

ŁUCJA CIEŚLAK, JERZY ZWONEK

Katedra Metaloznawstwa

UDAROWE WYŻARZANIE REKRYSALIZUJĄCE
MOSIĄDZU DWUFAZOWEGO CuZn_{40}

Streszczenie. Podano wyniki badań nad rekrystaliczacją udarową mosiądzu CuZn_{40} i możliwością usunięcia pasmowego układu faz nadanego w procesie przeróbki plastycznej. Uzyskane własności wytrzymałościowe są wyższe niż po wyżarzaniu konwencjonalnym, plastycznie natomiast zbliżone.

Wstęp

W licznych pracach z ostatnich lat wykazano możliwość wprowadzenia zasadniczych zmian szeregu procesów technologicznych, obejmujących przeróbkę plastyczną na zimno niektórych metali i stopów [1-4]. Polegają one na zastąpieniu konwencjonalnego wyżarzania rekrystalizującego przez udarowe. Stwarza to podstawy do znacznej intensyfikacji produkcji przez wielokrotne skrócenie czasu wyżarzania oraz automatyzację. Otrzymane po nagrzewaniu udarowym własności wytrzymałościowe nie są niższe, własności plastyczne natomiast często przewyższają uzyskane po wyżarzaniu konwencjonalnym, szczególnie przy stosowaniu szybkości nagrzewania większych od $1000^{\circ}\text{C}/\text{sek}$ [1-4]. Następuje wtedy, nawet w przypadku metali czystych, całkowite zahamowanie rekrystaliczacji wtórnej. W rezultacie otrzymuje się jednorodną strukturę drobnoziarnistą [3]. Proces ten ma także duże znaczenie w stopach wielofazowych, gdyż nierównomierne rozmieszczenie faz powoduje z reguły lokalny rozrost ziarn w czasie rekrystaliczacji konwencjonalnej.

Prac w zakresie wpływu udarowego na własności mechaniczne i strukturę stopów dwufazowych jest dotąd niewiele [4]. Do-

tychczasowe badania przeprowadzone na mosiądzu ($\alpha + \beta'$) dotyczyły kinetyki zdrowienia i zarodkowania podczas rekrytalizacji pierwotnej przy nagrzewaniu indukcyjnym z szybkością 100 - 2000°C/sek [5].

Zdrowienie i rekrytalizacja mosiądzu dwufazowego ($\alpha + \beta'$)

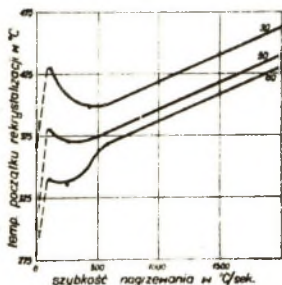
Mosiądze przerobione plastycznie na zimno poddaje się w zależności od żądanych własności wyżarzaniu odprężającemu albo rekrytalizującemu. Wyżarzanie odprężające w zakresie 200 - 300°C stosowane jest dla mosiądźców twardych i półtwardych celem zmniejszenia skłonności do pęknięcia sezonowego [7]. Właściwe wyżarzanie rekrytalizujące umożliwiające uzyskanie struktury w pełni zrekrystalizowanej prowadzone jest w temperaturach 500-650°C. Niższe temperatury powodują znaczne wydłużenie czasu wyżarzania [6, 7].

W zakresie 100-250°C w mosiądźcach α i ($\alpha + \beta'$) zachodzi zdrowienie połączone ze znacznym wzrostem wielkości bloków. Większa część energii zamagazynowanej w procesie przeróbki plastycznej ulega wydzieleniu w tym zakresie temperatur. Energia ta związana jest głównie z odbudową uporządkowania bliskiego zasięgu w fazie α i uporządkowania fazy β' zniszczonych w procesie przeróbki plastycznej oraz obniżaniem sumarycznej energii powierzchniowej subgranic [8]. Przy wysokich stopniach zgniotu powyżej 250°C tworzą się już zarodki rekrytalizacji na granicach fazy β' , przy niskich - zbliżonych do zgniotu krytycznego proces ten następuje około 400°C. Po zakończeniu rekrytalizacji pierwotnej pasmowy układ faz nadany w czasie przeróbki plastycznej zostaje zachowany prawie całkowicie. Jego zanikanie następuje dopiero przy wtórnej rekrytalizacji, po długotrwałym wyżarzaniu w temperaturach 600-650°C [6].

Zwiększenie szybkości nagrzewania wpływa hamująco na kinetykę zdrowienia, przyczym działanie to zależne jest od stopnia zgniotu. Znaczne zahamowanie zdrowienia po 60% zgniotcie stwierdzono już przy szybkości nagrzewania 100°C/sek, dla 30% zgniotu efekt ten występuje dopiero przy 400°C/sek [5]. Powyżej 1000°C/sek zdrowienie zachodzi w znikowym stopniu i nie jest

już uzależnione od uprzedniego zgniotu oraz szybkości nagrzewania. Zmiany twardości do momentu rekrytalizacji pierwotnej wynoszą wtedy 2-4HV, przy rekrytalizacji konwencjonalnej osiąga ją one 40 HV [5].

Zależność temperatury początku rekrytalizacji od szybkości nagrzewania i stopnia zgniotu mosiądzu ($\alpha+\beta'$) jest złożona (rys. 1). Do 100°C/sek temperatura rekrytalizacji rośnie gwałtownie



Rys. 1. Zależność temperatury początku rekrytalizacji pierwotnej od szybkości nagrzewania i stopnia zgniotu mosiądzu ($\alpha+\beta'$) wg [5]

dla wszystkich zgniotów. Przy większych szybkościach nagrzewania do około 400°C/sek, w zależności od stopnia zgniotu następuje obniżenie temperatury początku rekrytalizacji. Efekt ten jest wyraźniejszy przy mniejszych zgniotach. Szybkość nagrzewania przy której temperatura początku rekrytalizacji osiąga minimum nazwano krytyczną. Powyżej szybkości krytycznej temperatura rekrytalizacji rośnie linowo ze wzrostem szybkości nagrzewania.

Stwierdzono, że szybkość krytyczna odpowiada minimalnej szybkości nagrzewania, przy której zdrowienie zostaje

prawie całkowicie wstrzymane [5]. Złożoność występujących zależności (rys. 1) tłumaczono istnieniem bloków o podwyższonej gęstości defektów, spowodowanym obecnością fazy β' oraz wstrzymaniem zdrowienia. Interpretację taką potwierdza mechanizm zarodkowania a mianowicie, przy szybkościach nagrzewania mniejszych od 100°C/sek zarodki rekrytalizacji powstały jedynie na granicach fazy β' . Przy szybkościach większych od krytycznej, w zakresie badanych stopni zgniotu 30-60% zarodki powstały zarówno na granicach fazy α jak i β' .

Badania własne

Celem niniejszej pracy było określenie optymalnych parametrów udarowego wyżarzania rekrytalizującego mosiądzu CuZn40. Badaniom poddano mosiądz dwufazowy CuZn40 o składzie: 60,62% Cu;

0,04% Fe; 0,02% Pb; 0,35% Si - reszta Zn, dostarczony w postaci drutu o średnicy 1 mm i sumarycznym zgnieciu równym 75%. Własności mechaniczne badanego mosiądzu w stanie zgniecionym wynosiły: $R_m = 80 \text{ kg/mm}^2$, A_{10} około 7% i twardość - 214 HV.

Wyżarzanie rekrytalizujące konwencjonalne prowadzono w elektrycznym piecu komorowym zaś udarowe, w piecach solnych oraz przy nagrzewaniu indukcyjnym. Średnia szybkość nagrzewania w piecu komorowym wynosiła około $2^\circ\text{C}/\text{sek}$, zaś w piecach solnych - zależnie od temperatury kąpieli $80\text{--}130^\circ\text{C}/\text{sek}$. Nagrzewanie w kąpieli solnej umoliwiło zbadanie wpływu izotermicznego wygrzania w granicach od 15 sek do 36 minut.

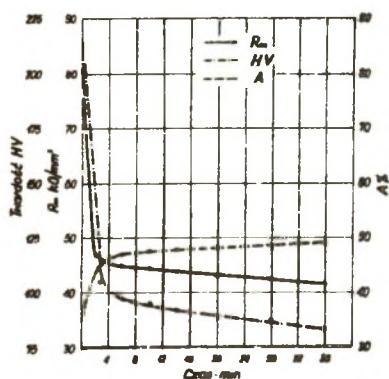
Nagrzewanie indukcyjne realizowano za pomocą generatora wysokiej częstotliwości ŁGZ60 produkcji radzieckiej o maksymalnej mocy obwodu drgającego 60 kW i częstotliwości roboczej 0,25 MHz, wyposażonego w wzbudnik jednofazowy i podawarkę. Odcinki drutu o długości 2 m rekrytalizowano sposobem ciągłym, przy prędkości przesuwu 0,016-0,08 m/sek i szybkościach nagrzewania od 1500 do $5000^\circ\text{C}/\text{sek}$. Większe szybkości przesuwu przy podanej mocy generatora możliwe są do osiągnięcia po zastosowaniu wzbudników wielozwojowych. Temperaturę mierzono sposobem opisanym w pracach [1, 4].

Wstępne badania rentgenograficzne odcinków próbnych nagrzewanych indukcyjnie do zakresu $400\text{--}600^\circ\text{C}$ miały na celu określenie temperatury początku rekrytalizacji oraz przebiegu zdrowienia przy szybkości nagrzewania 5000°C . Próbki nagrzewane konwencjonalnie lub w kąpielach solnych do $250\text{--}400^\circ\text{C}$ badano w celach porównawczych. Stosując metodę promieni wstecznych rejestrowano linie (420) fazy α oraz (321) - β' .

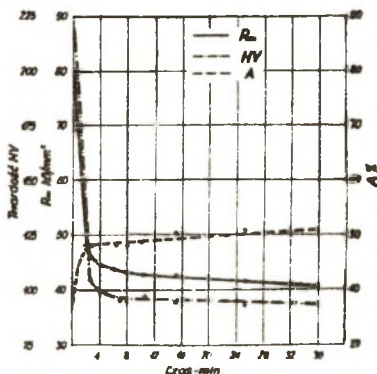
Po wyżarzaniu rekrytalizującym w zakresie $400\text{--}700^\circ\text{C}$ w piecach solnych oraz $700\text{--}850^\circ\text{C}$ przy nagrzewaniu indukcyjnym, z każdego odcinka sporządzono 3 próbki wytrzymałościowe oraz zgłady do badań metalograficznych i pomiaru twardości Vickersa przy obciążeniu 5 kg.

Wyniki badań i ich omówienie

Wyniki wstępnych badań rentgenowskich przedstawiono na rys. 12+15. Porównanie szerokości linii na rentgenogramach próbek nagrzewanych udarowo z szybkością 5000°C/sek (rys. 12) oraz konwencjonalnie (rys. 13) do temperatur zbliżonych do temperatury początku rekrystalizacji pierwotnej pozwala stwierdzić, że przy wymienionej szybkości nagrzewania zdrowienie praktycznie nie zachodzi. Pierwsze oddzielne refleksy punktowe wykryto jednocześnie na liniach (420) fazy α oraz (321) - β' po nagrzaniu udarowym do temperatury 520°C (rys. 14). Na tej podstawie



Rys. 2. Właściwości mechaniczne mosiądzu CuZn40 w zależności od czasu izotermicznego wygrzania w temperaturze 500°C po nagrzaniu z szybkością około 100°C/sek ($z=75\%$)



Rys. 3. Właściwości mechaniczne mosiądzu CuZn40 w zależności od czasu izotermicznego wygrzania w temperaturze 700°C po nagrzaniu z szybkością około 100°C/sek ($z=75\%$)

temperaturę początku rekrystalizacji pierwotnej obu faz przy nagrzaniu z szybkością 5000°C/sek oceniono jako zbliżoną do 500°C. Powyżej 650°C linie faz α i β' przestają być ciągłe i składają się z oddzielnych refleksów (rys. 15), których wymiary pozwalają ocenić średnicę ziarn równą 0,02-0,04 mm. Nie stwierdzono hamującego działania zwiększonej szybkości nagrzewania na kinetykę zdrowienia przy nagrzewaniu w kąpeli solnej. Obserwowane zmiany szerokości linii interferencyjnych były w tym przypadku zbliżone do zachodzących przy nagrzewaniu konwencjonalnym.

Zmiany własności mechanicznych próbek nagrzewanych w kąpieli solnej w zależności od czasu wygrzewania (rys. 2, 3), zbliżone są do zachodzących podczas rekrytalizacji konwencjonalnej od momentu ustalenia się temperatury. Wyjątek stanowi przebieg krzywej twardości po wygrzaniu w temperaturze 700°C w czasach od 8-36 min (rys. 3). Uzyskiwana w tym zakresie stała twardość spowodowana jest prawdopodobnie przesyleniem w czasie chłodzenia próbek. Pomiarzy twardości, wytrzymałości na rozciąganie i wydłużenie próbek rekrytalizowanych udarowo przy szybkościach nagrzewania 1500-5000°C/sek do temperatur 700-850°C wykazały, że w badanym zakresie własności te nie zależą od wymienionych parametrów. Uzyskane, optymalne dla każdego sposobu nagrzewania własności mechaniczne oraz odpowiadające im parametry wyżarzania zestawiono w tabelicy 1.

Tabela 1

Optymalne własności mechaniczne uzyskane po wyżarzaniu rekrytalizującym i udarowym						
Sposób wyżarzania	Szybkość nagrzewania °C/sek	Czas izotermicznego wygrzewania	Temperatura °C	Twardość HV	R _m kg/mm ²	A ₁₀ %
Konwencjonalny w piecu komorowym	ok. 2°C/sek	36	600	88	38	52
Udarowy nagrzewanie w piecu solnym	ok. 100°C/sek	36	500 600	86 90	43 41	50 52
Udarowy nagrzewanie indukcyjne	ok. 5000°C/sek	-	800	94	45,5	50

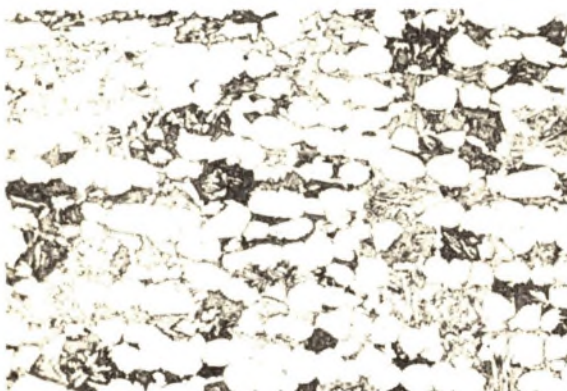
Próbki nagrzewane w piecu solnym do temperatur niższych od 650°C posiadały strukturę zbliżoną do uzyskanej po nagrzewaniu konwencjonalnym (rys. 4). W obydwu przypadkach pasmowy układ



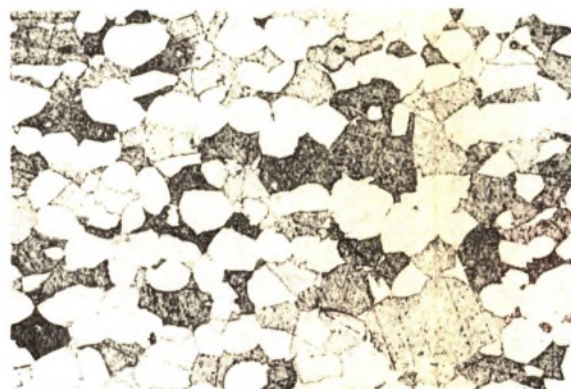
Rys. 4



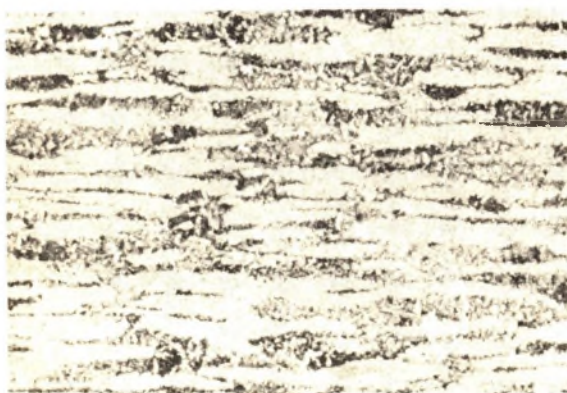
Rys. 5



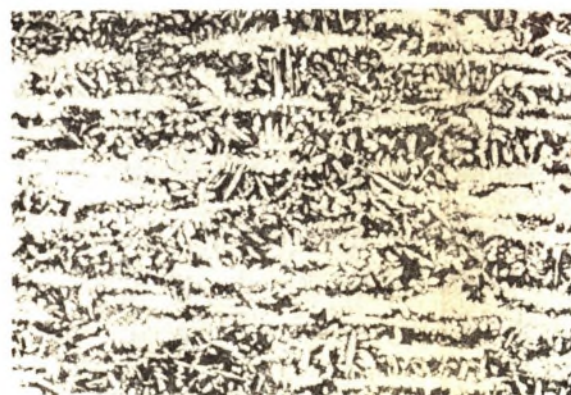
Rys. 6



Rys. 7



Rys. 8

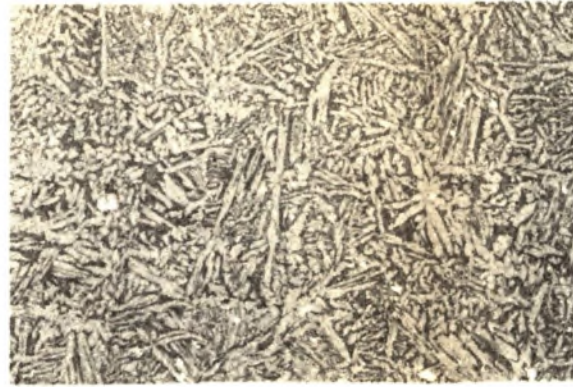


Rys. 9

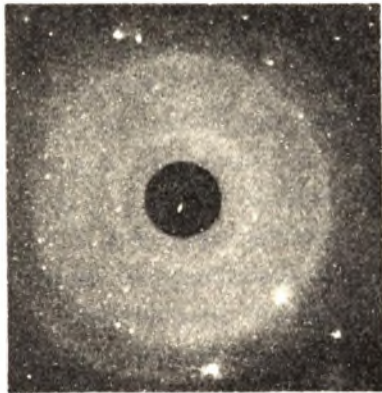
Nr rys.	Rodzaj i parametry wyżarzania	Powiększenie	Struktura
4	Udarowe 500°C/36min V ok. 100°C/sek	100	Zrekrytalizowane ziarna fazy α i β' w układzie pasmowym. Ziarna fazy β' osiągnęły wymiary zbliżone do szerokości pasm.
5	Udarowe 700°C/2 min V ok. 100°C/sek	100	Faza α rozmieszczona w postaci drobnoziarnistych pasm oraz igieł w obszarach β' .
6	Udarowe 700°C/15 min V ok. 100°C/sek	100	Stopniowe zanikanie struktury iglastej - rozrost ziarn fazy α .
7	Udarowe 700°C/36 min V ok. 100°C/sek	100	Struktura ziarnista - całkowity zanik pasmowości.
8	Udarowe 700°C V ok. 2500°C/sek	100	Drobnoziarniste pasma fazy α na tle iglastej struktury fazy β' .
9	Udarowe 750°C V ok. 500°C/sek	100	Jak wyżej - stopniowy zanik pasmowości i rozrost igieł fazy α .



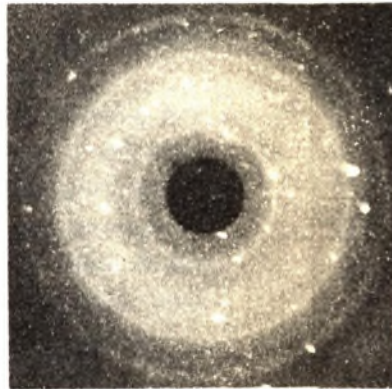
Rys. 10



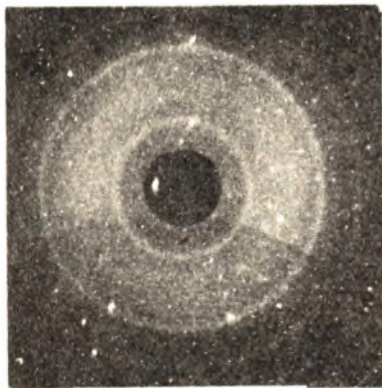
Rys. 11



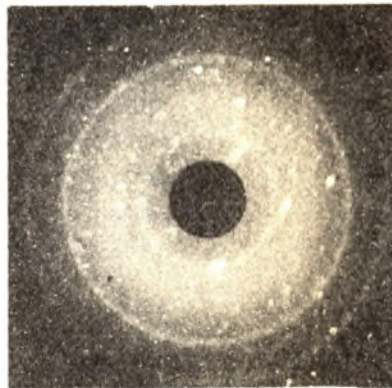
Rys. 12



Rys. 13



Rys. 14



Rys. 15

Nr rys.	Rodzaj i parametry wyżarzania	powiększenie	Struktura (opis)
10	Udarowe 750°C V ok. 1500°C/sec	100	Iglasta struktura ziarn fazy β - dalsze zanikanie pasmowości
11	Udarowe 800°C V ok. 1500°C/sec	100	Różnej wielkości igły fazy α w ziarnach β - całkowity zanik pasm
12	Udarowe 460°C V ok. 5000°C/sec	-	Rentgenogram zbliżony do uzyskanego dla mosiądzu CuZn40 bezpośrednio po przeróbce plastycznej. Widoczne ciągłe, rozmyte prążki (321) fazy β' , (420) - α oraz zewnętrzny złożony z (331) α i (222) β' .
13	Konwencjonalne 240°C V ok. 2°C/sec	-	W kierunku od środka prążki (321) fazy β' , (420) - α oraz (331) α i (222) β' . Zachowana ciągłość prążków - znaczne zmniejszenie się rozmycia
14	Udarowe 520°C V ok. 5000°C/sec	-	Jak wyżej - na tle ciągłych prążków obu faz znaczna ilość drobnych refleksów punktowych
15	Udarowe 700°C V ok. 5000°C/sec	-	Zanik ciągłości wyraźniej widoczny w przypadku prążka (321) fazy β' .

faz, nadany w procesie przeróbki plastycznej zachował się całkowicie. W temperaturach wyższych wystąpiła struktura iglasta z pasmami fazy α . Izotermiczne wygrzewanie powodowało stopniowe zanikanie struktury iglastej, przy równoczesnej rekrytalizacji wtórnej w pasmach fazy α (rys. 5, 6). Po 36 minutach wygrzewania uzyskano strukturę ziarnistą (rys. 7). Rekrytalizacja udarowa z szybkością 1500–5000°C/sek w temperaturach niższych od 800°C powoduje powstanie struktury iglastej z zachowanymi w mniejszym lub większym stopniu pasmami fazy α (rys. 8–11). Niezależnie od temperatury i szybkości nagrzewania pasma te posiadają budowę drobnoziarnistą. Zupełny ich zanik następuje po nagrzewaniu z szybkością 1500°C/sek do temperatury 800°C (rys. 11).

Przy 5000°C/sek całkowity zanik pasm fazy α zachodzi w temperaturze wyższej od 850°C, bliskiej linii solidusu.

Zbliżoną do przedstawionej na rys. 11 strukturę iglastą posiada mosiądz dwufazowy po odlaniu a także wygrzaniu w zakresie fazy β , szybkim chłodzeniu do około 500°C i dalszym wygrzewaniu w tej temperaturze [6]. Przyczyną jej powstawania jest zmienna rozpuszczalność cynku w fazach α i β . Przy chłodzeniu z zakresu β w obszarach uboższych w cynk następuje przemiana β w α , przy czym wydzielenia posiadają kształt igieł. Wielkość wydzielań zależy od szybkości chłodzenia.

Analiza struktur uzyskanych po rekrytalizacji udarowej w temperaturze 700°C przy różnych czasach izotermicznego wygrzewania, częściowo przedstawionych na rys. 5–7 pozwoliła stwierdzić, że w tym przypadku struktura iglasta powstaje w czasie nagrzewania. Warunki chłodzenia próbek były w każdym przypadku jednakowe, mimo tego po 36 minutach wygrzewania uzyskano strukturę ziarnistą bez iglastych wydzielań fazy α . Ponieważ efekty te związane być mogą z wieloma czynnikami między innymi stanem dostarczonego materiału oraz stopniem zgniotu, bliższe ich omówienie możliwe będzie po przeprowadzeniu badań uzupełniających.

W czasie nagrzewania udarowego do temperatur wyższych od 650°C niezależnie od sposobu, nastąpiła częściowa przemiana

α w β . Przebieg przemiany przy szybkościach nagrzewania 1500–5000°C/sek określić można na podstawie rysunków 20–23, ilustrujących wpływ zarówno temperatury jak i szybkości nagrzewania. Wzrost temperatury (rys. 10, 11) zgodnie z układem równowagi Cu–Zn przyspiesza przemianę, natomiast zwiększenie szybkości nagrzewania (rys. 9, 10) oddziałuje w kierunku przeciwnym.

Możliwość uniknięcia pasmowości posiadać może duże znaczenie w przypadku blach, które po konwencjonalnym wyżarzaniu rekrytalizującym cechuje znaczna anizotropia własności plastycznych, spowodowana zarówno pasmowością jak i teksturą rekrytalizacji [7]. Planowane dalsze badania pozwolą sprawdzić słuszność tych przewidywań, przez bezpośrednią ocenę wpływu obu wymienionych czynników na twardość blach.

Wnioski

1. Udarowa rekrytalizacja mosiądzu CuZn_4O zachodzi przy nagrzewaniu indukcyjnym do temperatury 700–850°C z szybkością 1500–5000°C/sek.

2. Wytrzymałość na rozciąganie po wyżarzaniu udarowym jest wyższa o około 5 kg/mm^2 niż po wyżarzaniu konwencjonalnym przy zbliżonych własnościach plastycznych.

3. Na strukturę uzyskaną po wyżarzaniu udarowym zasadniczy wpływ wywiera temperatura nagrzewania. Poniżej 650°C uzyskuje się strukturę drobnoziarnistą z pasmowym układem faz. Wyższe temperatury powodują powstanie struktury iglastej, Całkowity zanik pasm następuje w temperaturze około 850°C.

4. Nagrzewanie udarowe posiada szereg zalet technologicznych, między innymi wielokrotnie skraca czas wyżarzania oraz umożliwia prowadzenie procesu sposobem ciągłym.

LITERATURA

- [1] Staub F., Cieślak Ł.: Archiwum Hutnictwa, t. VII. 1962, str. 333.
- [2] Staub F., Cieślak Ł.: Hutnik nr 9, 1965, str. 315.
- [3] Iwanow W.J., Osipow K.A.: Wozwrat i rekrytalizacja w metalach pri bystriom nagrewje, Nauka, Moskwa 1964 r.
- [4] Cieślak Ł., Szewieczek D., Zwonek J.: Zeszyty Naukowe Pol. Śląskiej - nr 27, 1967 r.
- [5] Zimin N.W.: Fizika Metalłow i Metalłowiedenje, t. 20, 1965 r., z. 2, str. 265.
- [6] Praca zbiorowa: Werkstoff - Handbuch, Nichteisenmetalle, VDI - Düsseldorf 1960 r.
- [7] Gibbs L.E.: Cold Working of Brass, ASM - Cleveland 1946 r.
- [8] Clarebrough L.M., Hargreaves M.E., Loretto M.H.: Proc. Roy. Soc. 1961 r. A261, str. 500.

РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИЯ ПРИ СКОРОСТНОМ НАГРЕВЕ ДВУХФАЗНОЙ
ЛАТУНИ CuZn_{40}

Резюме

Исследовано процесс рекристаллизации предварительно наклепанной латуни CuZn_{40} при индукционном нагреве со скоростью $1500-5000^{\circ}\text{C}/\text{сек}$.

После быстрого нагрева механические свойства выше чем при медленном, пластические практически не изменяются.

Установлено, что быстрый нагрев в интервал $700-850^{\circ}\text{C}$ приводит к уголочатой структуре.

Применение результатов исследования позволяет создавать новые высокопроизводительные технологические процессы и открывает возможности автоматизации некоторых из них.

DIE BESCHLEUNIGTE REKRISTALLISATION DER α UND β MESSING

Zusammenfassung

Der $\alpha + \beta$ Messing (CuZn40) wurde nach Kaltverarbeitung konventionell und beschleunigt rekristallisiert. Die erhaltenen Werte sind bei der beschleunigten Rekristallisation für die Zugfestigkeit grösser im Vergleich zur konventioneller Rekristallisation, wobei die plastischen Eigenschaften ähnlich verbleiben. Ausser der Vorteile wie, eine sehr grosse Zeitverkürzung und die Möglichkeit den technologischen Prozess als laufend zu betreiben - ist die Strukturverbesserung zu betrachten in dem die zeilenförmige Gestaltung der β - Phase verschwindet und ein gleichmässiges Korn auftritt.