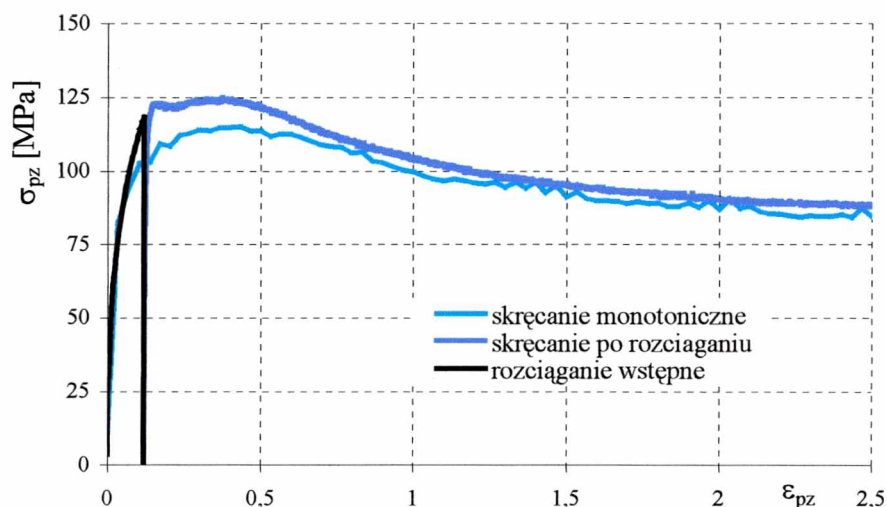
Rys. 6.1.1.30. Struktura brązu krzemowego CuSi_{3,5} po rozciąganiu ($\dot{\epsilon}_{pr} = 0,01 \text{ s}^{-1}$) z równoczesnym małowykłowym skręcaniem ($\dot{\epsilon}_{ps} = 0,1 \text{ s}^{-1}$) z amplitudą 0,11 do odkształcenia zastępczego 1,3 w temperaturze otoczenia (TEM)

6.1.2. Badania brązu krzemowego CuSi_{3,5} w temperaturze 600 °C

Interpretacja wyników uzyskanych w złożonych procesach odkształcania dla warunków obróbki plastycznej na gorąco jest utrudniona, gdyż jak wykazały badania monotonicznego odkształcania, brąz krzemowy CuSi_{3,5} w tych warunkach jest czuły na sposób odkształcania. Przebiegi naprężenia zastępczego uzyskane w próbie monotonicznego skręcania i rozciągania znacznie się różnią. Ponadto w warunkach obróbki plastycznej na gorąco materiał ten wykazuje dużą czułość na prędkość odkształcania, co utrudnia przeliczanie momentu skręcającego próbki na naprężenie styczne pochodzące od tego momentu. Również nie można tak jak dla temperatury otoczenia stabilizować temperatury odkształcanej próbki poprzez natryskiwanie na nią wody o stałej odpowiedniej temperaturze. Przy dużych prędkościach odkształcania może, więc występować wzrost temperatury próbki, spowodowany zamianą pracy odkształcania plastycznego na ciepło zakłócający badania. Dlatego w temperaturze 600 °C pominięto część badania, dla których wyniki były niemożliwe do poprawnej interpretacji.

Procesy sekwencyjnego odkształcania brązu krzemowego CuSi3,5 momentem skręcającym i siłą rozciągającą w temperaturze 600 °C

Na rys. 6.1.2.1. porównano przebieg naprężenia zastępczego dla próbki, która została wstępnie rozciągnięta do odkształcenia 0,12 a następnie skręcona do zniszczenia z przebiegiem otrzymanym w procesie skręcania monotonicznego.



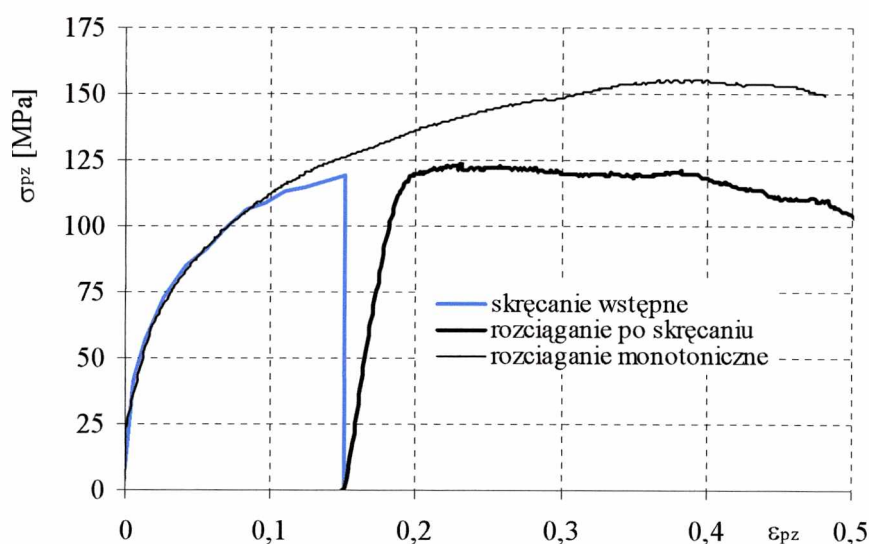
Rys. 6.1.2.1. Przebiegi naprężenia zastępczego uzyskane w próbie skręcania dla próbki wstępnie odkształconej w próbie rozciągania do odkształcenia 0,12 oraz w próbie monotonicznego skręcania dla brązu krzemowego CuSi3,5 przy prędkościach odkształcania wynoszących $0,1s^{-1}$ w temperaturze 600°C

Zaraz po zmianie drogi odkształcania dla wstępnie rozciągniętej próbki, uzyskano znacznie wyższe naprężenie niż w próbie monotonicznego skręcania. Podobny efekt takiej samej zmiany drogi odkształcania uzyskano w temperaturze otoczenia. Jednakże w temperaturze 600 °C wraz z dalszym odkształcaniem próbki naprężenie zbliża się szybko do poziomu naprężenia otrzymanego w monotonicznym procesie skręcania. W temperaturze otoczenia różnica pomiędzy naprężaniem uzyskanym w próbie monotonicznego skręcania a naprężeniem uzyskanym podczas skręcania wstępnie rozciągniętej utrzymuje się aż do zniszczenia materiału. Odmienne zachowanie się materiału w temperaturze otoczenia i w temperaturze 600 °C w trakcie dalszego odkształcania po zmianie drogi odkształcania jest najprawdopodobniej wynikiem rekrytalizacji dynamicznej, która likwiduje efekt historii odkształcania w warunkach obróbki plastycznej na gorąco. Zachowanie takie materiału potwierdza również zasadę, że poziom naprężenia ustalonego płynięcia materiału odkształcanego na gorąco nie zależy od jego historii odkształcania a od aktualnych warunków odkształcania to jest temperatury i prędkości odkształcania. Ponadto dla przedstawionego złożonego schematu odkształcania uzyskano mniejsze odkształcenie krytyczne niż dla

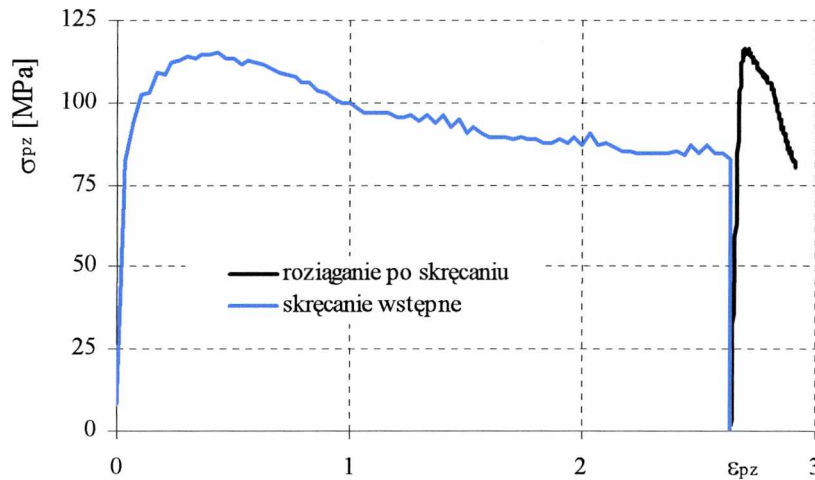
skręcania monotonicznego. Tłumaczyć to należy tym, że wstępne rozciąganie prowadzi do szybszego umocnienia materiału i gromadzenia energii niezbędnej do rozpoczęcia rekrytalizacji dynamicznej niż w procesie skręcania i dlatego w złożonym schemacie dla mniejszego odkształcenia występuje osłabienia wywołane poprzez rekrytalizację dynamiczną niż w próbie monotonicznego skręcania.

Na rys. 6.1.2.2. przedstawiono sytuację odwrotną, gdy próbka została poddana wstępnemu skręcaniu do odkształcenia (0,15) mniejszego niż odkształcenie krytyczne, a następnie rozciągnięta do zniszczenia. Po zmianie drogi odkształcania, naprężenie podobnie jak w temperaturze otoczenia, jest niższe niż dla monotonicznego rozciągania. Dla próby tej nie można określić wpływu wstępnego skręcania na odkształcenie krytyczne podczas zasadniczego rozciągania, gdyż w próbie tej nie uzyskano ustalonego płynięcia plastycznego a więc nie doszło do pełnej rekrytalizacji materiału.

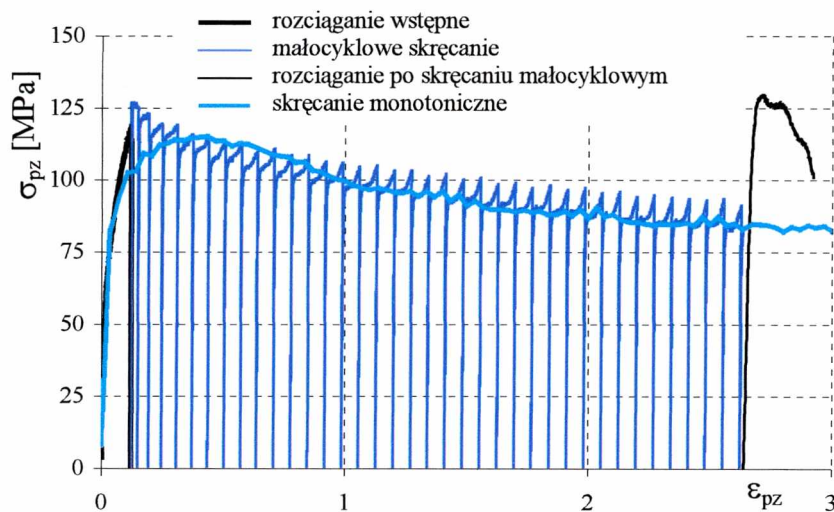
Dla tej samej sekwencji odkształcania przeprowadzono następny eksperyment, z tą tylko różnicą, że podczas wstępnego skręcania materiał był odkształcony aż do odkształcenia 2,6 odpowiadającego zakresowi ustalonego płynięcia plastycznego (rys. 6.1.2.3). W ten sposób uzyskano strukturę całkowicie zrekrystalizowaną dynamicznie. Naprężenia uplastyczniającego takiego materiału podczas rozciągania osiąga zbliżoną wartość, jaką uzyskano podczas wstępnego skręcania i znacznie niższą niż w próbie monotonicznego rozciągania.



Rys. 6.1.2.2. Przebiegi naprężenia zastępczego uzyskane w próbie rozciągania dla próbki wstępnie odkształconej w próbie skręcania do odkształcenia około 0,15 oraz w próbie monotonicznego rozciągania dla brązu krzemowego CuSi3,5 przy prędkościach odkształcania wynoszących $0,1 \text{ s}^{-1}$ w temperaturze 600°C



Rys. 6.1.2.3. Przebiegi naprężenia zastępczego uzyskane w próbie rozciągania dla próbki wstępnie odkształconej w próbie skręcania do odkształcenia około 2,6 oraz w próbie monotonicznego rozciągania dla brązu krzemowego CuSi_{3,5} przy prędkościach odkształcania wynoszących 0,1 s⁻¹ w temperaturze 600 °C



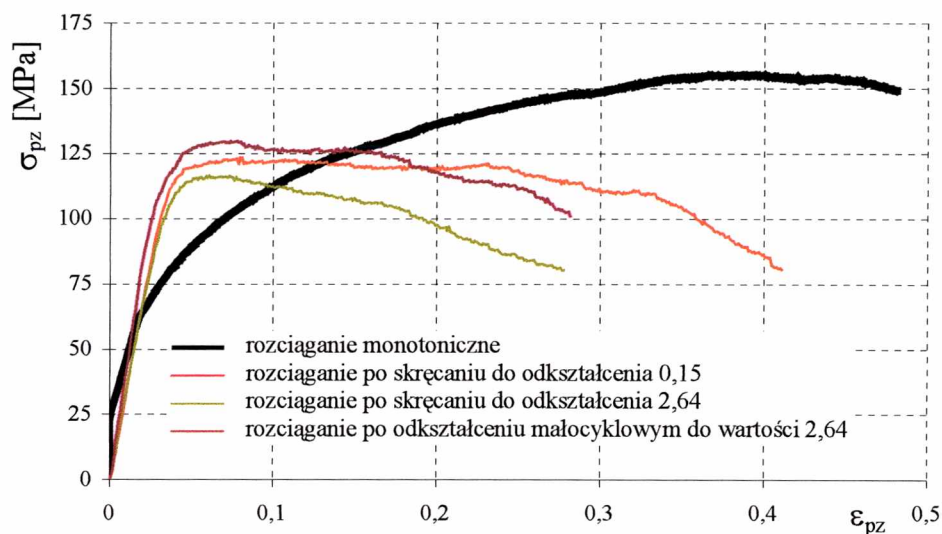
Rys. 6.1.2.4. Przebiegi naprężenia zastępczego uzyskane w próbie rozciągania dla próbki wstępnie odkształconej poprzez rozciągania do odkształcenia 0,12, a następnie skręconej małowykłowo do odkształcenia około 2,6 oraz w próbie monotonicznego skręcania dla brązu krzemowego CuSi_{3,5} przy prędkościach odkształcania wynoszących 0,1 s⁻¹ w temperaturze 600 °C

Na rys. 6.1.2.4. przedstawiono zależność pomiędzy naprężeniem uplastyczniającym a odkształceniem plastycznym dla próbki, która została rozciągnięta do wartości odkształcenia 0,2, następnie skręcona małowykłowo z amplitudą 0,11 do odkształcenia 2,6, po czym poddano ją ponownie rozciąganiu. Na rysunku przedstawiono również, przebieg naprężenia uplastyczniającego otrzymanego podczas monotonicznego skręcania. Podobnie jak dla sposobu odkształcenia przedstawionego na rys. 6.1.2.1 podczas zmiany drogi odkształcania,

po wstępnym rozciągnięciu do odkształcenia 0,2, następuje wzrost naprężenia uplastyczniającego, po czym w kolejnych cyklach odkształcenia maksymalny poziom naprężenia jest coraz niższy, zbliżony do poziomu naprężenia uzyskanego podczas monotonicznego skrećania.

Przeprowadzone badania wykazały, że wpływ wstępnego sposobu odkształcania próbki jest bardzo niewielki, jeżeli jest ona następnie skrećana. W procesie skrećania dochodzi szybko do rekrytalizacji dynamicznej, która likwiduje historię odkształcenia i taki materiał zachowuje się podobnie jak materiał skrećany monotonicznie.

W przypadku rozciągania sytuację mamy bardziej złożoną, gdyż w procesie tym nie dochodzi do tak intensywnej rekrytalizacji dynamicznej jak w próbie skrećania. Dla lepszego zobrazowania wpływu wstępnego sposobu odkształcania na naprężenia rozciągające na rys. 6.1.2.5. zaprezentowano przebiegi naprężenia uzyskane podczas rozciągania próbek wstępnie odkształconych, w różny sposób, który został przedstawione na rys. 6.1.2.1. – 6.1.2.4.



Rys. 6.1.2.5. Przebiegi naprężeń zastępczych uzyskanych w próbach rozciągania dla próbki wstępnie odkształconej w próbie skrećania do różnych wartości odkształceń oraz przebieg naprężenia zastępczego uzyskanego w próbie monotonicznego rozciągania dla brązu krzemowego CuSi3, przy prędkościach odkształcania wynoszących $0,1 \text{ s}^{-1}$ w temperaturze $600 \text{ }^{\circ}\text{C}$

We wszystkich przypadkach wstępne skrećanie próbki powoduje obniżenie naprężenia we wtórnym procesie rozciągania w stosunku do próby monotonicznego rozciągania.

Charakterystyczne jest to, że brąz krzemowy CuSi3,5 po wstępnym małocyklowym skrećaniu ma wyższy poziom naprężeń podczas rozciągania niż próbka po wstępnym monotonicznym skrećaniu.

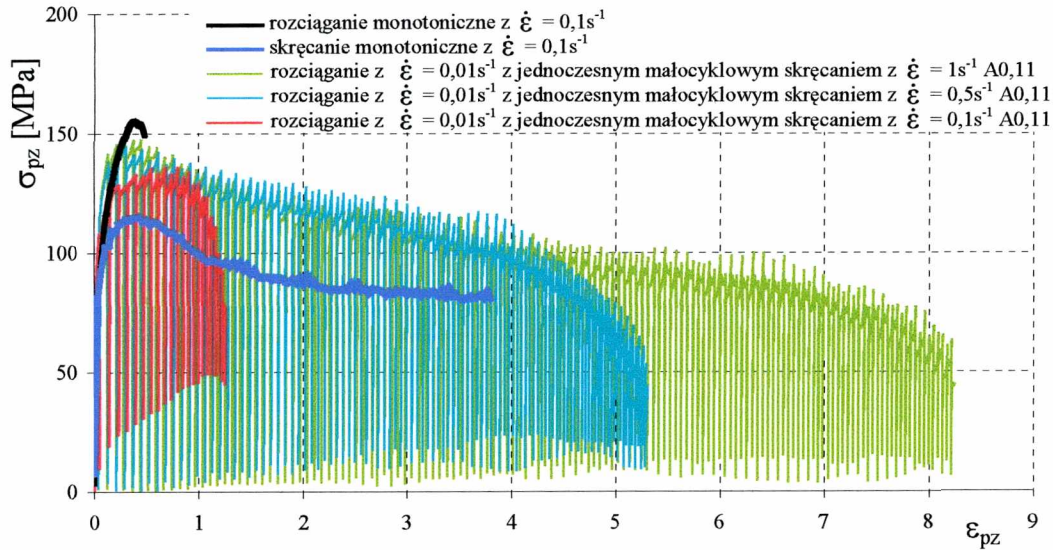
Również kształt krzywych naprężenie-odkształcenie uzyskany podczas rozciągania próbek wstępnie skrećonych jest odmienny niż dla monotonicznego rozciągania. Dla

schematu złożonego w zakresie odkształceń od 0 do 0,1 materiał umacnia się niemal liniowo po czym umocnienie stopniowo się zmniejsza aż dochodzi do osłabienia świadczącego o pojawieniu się rekrytalizacji dynamicznej. Podobne przebiegi naprężenia z początkowym niemal liniowym umocnieniem zaobserwowano również w temperaturze otoczenia podczas rozciągania wstępnie skręconych próbek (rys. 6.1.1.4.).

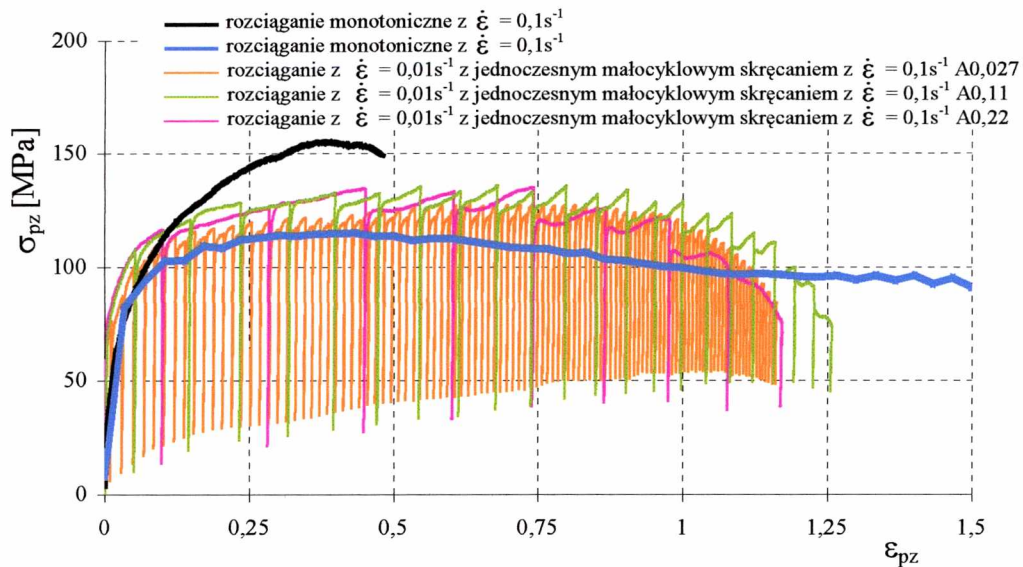
Proces jednoczesnego odkształcania próbki oscylacyjnym momentem skręcającym i siłą rozciągającą w temperaturze 600 °C

Na rys. 6.1.2.6. i 6.1.2.7. przedstawiono przebiegi naprężenia zastępczego w funkcji odkształcenia zastępczego uzyskane w próbie jednoczesnego odkształcania próbki oscylacyjnym momentem skręcającym i siłą rozciągającą w temperaturze 600 °C. W badaniach tych podobnie jak w temperaturze otoczenia prędkość odkształcania pochodząca od siły rozciągającej była stała i wynosiła $0,01\text{ s}^{-1}$, natomiast prędkość odkształcania pochodząca od momentu skręcającego zmieniana była w przedziale od $0,01\text{ s}^{-1}$ do 1 s^{-1} . Z uzyskanych przebiegów wynika, że w przeciwieństwie do temperatury otoczenia zwiększenie prędkości odkształcania pochodzącej od skręcania nie powoduje obniżenia naprężenia zastępczego a nawet wywołuje niewielki jego wzrost co należy tłumaczyć dość dużą czułością brązu krzemowego CuSi_{3,5} na prędkość odkształcania w temperaturze 600 °C. Natomiast zwiększenie tej prędkości zwiększa odkształcenia graniczne, gdyż poprzez zwiększenie prędkości odkształcania pochodzącej od skręcania zwiększony został udział w odkształceniu zastępczym odkształceń pochodzących od sposobu odkształcania, który wolniej prowadzi do lokalizacji odkształcenia (próba skręcania).

Ponieważ brąz krzemowy CuSi_{3,5} w temperaturze 600 °C ma dużą czułość na prędkość odkształcania porównywać można jedynie w tych warunkach odkształcania różne przebiegi naprężenia dla podobnej zastępczej prędkości odkształcania. Uwzględniając ten warunek przebiegi monotoniczne dla prędkości odkształcania wynoszącej $0,1\text{ s}^{-1}$ można porównywać na przykład ze złożonym schemat odkształcania składającego się z małowykłowego skręcania z prędkością $0,1\text{ s}^{-1}$ i rozciągania z prędkością $0,01\text{ s}^{-1}$, bowiem zastępcza prędkość odkształcania dla złożonego odkształcania będzie większa od zastępczej prędkości dla monotonicznego odkształcania jedynie o $0,0005\text{ s}^{-1}$. Ta niewielka różnica nie powinna mieć większego wpływu na naprężenie zastępcze. Naprężenie zastępcze jak i odkształcenia graniczne dla tego złożonego odkształcania dla różnych amplitudy leży pomiędzy naprężeniem uzyskanym w monotonicznej próbie rozciągania i skręcania (rys. 6.1.2.7.).



Rys. 6.1.2.6. Przebiegi naprężenia zastępczego w funkcji odkształcenia zastępczego dla złożonego procesu odkształcania przy prędkości odkształcania pochodzącej od siły rozciągającej $0,01\text{s}^{-1}$ i dla prędkości odkształcania pochodzącej od momentu skręcającego zmieniającej się w zakresie od $0,01$ do 1s^{-1} dla brązu krzemowego CuSi3,5 w temperaturze $600\text{ }^{\circ}\text{C}$

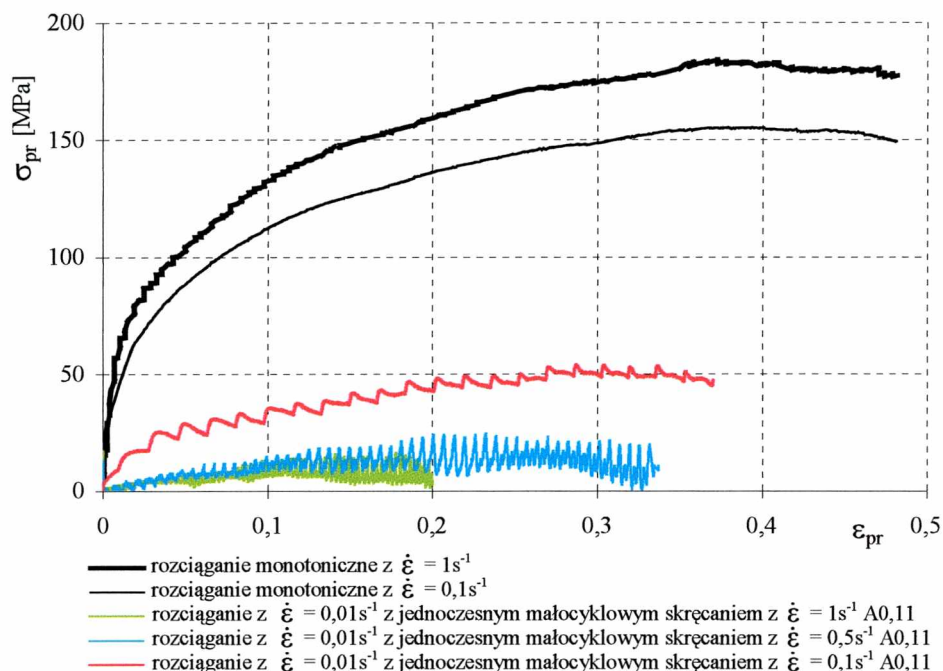


Rys. 6.1.2.7. Przebiegi naprężenia zastępczego w funkcji odkształcenia zastępczego dla złożonego procesu odkształcania przy prędkości odkształcania pochodzącej od siły rozciągającej $0,01\text{s}^{-1}$ i od momentu skręcającego $0,1\text{s}^{-1}$ dla brązu krzemowego CuSi3,5 w temperaturze $600\text{ }^{\circ}\text{C}$

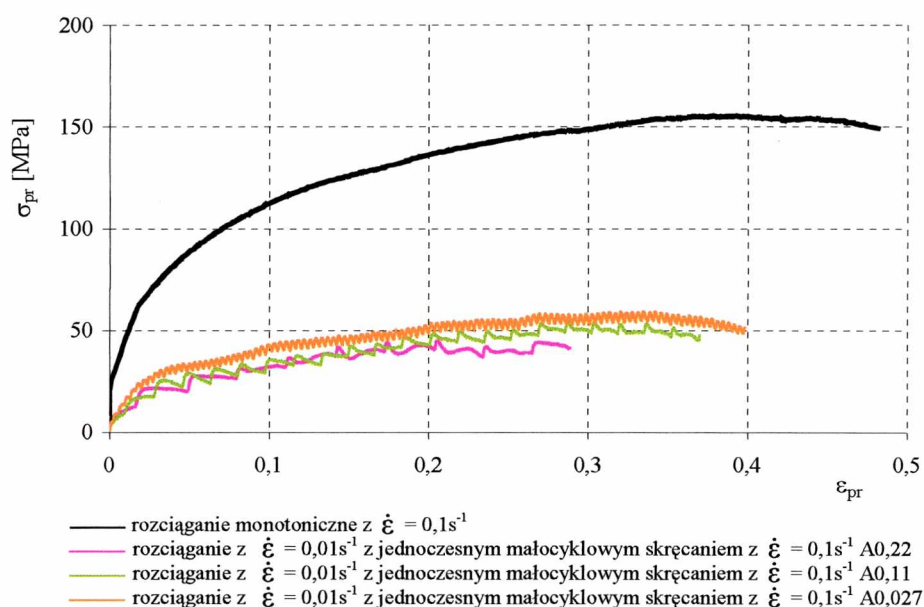
W przeciwieństwie do temperatury otoczenia zmiana amplitudy dodatkowego odkształcania małycklowego dla tej samej zastępczej prędkości odkształcania nie wpływa na poziom naprężeń zastępczych oraz odkształcać granicznych.

Podobną analizę jak w temperaturze otoczenia wpływu dodatkowego skręcania małycklowego na naprężenia pochodzącego od siły rozciągającej przeprowadzona dla prób

wykonanych w temperaturze 600 °C. Uzyskane zależności pomiędzy naprężeniem i odkształceniem pochodzącym od siły rozciągającej dla przebiegów przedstawionych na rys. 6.1.2.6. i 6.1.2.7. przedstawiono na rys. 6.1.2.8. i 6.1.2.9.



Rys. 6.1.2.8. Przebiegi naprężenia w funkcji odkształcenia pochodzące od siły rozciągającej przy prędkości odkształcania pochodzącej od siły rozciągającej 0,01 s⁻¹ i dla prędkości odkształcania pochodzącej od momentu skręcającego zmieniającej się w zakresie od 0,01 do 1 s⁻¹ na tle rozciągania monotonicznego dla różnych prędkości odkształcania dla brązu krzemowego CuSi_{3,5} w temperaturze 600 °C



Rys. 6.1.2.9. Przebiegi naprężenia w funkcji odkształcenia pochodzące od siły rozciągającej przy prędkości odkształcania pochodzącej od siły rozciągającej 0,01 s⁻¹ i od momentu skręcającego 0,1 s⁻¹ dla różnych amplitud dla brązu krzemowego CuSi_{3,5} w temperaturze 600 °C

Na rys. 6.1.2.8. przedstawiono wpływ prędkości odkształcania pochodzącej od momentu skręcającego na naprężenie rozciągające. Na rysunku tym przedstawiono również przebiegi uzyskane w próbie monotonicznego rozciągania dla zastępczej prędkości odkształcania 0,1 i 1 s⁻¹, gdyż dla złożonych procesów odkształcania uzyskiwano takie właśnie zastępcze prędkości odkształcania. Charakterystyczne jest to, że zwiększanie prędkości skręcania powoduje, pomimo że brąz krzemowy wykazuje znaczną czułość na prędkość odkształcania, spadek naprężeń rozciągających, które dla złożonych schematów odkształcania leżą znacznie poniżej naprężeń określonych w próbach monotonicznych. Zwiększenie prędkości skręcania powoduje obniżenie odkształceń granicznych w kierunku rozciągania, gdyż przyspiesza to lokalizację odkształcenia. Zwiększenie natomiast amplitudy w bardzo niewielkim stopniu obniża zarówno naprężenie rozciągające i odkształcenia graniczne w kierunku rozciągania (rys. 6.1.2.9.).

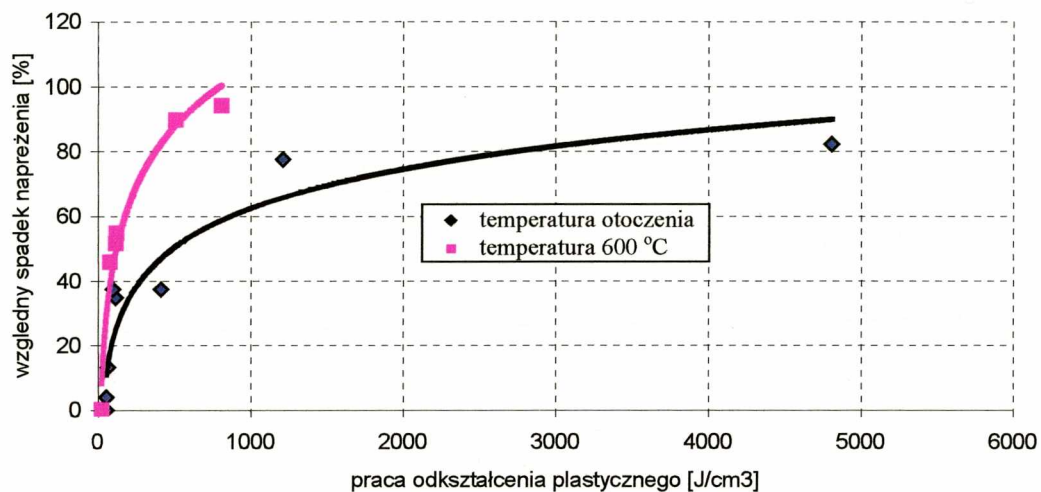
Również podobnie jak w temperaturze otoczenia przeprowadzono analizę pracy odkształcenia plastycznego omawianych złożonych sposobów odkształcania. Przyjęto, że celem jest uzyskanie określonego kształtu - wydłużenie próbki równe 0,2 przy jak najmniejszej pracy odkształcenia plastycznego. Uzyskane wartości prac dla poszczególnych sposobów odkształcania zostały umieszczone w tabeli 6.1.2. W tabeli tej przedstawiono również względny spadek naprężenia maksymalnego pochodzącego od siły rozciągającej dla różnych sposobów odkształcania złożonego, który został wyznaczony ze wzoru (6.1.1.1). Podczas wyznaczania względnego spadku naprężenia porównywano naprężenie rozciągające uzyskane w złożonych schematach odkształcenia z naprężeniem wyznaczonym w monotonicznej próbie rozciągania przy podobnych prędkościach odkształcania

Na rys. 6.1.2.10. przedstawiono zależność między pracą odkształcenia plastycznego dla różnych złożonych procesów odkształcania a względnym spadkiem naprężenia. Najmniejszą pracę odkształcenia plastycznego uzyskano dla monotonicznego rozciągania. Wprowadzenie dodatkowego małowrotowego skręcania we wszystkich przypadkach powoduje wzrost tej pracy. Im większa praca dodatkowego odkształcenia małowrotowego tym większy spadek naprężenia pochodzącego od siły rozciągającej.

Nieco odmienne zachowanie się materiału podczas odkształcania na zimno i na gorąco wynika z tego, że w materiale odkształcanym na gorąco intensywnie zachodzą procesy odbudowy struktury, które eliminują oddziaływanie historii odkształcania.

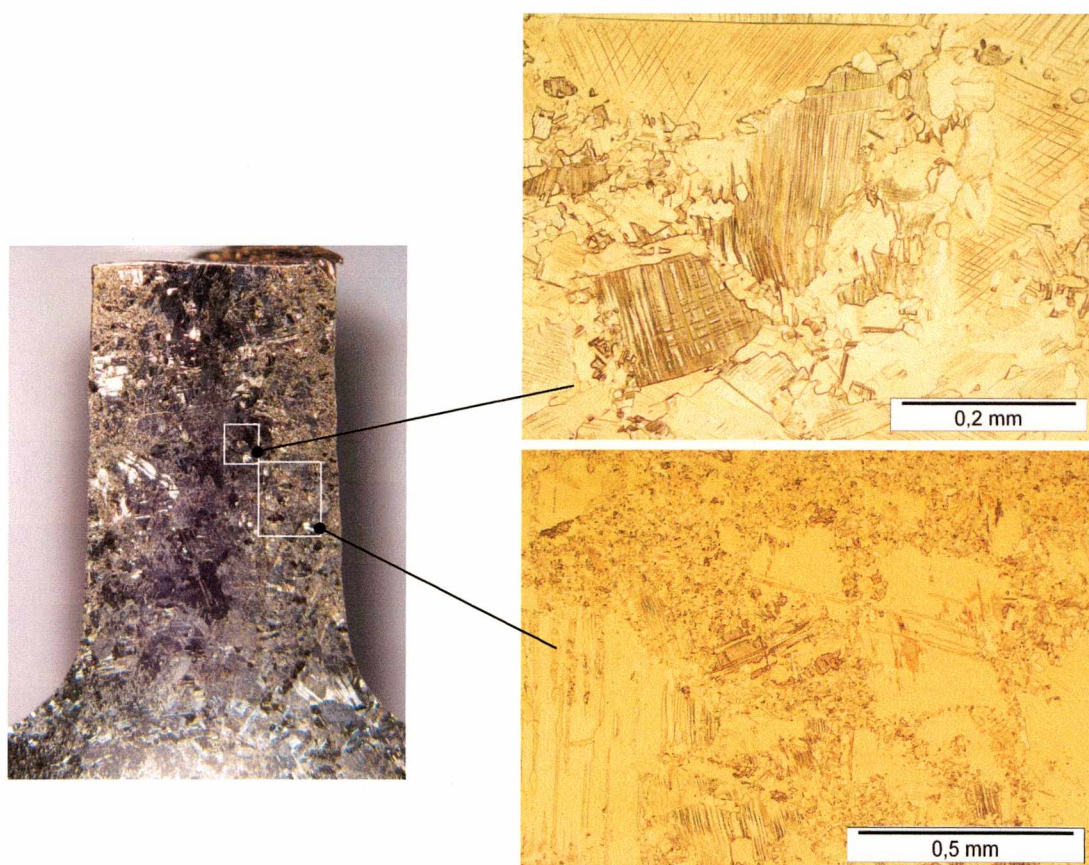
Tabela 6.1.2. Wartości prac odkształcenia plastycznego oraz względny spadek naprężenia pochodzącego od siły rozciągającej dla poszczególnych sposobów odkształcania przy wydłużeniu próbki do odkształcenia 0,2 dla brązu krzemowego CuSi3,5

Rodzaj próby	Praca odkształcenia plastycznego pochodząca od siły rozciągającej [J/cm ³]	Praca odkształcenia plastycznego pochodząca od momentu skręcającego [J/cm ³]	Całkowita praca odkształcenia plastycznego [J/cm ³]	$\Delta\sigma_p$ [%]
monotoniczne rozciąganie z prędkością odkształcania $\dot{\epsilon}_p = 0,01 \text{ s}^{-1}$	14,7		14,7	0
monotoniczne rozciąganie z prędkością odkształcania $\dot{\epsilon}_p = 0,1 \text{ s}^{-1}$	19,9		19,9	0
monotoniczne rozciąganie z prędkością odkształcania $\dot{\epsilon}_p = 1 \text{ s}^{-1}$	25		25	0
odkształcanie złożone rozciąganie ($\dot{\epsilon}_{pr} = 0,01 \text{ s}^{-1}$) i skręcania ($\dot{\epsilon}_{ps} = 0,1 \text{ s}^{-1}$) amplituda 0,027	7,5	72	79,5	61
odkształcanie złożone rozciąganie ($\dot{\epsilon}_{pr} = 0,01 \text{ s}^{-1}$) i skręcania ($\dot{\epsilon}_{ps} = 0,1 \text{ s}^{-1}$) amplituda 0,11	6	112,5	117,5	62
odkształcanie złożone rozciąganie ($\dot{\epsilon}_{pr} = 0,01 \text{ s}^{-1}$) i skręcania ($\dot{\epsilon}_{ps} = 0,1 \text{ s}^{-1}$) amplituda 0,22	5	120	125	63
odkształcanie złożone rozciąganie ($\dot{\epsilon}_{pr} = 0,01 \text{ s}^{-1}$) i skręcania ($\dot{\epsilon}_{ps} = 0,5 \text{ s}^{-1}$) amplituda 0,11	2	510	512	89,5
odkształcanie złożone rozciąganie ($\dot{\epsilon}_{pr} = 0,01 \text{ s}^{-1}$) i skręcania ($\dot{\epsilon}_{ps} = 1 \text{ s}^{-1}$) amplituda 0,22	1	810	811	93,9



Rys. 6.1.2.10. Zależność między pracą odkształcenia plastycznego dla różnych złożonych sposobów odkształcania a względnym spadkiem naprężenia

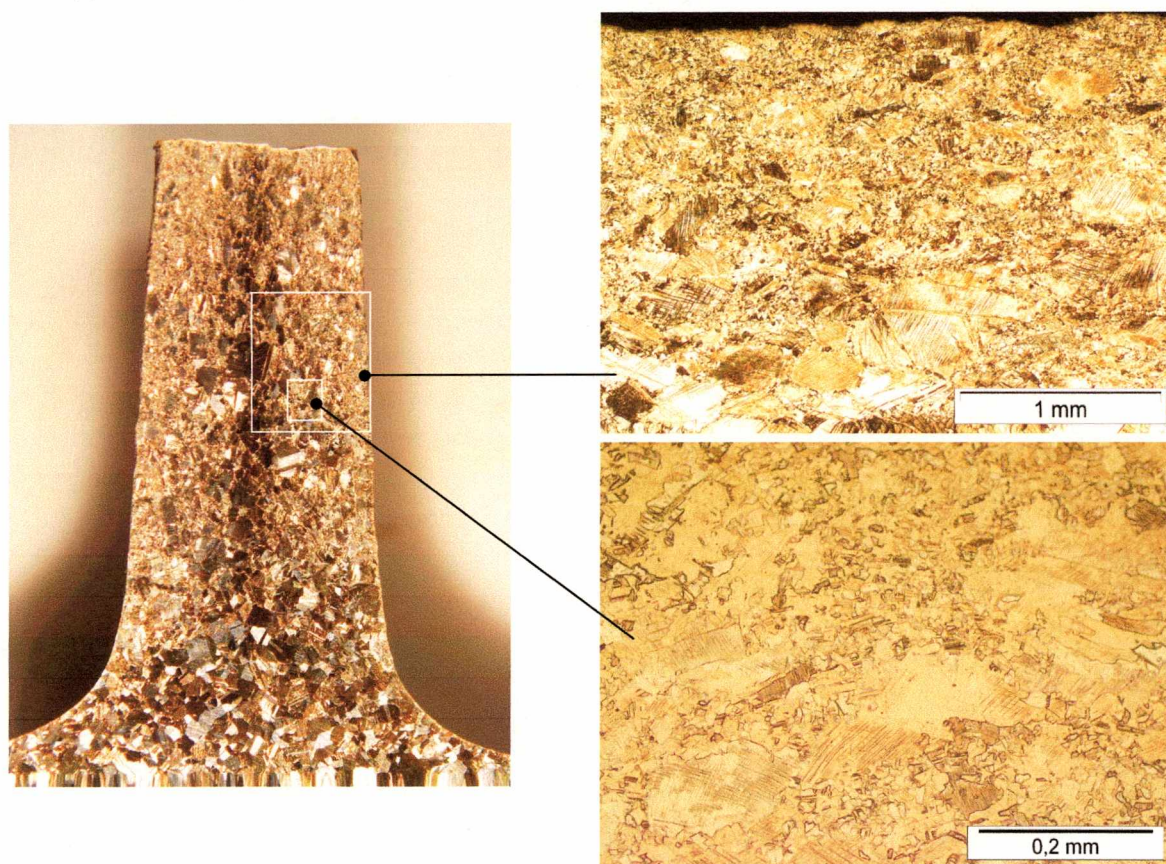
Struktura brązu krzemowego CuSi3,5 po złożonym odkształceniu w temperaturze 600°C



Rys. 6.1.2.11. Struktura brązu krzemowego CuSi_{3,5} po rozciąganiu ($\dot{\epsilon}_{pr} = 0,01 \text{ s}^{-1}$) z równoczesnym skręcaniem małowykwym ($\dot{\epsilon}_{ps} = 0,1 \text{ s}^{-1}$) z amplitudą 0,22 do odkształcenia zastępczego 1,2 w temperaturze 600 °C

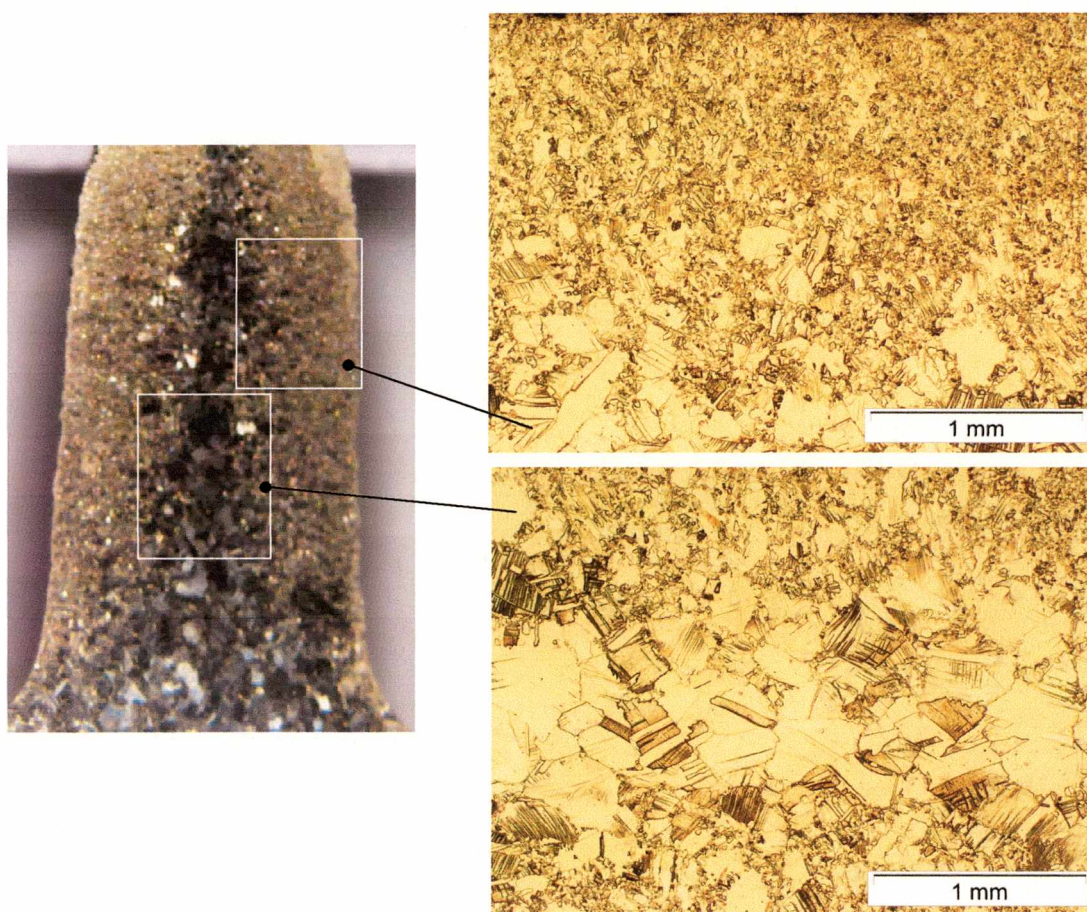
Badania strukturalne przeprowadzone zostały głównie dla schematów odkształcania, w których próbka była jednocześnie skręcana małowykłowo i rozciągana. Podczas takiego odkształcania proces rekryształizacji dynamicznej nie występuje w całej objętości materiału odkształcanego. W warstwie środkowej próbki wzdłuż jej osi, gdzie występują głównie odkształcenia pochodzące od rozciągania, rekryształizacja zachodzi tylko na granicach ziaren, w warstwach zewnętrznych, w których odkształcenia pochodzą zarówno od rozciągania jak i skręcania, występują obszary, w których doszło do rekryształizacji dynamicznej, przy czym w obszarach tych pojawiają się jeszcze nie zrekrystalizowane w pełni ziarna (rys. 6.1.2.11).

Dla tych samych warunków odkształcania i sposobu odkształcania zmniejszenie amplitudy małowykłowego dodatkowego skręcania powoduje zwiększenie liczby obszarów, które uległy zrekrystalizowaniu. Na przykład dla najmniejszej zastosowanej amplitudy 0,027 w warstwach zewnętrznych próbki prawie cała objętość materiału uległa rekryształizacji, natomiast w warstwach bliskich osi nadal materiał rekryształizuje głównie w pobliżu granic ziaren (rys. 6.1.2.12)



Rys. 6.1.2.12. Struktury brązu krzemowego CuSi_{3,5} po rozciąganiu ($\dot{\epsilon}_{pr} = 0,01 \text{ s}^{-1}$) z równoczesnym skręcaniem małowykłowym ($\dot{\epsilon}_{ps} = 0,1 \text{ s}^{-1}$) z amplitudą 0,027 do odkształcenia zastępczego 1,2 w temperaturze 600 °C

Pomimo, że wraz ze zmniejszaniem amplitudy odkształcania następuje wzrost liczby obszarów, w których dochodzi do rekrytalizacji dynamicznej, struktura po odkształcaniu złożonym z rozciągania i małowykłowego skręcania dla wszystkich zastosowanych amplitud charakteryzuje się dużą niejednorodnością występowania rekrytalizacji dynamicznej świadcząca o dużej nierównomierności odkształcenia. Obok siebie leżą obszary, w których wystąpiła pełna rekrytalizacja i w których w ogóle ona nie zaszła. W przypadku odkształcania monotonicznego takiej niejednorodności procesu rekrytalizacji nie ma (rys. 5.1.2.4 i rys. 5.1.2.5). Również bardziej równomierny rozkład obszarów zrekrystalizowanych uzyskano w próbie równoczesnego rozciągania ze skręcaniem, pomimo, że w tym przypadku w obszarach bliskich osi próbki nie dochodzi prawie całkowicie do rekrytalizacji dynamicznej (rys. 6.1.2.13). Badania te potwierdziły spostrzeżenia z temperatury otoczenia, że dodatkowe cykliczne odkształcanie powoduje lokalizuje odkształcenia w pasmach ścinania, w których jako proces wtórny występuje rekrytalizacja dynamiczna.



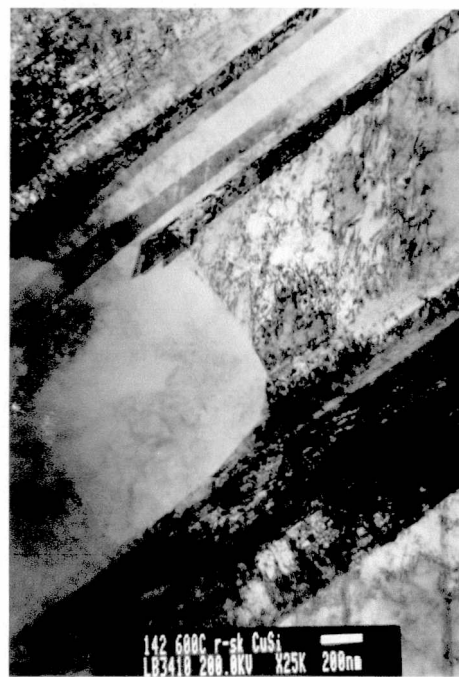
Rys. 6.1.2.13. Strukturę brązu krzemowego $\text{CuSi}_{3,5}$ po rozciąganiu ($\dot{\epsilon}_{pr} = 0,01 \text{ s}^{-1}$) z równoczesnym skręcaniem ($\dot{\epsilon}_{ps} = 0,1 \text{ s}^{-1}$) do odkształcenia zastępczego 1,2 w temperaturze $600 \text{ }^{\circ}\text{C}$

W brązie krzemowym odkształcanym na gorąco można zaobserwować powstające zarodki rekrytalizacji dynamicznej (granice są wypukłe oraz występuje wyraźna różnica w gęstości dyslokacji w stosunku do obszarów sąsiednich) (rys. 6.1.2.14) oraz migrujące fronty rekrytalizacji dynamicznej, który zastępuje strukturę z bliźniakami odkształcenia nową strukturą (rys. 6.1.2.15). W badanym brązie krzemowym oprócz bliźniaków odkształcenia występują bliźniaki wyżarzania. Na rys. 6.1.2.16 bliźniak wyżarzania dzieli ziarno na dwie części. Bliźniaki wyżarzania są znacznie większe od bliźniaków odkształcenia.

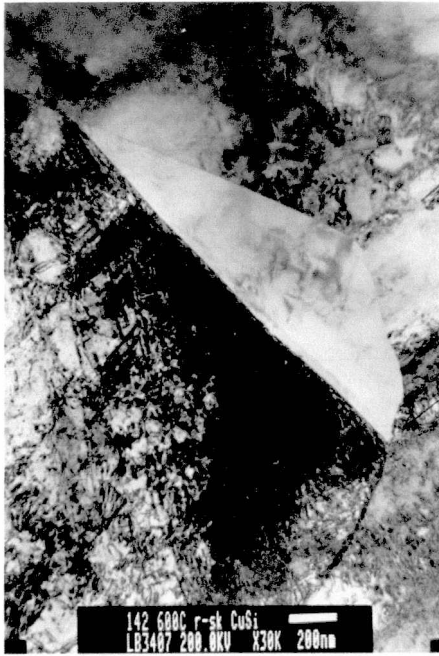
W przypadku, gdy bliźniaki odkształcenia napotykaą na granicę ziarna tworzą się koncentracja naprężeń w ziarnie sąsiednim, która może wymusić albo poślizg dyslokacyjny, co prowadzi do powstania grubych pasm poślizgu lub w przypadku, gdy kierunek wywołanych naprężeń na granicy ziaren sprzyja tworzeniu się bliźniaka w następnym ziarnie powstają bliźniaki odkształcenia w sąsiednim ziarnie (rys. 6.1.2.17). Na rys. 6.1.2.18 przedstawiono dyfraktogram z pasa krystalograficznego typu $\langle 110 \rangle$ zrobiony z obszaru gdzie występowały bliźniaki odkształcenia. Refleksy zaznaczone kolorem białym pochodzą do osnowy natomiast refleksy zaznaczone kolorem czerwonym od bliźniaka.



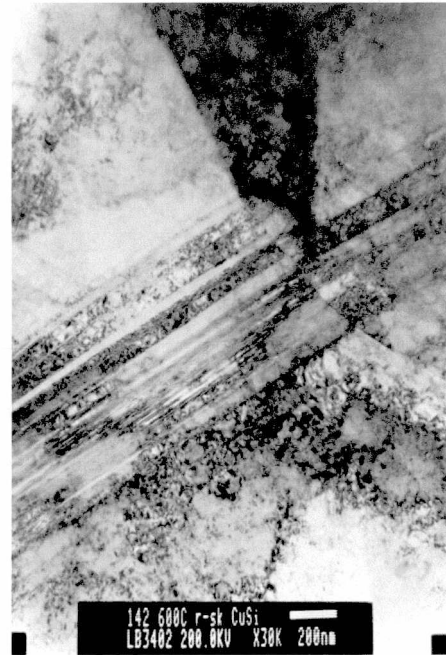
Rys. 6.1.2.14. Zarodek rekrytalizacji w strukturze brązu krzemowego $\text{CuSi}_{3,5}$ po rozciąganiu ($\dot{\epsilon}_{pr} = 0,01 \text{ s}^{-1}$) z równoczesnym skręcaniem małowykłowym ($\dot{\epsilon}_{ps} = 0,1 \text{ s}^{-1}$) z amplitudą 0,11 do odkształcenia zastępczego 1,2 w temperaturze 600°C



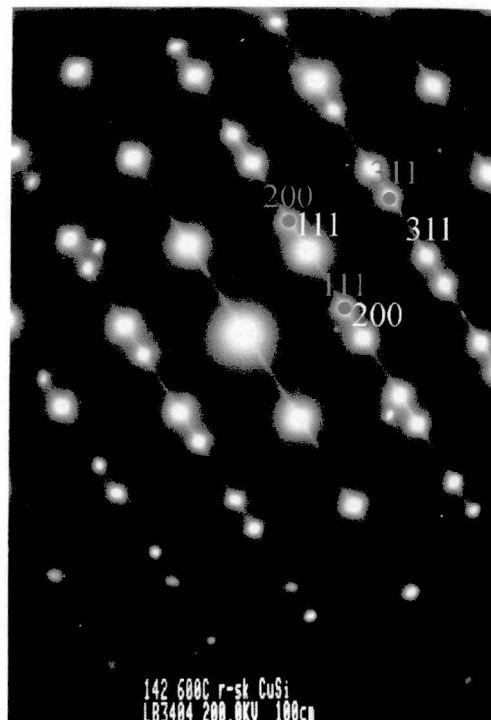
Rys. 6.1.2.15. Migrujący front rekrytalizacji w strukturze brązu krzemowego $\text{CuSi}_{3,5}$ po rozciąganiu ($\dot{\epsilon}_{pr} = 0,01 \text{ s}^{-1}$) z równoczesnym skręcaniem małowykłowym ($\dot{\epsilon}_{ps} = 0,1 \text{ s}^{-1}$) z amplitudą 0,11 do odkształcenia zastępczego 1,2 w temperaturze 600°C



Rys. 6.1.2.16. Bliźniak wyżarzania w strukturze brązu krzemowego CuSi_{3,5} po rozciąganiu ($\dot{\epsilon}_{pr} = 0,01 \text{ s}^{-1}$) z równoczesnym skręcaniem małowykłowym ($\dot{\epsilon}_{ps} = 0,1 \text{ s}^{-1}$) z amplitudą 0,11 do odkształcenia zastępczego 1,2 w temperaturze 600 °C



Rys. 6.1.2.17. Wymuszenie bliźniaka odkształcenia w sąsiednim ziarnie w strukturze CuSi_{3,5} po rozciąganiu ($\dot{\epsilon}_{pr} = 0,01 \text{ s}^{-1}$) z równoczesnym skręcaniem małowykłowym ($\dot{\epsilon}_{ps} = 0,1 \text{ s}^{-1}$) z amplitudą 0,11 do odkształcenia zastępczego 1,2 w temperaturze 600 °C



Rys. 6.1.2.18. Dyfraktogram z pasa krystalograficznego $\langle 110 \rangle$ dla brązu krzemowego CuSi_{3,5} po rozciąganiu ($\dot{\epsilon}_{pr} = 0,01 \text{ s}^{-1}$) z równoczesnym małowykłowym skręcaniem ($\dot{\epsilon}_{ps} = 0,1 \text{ s}^{-1}$) z amplitudą 0,11 do odkształcenia zastępczego 1,2 w temperaturze 600 °C (TEM)

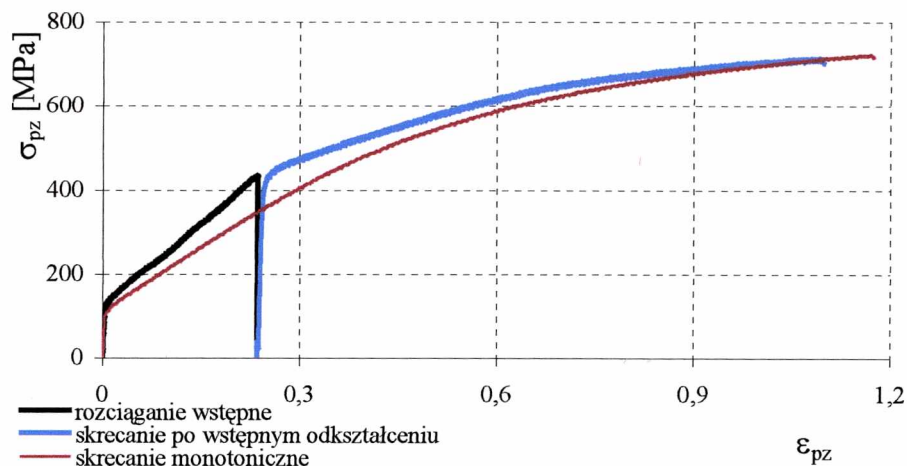
6.2. Brąz aluminiowy CuAl8

W celu sprawdzenia czy inne stopy miedzi reagują na zmianę drogi odkształcania podobnie jak brąz krzemowy CuSi3,5 przeprowadzono próby złożonego odkształcania brązu aluminiowego CuAl8.

6.2.1. Badania brązu aluminiowego CuAl8 w temperaturze otoczenia

Procesy sekwencyjnego odkształcania brązu aluminiowego CuAl8 momentem skręcającym i siłą rozciągającą w temperaturze pokojowej

Na rys. 6.2.1.1 przedstawiono zależność pomiędzy naprężeniem zastępczym a odkształceniem zastępczym dla próbki, która została wstępnie rozciągnięta do odkształcenia 0,23 a następnie skrzyta do zniszczenia. Na tym samym rysunku przedstawiono także, przebieg naprężenia dla monotonicznej próby skrzywania. Po zmianie drogi odkształcania uzyskano naprężenie zastępcze zbliżone do naprężenia uzyskanego w końcowym procesie rozciągania wstępnego. Początkowo jest ono znacznie wyższe niż w próbie monotonicznego skrzywania, jednak wraz ze wzrostem odkształceń różnica ta zmniejsza się tak, że dla odkształceń granicznych osiąga ten sam poziom. Podobny wzrost naprężenia zastępczego w próbie skrzywania po wstępnym rozciąganiu w stosunku do monotonicznego skrzywania uzyskano dla brązu krzemowego CuSi3,5. Jednakże w przypadku brązu krzemowego CuSi3,5 naprężenie po zmianie drogi odkształcania nie zbliża się wraz z odkształceniem do naprężenia w próbie monotonicznego skrzywania.



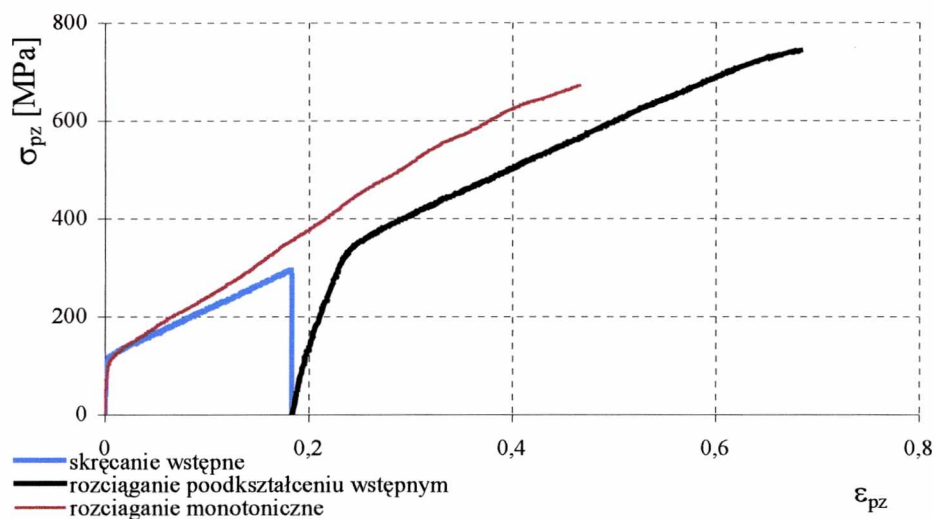
Rys. 6.2.1.1. Przebieg naprężenia zastępczego otrzymany w próbie skrzywania próbki wstępnie rozciągniętej do odkształcenia 0,23 oraz przebieg naprężenia zastępczego uzyskanego podczas monotonicznego skrzywania dla brązu aluminiowego CuAl8 przy prędkości odkształcania $0,1\text{s}^{-1}$ w temperaturze otoczenia

Różnica ta może wynikać z faktu, że dla brązu aluminiowego CuAl8 w przeciwieństwie do CuSi3,5 poziomy naprężeń uzyskanych podczas monotonicznego skrzywania i rozciągania

znacznie różnią się od siebie (rys. 5.2.1.1). Na przykład dla odkształcenia 0,2 dla brązu krzemowego CuSi3,5 naprężenia uzyskane w próbie rozciągania i skręcania monotonicznego mają prawie tę samo wartość, podczas gdy dla brązu aluminiowego CuAl8 różnica między tymi naprężeniami wynosi około 80 MPa.

Na rys. 6.2.1.2 przedstawiono natomiast zależność pomiędzy naprężeniem zastępczym a odkształceniem zastępczym dla przypadku, gdy próbka jest wstępnie skręcona, a następnie poddana rozciąganiu aż do pęknięcia. Podobnie jak dla brązu krzemowego CuSi3,5 (rys. 6.1.1.4), otrzymano niższe naprężenie zastępcze podczas rozciągania po wstępnym skręcaniu w porównaniu z naprężeniem zastępczym uzyskanym w monotonicznej próbie rozciągania, przy czym dla brązu aluminiowego różnica ta wynosi około 120 MPa natomiast dla brązu krzemowego CuSi3,5 około 60 MPa. Ta niewielka niezgodność zachowania się brązu aluminiowego CuAl8 i brązu krzemowego CuSi3,5 wynika, z różnych wartości ich naprężeń w próbie monotonicznego rozciągania i skręcania.

Tak samo jak dla brązu krzemowego CuSi3,5, zaobserwowano, że podczas rozciągania próbki wstępnie odkształconej poprzez skręcanie, otrzymano krzywą umocnienia, na której można wyróżnić dwa zakresy o różnym współczynniku umocnienia. W złożonej sekwencyjnej próbie odkształcania uzyskano również nieznacznie większe odkształcenie graniczne niż w próbie monotonicznego rozciągania.



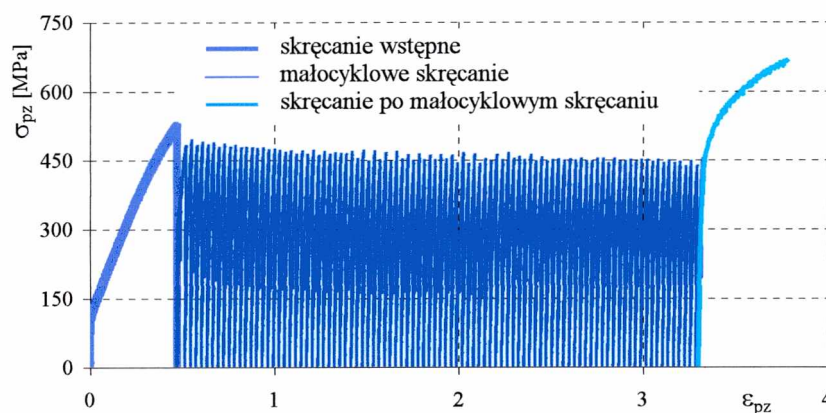
Rys. 6.2.1.2. Przebieg naprężenia zastępczego otrzymane w próbie rozciągania próbki wstępnie skręconej do odkształcenia 0,18 oraz przebieg naprężenia zastępczego uzyskanego podczas monotonicznego rozciągania dla brązu aluminiowego CuAl8 przy prędkości odkształcania $0,1s^{-1}$ w temperaturze otoczenia

Podobnie jak w przypadku brązu krzemowego CuSi3,5, poprzez wprowadzenie odpowiedniej nagłej zmiany schematu odkształcania można wywołać zmniejszenie lub

zwiększenie naprężenia zastępcze dla brązu aluminium CuAl8. Biorąc to pod uwagę postanowiono zbadać wpływ dodatkowego cyklicznego skręcania na przebieg naprężenia uplastyczniającego i odkształcenie graniczne brązu aluminium CuAl8 w złożonych sposobach odkształcania.

Procesy sekwencyjnego odkształcania brązu aluminium CuAl8 cyklicznym momentem skręcającym i siłą rozciągającą lub momentem skręcającym w temperaturze pokojowej

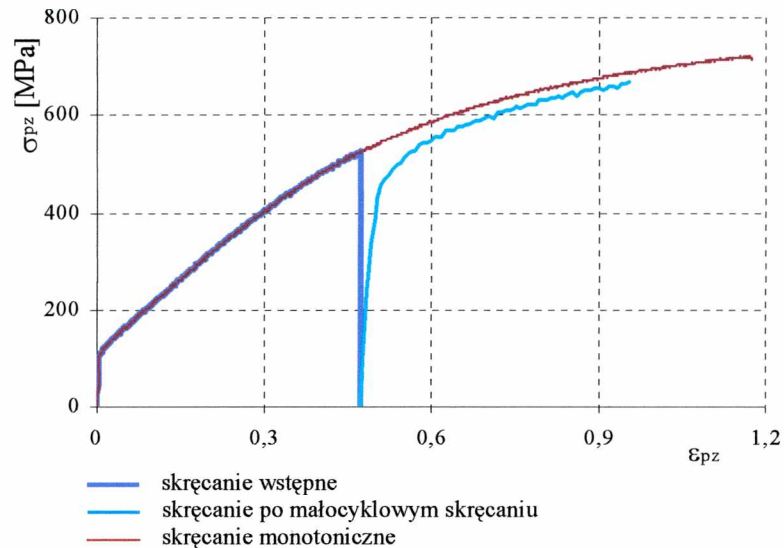
Dla ustalenia wpływu małowykłowego skręcania na zachowanie się wstępnie odkształconego materiału (podobnie jak dla brązu krzemowego CuSi3,5, przeprowadzono następujące dwa eksperymenty. Pierwszy obejmował wstępne skręcanie monotoniczne do odkształcenia wynoszącego 0,5, po którym następowało skręcanie małowykłowe z amplitudą 0,11 do odkształcenia 3,3 i ponowne skręcanie monotoniczne w tym samym kierunku, co w pierwszym schemacie odkształcenia aż do zniszczenia próbki (rys. 6.2.1.3).



Rys. 6.2.1.3. Przebiegi naprężenia zastępczego uzyskanego podczas sekwencyjnego odkształcania obejmującego następujące schematy odkształcania: wstępne monotoniczne skręcanie, małowykłowe skręcanie z amplitudą 0,11 oraz ponowne skręcanie w tym samym kierunku, co w pierwszym schemacie dla brązu aluminium CuAl8 przy prędkości odkształcania $0,1\text{s}^{-1}$ w temperaturze otoczenia

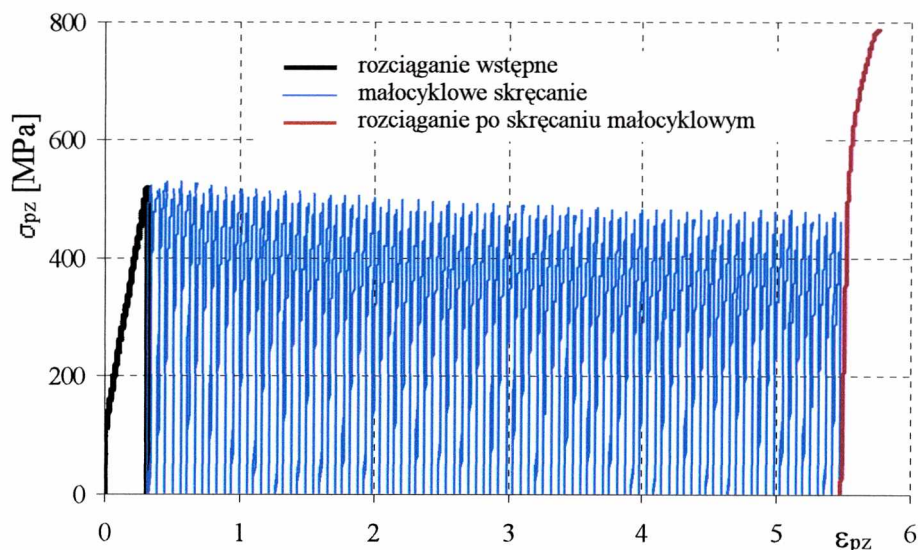
Próbka wstępnie skręcona podczas odkształcania cyklicznego, w którym zmiana kierunku wektora prędkości przemieszczenia wynosi 180° wykazuje spadek naprężenia uplastyczniającego w kolejnych cyklach odkształcania. W wyniku tego spadku, naprężenie zastępcze ulega obniżeniu z wartości 480 MPa w momencie zmiany kierunku odkształcania do 450 MPa pod koniec małowykłowego skręcania.

Na rys. 6.2.1.4. przedstawiono przebieg z rys. 6.2.1.3. po wycięciu (tylko na wykresie) sekwencji małowykłowego odkształcania na tle próby monotonicznego skręcania. Przebieg naprężenia uzyskany po odkształcaniu małowykłowym, tak jak w przypadku brązu krzemowego CuSi3,5, leży znacznie poniżej przebiegu uzyskanego dla monotonicznego skręcania.



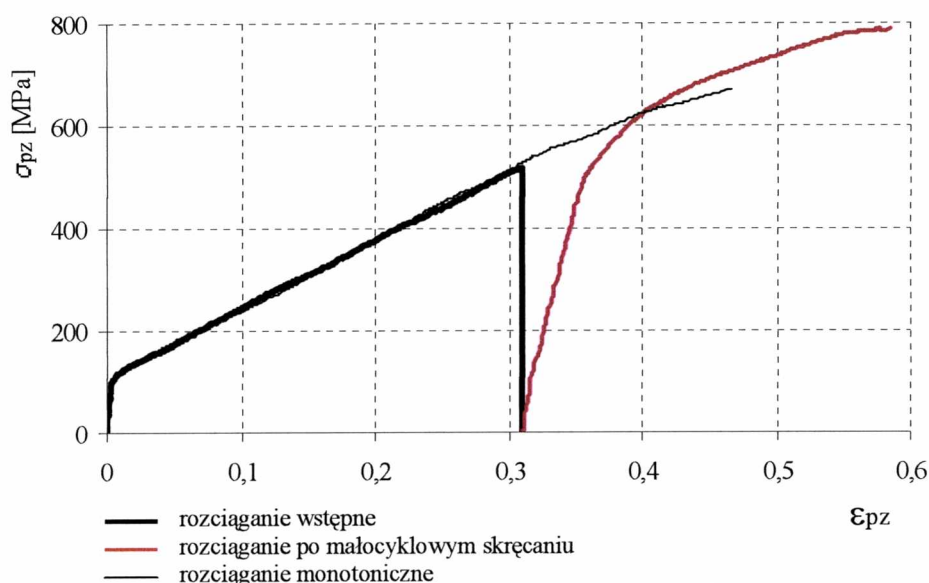
Rys. 6.2.1.4. Przebieg z rys. 6.2.1.3 po wyeliminowaniu sekwencji małowykłowego odkształcania na tle próby monotonicznego skręcania dla brązu aluminiowego CuAl8 przy prędkości odkształcania $0,1s^{-1}$ w temperaturze otoczenia

Drugi eksperyment składał się z wstępnego rozciągania do odkształcenia plastycznego 0,3, po którym następowało skręcanie małowykłowe z amplitudą 0,11 do odkształcenia 5,6 i ponownego rozciągania próbki do jej zniszczenia. Zależność pomiędzy naprężeniem zastępczym a odkształceniem zastępczym dla tej próbki przedstawiono na rys. 6.2.1.5. Podczas odkształcania małowykłowego, w kolejnych cyklach odkształcania, następuje obniżenie naprężenia uplastyczniającego oraz występuje niewielki efekt Buschingera.



Rys. 6.2.1.5. Przebiegi naprężenia uplastyczniającego uzyskanego podczas sekwencyjnego odkształcania obejmującego następujące procesy: wstępne monotoniczne rozciąganie, małowykłowe skręcanie z amplitudą 0,11 oraz ponowne rozciąganie dla brązu aluminiowego CuAl8 przy prędkości odkształcania $0,1s^{-1}$ w temperaturze otoczenia.

Na rys. 6.2.1.6 przedstawiono przebieg z rys. 6.2.1.5. po wycięciu sekwencji małowyciskowego odkształcania (tylko na wykresie) na tle próby monotonicznego rozciągania.



Rys. 6.2.1.6. Przebieg z rys. 6.2.1.5. po wyeliminowaniu sekwencji małowyciskowego odkształcania na tle próby monotonicznego rozciągania

Dla analizowanego schematu odkształcania, naprężenie otrzymane po odkształcaniu małowyciskowym, jest znacznie niższe niż naprężenie uzyskane dla monotonicznego rozciągania ale wraz z odkształceniem ulega bardzo szybkiemu wzrostowi, tak że po odkształceniu 0,1 od momentu zmiany drogi odkształcania uzyskano naprężenie takie same jak w monotonicznej próbie rozciągania.

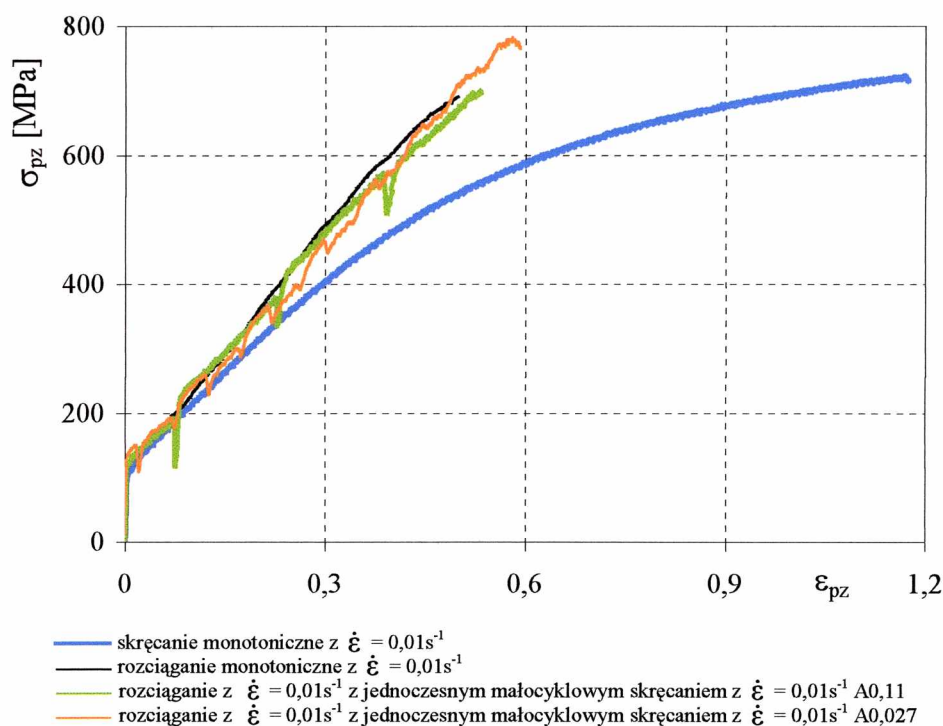
Podsumowując przeprowadzone eksperymenty można stwierdzić, że w sekwencyjnym odkształcaniu dodatkowe odkształcanie małowyciskowe, tak jak w przypadku badań przeprowadzonych na brązie krzemowym CuSi3,5, prowadzi do obniżenia naprężenia w odniesieniu do monotonicznych procesów odkształcania. W dalszej części pracy, przedstawiono wyniki z równoczesnego rozciągania i skręcania małowyciskowych próbek z brązów aluminium CuAl8.

Proces jednoczesnego odkształcania brązu aluminium CuAl8 oscylacyjnym momentem skręcającym i siłą rozciągającą w temperaturze pokojowej

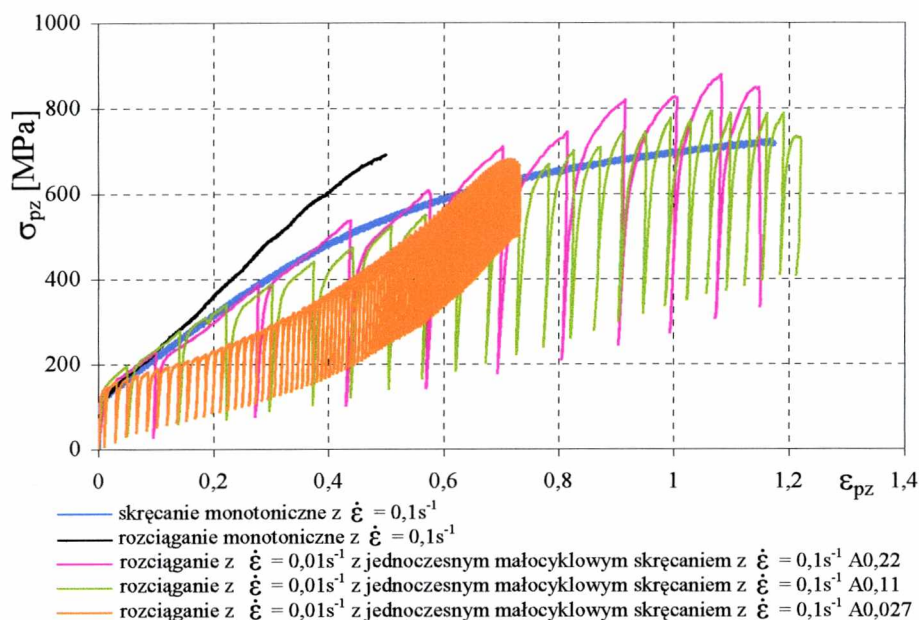
Na rys. 6.2.1.7 - 6.2.1.8 przedstawiono przebiegi naprężenia zastępczego w funkcji odkształcenia zastępczego uzyskane w próbie jednoczesnego odkształcania próbki

oscylacyjnym momentem skręcającym i siłą rozciągającą w temperaturze pokojowej. W badaniach tych, tak samo jak dla brązu krzemowego CuSi3,5 prędkość odkształcania pochodząca od siły rozciągającej była stała i wynosiła 0.01 s^{-1} , natomiast prędkość odkształcania pochodząca od momentu skręcającego zmieniana była w przedziale od 0.01 s^{-1} do 1 s^{-1} . Ponieważ uzyskane rezultaty w omawianych próbach dla brązu aluminium CuAl8 są zgodne z wynikami uzyskanymi dla brązu krzemowego CuSi3,5, w rozdziale tym przedstawiono tylko część najważniejszych wyników.

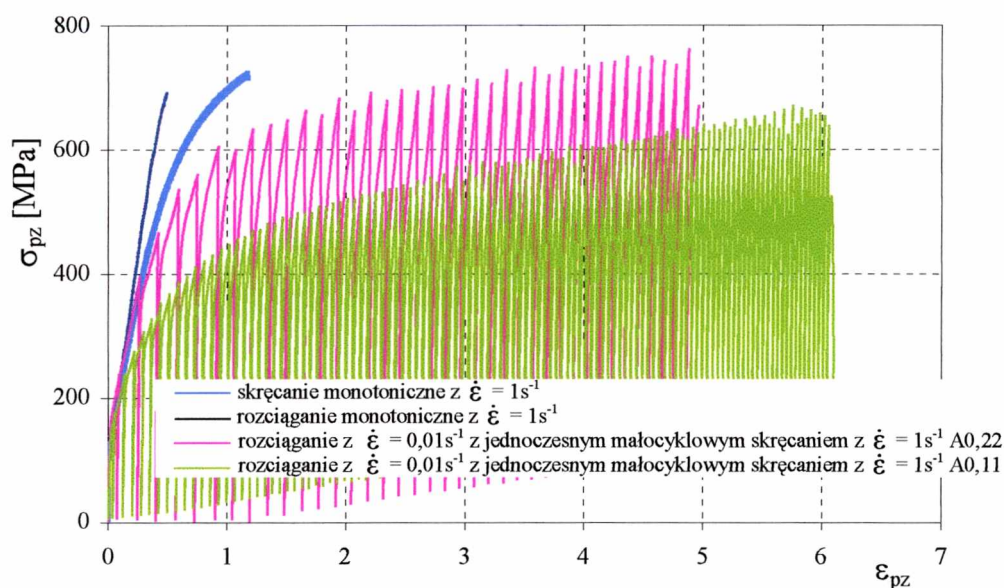
W przypadku, gdy prędkości odkształcania pochodzącego od obu zastosowanych obciążeń są takie same to zarówno odkształcenie graniczne jak i naprężenie zastępcze są zbliżone do wartości uzyskanych w próbie monotonicznego rozciągania (rys. 6.2.1.7). Zwiększenie prędkości odkształcania do $0,1 \text{ s}^{-1}$ pochodzącej od momentu skręcającego powoduje spadek naprężeń zastępczych (rys. 6.2.1.8). Natomiast przy zwiększeniu prędkości odkształcania do 1 s^{-1} , dochodzi do dodatkowego wyraźnego zwiększenia odkształcenia granicznego zarówno w stosunku do odkształceń granicznych dla monotonicznego rozciągania jak i skręcania (rys. 6.2.1.9).



Rys. 6.2.1.7. Przebiegi naprężenia zastępczego w funkcji odkształcenia zastępczego dla złożonego procesu odkształcania przy prędkościach odkształcania pochodzących od siły rozciągającej i momentu skręcającego $0,01 \text{ s}^{-1}$ dla brązu aluminium CuAl8 w temperaturze otoczenia



Rys. 6.2.1.8. Przebiegi naprężenia zastępczego w funkcji odkształcenia zastępczego dla złożonego procesu odkształcania przy prędkości odkształcania pochodzącej od siły rozciągającej 0.01 s^{-1} i od momentu skręcającego 0.1 s^{-1} dla brązu aluminiowego CuAl8 w temperaturze otoczenia

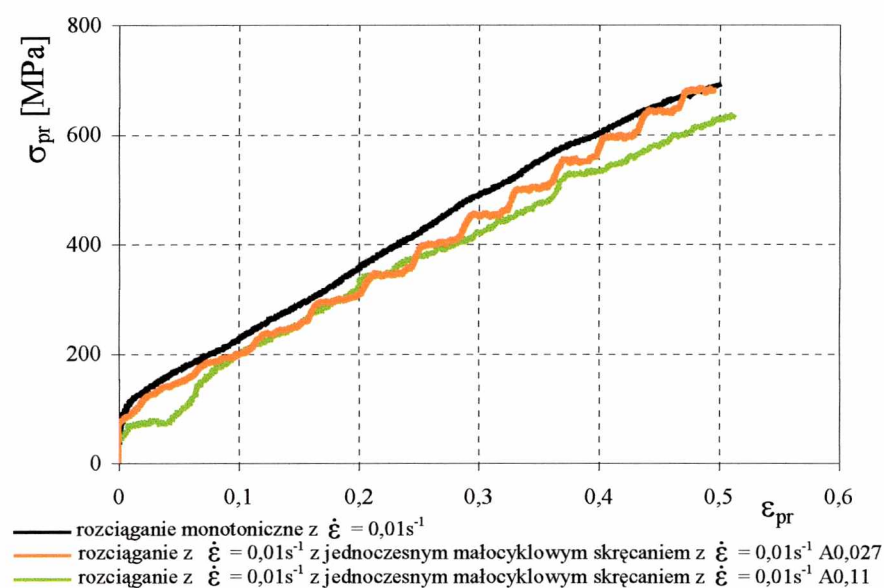


Rys. 6.2.1.9. Przebiegi naprężenia zastępczego w funkcji odkształcenia zastępczego dla złożonego procesu odkształcania przy prędkości odkształcania pochodzącej od siły rozciągającej 0.01 s^{-1} i momentu skręcającego 1 s^{-1} dla brązu aluminiowego CuAl8 w temperaturze otoczenia

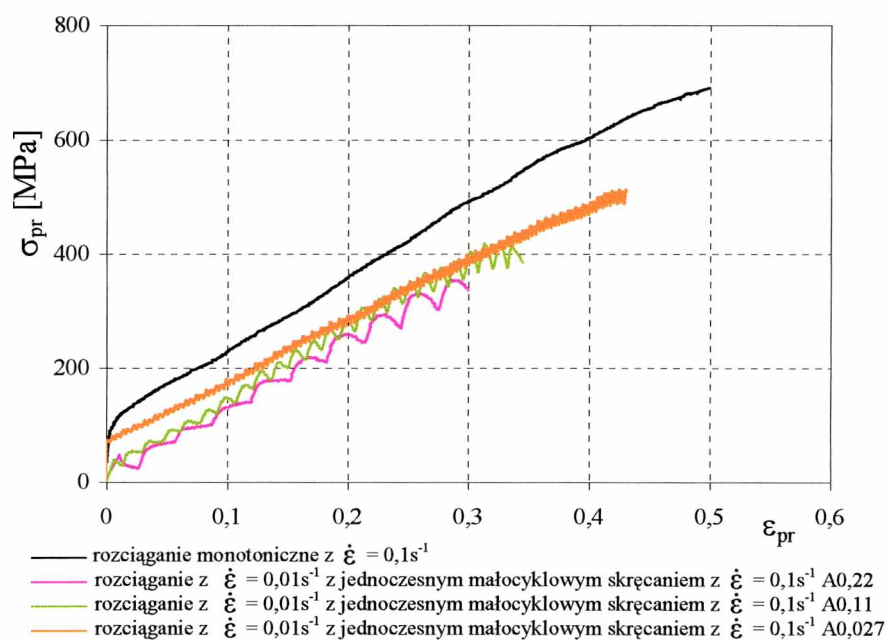
Na podstawie przedstawionych wyników, podobnie jak dla brązu krzemowego CuSi3,5, można stwierdzić, że im mniejsza jest zastosowana amplituda w dodatkowym skręcaniu małowykłowym, tym większy jest spadek naprężenia zastępczego oraz, że zwiększenie

prędkości odkształcania pochodzącej od momentu skręcającego obniża naprężenie zastępcze i zwiększa zastępcze odkształcenia granicznego.

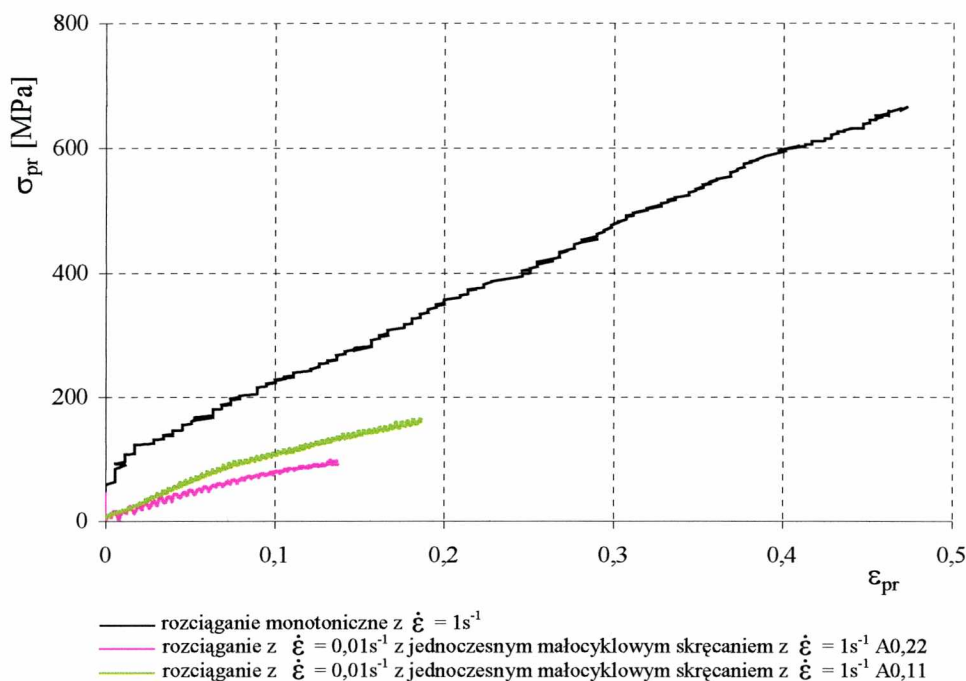
Na rys. 6.2.1.10. – 6.2.1.12. przedstawiono uzyskane zależności pomiędzy naprężeniem i odkształceniem pochodzącym od siły rozciągającej



Rys. 6.2.1.10. Przebiegi naprężenia w funkcji odkształcenia pochodzące od siły rozciągającej przy jednakowych prędkościach odkształcania pochodzących od siły rozciągającej i momentu skręcającego $0,01s^{-1}$ dla brązu aluminiowego CuAl8 w temperaturze otoczenia



Rys. 6.2.1.11. Przebiegi naprężenia w funkcji odkształcenia pochodzące od siły rozciągającej przy prędkości odkształcania pochodzącej od siły rozciągającej $0,01s^{-1}$ i od momentu skręcającego $0,1s^{-1}$ dla brązu aluminiowego CuAl8 w temperaturze otoczenia



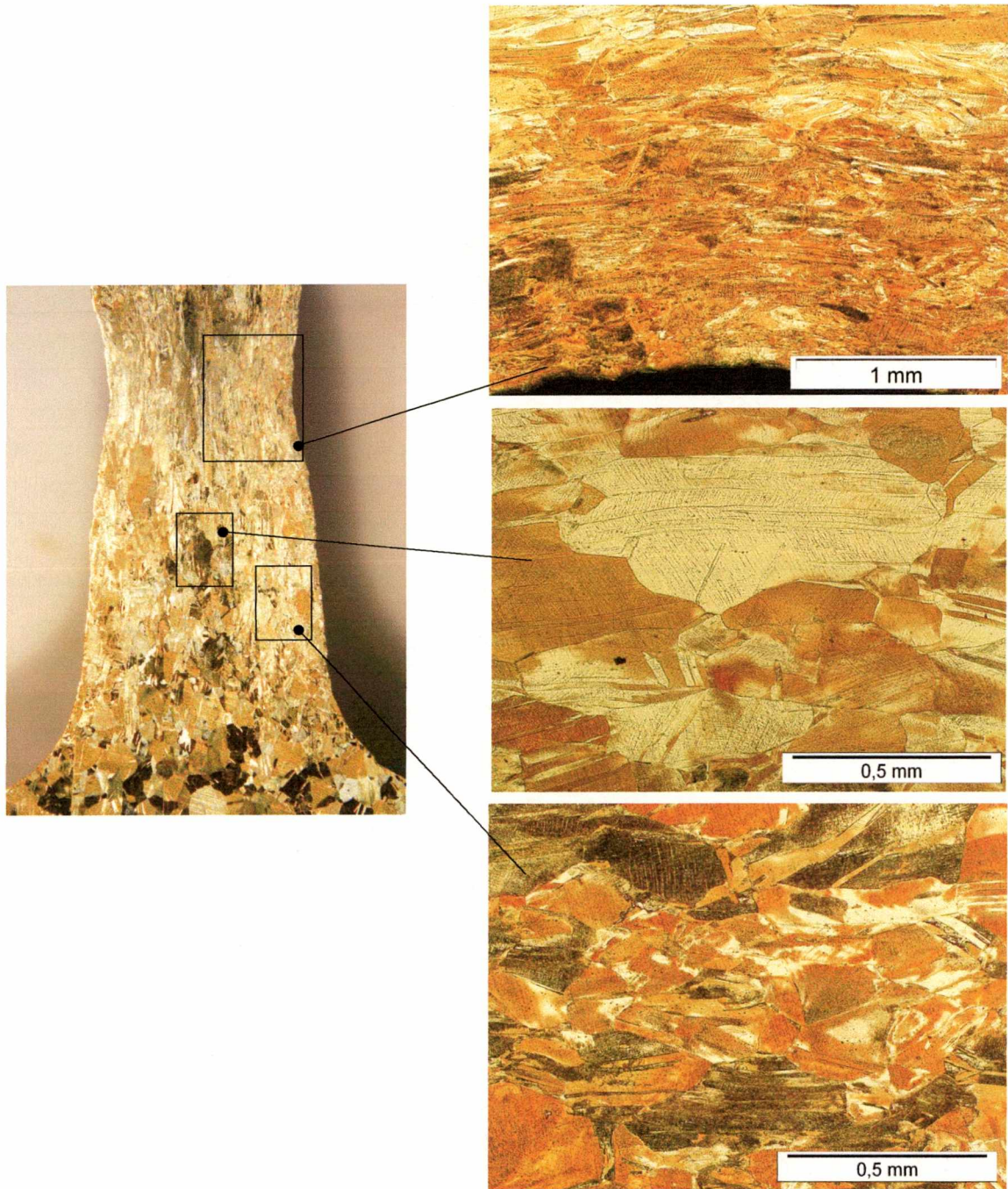
Rys. 6.2.1.12. Przebiegi naprężenia w funkcji odkształcenia pochodzące od siły rozciągającej przy prędkości odkształcania pochodzącej od siły rozciągającej $0,01s^{-1}$ i od momentu skręcającego $1s^{-1}$ dla brązu aluminiowego CuAl8 w temperaturze otoczenia

Z uzyskanych przebiegów wynika, że zwiększenie wielkości amplitudy dodatkowego skręcania małowym nie wpływa istotnie na naprężenie pochodzące od siły rozciągającej natomiast nieznacznie obniża odkształcenia graniczne. Poziom naprężeń oraz uzyskane odkształcenia graniczne zależą istotnie od prędkości odkształcania pochodzącej od momentu skręcającego, co jest zgodne z wynikami otrzymanymi dla brązu krzemowego CuSi3,5.

Dla brązu aluminiowego nie wyznaczono relacji między wartością pracy odkształcenia plastycznego oraz względnym spadkiem naprężenia pochodzącego od siły rozciągającej dla poszczególnych sposobów odkształcania, gdyż relacja ta byłaby podobna jak dla brązu krzemowego CuSi3,5, ponieważ oba materiały zachowują się bardzo podobnie podczas złożonego odkształcania

Struktura brązu aluminiowego CuAl8 po złożonym odkształceniu

Na rys. 6.2.1.13 przedstawiono strukturę brązu aluminiowego CuAl8 w temperaturze otoczenia po rozciąganiu ($\dot{\varepsilon}_{pr} = 0,01 s^{-1}$) z równoczesnym małowym skręcaniem ($\dot{\varepsilon}_{ps} = 0,1 s^{-1}$) z amplitudą 0,11 do odkształcenia zastępczego 1,2. Struktura ta jest bardzo podobna do struktury otrzymanych w innych złożonych procesach odkształcania gdzie zmiana wektora prędkości przemieszczenia wynosiła 90° .



Rys. 6.2.1.13. Struktura brązu alumiowego CuAl8 po rozciąganiu ($\dot{\epsilon}_{pr} = 0,01 \text{ s}^{-1}$) z równoczesnym małowykwym skręcaniem ($\dot{\epsilon}_{ps} = 0,1 \text{ s}^{-1}$) z amplitudą 0,11 do odkształcenia zastępczego 1,2 w temperaturze otoczenia

W strukturach próbek odkształcanych monotonicznie (rys. 5.2.1.3 i 5.2.1.4) występuje typowa tekstura odkształcenia, tekstury takiej nie ma w próbkach po odkształceniu złożonym w obszarze gdzie występowało równomierne odkształcenie. Wyraźna tekstura odkształcenia w złożonym odkształceniu pojawia się w momencie powstania rozproszonej utraty stateczności. W złożonych sposobach odkształcenia zaobserwowano większą niejednorodność odkształcenia niż podczas monotonicznego odkształcania. Występują przechodzące przez

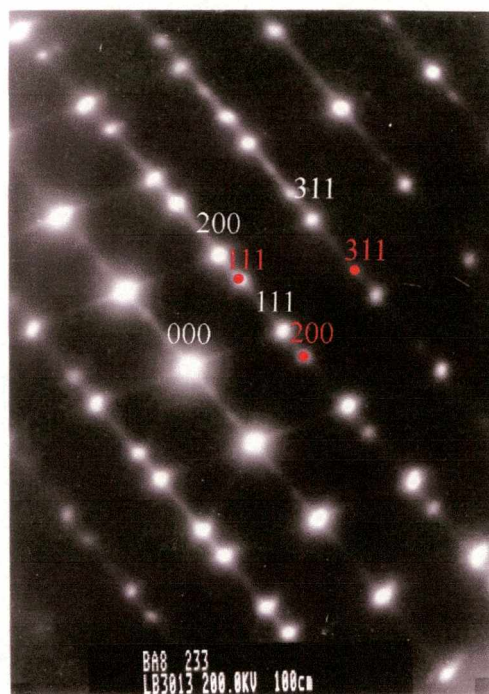
kilka ziaren pasma, w których dochodzi do silnego odkształcenia, które można traktować jak pasma ścinania

Badani na transmisyjnym mikroskopie elektronowym wykazały, że w temperaturze otoczenia podobnej jak dla brązu krzemowego CuSi3,5 dominują bliźniaki odkształcenia (rys. 6.2.1.14). Na rys. 6.2.1.15 przedstawiono dyfraktogram z obszaru gdzie występowały bliźniaki odkształcenia. Układy płaszczyzn bliźniakowania oraz relacje krystalograficzne bliźniaka i osnowy są takie same jak dla brązu krzemowego CuSi3,5 (rys. 6.1.1.18). W złożonym odkształcaniu w brązie aluminium można zaobserwować grube pasma poślizgu, które są złożone głównie z bliźniaków (rys. 6.2.1.16). Makroskopowo przebiegają one niezgodnie z układem krystalograficznym, co wskazywałby to no to, że są one częścią pasma ścinania. Dyfrakcja z tego obszaru jest bardzo rozmyta, co świadczy o dużym stopieniu odkształcenia tego obszaru w różnych systemach poślizgu (rys. 6.2.1.17).

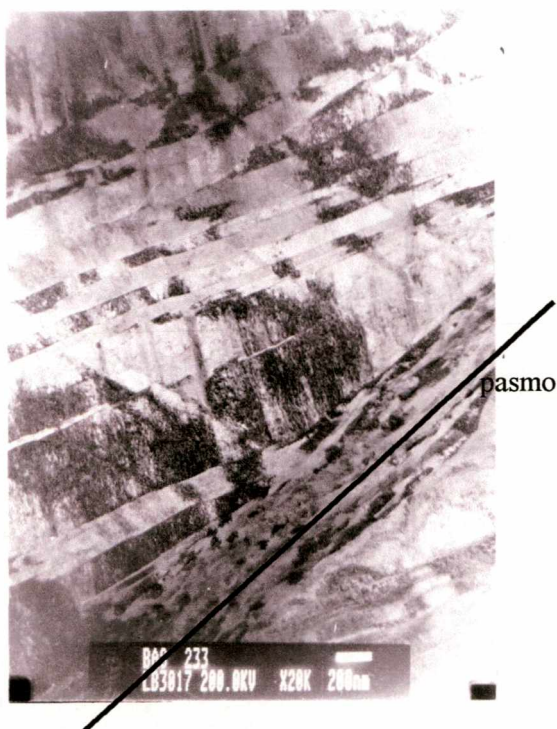
Na mikroskopie optycznym w strukturze odkształconego materiału widoczne są przecięcia bliźniaków wyżarzania przez bliźniaki odkształcenia oraz prawdopodobnie pasma poślizgu (rys. 6.2.1.18).



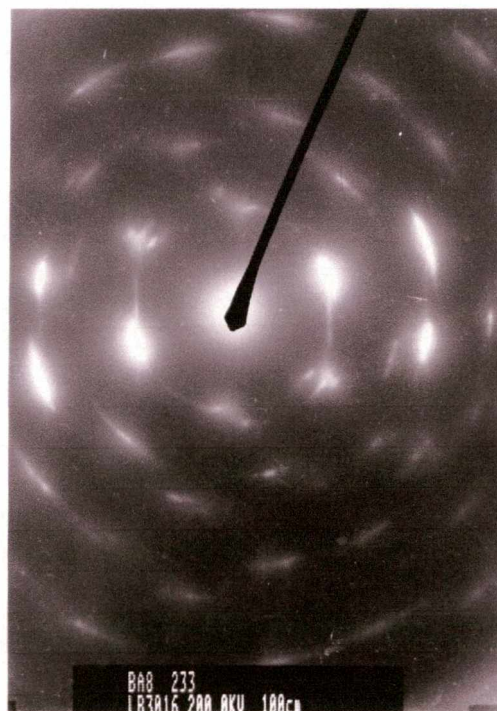
Rys. 6.2.1.14. Obraz struktury brązu aluminium CuAl8 po rozciąganiu ($\dot{\epsilon}_{pr} = 0,01 \text{ s}^{-1}$) z równoczesnym skręcaniem ($\dot{\epsilon}_{ps} = 0,1 \text{ s}^{-1}$) z amplitudą 0,11 do odkształcenia zastępczego 1,2 w temperaturze otoczenia (TEM)



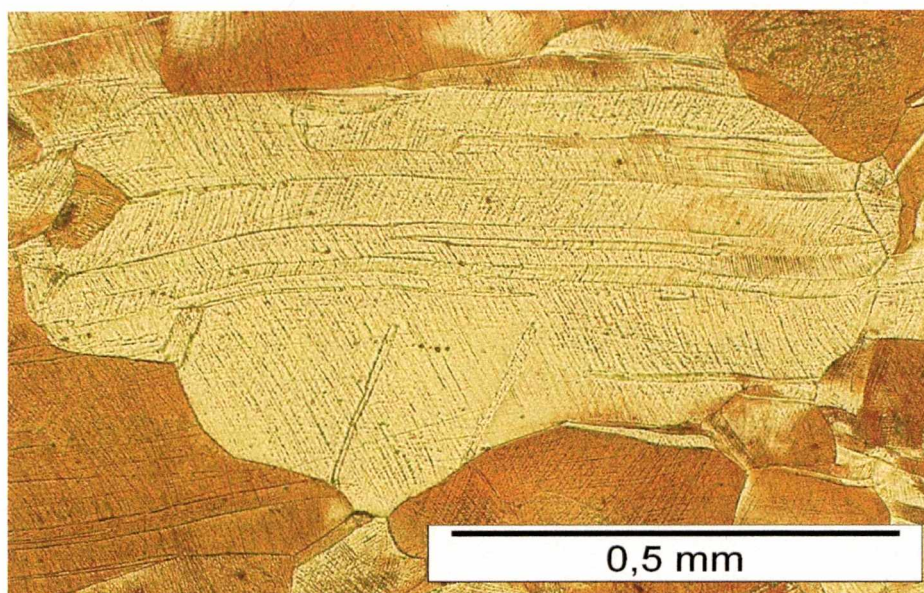
Rys. 6.2.1.15. Dyfraktogram z pasa krystalograficznego $\langle 110 \rangle$ dla brązu aluminium CuAl8 po rozciąganiu ($\dot{\epsilon}_{pr} = 0,01 \text{ s}^{-1}$) z równoczesnym skręcaniem ($\dot{\epsilon}_{ps} = 0,1 \text{ s}^{-1}$) z amplitudą 0,11 do odkształcenia zastępczego 1,2 w temperaturze otoczenia z obszaru przedstawionego na rys. 6.2.1.14



Rys. 6.2.1.16. Obraz struktury brązu aluminiowego CuAl8 po rozciąganiu ($\dot{\epsilon}_{pr} = 0,01 \text{ s}^{-1}$) z równoczesnym skręcaniem ($\dot{\epsilon}_{ps} = 0,1 \text{ s}^{-1}$) z amplitudą 0,11 do odkształcenia zastępczego 1,2 w temperaturze otoczenia (TEM)



Rys. 6.2.1.17. Dyfraktogram dla brązu aluminiowego CuAl8 po rozciąganiu ($\dot{\epsilon}_{pr} = 0,01 \text{ s}^{-1}$) z równoczesnym skręcaniem ($\dot{\epsilon}_{ps} = 0,1 \text{ s}^{-1}$) z amplitudą 0,11 do odkształcenia zastępczego 1,2 dla obszaru przedstawionego na rys. 6.2.1.16



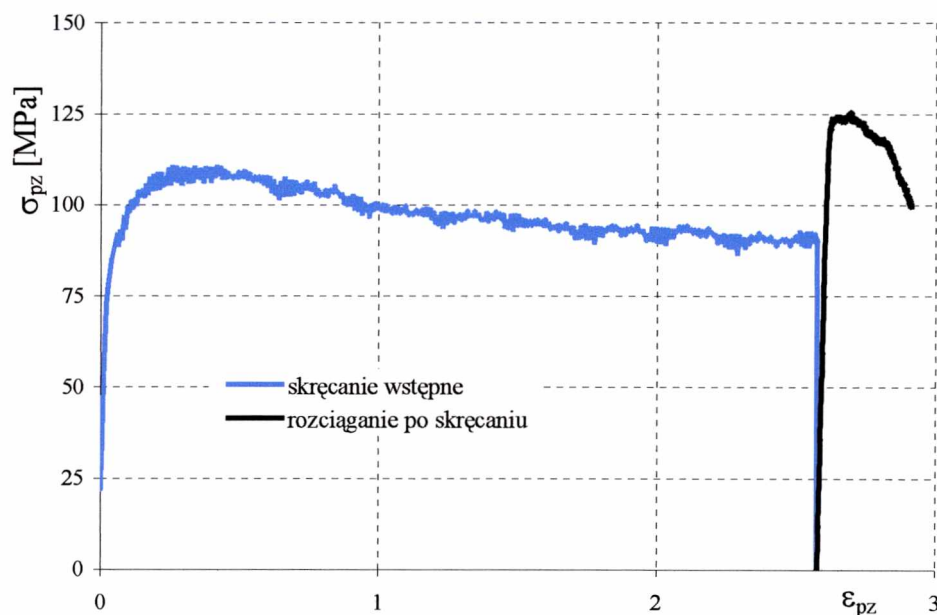
Rys. 6.2.1.18. Przecięcia bliźniaków wyżarzania przez bliźniaki odkształcenia oraz prawdopodobnie pasma poślizgu, struktura brązu aluminiowego CuAl8 po rozciąganiu ($\dot{\epsilon}_{pr} = 0,01 \text{ s}^{-1}$) z równoczesnym skręcaniem ($\dot{\epsilon}_{ps} = 0,1 \text{ s}^{-1}$) z amplitudą 0.11 do odkształcenia zastępczego 1,2 w temperaturze otoczenia

6.2.2. Badania brązu aluminowego CuAl8 w temperaturze 650 °C

Procesy złożonego odkształcania brązu aluminowego CuAl8 w temperaturze 650 °C

Interpretacja wyników uzyskanych w złożonych procesach odkształcania dla warunków obróbki plastycznej na gorąco dla brązu aluminowego CuAl8 jest utrudniona, z przyczyn podobnych jak dla brązu krzemowego CuSi3,5. Ponadto dotychczasowe badania brązu aluminowego CuAl8 w temperaturze otoczenia wykazały, że zachowuje się on bardzo podobnie jak brąz krzemowy CuSi3,5. W związku z tym, dla warunków obróbki plastycznej na gorąco, przeprowadzono głównie badania mające na celu potwierdzenie otrzymanych wyników dotyczących brązu krzemowego CuSi3,5. Badania te dotyczyły sekwencyjnego odkształcania próbki momentem skręcającym i siłą rozciągającą oraz jednoczesnego odkształcania próbki oscylacyjnym momentem skręcającym i siłą rozciągającą.

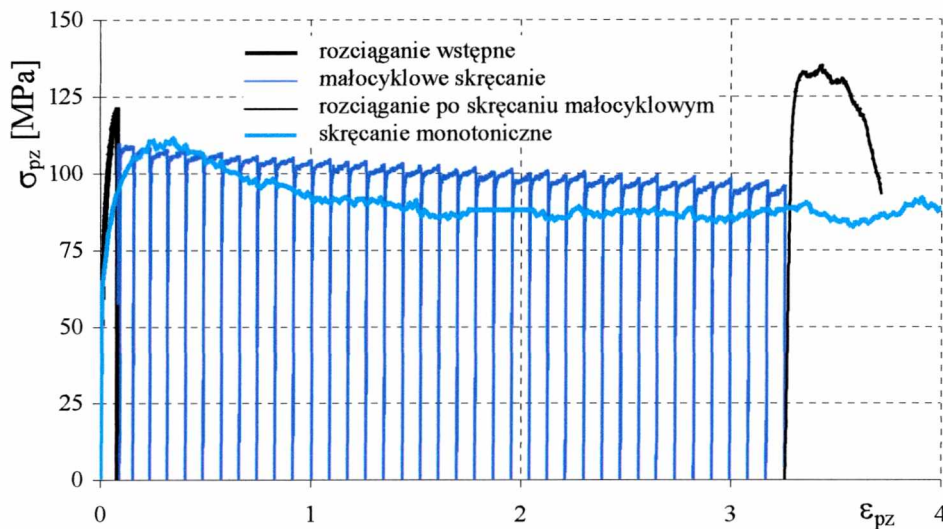
Procesy sekwencyjnego odkształcania brązu aluminowego CuAl8 momentem skręcającym i siłą rozciągającą w temperaturze 650 °C



Rys. 6.2.2.1. Przebieg naprężenia zastępczego uzyskany w próbie rozciągania próbki wstępnie odkształconej po skręcaniu do odkształcenia 2,6 dla brązu aluminowego CuAl8 przy prędkości odkształcania wynoszącej 0,1 s⁻¹ w temperaturze 650 °C

Na rys. 6.2.2.1 przedstawiono przebiegi naprężenia zastępczego w próbie, w której materiał został wstępnie skręcony do odkształcenia 2,6, a następnie rozciągnięta do zniszczenia próbki. Wstępne skręcanie prowadzi do uzyskania całkowicie zrekrytalizowanej

dynamicznie struktury, gdyż osiągnięty zostaje stan ustalonego płynięcia plastycznego. Naprężenie zastępcze wstępnie skróconego materiału podczas rozciągania osiąga nieznacznie wyższą wartość od uzyskanej podczas wstępnego skrócenia i znacznie niższą niż w próbie monotonicznego rozciągania (rys. 6.2.2.3). Natomiast na rys. 6.2.2.2 przedstawiono przebieg naprężenia dla próbki, która została wstępnie rozciągnięta do wartości odkształcenia 0,08, następnie skręcana małowykłowo z amplitudą 0,11 do odkształcenia 3,25, poczym ponownie rozciągnięta aż do zniszczenia.

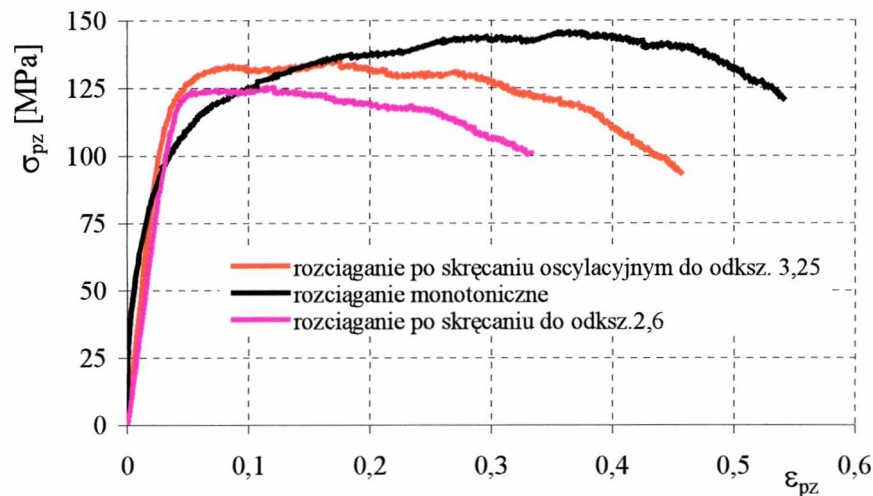


Rys. 6.2.2.2. Przebiegi naprężenia zastępczego uzyskane w próbie złożonej obejmująca następujące schematy odkształcenia: rozciąganie do odkształcenia 0,08, następnie skręcanie małowykłowe do odkształcenia 3,25 oraz ponowne rozciąganie do zniszczenia próbki na tle przebiegu naprężenia dla monotonicznego skręcania brązu aluminiowego CuAl8 przy prędkości odkształcania wynoszących $0,1 \text{ s}^{-1}$ w temperaturze $650 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Podczas małowykłowego odkształcania dla sposobu odkształcania przedstawionego na rys. 6.2.2.2 następuje spadek maksymalnego poziomu naprężeń w kolejnych cyklach odkształcenia, można sadzić, że dla większych odkształceń, osiągnie on poziom zbliżony do naprężenia otrzymanego w monotonicznej próbie skręcania. Ponowne rozciąganie po małowykłowym skręcaniu powoduje szybki wzrost naprężenia.

Na rys. 6.2.2.3 przedstawiono przebiegi naprężeń zastępczych otrzymanych podczas rozciągania próbek wstępnie odkształconych według sposobów odkształcania, które zostały przedstawionych na rys. 6.2.2.1 i 6.2.2.2. W obu przypadkach, wstępne monotoniczne lub małowykłowe skręcanie próbki, powoduje obniżenie naprężenia w następującym po nich procesie rozciągania w stosunku do próby monotonicznego rozciągania.

Przeprowadzone badania wykazały, że brąz aluminiowy CuAl8 zachowuje się bardzo podobnie jak brąz krzemowy CuSi3,5 podczas przedstawionych prób odkształcania złożonego.

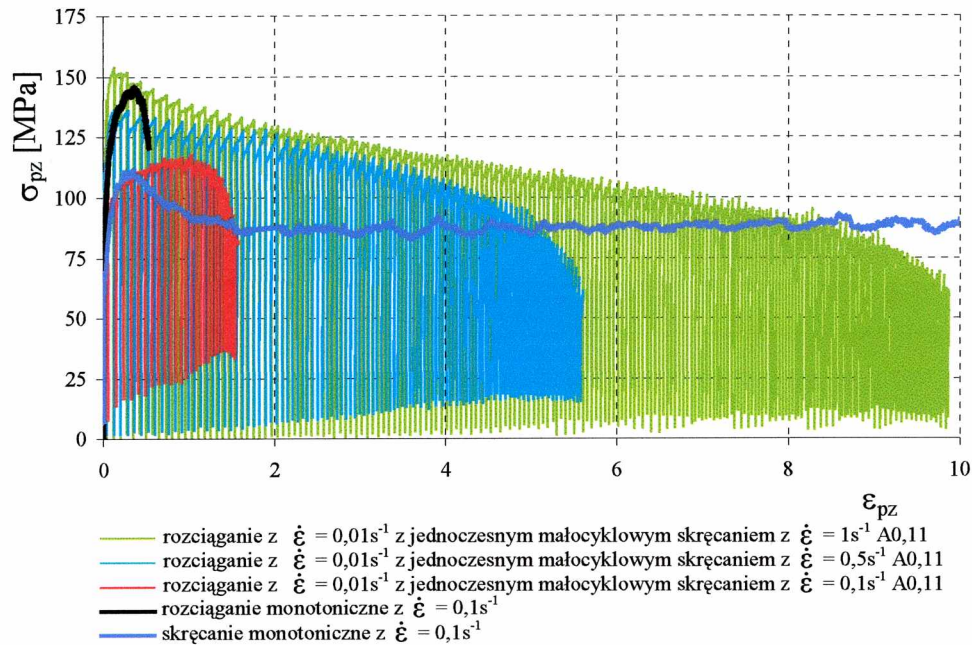


Rys. 6.2.2.3. Przebiegi naprężeń zastępczych uzyskane w próbie rozciągania dla próbek wstępnie odkształconych wg. sposobów odkształcania przedstawionych na rys. 6.2.2.1 i 6.2.2.2 oraz przebieg naprężenia zastępczego uzyskanego w próbie monotonicznego rozciągania dla brązu aluminiowego CuAl8 w temperaturze 650 °C przy prędkości odkształcania wynoszących 0,1 s⁻¹

Proces jednoczesnego odkształcania próbki oscylacyjnym momentem skręcającym i siłą rozciągającą w temperaturze 650 °C

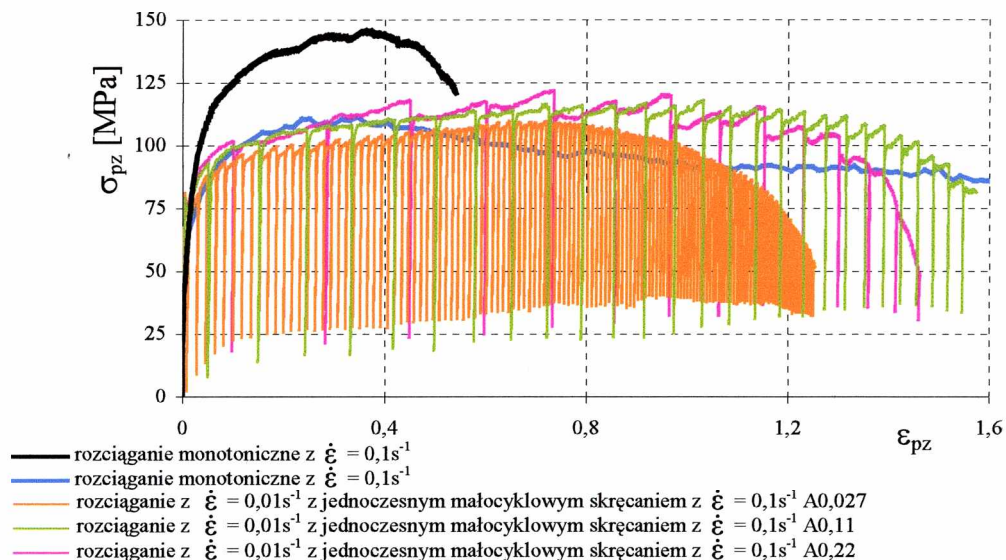
Na rys. 6.2.2.4. i 6.2.2.5. przedstawiono przebiegi naprężenia zastępczego w funkcji odkształcenia zastępczego uzyskane w próbie jednoczesnego odkształcania próbki oscylacyjnym momentem skręcającym z amplitudą 0,11 i siłą rozciągającą w temperaturze 650°C.

W badaniach tych podobnie jak w temperaturze otoczenia prędkość odkształcania pochodząca od siły rozciągającej była stała i wynosiła 0.01 s⁻¹, natomiast prędkość odkształcania pochodząca od momentu skręcającego zmieniana była w przedziale od 0.01 s⁻¹ do 1 s⁻¹. Wyniki te są podobne do rezultatów uzyskanych dla brązu krzemowego CuSi3,5, z tą różnicą, że dla najmniejszej prędkości odkształcania pochodzącej od momentu skręcającego uzyskano nieznacznie niższy poziom naprężenia dla brązu aluminiowego CuAl8 niż dla brązu krzemowego CuSi3,5 w porównaniu do prób monotonicznych dla tych materiałów.



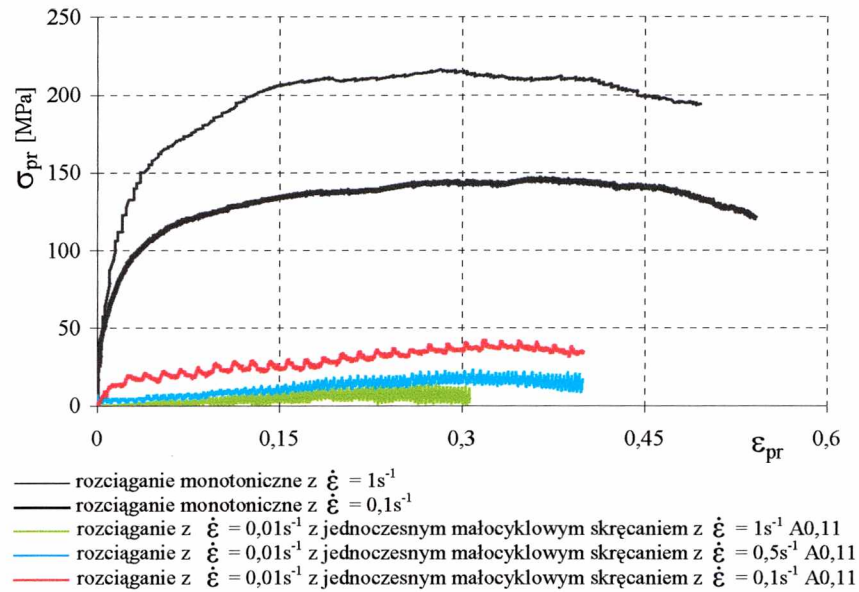
Rys. 6.2.2.4. Przebiegi naprężenia zastępczego w funkcji odkształcenia zastępczego dla złożonego procesu odkształcania przy prędkości odkształcania pochodzącej od siły rozciągającej $0,01s^{-1}$ i dla prędkości odkształcania pochodzącej od momentu skręcającego zmieniającej się w zakresie od $0,01$ do $1 s^{-1}$ oraz dla prób monotonicznych dla brązu aluminiowego CuAl8 w temperaturze $650^{\circ}C$

W przeciwieństwie do temperatury otoczenia zmiana amplitudy dodatkowego odkształcania małym cyklowym w temperaturze $650^{\circ}C$ przy takiej samej zastępczej prędkości odkształcania nie wpływa istotnie na poziom naprężenia zastępczego oraz odkształcenia graniczne (rys. 6.2.2.5). Podobne oddziaływanie amplitudy obserwowano dla brązu krzemowego CuSi3,5.

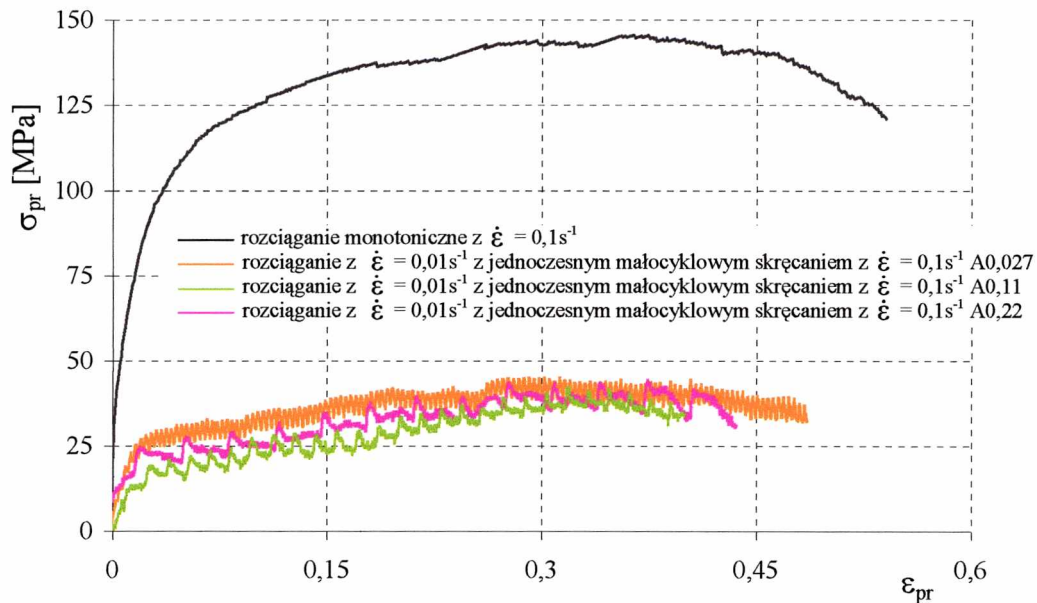


Rys. 6.2.2.5. Przebiegi naprężenia zastępczego w funkcji odkształcenia zastępczego dla złożonego procesu odkształcania przy prędkościach odkształcania pochodzących od siły rozciągającej $0,01s^{-1}$ i momentu skręcającego $0,1s^{-1}$ dla różnych amplitud oraz dla prób monotonicznych dla brązu aluminiowego CuAl8 w temperaturze $650^{\circ}C$

Również, podobnie jak dla brązu krzemowego CuSi3,5 przeprowadzono analizę wpływu dodatkowego skręcania małowykłowego na naprężenie pochodzące od siły rozciągającej dla prób uzyskanych w temperaturze 650 °C dla brązu aluminium CuAl8. Uzyskane zależności pomiędzy naprężeniem i odkształceniem pochodzącym od siły rozciągającej dla przebiegów przedstawionych na rys. 6.2.2.4. i 6.2.2.5. przedstawiono na rys. 6.2.2.6. i 6.2.2.7.



Rys. 6.2.2.6. Przebiegi naprężenia w funkcji odkształcenia pochodzące od siły rozciągającej przy prędkości rozciągania $0,01\text{s}^{-1}$ i różnych prędkościach skręcania na tle rozciągania monotonicznego dla brązu aluminium CuAl8 w temperaturze 650 °C



Rys. 6.2.2.7. Przebiegi naprężenia w funkcji odkształcenia pochodzące od siły rozciągającej przy prędkości rozciągania $0,01\text{s}^{-1}$ i skręcania $0,1\text{s}^{-1}$ dla różnych amplitud na tle rozciągania monotonicznego dla brązu aluminium CuAl8 w temperaturze 650 °C

Na rys. 6.2.2.6. przedstawiono wpływ prędkości odkształcania pochodzącej od momentu skręcającego na naprężenie rozciągające. Na rysunku tym przedstawiono również przebiegi uzyskane w próbie monotonicznego rozciągania dla zastępczej prędkości odkształcania $0,1$ i 1 s^{-1} , gdyż dla złożonych procesów odkształcania uzyskiwano bardzo zbliżone zastępcze prędkości odkształcania. Charakterystyczne jest to, że zwiększanie prędkości skręcania powoduje, pomimo że brąz aluminiowy CuAl8 wykazuje znaczną czułość na prędkość odkształcania, spadek naprężeń rozciągających, które dla złożonych schematów odkształcania leżą znacznie poniżej naprężeń w próbach monotonicznych. Zwiększenie prędkości skręcania powoduje obniżenie odkształceń górniczych w kierunku rozciągania, gdyż przyspiesza to lokalizację odkształcenia. Zwiększenie natomiast amplitudy w bardzo niewielkim stopniu obniża zarówno naprężenie rozciągające i odkształcenia graniczne w kierunku rozciągania (rys. 6.2.2.7).

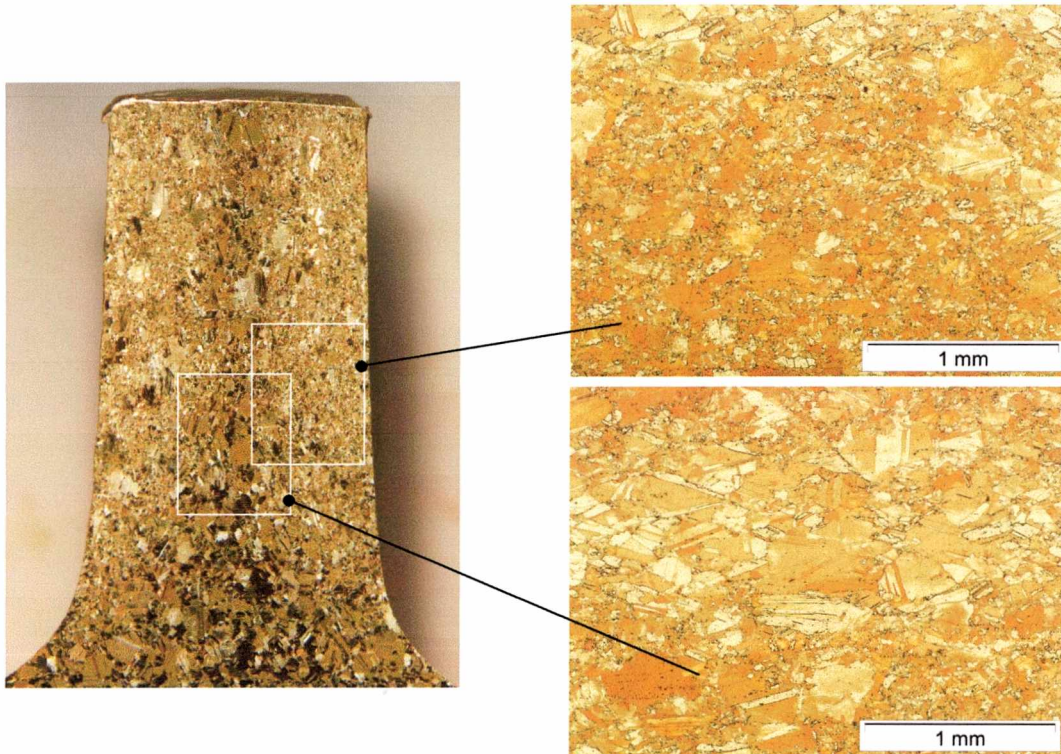
Struktura brązu aluminiowego CuAl8 po złożonym odkształceniu w temperaturze 650°C

Podczas złożonego odkształcania brązu aluminiowego CuAl8 na gorąco proces rekrytalizacji dynamicznej nie występuje w całej objętości odkształcanego materiału. W warstwie środkowej próbki wzdłuż jej osi, gdzie występują głównie odkształcenia pochodzące od siły rozciągającej, rekrytalizacja zachodzi tylko na granicach ziaren, w warstwach zewnętrznych, w których odkształcenia pochodzą zarówno od rozciągania jak i skręcania, występują obszary, w których doszło do pełnej rekrytalizacji dynamicznej, przy czym obok tych obszarów pojawiają się jeszcze nie zrekrystalizowane w pełni ziarna (rys. 6.2.2.8).

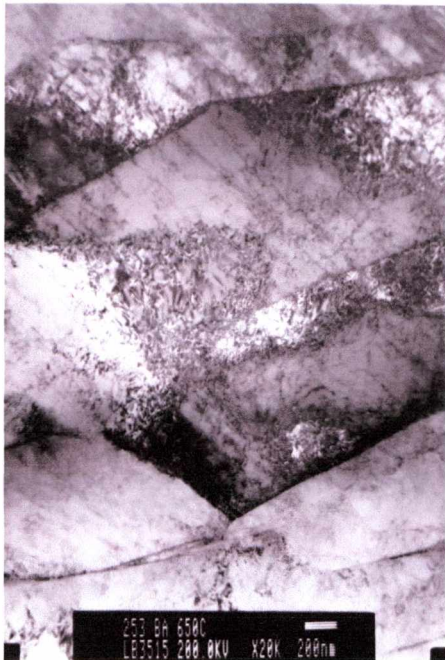
W strukturze brązu aluminiowego CuAl8 odkształcanego w warunkach obróbki plastycznej na gorąco występuje silnie wyzdrowiona struktura dyslokacyjna (rys. 6.2.2.9). Na rys. 6.2.2.10 można zaobserwować początkowe stadium tworzenia się podgranic.

W brązie aluminiowym CuAl8 nie tworzą się grube bliźniaki odkształcenia gdyż dyslokacje szybko ulegają przegrupowaniu i tworzą się podgranic. Nie następuje wówczas proces akumulacji odkształcenia i umocnienie materiału. Zanik bliźniakowania w podwyższonych temperaturach może być również wynikiem wzrostu energii błędu ułożenia wraz ze wzrostem temperatury. Poglądy na zmianę energii błędu ułożenia wraz ze wzrostem temperatury nie są jednoznaczne. Najczęściej jednak przyjmuje się, że wraz z jej wzrostem następuje wzrost energii błędu ułożenia.

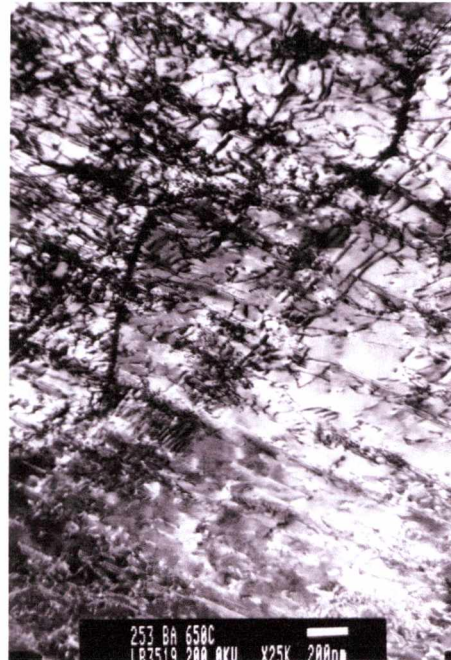
Na rys. 6.2.2.11 przedstawiono podstrukturę, w której widoczny jest front rekrytalizacji dynamicznej przemieszczający się wzdłuż bliźniaków wyżarzania. W odkształconym materiale zaobserwowano pofalowane granice ziaren, co świadczy o ich niestabilności i różnym gradiencie gęstości dyslokacji po obu jej stronach, jest to najprawdopodobniej, front rekrytalizacji dynamicznej (rys. 6.2.2.12).



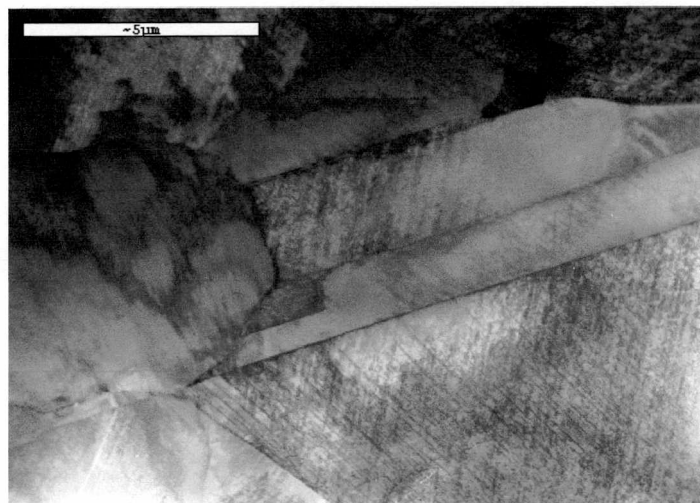
Rys. 6.2.2.8. Struktura brązu alumińowego CuAl8 po rozciąganiu ($\dot{\epsilon}_{pr} = 0,01 \text{ s}^{-1}$) z równoczesnym skręcaniem małowykwym ($\dot{\epsilon}_{ps} = 0,5 \text{ s}^{-1}$) z amplitudą 0,027 do odkształcenia zastępczego 3 w temperaturze 650 °C



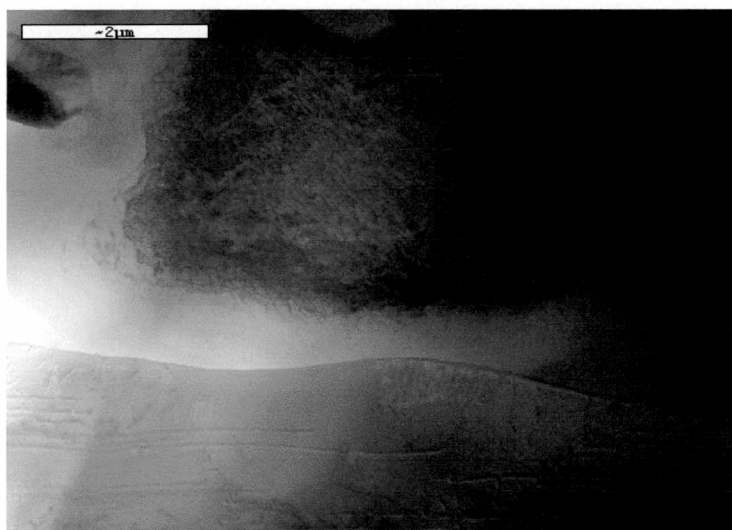
Rys. 6.2.2.9. Obraz silnie wyzdrowionej struktury CuAl8 po rozciąganiu ($\dot{\epsilon}_{pr} = 0,01 \text{ s}^{-1}$) z równoczesnym skręcaniem małowykwym ($\dot{\epsilon}_{ps} = 0,5 \text{ s}^{-1}$) z amplitudą 0,027 do odkształcenia zastępczego 3 w temperaturze 650°C [TEM]



Rys. 6.2.2.10. Początkowe stadium tworzenia się granicy podziarna w CuAl8 po rozciąganiu ($\dot{\epsilon}_{pr} = 0,01 \text{ s}^{-1}$) z równoczesnym skręcaniem małowykwym ($\dot{\epsilon}_{ps} = 0,5 \text{ s}^{-1}$) z amplitudą 0,027 do odkształcenia zastępczego 3 w temperaturze 650 °C [TEM]



Rys. 6.2.2.11 Migracja frontu rekrytalizacji dynamicznej w brązie aluminiowym CuAl8 po rozciąganiu ($\dot{\epsilon}_{pr} = 0,01 \text{ s}^{-1}$) z równoczesnym skręcaniem małowykłowym ($\dot{\epsilon}_{ps} = 0,5 \text{ s}^{-1}$) z amplitudą 0,027 do odkształcenia zastępczego 3 w temperaturze 650 °C [STEM]



Rys. 6.2.2.12 Migrująca granica ziarna w brązie aluminiowym CuAl8 po rozciąganiu ($\dot{\epsilon}_{pr} = 0,01 \text{ s}^{-1}$) z równoczesnym skręcaniem małowykłowym ($\dot{\epsilon}_{ps} = 0,5 \text{ s}^{-1}$) z amplitudą 0,027 do odkształcenia zastępczego 3 w temperaturze 650 °C [STEM]

7. PODSUMOWANIE

W pracy zbadano wpływ różnych sposobów złożonego odkształcania obejmującego: jednoczesne oraz sekwencyjne skręcanie z rozciąganiem, sekwencyjne małowyprężne skręcanie z rozciąganiem lub skręcaniem, jednoczesne małowyprężne skręcanie z rozciąganiem na zastępcze naprężenie uplastyczniające, odkształcenie graniczne i strukturę brązu krzemowego CuSi_{3,5} oraz brązu aluminiowego CuAl₈ z uwzględnieniem energii odkształcenia plastycznego koniecznego do realizacji tych procesów. Oba materiały charakteryzują się bardzo zbliżonymi niskimi wartościami energii błędu ułożenia w wyniku, czego dominującym sposobem odbudowy odkształconej struktury jest rekryształizacja dynamiczna. Wyniki uzyskane w procesach odkształcania złożonego porównywano między sobą oraz z wynikami otrzymanymi w monotonicznych próbach skręcania i rozciągania.

W celu realizacji założonych badań zbudowane zostało urządzenie, które umożliwiło jednoczesne skręcanie i rozciąganie badanego materiału. Na etapie konstrukcyjnym trzy zagadnienia okazały się najistotniejsze dla całej konstrukcji plastometru. Układ napędowy został tak zaprojektowany, aby można było uzyskać bardzo duże zmiany stabilnych prędkości odkształcania oraz łatwą możliwość sterowania tymi prędkościami. Równoczesne realizowanie różnych dróg odkształcania wymagało rozdzielenia układu napędowego, odpowiedzialnego za skręcanie od układu realizującego rozciąganie. Również pomiary momentu skręcającego i siły osiowej zostały tak rozwiązane, aby wzajemnie się nie zakłócały. Innym bardzo ważnym elementem decydującym o konstrukcji plastometru było dobranie odpowiednich wymiarów i kształtu części pomiarowej próbki oraz części uchwytywnej, która musi zapewnić możliwość przenoszenia zarówno momentu skręcającego jak i siły osiowej. W celu zmniejszenia sił bezwładności występujących podczas odkształcania próbek, poruszające się masy elementów plastometru zostały zminimalizowane zarówno poprzez zaprojektowanie odpowiedniego ich kształtu jak i dobranie stosownego materiału na te elementy.

W badaniach odkształcania złożonego wymagana jest poprawna interpretacja odkształceń. W dotychczasowych pracach dotyczących odkształcania cyklicznego oraz sekwencyjnego [54-57] posługiwano się odkształceniami całkowitymi, w których znaczny udział mają odkształcenia sprężyste, bowiem występują one w każdym cyklu odkształcania. Porównywanie, więc przebiegów naprężenia uplastyczniającego w funkcji odkształcenia całkowitego w procesach złożonego odkształcania cyklicznego z procesami odkształcania monotonicznego, jest z założenia obarczone dużym błędem. Dlatego w pracy zastosowano

metodę pozwalającą wydzielić odkształcenia sprężyste z odkształceń całkowitych. W ten sposób uzyskiwano poprawne przebiegi uplastyczniającego naprężenia zastępczego w funkcji odkształcenia plastycznego dla zastosowanych procesów odkształcania, co stworzyło możliwość wzajemnego ich poprawnego porównywania. Do badań wybrano następujące sposoby złożonego odkształcania:

- jednoczesne skręcanie z rozciąganiem,
- sekwencyjne skręcanie z rozciąganiem,
- sekwencyjne małowykłowe skręcanie z rozciąganiem lub skręcaniem,
- jednoczesne małowykłowe skręcanie z rozciąganiem.

W celu stwierdzenia efektów złożonych sposobów odkształcania w stosunku do prostych prób przeprowadzono również:

- monotoniczne skręcanie,
- monotoniczne rozciąganie.

Oddziaływanie zastosowanych sposobów odkształcania na naprężenie uplastyczniające, odkształcenie graniczne i strukturę badanych brązów nie jest jednoznaczne. Zależy ono od temperatury, prędkości odkształcania, ale przede wszystkim od zastosowanej drogi odkształcania, natomiast w niewielkim stopniu od rodzaju materiału. Oba badane materiały brąz krzemowy $\text{CuSi}_{3,5}$ oraz brąz aluminiowy CuAl_8 zachowują się bardzo podobnie w analizowanych złożonych sposobach odkształcania. Zaobserwowano, że wpływ złożonego odkształcania na właściwości i strukturę badanych stopów miedzi jest szczególnie widoczny w temperaturze otoczenia. W wyższych temperaturach zwłaszcza, gdy w materiale występuje rekrytalizacja dynamiczna wpływ ten jest znacznie mniejszy. Pewnym utrudnieniem w interpretacji uzyskanych wyników jest duża czułość brązu aluminiowego CuAl_8 na sposób monotonicznego odkształcania. Poziomy naprężen uzyskanych podczas skręcania i rozciągania monotonicznego w temperaturze otoczenia dla brązu aluminiowego CuAl_8 w przeciwieństwie do brązu krzemowego $\text{CuSi}_{3,5}$ znacznie różnią się od siebie (rys. 5.2.1.1).

W procesie jednoczesnego odkształcania momentem skręcającym i siłą rozciągającą w temperaturze otoczenia można sterować naprężeniami pochodzącymi od poszczególnych obciążeń oraz odkształceniem granicznym poprzez zmianę prędkości odkształcania jednej ze składowych obciążenia (w prowadzonych badaniach zmieniano prędkość odkształcania pochodzącą od momentu skręcającego). Zwiększenie w odkształceniu zastępczym udziału odkształceń pochodzących od takiej składowej obciążenia, która nie prowadzi do szybkiej lokalizacji odkształcenia, powoduje wzrost odkształcenia granicznego oraz bardzo wyraźny

wzrost naprężenia pochodzący od tej składowej obciążenia przy spadku drugiej składowej (rys 6.1.1.2). W temperaturze otoczenia dla różnych sposobów jednoczesnego odkształcania, gdy nie zachodzą częste szybkie zmiany drogi odkształcania, tak jak ma to miejsce na przykład podczas odkształcania małowykłowego, uzyskuje się zbliżone przebiegi naprężenia zastępczego.

Podczas jednoczesnego skręcania i rozciągania próbki nie zachodzi gwałtowna zmiana drogi odkształcania, która burzy istniejącą strukturę dyslokacyjną i taki proces nie prowadzi do osłabienia materiału poprzez wydłużenie swobodnej drogi ruchu dyslokacji. Natomiast nagłą zmianę wektora prędkości przemieszczenia o 90° uzyskuje się w sekwencyjnym odkształcaniu próbki momentem skręcającym i siłą rozciągającą. Podczas skręcania wstępnie rozciągniętej próbki w temperaturze otoczenia, uzyskuje się znacznie wyższe naprężenie oraz mniejsze odkształcenie graniczne niż w przypadku, gdy próbka jest w całym zakresie odkształceń tylko skręcana (rys. 6.1.1.3 i 6.2.1.1). Wynika to z faktu, że rozciąganie próbki aktywuje więcej systemów poślizgu niż skręcanie, co prowadzi do większego umocnienia materiału już we wstępnej fazie jego odkształcania. Zastanawiające jest jednak, dlaczego dla brązu krzemowego $\text{CuSi}_{3,5}$ takie umocnienie ujawnia się dopiero po zmianie drogi odkształcania, do momentu tej zmiany naprężenie uplastyczniające dla procesu rozciągania leży niemal na tym samym poziomie, co podczas próby monotonicznego skręcania. W przypadku odwrotnym, gdy próbka jest wstępnie skręcona, a następnie poddana rozciąganiu aż do pęknięcia, otrzymano niższe naprężenie rozciągające oraz nieznacznie większe odkształcenie graniczne w porównaniu do naprężenia uzyskanego w monotonicznej próbie rozciągania (rys. 6.1.1.4 i 6.2.1.2). Przeprowadzone badania wykazały, że poprzez wprowadzenie nagłej zmiany wektora prędkości przemieszczenia w sekwencyjnych procesach odkształcania można sterować naprężeniem i odkształceniem granicznym.

W celu ustalenia wpływu wielokrotnej, nagłej zmiany wektora prędkości odkształcania w sekwencyjnych procesach odkształcania na naprężenie i odkształcenie graniczne wstępnie odkształconego materiału przeprowadzono badania sekwencyjnych procesów odkształcania obejmujących rozciąganie lub skręcanie połączone z małowykłowym skręcaniem. W przypadku wstępnego skręcania, po którym następowało skręcanie małowykłowe i ponowne skręcanie w tym samym kierunku, co poprzednio aż do zniszczenia próbki (rys. 6.1.1.5 i 6.2.1.3) to w momencie przejścia od wstępnego skręcania do małowykłowego skręcania, następuje spadek naprężenia uplastyczniającego, które ulega dalszemu obniżeniu w kolejnych cyklach odkształcania aż do osiągnięcia poziomu naprężenia odpowiadającemu naprężeniu uzyskanemu podczas próby małowykłowego skręcania w całym zakresie odkształcania z taką

samą amplitudą. Naprężenie uzyskane podczas ponownego skręcania leży znacznie poniżej przebiegu naprężenia uzyskanego dla monotonicznego skręcania w całym zakresie odkształceń.

Natomiast, gdy próbka była poddana wstępnemu rozciąganiu następnie skręcaniu małowykwowemu i ponownemu rozciąganiu do jej pęknięcia (rys. 6.1.1.7) to w momencie przejścia od wstępnego rozciągania do małowykwowego skręcania, następuje gwałtowny skok naprężenia uplastyczniającego świadczący o tym, że podczas rozciągania nastąpiło intensywne umocnienie materiału. Następnie w kolejnych cyklach odkształcania zmniejsza się naprężenie uplastyczniające, lecz obniżenie to nie jest tak duże, aby osiągnąć poziom naprężenia odpowiadającego naprężeniu uzyskanemu podczas małowykwowego skręcania o tej samej amplitudzie od samego początku odkształcania. Ponowne plastyczne rozciąganie rozpoczyna się od poziomu naprężenia uzyskanego w końcowym cyklu odkształcania małowykwowego. W oby przypadkach sekwencyjnego odkształcania wykazano, że odkształcenie graniczne w wyniku udziału małowykwowego odkształcania bardzo wyraźnie zwiększa się w porównaniu do odkształcenia granicznego ustalonego w monotonicznych procesach odkształcania.

Badania te wskazują, że wielokrotna, nagła zmiana wektora prędkości przemieszczenia w sekwencyjnych procesach odkształcania prowadzi do osłabienia materiału i zwiększenia odkształceń granicznych szczególnie w temperaturze otoczenia. Warto również podkreślić, że w procesach, w których zachodzi wielokrotna, nagła zmiana wektora prędkości przemieszczenia o 180° obserwuje się efektu Buschingera. Wielkość jego jest zależna od temperatury odkształcania oraz rodzaju materiału.

Uzyskany spadek naprężenia uplastyczniającego i wielokrotny wzrost odkształceń granicznych brązu krzemowego $\text{CuSi}_{3,5}$ oraz brązu aluminiowego CuAl_8 w opisanych powyżej sekwencyjnych procesach odkształcania z udziałem małowykwowego odkształcania w temperaturze otoczenia w porównaniu do tych właściwości wyznaczonych w monotonicznych procesach skręcania i rozciągania spowodował, że w pracy zbadano również oddziaływanie złożonego małowykwowego skręcania z jednoczesnym rozciąganiem.

Dla takiego sposobu obciążania w temperaturze otoczenia w przypadku, gdy prędkości odkształcania pochodzącego od składowych obciążeń są takie same to zarówno odkształcenie graniczne jak i naprężenie zastępcze są zbliżone do wartości uzyskanych w próbie monotonicznego rozciągania przy takiej samej prędkości odkształcania (rys. 6.1.1.8 i 6.2.1.7). Zwiększenie prędkości odkształcania pochodzącej od momentu skręcającego powoduje spadek naprężeń zastępczych (rys. 6.1.1.9 i 6.2.1.8). Dla największej zastosowanej prędkości

odkształcenia pochodzącej od momentu skręcającego 1 s^{-1} uzyskano około dwukrotny spadek naprężenia zastępczego oraz znaczny wzrost odkształceń granicznych w porównaniu do monotonicznego skręcania i monotonicznego rozciągania (rys. 6.1.1.10 i 6.2.1.9). W skręcaniu małowykłowym zastosowano cztery różne amplitudy odkształcenia całkowitego 0,027, 0,53, 0,11 i 0,22. Na podstawie przedstawionych wyników można wnioskować, że w temperaturze otoczenia im mniejsza jest zastosowana amplituda w dodatkowym skręcaniu małowykłowym tym uzyskuje się większy spadek naprężenia zastępczego. Natomiast nie zaobserwowano prostej zależności, która by określała wpływ wielkości amplitudy na uzyskane odkształcenia graniczne.

Prowadzone badania są próbą symulacji w skali laboratoryjnej podobnych obciążeń, jakie występują w rzeczywistych procesach ciągnięcia czy wyciskania, w których materiał dodatkowo jest odkształcany poprzez matrycę wykonującą ruch oscylacyjny wokół swojej osi. Siły ciągnięcia w takich procesach można oszacować na podstawie uzyskanych naprężeń w odkształcanej próbce pochodzących od siły rozciągającej w prowadzonych badaniach. Przeprowadzono, więc analizę wpływu dodatkowego skręcania małowykłowego na naprężenia pochodzącego od siły rozciągającej. Z uzyskanych przebiegów wynika, że w temperaturze otoczenia zwiększenie amplitudy dodatkowego skręcania małowykłowego nie wpływa istotnie na naprężenie pochodzące od siły rozciągającej natomiast nieznacznie obniża odkształcenia graniczne. Poziom tych naprężeń zależy natomiast istotnie od prędkości odkształcania pochodzącej od momentu skręcającego. Dla prędkości 1 s^{-1} można uzyskać około czterokrotne obniżenie naprężenia pochodzące od siły rozciągającej.

Przedstawione wyniki wskazywałyby na to, że dodatkowe małowykłowe odkształcenie skręcające zwiększa zastępcze odkształcenia graniczne oraz obniża naprężenie zastępcze i siłę osiową potrzebną do odkształcania plastycznego materiału. Jednakże, aby sprawdzić opłacalność stosowania badanych sposobów odkształcenia w praktyce przeanalizowano ich pracę odkształcenia plastycznego. W tym celu określono pracę odkształcenia plastycznego koniecznego do wydłużenia próbki o 0,2. Dla określenia tej pracy zastosowano zasadę superpozycji, oddzielnie określano prace pochodzące od momentu skręcającego i od siły rozciągającej, określono również względny spadek naprężenia pochodzącego od siły rozciągającej dla różnych sposobów odkształcania.

Najmniejszą pracę odkształcenia plastycznego uzyskano dla monotonicznego rozciągania. Wprowadzenie dodatkowego małowykłowego skręcania we wszystkich przypadkach powoduje wzrost tej pracy. Najmniejszy wzrost pracy uzyskano dla złożonego odkształcania, gdy prędkości odkształcania pochodzącego od obu zastosowanych obciążeń są

takie same i wynoszą 0.01 s^{-1} . Jednakże występuje wówczas bardzo niewielki spadek naprężenia rozciągającego. Natomiast największy przyrost pracy odkształcenia plastycznego uzyskano dla największej zastosowanej amplitudy i największej prędkości odkształcania małowykłowego. Zaobserwowano zasadę, że im większa praca odkształcania małowykłowego, tym większy na ogół spadek naprężenia rozciągającego. Również daje się zaobserwować, że zwiększenie amplitudy nie wpływa istotnie na pracę odkształcenia plastycznego pochodzącą od siły rozciągającej, natomiast powoduje wyraźny przyrost pracy odkształcenia plastycznego pochodzącej od momentu skręcającego.

Prowadzone badania wykazały, że istnieje możliwość znacznego zmniejszenia naprężenia pochodzącego od siły rozciągającej w złożonych procesach odkształcania zwłaszcza w temperaturze otoczenia poprzez wprowadzenie dodatkowego odkształcania małowykłowego, jednakże trzeba mieć wówczas świadomość, że prowadzi to do znacznego wzrostu pracy odkształcenia plastycznego.

Wpływ wysokiej temperatury na opisane przebiegi naprężenia uzyskane dla wszystkich realizowanych złożonych procesów odkształcania charakteryzuje się tym, że obserwowane zmiany stają się mniej wyraźne. Jest to spowodowane tym, że w wysokich temperaturach, jak wykazały badania strukturalne zachodzą bardzo szybko procesy aktywowane termicznie, głównie rekrytalizacja dynamiczna, które bardzo szybko likwidują efekt historii odkształcania.

Również interpretacja wyników uzyskanych w złożonych procesach odkształcania dla warunków obróbki plastycznej na gorąco jest kłopotliwa, gdyż dla badanych materiałów przebiegi naprężenia zastępczego uzyskane w próbie monotonicznego skręcania i rozciągania znacznie się różnią. Ponadto w warunkach obróbki plastycznej na gorąco materiały wykazują dużą czułość na prędkość odkształcania, co utrudnia przeliczanie momentu skręcającego próbki na naprężenie styczne pochodzące od tego momentu.

Badania strukturalne wykazały, że w temperaturze otoczenia podstawowym mechanizmem odkształcenia plastycznego są bliźniaki odkształcenia, wraz ze wzrostem temperatury zmniejsza się ich znaczenia.

Wprowadzenie nagłej zmiany wektora prędkości przemieszczenia powoduje szybsze uruchamianie różnych systemów poślizgu. W znacznie większej liczbie ziaren w próbkach odkształconych w sposób złożony widoczne są różne orientacje bliźniaków odkształcenia i pasm poślizgu przecinających się pod kątem zależnym od kierunku obciążenia zewnętrznego oraz układu krystalograficznego ziaren niż w próbach odkształcania monotonicznego (rys. 6.1.1.23 i 6.2.1.18).

oraz układu krystalograficznego ziaren, niż w próbkach odkształcanych monotonicznie (rys. 6.1.1.23 i 6.2.1.18).

Zaobserwowano również, że gdy bliźniaki odkształcenia napotykają na granicę ziarna, tworzą się koncentracje naprężeń w ziarnie sąsiednim, które mogą wymusić albo poślizg dyslokacyjny, co prowadzi do powstania grubych pasm poślizgu lub w przypadku, gdy kierunek wywołanych naprężeń na granicy ziaren sprzyja tworzeniu się bliźniaka w następnym ziarnie, powstają bliźniaki odkształcenia w sąsiednim ziarnie (rys. 6.1.2.17).

W złożonych schematach odkształcania częsta zmiana kierunku odkształcania wywołana małym cyklowym skręcaniem sprzyja heterogenizacji odkształcenia, co prowadzi do tworzenia się pasm ścinania przebiegających przez wiele ziaren (rys. 6.1.1.24).

W pracy udowodniono postawioną tezę. Reakcja odkształcanego materiału zależy od drogi odkształcenia. Poprzez zastosowanie określonych złożonych warunków odkształcania, w których zachodzi zmiana orientacji składowych głównych stanu odkształcenia można doprowadzić do zmiany uplastyczniającego naprężenia zastępczego oraz wpływać na strukturę odkształcanych stopów miedzi o budowie jednofazowej.

8. WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań, dotyczących wpływu złożonych dróg odkształcania, obejmujących: jednoczesne oraz sekwencyjne skręcanie z rozciąganiem, sekwencyjne małowykrętne skręcanie z rozciąganiem lub skręcaniem, jednoczesne małowykrętne skręcanie z rozciąganiem, na właściwości i zjawiska zachodzące w odkształcanym, w szerokim zakresie temperatur 20°C – 650°C i prędkości odkształcania $0,0\text{s}^{-1}$ – 1s^{-1} brązie krzemowym CuSi3,5 oraz brązie aluminiowym CuAl8 oraz na zapotrzebowanie energii do realizacji takich procesów można, wyciągnąć następujące wnioski:

1. Reakcja odkształcanego materiału zależy od drogi odkształcania. Poprzez zastosowanie określonych złożonych warunków odkształcania, w których zachodzi zmiana orientacji składowych głównych stanu odkształcenia, można doprowadzić do zmiany uplastyczniającego naprężenia zastępczego oraz wpływać na strukturę odkształcanych stopów miedzi o budowie jednofazowej.
2. Badane materiały brąz krzemowy CuSi3,5 oraz brąz aluminiowy CuAl8 zachowują się bardzo podobnie w analizowanych złożonych sposobach odkształcania.
3. Zbudowane urządzenie do badań złożonych stanów odkształcenia, umożliwiło poprawne zrealizowanie wyżej wymienionych sposobów odkształcania.
4. Poprawna interpretacja wyników badań, przy porównywaniu przebiegów naprężenia uplastyczniającego w funkcji odkształcenia w procesach odkształcania małowykrętnego i monotonicznego, wymaga zastosowania jednakowego pod względem fizycznym opisu odkształcenia. Takim odkształceniem jest odkształcenie plastyczne, a nie odkształcenie całkowite, w którym udział odkształceń sprężystych w procesach małowykrętnych jest zupełnie inny niż w procesach monotonicznych.
5. Opracowanie i zastosowanie metody wyodrębniania odkształceń plastycznych z odkształceń całkowitych w złożonych procesach odkształcania, umożliwiło uzyskiwanie porównywalnych przebiegów naprężenia uplastyczniającego w funkcji odkształcenia plastycznego dla zbadanych sposobów odkształcania.
6. Praca odkształcenia plastycznego, konieczna do określonego wydłużenia próbki w temperaturze pokojowej, będąca najważniejszym parametrem określającym wkład energii do realizacji takich procesów odkształcania, bowiem praca odkształcenia sprężystego jest odwracalna, zwiększa się wyraźnie wraz z wprowadzeniem dodatkowego małowykrętnego skręcania. Przy czym przyrost ten zwiększa się wraz ze wzrostem amplitudy i prędkości odkształcania małowykrętnego.

7. Korzystny wpływ złożonych dróg odkształcania na obniżenie naprężenia zastępczego i zwiększenie odkształcenia granicznego w stosunku do naprężenia uplastyczniającego, określonego w monotonicznych próbach skręcania jak i rozciągania, daje się zaobserwować głównie w warunkach obróbki plastycznej na zimno. W wyższych temperaturach, w których zachodzi rekrytalizacja dynamiczna, wpływ złożonego odkształcania jest znacznie mniejszy.
8. W przypadku materiałów o niskiej energii błędu ułożenia, jakimi są brąz krzemowy CuSi3,5 i brąz aluminiowy CuAl8, dla których dominującym sposobem usuwania umocnienia materiału jest rekrytalizacja dynamiczna, zastosowanie złożonego odkształcania powoduje intensyfikację lokalizacji odkształcenia w pasmach ścinania.
9. W procesie jednoczesnego odkształcania momentem skręcającym i siłą rozciągającą, poprzez zmianę prędkości odkształcania jednej ze składowych obciążenia, można sterować naprężeniami pochodzącymi od poszczególnych obciążeń oraz odkształceniem granicznym.
10. Wprowadzenie nagłej zmiany wektora prędkości przemieszczenia w sekwencyjnych procesach odkształcania umożliwia sterowanie naprężeniem i odkształceniem granicznym.
11. W sekwencyjnych procesach odkształcania wprowadzenie odkształcania małowykłowego prowadzi do osłabienia wstępnie odkształcanego materiału. Osłabienie to zależy silnie od rodzaju wstępnego odkształcania monotonicznego.
12. Wprowadzenie nagłej zmiany wektora prędkości przemieszczenia powoduje szybsze uruchamianie różnych systemów poślizgu. W znacznie większej liczbie ziaren w próbkach odkształconych w sposób złożony widoczne są różne orientacje bliźniaków odkształcenia i pasm poślizgu przecinających się pod kątem zależnym od kierunku obciążenia zewnętrznego oraz układu krystalograficznego ziaren aniżeli w monotonicznych procesach odkształcania.
13. Podstawowym mechanizmem odkształcania badanych materiałów w temperaturze otoczenia, zarówno podczas odkształcania monotonicznego jak i złożonego, jest powstawanie bliźniaków odkształcenia. W podwyższonych temperaturach, szczególnie w brązie aluminiowym CuAl8, nie tworzą się grube bliźniaki odkształcenia, gdyż dyslokacje szybko ulegają przegrupowaniu i tworzą się podgrance. Nie następuje wówczas proces akumulacji odkształcenia i umocnienia materiału.

14. Zaobserwowano również, że w złożonych schematach odkształcania, częsta zmiana kierunku odkształcania wywołana małowym skręcaniem, sprzyja heterogenizacji odkształcenia, co prowadzi do tworzenia się pasm ścinania przebiegających przez wiele ziaren.
15. Uzyskane wyniki badań, mogą być zastosowane do ulepszenia stosowanych obecnie technologii kształtowania plastycznego zbadanych dwóch stopów miedzi: brązu krzemowego CuSi3,5 i brązu aluminiowego CuAl8, ewentualnie opracowania nowych bardziej efektywnych procesów kształtowania tych stopów.
16. Poprzez zastosowanie właściwej drogi odkształcania w rzeczywistych procesach wytwórczych, można spodziewać się poprawy odkształcalności i obniżenia naprężenia uplastyczniającego
17. Wyniki przedstawione w tej pracy, dotyczące tylko wpływu wybranych złożonych sposobów odkształcania na zachowanie się brązu krzemowego CuSi3,5 i brązu aluminiowego CuAl8, wskazują na celowość dalszych badań obejmujących wpływ innych złożonych sposobów odkształcania na zachowanie się różnych materiałów w procesach kształtowania plastycznego.

Literatura

1. Anand L., Kalidini S. R.: The process of shear band formation in plane strain compression of FCC metals. Effect of crystallographic texture, *Mech. Materials*, 17, 1994, 223-243.
2. Arrieux R., Bedrin C., Boivin M.: Determination of an intrinsic forming limit stress diagram for isotropic metal sheets, 12th Biennial Congress Int. Deep Drawing Research Group, S. Margherita Ligure, 1982, 61-68.
3. Bate P.S.: The effect of combined strain path and strain-rate changes in aluminium, *Metall. Trans. A* 24, 1993, 2679 – 2689.
4. Beck P.A., Panchanadeeswarn S.: IV International Symposium on Plasticity and Its Current Application, 19-23.07.1993 Baltimore, Maryland, USA.
5. Błaż L.: Dynamiczne procesy strukturalne w metalach i stopach, Monografia, AGH Uczelniane Wydawnictwo Naukowo-Dydaktyczne, Kraków, 1998.
6. Bochniak W., Korbel A.: KOBO Type Forming: forging of metals under complex conditions of the process, *J. Mater. Processing Technol.*, 134, 2003, 120-134.
7. Bochniak W., Korbel A.: Structured based design of metal forming operations, *J. Mater. Proc. Technol.*, 53, 1995, 229-236.
8. Bochniak W., Korbel A.: The effect of change of the deformation path at high temperature in polycrystalline metals, *Strength of Metals*, Wyd. Oikawa i inni, 1994, 579.
9. Bochniak W.: Microstructure of Lüders bands in Cu-Sn2 alloy, *Scr. Metall.*, 23, 1989, 519-522.
10. Correa E.C.S., Aguilar M.T.P., Cetlin P. R.: The effect of tension/torsion strain path changes on the work hardening of Cu-Zn brass, *J. Mater. Proc. Technol.*, 124, 2002, 384-388.
11. Cottrell A.H., Stokes R.J.: Effect of temperature on the plastic properties of aluminum crystals, *Proc. R. Soc. A* 233 (1955) 17.
12. Dyja H., Korczak P.: Investigation of microstructure prediction during experimental thermo-mechanical plate rolling, *J. Mater. Proc. Technol.*, 109, 2001, 112-119.
13. Dyja H., Korczak P.: The thermal-mechanical and microstructural model for the FEM simulation of hot plate rolling, *J. Mater. Proc. Technol.*, 92-93, 1999, 463-467.
14. El-Danaf E., Kalidindi S.R., Doherty R.D.: Influence of deformation path on the strain hardening behavior and microstructure evolution in low SFE FCC metals, *International Journal of Plasticity*, 17, 2001, 1245-1265.
15. Gronostajski J., Dolny A., Sobis T.: Formability of high strength steel and armco at different strain path, *Proc. of 12th Biennial Congress IDDRG, Associazione Italiana Di Metallurgia, S. Margherita Ligure*, 1982, 39-48.
16. Gronostajski J., Gronostajski Z., Jaśkiewicz K., Misiołek N., Weiler W.: Plastometr realizujący złożone drogi odkształcania, *Obróbka Plastyczna Metali*, 12, 2001, nr 4, 5-10.
17. Gronostajski J., Pulit E., Ziemia H.: Recovery and recrystallization of Cu after hot deformation, *Metals Science*, 17, 1983, 348-352.
18. Gronostajski J.: Sheet metal forming-limit for complex strain paths, *J. Mech. Working Technology*, 1984, 10, 349-362.
19. Gronostajski Z., Jaśkiewicz K.: The behaviour of CuSi5 silicon bronze during deformation along complex strain path, *Arch. of Civil and Mechanical Engineering*, 4, nr 1, 2004, 17-30.

20. Gronostajski Z., Jaśkiewicz K.: The effect of complex strain path on the properties of silicon bronze CuSi3.5, 3rd Int. Conf. on Advanced Engineering Design. AED'2003, Prague, Czech Republic, Lokalizacja elektroniczna: www.aed2003.cz
21. Gronostajski Z., Jaśkiewicz K.: The effect of complex strain path on the properties and structures of silicon bronze CuSi3.5, Proc. of 20th Int. Manufacturing Conf. "Knowledge Driven Manufacturing", IMC20, Cork, Ireland, 2003, 666-671.
22. Gronostajski Z., Jaśkiewicz K.: The effect of complex strain path on the behavior of CuSi3.5 silicon bronze, Arch. of Metallurgy, 48, 2003, 435-453.
23. Gronostajski Z., Jaśkiewicz K.: The effect of complex strain path on the hot dynamic restoration of CuSi5 silicon bronze, Proc. of the Int. Conf on Advanced in Materials and Processing Technologies (AMPT'2003), Dublin, 2003, 1404-1407.
24. Gronostajski Z., Jaśkiewicz K.: The effect of complex strain path on the hot dynamic restoration of silicon bronze CuSi3.5, Proc. of Int. Sc. Conf. Achievements in Materials and Mechanical Engineering, AMME'2002, Zakopane, 2002, 215-218.
25. Gronostajski Z., Misiólek N., Jaśkiewicz K.: Wpływ małowykłowego skręcania oscylacyjnego na naprężenie uplastyczniające oraz odkształcenie graniczne brązu CuAl8, Materiały Konf. Forming'2002, Luhacovice, 2002, 93-98.
26. Gronostajski Z., Misiólek N.: Effect of minor cyclic deformation on properties and structure of deformed materials, rozdział w monografii pt. Plasticity of Metallic Materials, Deformation Behaviour, Structure Development, Testing, Modeling. Red. E. Hadasik, Schindler, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2004, 69-96.
27. Gronostajski Z., Misiólek N.: The effect of minor cycling torsion on the hot dynamic restoration of CuAl8 aluminium bronze, Proc. of 6th Int. ESAFORM Conference on Material Forming, Salerno, 2003, 807-810.
28. Gronostajski Z., Misiólek Z.: Model describing flow stress by means of structural processes and internal state of materials, Archive of Metallurgy, 40, 1995, 399-418.
29. Gronostajski Z.: Analiza metodą elementów skończonych plastometrycznej próby skręcania, Informatyka w Technologii Materiałów, 2, nr 2-3, 2002, 46-54.
30. Gronostajski Z., Jaśkiewicz K.: Wpływ zmiany schematu obciążenia na naprężenia styczne w próbie skręcania. Forming 2003. Materiały X Jubileuszowej Konferencji Forming'2003, Podlesice, 2003, 27-32.
31. Gronostajski Z., Misiólek N.: The effect of cycling strain path on the properties and structure of CuAl10 aluminium bronze, Proc. of the Int. Conf on Advanced in Materials and Processing Technologies (AMPT'2003), Dublin, 2003, 1408-1411.
32. Gronostajski Z., Misiólek N.: Wpływ małowykłowego skręcania oscylacyjnego na strukturę oraz naprężenie uplastyczniające brązu aluminiowego CuAl8 oraz stopu aluminium PA38, Forming 2003. Materiały X Jubileuszowej Konferencji Forming'2003, Podlesice, 2003, 33-38.
33. Gronostajski Z., Hadasik E., Schindler I.: Analiza próby skręcania na gorąco metodą elementów skończonych, Materiały 9 Konf. KomPlasTech'2002, Szczawnica, 2002, 103-108.
34. Hadasik E., Płachta A., Schindler I., Gronostajski Z.: Analysis of methodology for determination of the flow stress in hot torsion test, Proc. of 11th Int. Metallurgical and Materials Conf., Metal 2002, Hradec and Moravici, 2002, 1-8
35. Hadasik E., Płachta A., Gronostajski Z., Schindler I.: Analiza sposobów wyznaczania naprężenia uplastyczniającego w próbie skręcania na gorąco, Forming 2001, Stara-Lesna, 2001, 77-84.
36. Hansen M., Anderko K.: Constitution of Binary Alloys, Mc Graw-Hill, New York 1958.
37. Hull D.: Dyslokacje, PWN, Warszawa 1982.



38. Jackson P.J., Basinski Z.S.: Latent hardening and the flow stress in copper single crystals, *Can. J. Phys.* 45 (1967) 707.
39. Kong L.H., Hodgson P.D., Wang B.: Development of constitutive models for metal forming with cyclic strain softening, *J. Mater. Proc. Technol.*, 89-90, 1999, 44-50.
40. Kong L.H., Lin L., Hodgson P.D.: Material properties under drawing and extrusion with cyclic torsion, *J. Mater. Proc. Technol.*, A308, 2001, 209-215.
41. Korbel A., Bochniak W.: Method of plastic forming of materials, US Patent No 5, 737.959, 1998.
42. Korbel A., Embury J.D., Hartherly M., Martin P.L., Erbsloh H.W.: Microstructural aspects of strain localizations in Al-Mg alloys, *Acta Metall.* 34, 1986, 1999-2009.
43. Korbel A., Szczerba M.: Self-induced change of deformation path in Cu-Al single crystals, *Rev. Phys. Appl.*, 23, 1988, 706-710.
44. Korbel A.: Structural and mechanical aspects of homogeneous and non-homogeneous deformation in solids, w *Localization and Fracture Phenomena in Inelastic Solids*, Ed. P. Perzyna, Springer, Wien, 1998, 21-98.
45. Lachowicz C.T.: Calculation of the elastic-plastic strain energy density under cyclic and random loading, *Int. J. of Fracture*, 23, 2000, 643-652.
46. Lewandowska M.: Dependence of the deformation microstructure of aluminium alloys on the strain path, *Materials Chemistry and Physics*, 81, 2003, 555-557.
47. McQueen H.J., Jonas J.J.: *Treatise on Materials Science and Technology*, wyd. R.J. Arsenault, Academic Press, 6, 1975, 393.
48. Pawlicki J., Grosman F.: Możliwości niskoenergetycznego odkształcania metali w warunkach sterowanej drogi odkształcania, *Mednarodna Vedecka Konferencja FORMING'2001, Plasticita Materialov*, Stara Lesna, 2001, 155-162.
49. Pawlicki J., Grosman F.: Naprężenie uplastyczniające w warunkach wymuszonej zmiany orientacji osi głównych stanu naprężenia wybranych materiałów metalicznych, *Materiały Międzynarodowej Konf. FORMING'99*, 1999, 208-213.
50. Pawlicki J., Grosman F.: Wpływ zmiany orientacji osi głównych stanu naprężenia na wartość naprężenia uplastyczniającego, *Rudy i Metale Nieżelazne*, 42, 1997, 501-503.
51. Pawlicki J., Grosman F.: Wpływ przebiegu odkształcania na wartość naprężenia uplastyczniającego polikryształów, *Rudy i Met. Nieżelazne*, 10, nr 11, 1999, 565-568.
52. Pęcherski R.B.: *Opis deformacji plastycznej metali z efektami mikropasm ścinania*, Monografia, IPPT, Warszawa, 1998.
53. Pietrzyk M., Roucoules C., Hodgson P.D.: Dislocation model for work hardening and recrystallization applied to the finite-element simulation of hot forming, *Proc. NUMIFORM'95*, Eds. S. F. Shen, P. R. Dawson, Ithaca, 1995, 315.
54. Pinheiro J.P., Barbosa R.A.N.M., Cetlin P.R.: The effect of cycling torsion on the hot dynamic restoration of interstitial free steel in the austenitic range, *J. Mater. Proc. Technol.*, 125-126, 2002, 125-129.
55. Pinheiro J.P., Barbosa R.A.N.M., Cetlin P.R.: Dynamic restoration during the hot cyclic straining of copper, *Scripta Mater.*, 38, 1998, 53-57.
56. Pinheiro J.P., Barbosa R.A.N.M., Cetlin P.R.: Effect of the cyclic straining amplitude on the hot dynamic restoration of copper, *Scripta Mater.*, 44, 2001, 187-193.
57. Pinheiro J.P., Barbosa R.A.M.N., Cetlin P.R.: Warm cyclic straining of ferritic interstitial free steel, *Proc. of Symposium of Thermomechanical Processing of Steel*, Ottawa, the Metallurgical Society of the Canadian Institute of Metallurgy, Ottawa, 2000, 221-233.
58. Przybyłowicz K.: *Strukturalne aspekty odkształcania metali*, WNT, Warszawa 2002

59. Rollett A.D., Lowe T., Kocks U.K., Stout M.G.: The microstructure and texture of torsion-reverse torsion experiments, Eighth International Conference on Textures of Materials (ICOTOM 8), 1988, 473 – 478.
60. Schmitt J.H., Fernandes J.V., Gracio J.J.: Plastic behaviour of copper sheets during sequential tension tests, Materials Science and Engineering, A147, 1991, 143-154.
61. Stout M.G., Rollett A.D.: Large-strain Baushinger effects in FCC metals and alloys, Metall. Trans. A21(12), 1990, 3201 – 3213.
62. Vatne N.E., Mousavi M.G., Benum S., Ronning B., Nes E.: Texture and structure evolution in AlMn and commercial purity aluminium deformed by monotonic and reversed hot torsion, Mater. Sci. Forum 217/222, 1996, 553 – 558.
63. Weroński A.: Badania zależności pomiędzy budową strukturalną, technologią i właściwościami materiałów konstrukcyjnych. XII konferencja sprawozdawcza „Metalurgia 98”, Krynica, 1998, 430-433.
64. Zasadziński J.: Grosman F., Pawlicki J.: Nowe procesy kształtowania plastycznego metali i stopów oparte o kontrolowanie struktury z uwzględnieniem fizycznego i matematycznego modelowania zjawisk strukturalnych, Projekt Zamawiany, PBZ KBN 09/T08/98, 2003.