

Łucja CIEŚLAK, Elżbieta KALINOWSKA,
Wojciech OZGOWICZ, Zbigniew PŁONKA

ZASTOSOWANIE NAGRZEWANIA INDUKCYJNEGO DO WYŻARZANIA REKRYSALIZUJĄCEGO RUR MOSIĘŻNYCH

Streszczenie. Zbadano wpływ parametrów wyżarzania rekrystalizującego metodą indukcyjną na strukturę i własności mechaniczne rur z mosiądzu CuZn37. Stwierdzono, że zastosowanie bezpośredniego nagrzewania indukcyjnego pozwala na uzyskanie drobnoziarnistej struktury stopu, zapewniającej wymagane własności mechaniczne. Korzystne własności wytrzymałościowe i plastyczne oraz znaczne skrócenie czasu nagrzewania i możliwość automatyzacji procesu preferują zastosowanie tej metody w ciągłym procesie technologicznym wytwarzania rur.

1. Wstęp

Względy ekonomiczne oraz konieczność podnoszenia jakości wyrobów w przemyśle przetwórczym metali żelaznych skłaniają do szukania nowych rozwiązań technologicznych, szczególnie w zakresie wyżarzania rekrystalizującego rur mosiężnych. Aktualnie stosowane technologie obróbki cieplnej rur nie zapewniają wysokiej wydajności procesu produkcji. Ponadto długi czas obróbki cieplnej zwiększa straty materiału spowodowane utlenianiem powierzchni rur. Prowadzi do wydłużenia czasu trawienia i większego zużycia środków trawiących.

Zastosowanie nagrzewania przyspieszonego do wyżarzania rekrystalizującego rur mosiężnych pozwala na częściowe wyeliminowanie tych wad. Rozwiązaniem z wielu względów korzystnym i możliwym do stosowania w obecnych warunkach przemysłowych jest wprowadzenie nagrzewania oporowego i indukcyjnego [1÷3].

W licznych pracach dotyczących nagrzewania przyspieszonego szczegółowo opisano proces rekrystalizacji żelaza i stali oraz tytanu i jego stopów [4÷6], a także miedzi i mosiądźców [5÷8]. Większość badań prowadzono jednak na taśmach i drutach w warunkach stacjonarnych [9]. Brak jest natomiast danych na temat wykorzystania prądów wysokiej częstotliwości do ciągłego wyżarzania rekrystalizującego rur mosiężnych.

Zastosowanie nagrzewania indukcyjnego wpływa istotnie na kinetykę przemian fazowych i własności obrobionych cieplnie stopów. Stwierdzono, że przy niskich temperaturach wyżarzania zmiany w kinetyce rekrystalizacji są nieznaczne, natomiast w wyższych temperaturach zwiększenie szybkości

nagrzewania powoduje gwałtowny wzrost szybkości rekrytalizacji [10]. Szybkość nagrzewania oddziałuje decydująco na początkowe stadia rekrytalizacji. Eksperymentalnie wykazano [11, 12], że główną przyczyną zmian kinetyki rekrytalizacji w warunkach dużych szybkości nagrzewania jest tłumienie procesu zdrowienia i połączenie go z procesem rekrytalizacji. Miarą tłumienia zdrowienia jest zmiana energii aktywacji, która maleje ze wzrostem szybkości nagrzewania. Wykorzystanie eksperymentalnych wartości energii aktywacji często stwarza spore trudności. Aktualnie więc poglądy na temat kinetyki rekrytalizacji przy szybkim nagrzewaniu są nadal kontrowersyjne [10, 11, 13]. Ogólnie stwierdza się, że ze wzrostem szybkości nagrzewania rośnie temperatura początku i końca rekrytalizacji, a ziarno ulega rozdrobieniu [14]. W stopach żelaza takie rozdrobienie ziarna prowadzi do jednoczesnego podwyższenia zarówno wytrzymałości na rozciąganie jak i własności plastycznych. Natomiast w stopach miedzi własności plastyczne mogą ulec zmniejszeniu [9]. Wykazano także, że rekrytalizacja może rozwijać się zarówno w czasie nagrzewania jak i podczas chłodzenia [4, 15], dlatego w analizie procesu rekrytalizacji przy krótkotrwałym nagrzewaniu należy uwzględnić nie tylko szybkość nagrzewania, ale również szybkość chłodzenia.

Podjęte badania miały na celu ustalenie przydatności zastosowania bezpośredniego nagrzewania indukcyjnego w procesie wyżarzania rekrytalizującego rur mosiężnych oraz określenie wpływu parametrów tego wyżarzania na strukturę i własności mechaniczne rur walcowanych i ciągnionych na zimno w oparciu o kryterium otrzymania stanu zrekrystalizowanego oraz wysokiej wydajności procesu.

2. Badania własne

Badania przeprowadzono na rurach o wymiarach $\phi 30 \times 1,5 + 1,8 \times 3000$ mm z wytopu przemysłowego mosiądku CuZn37. Rury dostarczone w stanie odkształconym plastycznie po ciągnięciu i walcowaniu na zimno z gniosem około 66% i 77%. Skład chemiczny badanych rur przedstawiono w tabelicy 1, a własności mechaniczne w tabelicy 2.

W celu określenia wpływu parametrów obróbki cieplnej na strukturę i własności mechaniczne mosiądku CuZn37 przeprowadzono wyżarzanie rekrytalizujące metodą konwencjonalną oraz indukcyjną. Wyżarzanie rekrytalizujące metodą konwencjonalną przeprowadzono w piecu przelotowym rolkowym produkcji EBNER - ZAMET przy temperaturze 640°C w czasie około 30 minut. Po wyżarzeniu rury chłodzono na powietrzu. Nagrzewanie indukcyjne metodą ciągłą realizowano przy użyciu generatora firmy Elphiac o mocy maksymalnej 300 kW i częstotliwości 4kHz. Wyżarzanie rekrytalizujące metodą indukcyjną prowadzono w zakresie temperatur 600 do 800°C , stosując prędkości przesuwu rur we wzbudnikach od 0,2 do 0,5 m/s. Pomiary temperatury wy-

Tablica 1

Skład chemiczny badanych rur

Stan materiału	Skład chemiczny w %						
	Cu	Fe	Pb	Sb	Bi	P	Zn
Rury ciągnione	63,37	0,01	0,017	0,002	0,0009	0,004	reszta
Rury walcowane	63,54	0,012	0,018	0,0008	0,0007	0,0004	reszta

Tablica 2

Własności mechaniczne mosiądzu CuZn37 w stanie dostarczenia

Stan materiału	Stopień gniotłu %	Własności mechaniczne			
		R _m MPa	R _{0,2} MPa	A ₁₀ %	Twardość HV5
Rury ciągnione	66	633	614	3	165
Rury walcowane	77	673	-	2,5	171

żarzania realizowano przy użyciu pirometru fotoelektrycznego typu "Pyro-cord" produkcji NRD oraz pirometru typu "Raytex" produkcji USA z dokładnością do $\pm 15^{\circ}\text{C}$. Po nagrzewaniu indukcyjnym rury mosiężne chłodzono w wodzie lub w atmosferze azotu.

Dla określenia przydatności nagrzewania indukcyjnego do ciągłego wyżarzania rekrytalizującego rur mosiężnych przeprowadzono:

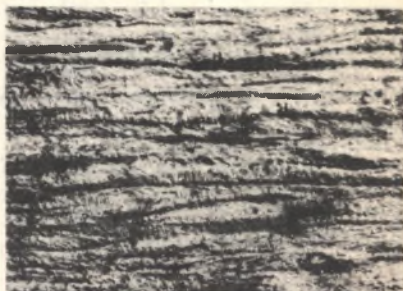
- badania wytrzymałości na rozciąganie,
- pomiary twardości,
- pomiary siły ciągnięcia,
- badania metalograficzne.

3. Wyniki badań i ich analiza

Rury z mosiądzu CuZn37 po ciągnięciu lub walcowaniu na zimno wykazują wydłużone w kierunku przeróbki plastycznej ziarna roztworu stałego α z licznymi pasmami poślizgu - rys. 1, 2. W strukturze mosiądzu walcowanego obserwuje się większe rozdrobnienie i wyraźną pasmowość - rys. 2. Własności mechaniczne rur ciągniętych i walcowanych wynoszą odpowiednio: R_m = 633 MPa, R_{0,2} = 614 MPa, A₁₀ = 3%, twardość ok. 165 HV oraz R_m = 673 MPa, A₁₀ = 2,5% i twardość ok. 171 HV.



Rys. 1. Wydłużone ziarna roztworu stałego α miedzi CuZn37 po ciągnięciu z gniotem 66%. Pow. 500x



Rys. 2. Struktura pasmowa miedzi CuZn37 po walcowaniu z gniotem 77%. Pow. 500x



Rys. 3. Zrekrytalizowane ziarna fazy α rur miedzi walcowanych na zimno i wyżarzonych metodą konwencjonalną. Pow. 400x



Rys. 4. Zrekrytalizowana struktura rur miedzi ciągniętych i wyżarzanych indukcyjnie w temperaturze 600°C. Prędkość przesuwu 0,3 m/s; chłodzenie w wodzie. Pow. 400x

Wyżarzanie rekrystalizujące miedzi metodą konwencjonalną zapewnia jednofazową strukturę roztworu stałego α z licznymi bliźniakami wyżarzenia, o stosunkowo dużej wielkości ziarna - rys. 3, odpowiadającej numerowi 3 + 5 według skali wzorców ASTM dla rur ciągniętych oraz numerowi 2 + 4 dla rur walcowanych. Po wyżarzaniu konwencjonalnym wytrzymałość na rozciąganie R_m wynosi około 305 i 335 MPa, granica plastyczności $R_{0,2}$ ok. 103 i 106 MPa, natomiast wydłużenie względne A_{10} ok. 59% i 45% odpowiednio dla rur ciągniętych i walcowanych.

Zastosowanie do wyżarzania rekrystalizującego nagrzewania indukcyjnego spowodowało znaczne rozdrobnienie struktury oraz przyrost własności wytrzymałościowych w porównaniu z konwencjonalną obróbką cieplną. W badanym zakresie temperatur wyżarzania przyspieszonego miedź wykazuje zrekrystalizowaną strukturę roztworu stałego α o wielkości ziarna od 6 do



Rys. 5. Drobnoziarnista zrekrystalizowana struktura rur miedziowych ciągnionych i wyżarzanych indukcyjnie w temperaturze 600°C. Prędkość przesuwu 0,5 m/s; chłodzenie w wodzie. Pow. 400x



Rys. 6. Zrekrystalizowana struktura rur miedziowych walcowanych i wyżarzanych indukcyjnie w temperaturze 800°C. Prędkość przesuwu 0,5 m/s; chłodzenie w azocie. Pow. 400x



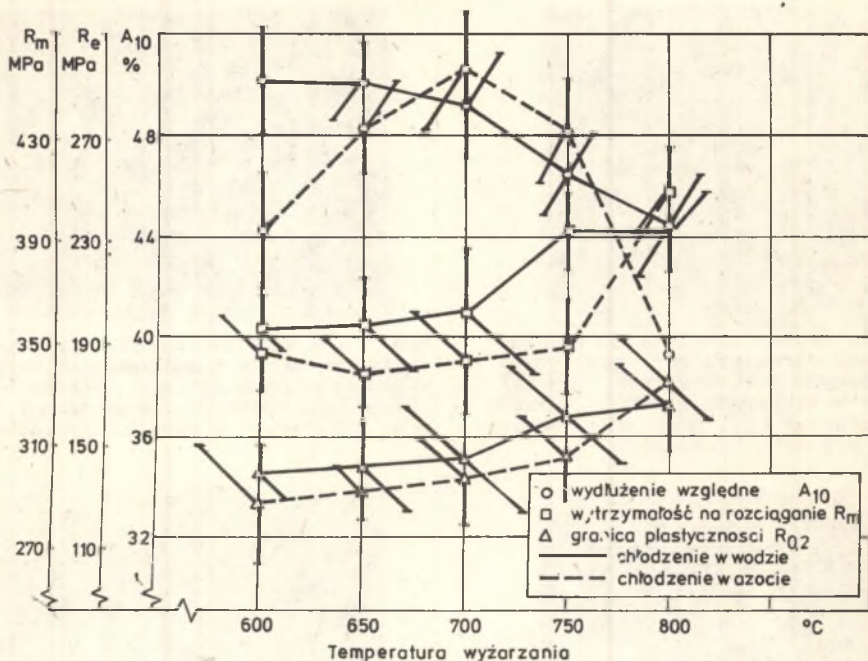
Rys. 7. Drobnoziarnista zrekrystalizowana struktura rur miedziowych walcowanych i wyżarzanych indukcyjnie w temperaturze 800°C. Prędkość przesuwu 0,5 m/s; chłodzenie w wodzie. Pow. 400x



Rys. 8. Zrekrystalizowana struktura roztworu stałego α z wydzieleniami fazy β' . Rury miedziowe ciągnięte i wyżarzane indukcyjnie w temperaturze 800°C. Prędkość przesuwu 0,3 m/s; chłodzenie w wodzie. Pow. 400x

11 według ASTM - rys. 4+8. Rozdrobnienie ziarn zwiększa się wraz ze wzrostem szybkości nagrzewania - rys. 4 i 5 oraz ze zwiększeniem intensywności chłodzenia - rys. 6 i 7. Podwyższenie temperatury wyżarzania z 600 do 800°C nie wpływa istotnie na zmianę wielkości ziarna - rys. 4 i 8, powoduje jednak wydzielenie fazy β' z roztworu stałego α - rys. 8. Proces wydzielenia roztworu wtórnego przyczynia się znacznie do hamowania rozrostu ziarn fazy α .

Własności wytrzymałościowe rur miedziowych ciągnionych i wyżarzanych indukcyjnie zwiększają się ze wzrostem temperatury wyżarzania oraz intensywności chłodzenia - rys. 9. Zwiększenie temperatury wyżarzania od 600°C do



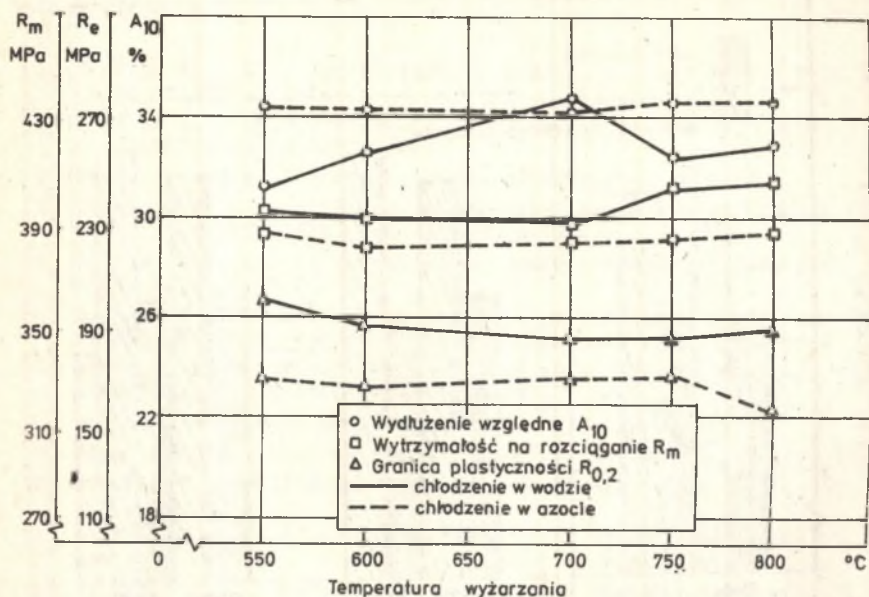
Rys. 9. Zależność własności mechanicznych od temperatury i ośrodka chłodzącego dla rur ciągnionych, wyżarzonych z szybkością przesuwu 0,5 m/s

800°C powoduje wzrost wytrzymałości na rozciąganie o około 40MPa oraz granicy plastyczności o około 20MPa. Wydłużenie względne w badanym zakresie temperatur zmniejsza się o około 6%.

W przypadku rur walcowanych temperatura wyżarzania nie wykazuje wyraźnego wpływu na własności mechaniczne - rys. 10. Wytrzymałość na rozciąganie R_m w zakresie temperatur 550 ÷ 800°C zmienia się od około 380 do około 410 MPa. Podobnie zmienia się $R_{0,2}$ (od 186 do 205 MPa) oraz A_{10} (od 31 do 35%). Zależność twardości od temperatury wyżarzania przedstawia się podobnie (od około 70 do 130 HV).

Rury ciągnięte i walcowane wyżarzane rekrytalizująco metodą indukcyjną a następnie chłodzone w azocie wykazują niższe własności wytrzymałościowe (R_m o około 10 ÷ 40 MPa) oraz wyższe wydłużenie względne w porównaniu z rurami chłodzonymi w wodzie - rys. 9 i 10.

Zwiększenie własności wytrzymałościowych i obniżenie własności plastycznych, ze wzrostem temperatury wyżarzania, związane jest nie tylko z rozdrobnieniem wielkości ziarna, ale też z pojawieniem się w strukturze msiądzu roztworu wtórnego β' . Z tego względu uważa się za niecelowe prowadzenie wyżarzania rekrytalizującego w temperaturach wyższych od 700°C.

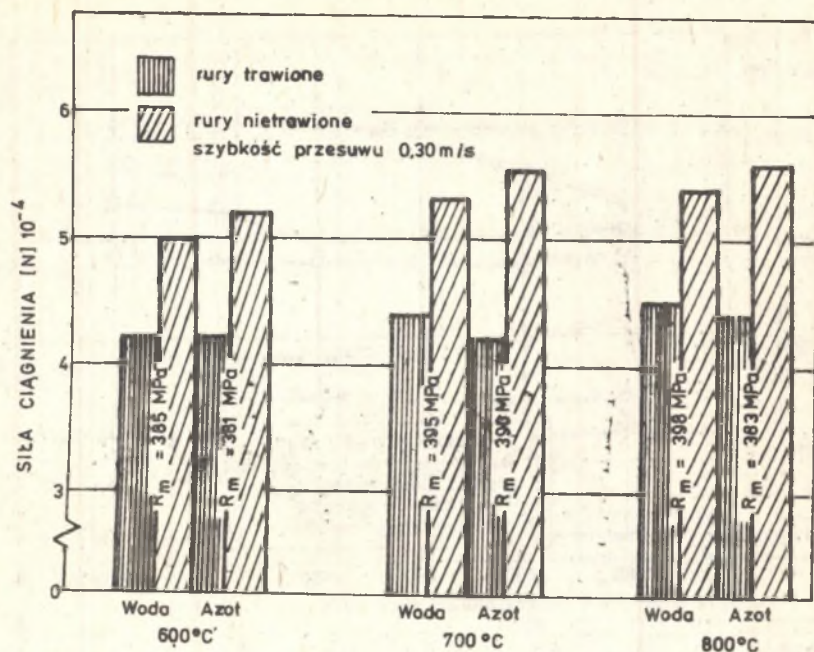


Rys. 10. Zależność własności mechanicznych od temperatury i ośrodka chłodzącego dla rur walcowanych wyżarzanych z szybkością przesuwu 0,5 m/s

Przydatność nagrzewania indukcyjnego do międzyoperacyjnego wyżarzania rekrytalizującego potwierdziły próby przeciągania rur, realizowane według schematu stosowanego w przemyśle. Przeprowadzone pomiary sił ciągnięcia wykazały, że zastosowane parametry wyżarzania rekrytalizującego metodą indukcyjną powodują wyraźne zmiany stanu powierzchni rur. Wartości sił ciągnięcia rur walcowanych zwiększają się wyraźnie ze wzrostem temperatury wyżarzania - rys. 11. Trawienie rur po wyżarzaniu w tych samych temperaturach powoduje istotne zmniejszenie wartości sił ciągnięcia. Nieznaczne zmniejszenie wartości tych sił powoduje również wzrost szybkości przesuwu. Natomiast zmniejszenie szybkości chłodzenia wpływa na zwiększenie sił ciągnięcia (rys. 11).

Ponieważ stwierdzone zmiany wartości sił ciągnięcia występowały przy porównywalnych własnościach wytrzymałościowych, można przypuszczać, że są one spowodowane różnym stanem utleniania powierzchni rur wyżarzanych indukcyjnie. Podwyższenie temperatury i zwiększenie czasu wyżarzania, a także zmniejszenie szybkości chłodzenia powoduje addytywny wzrost utleniania powierzchni, co oddziałuje na zmiany wartości sił ciągnięcia.

Zastosowane parametry wyżarzania indukcyjnego zapewniają dużą wydajność procesu (przy szybkości przesuwu rur 0,5 m/s do około 2100 kg/h). Wprowadzenie metody nagrzewania indukcyjnego do procesu międzyoperacyjnego wyżarzania rekrytalizującego rur miedzianych okazało się nie tylko możliwe, lecz również korzystne z uwagi na rozpatrywane kryteria oceny.



Rys. 11. Zależność siły ciągnięcia od temperatury wyżarzania i sposobu chłodzenia po wyżarzaniu rekrytalizującym metodą indukcyjną

4. Wnioski

1. Nagrzewanie indukcyjne zastosowane do wyżarzania rekrytalizującego rur z mosiądzu CuZn37 jest efektywną metodą obróbki cieplnej zapewniającą zrekrystalizowaną strukturę rur i wymagane własności mechaniczne określone normą PN-72/H-74586.
2. Proces rekrytalizacji badanych rur mosiężnych zachodzi podczas nagrzewania indukcyjnego w zakresie temperatur $550 \pm 750^\circ\text{C}$.
3. Istotny wpływ na przebieg procesu rekrytalizacji wywiera sposób chłodzenia rur po nagrzewaniu indukcyjnym.
4. Struktura rur walcowanych i ciągniętych wykazuje po rekrytalizacji przyspieszonej znaczne rozdrobnienie ziarn.
5. Zastosowane wyżarzanie rekrytalizujące metodą indukcyjną umożliwia znaczne ograniczenie ilości zabiegów technologicznych międzyoperacyjnego wyżarzania i trawienia.

LITERATURA

- [1] Cieślak Z. i in.: Sprawozdanie z pracy badawczej IMiS, Pol. Śląska, Gliwice 1977, nr 32.
- [2] Cieślak Z. i in.: Zgłoszenie patentowe, Pol. Śląska, Gliwice z dnia 09.02.1979, za nr NP1512/20.
- [3] Praca zbiorowa: Sprawozdanie IMN, Gliwice, nr 1860/74.
- [4] Iwanow W.I. i in.: Wozwrat i rekrytalizacija w mietałkach pri bystrom nagriewie, Izd. Nauka, Moskwa 1964.
- [5] Bodiako M.N. i in.: Termokinetika rekrytalizacji, Izd. Nauka i Technika, Kijów 1968.
- [6] Bodiako M.N. i in.: Promyszlienneje primienienie tokow wysokoj czastoty. WNIITWCz, Maszgiz, Kijów 1968.
- [7] Zimin N.W.: Promyszlienneje primienienie tokow wysokoj czastoty, WNIITWCz, Izd. Maszinostrojenie 1965.
- [8] Bielanik J. i in.: Mechanik, Nr 10, 1972, s. 554.
- [9] Błanter M.S. i in.: Cwietnyje Mietałki, 44, nr 3, 1971, s. 74.
- [10] Zimin N.W. i in.: Fizika Mietałłow i Mietałłowiedienije, 20, nr 2, 1965, s. 265.
- [11] Cieślak Z. i in.: Zeszyty Naukowe, Pol. Śląska, Mechanika 29, Gliwice 1967.
- [12] Izbranow P.D. i in.: Fizika Mietałłow i Mietałłowiedienije, 7, nr 6, 1959, s. 915.
- [13] Gridniew W.I. i in.: Fiziczeskije Osnowy Elektretermiczeskowo Uprocznienia Stali, Kijów 1973.
- [14] Bodiako M.N. i in.: Mietałłow. i Termiczeskaja Obrabotka Mietałłow, nr 1, 1960, s. 49.
- [15] Blicharski M., Gorczyca S.: Hutnik, nr 12. 1971, s. 659.

ПРИМЕНЕНИЕ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА

К РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИОННОМУ ОТЖИГУ ЛАТУННЫХ ТРУБ

Резюме

Исследовано влияние параметров рекристаллизационного отжига индукционным методом на структуру и механические свойства труб из латуни CuZn37. Установлено, что применение непосредственного индукционного нагрева позволяет получить мелкозернистую структуру сплава, обеспечивающую требуемые механические свойства. Положительные прочностные и пластические свойства, а также значительное сокращение времени нагрева и возможность автоматизации процесса указывают на приоритет применения этого метода в непрерывном технологическом процессе изготовления труб.

THE UTILIZATION OF INDUCTIVE HEATING IN BRASS PIPES
RECRYSTALLIZING ANNEALING

S u m m a r y

The influence of inductive method recrystallizing annealing parameters on the structure and mechanical conditions of CuZn37 brass pipes has been investigated. It has been stated that utilizing of the direct inductive heating allows for obtaining the fine-grained alloy structure, which ensures the requires mechanical properties. The utilization of this method in the constant process of pipes production is promoted by the good strength and plastic properties, considerable shortening of heating time and the perspective of automatization.