



Wpływ procesu KOBO na właściwości stopu CuCr1Zr

Influence of KOBO process on the properties of CuCr1Zr alloy

(1) Justyna Rozwalka*, (2) Grzegorz Płaczek, (3) Daniel Andrzejewski
Instytut Obróbki Plastycznej, Poznań, ul. Jana Pawła II nr 14, 61-139 Poznań, Poland

Informacje o artykule

Data przyjęcia: 28.03.2017
Data recenzji: 28.05.2017
Data akceptacji: 30.06.2017

Wkład autorów

- (1) Opracowanie koncepcji badawczej, przeprowadzenie pomiarów, opracowanie wyników badań, opracowanie wniosków
- (2) Przeprowadzenie badań, opracowanie wyników badań, opracowanie wniosków
- (3) Przeprowadzenie badań, opracowanie wyników badań, opracowanie wniosków

Streszczenie

Autorzy pracy podjęli badania nad stopem CuCr1Zr w celu polepszenia jego właściwości mechanicznych oraz określenia ich stabilności w podwyższonej temperaturze. W badaniach wykorzystano niekonwencjonalną metodę obróbki plastycznej – wyciskanie metodą KOBO. Idea metody KOBO oparta jest na zewnętrznym wymuszeniu zlokalizowanego plastycznego płynięcia w pasmach ścinania poprzez nałożenie na jednokierunkowe, robocze oddziaływanie siłowe narzędzi kształtujących, dodatkowego, cyklicznie zmiennego oddziaływania w kierunku odmiennym od kierunku ruchu roboczego danego procesu. Wyciskaniu podano pręt w stanie T6 (bez powodzenia), a następnie pręt po przesycaaniu z temperatury 900 i 1030°C (próba zakończona sukcesem). Wyciskanie metodą KOBO przeprowadzono dla prętów po przesycaaniu, z dwoma wariantami chłodzenia (do powietrza i do wody). Podczas procesu wyciskania KOBO nastąpiła redukcja przekroju prętów z $\phi 40$ mm do ϕ ok. 12 mm, co dało stopień przerobu ok. 11,1, przy odkształceniu rzeczywistym ok. 2,4. Pręty, wyjściowy i wyciśnięte metodą KOBO, poddano badaniom twardości, statycznej próbie ściskania w temperaturze otoczenia oraz statycznej próbie rozciągania w temperaturze otoczenia i temperaturze podwyższonej do 450°C. Na podstawie uzyskanych wyników badań można stwierdzić, że zastosowanie metody odkształceń plastycznych (wyciskanie KOBO) pozwala umocnić materiał do tego stopnia, że wartości jego właściwości wytrzymałościowych przewyższają wartości uzyskane po obróbce cieplnej (stan T6). Natomiast w temperaturze 450°C dochodzi do spadku właściwości wytrzymałościowych o wartość od 25 do 40%.

Słowa kluczowe: stop CuCr1Zr, wyciskanie KOBO, właściwości mechaniczne

Article info

Received: 28.03.2017
Reviewed: 23.05.2017
Accepted: 30.06.2017

Authors' contribution

- (1) Concept, measurements, research results, conclusions
- (2) Testing, research results, conclusions
- (3) Testing, research results, conclusions

Abstract

The authors of this article conducted tests on CuCr1Zr alloy for the purpose of improving its mechanical properties and determining their stability at elevated temperatures. An unconventional plastic working method was utilized – KOBO extrusion. The idea of the KOBO method is based on external forcing of localized plastic flow in shear bands through the superposition onto the unidirectional operational force action of forming tools of an additional, cyclically variable action in a direction different from the direction of the given process's operating direction. A rod in T6 state was extruded (unsuccessfully), followed by a extrusion of rod after hyperquenching from temperatures of 900 and 1030°C (test successful). KOBO extrusion was performed for hyperquenched rods with two cooling variants (in air and in water). During the KOBO extrusion process, the cross-section of rods was reduced from $\phi 40$ mm to approx. $\phi 12$ mm, which yielded a reduction ratio of approx. 11.1 for an actual deformation of approx. 2.4. Rods, in original state and after KOBO extrusion, were subjected to hardness tests, static compression testing at room temperature and elevated temperature up to 450°C. Based on the obtained test results, it can be stated that the application of the method of plastic deformation (KOBO extrusion) makes it possible to harden the extent that the values of its strength properties exceed the values obtained after heat treatment (T6 state). However, at 450°C, strength properties decrease by 25 to 40%.

Keywords: alloy CuCr1Zr, KOBO extrusion, mechanical properties

* Autor do korespondencji. Tel.: +48 61 657 05 55; fax: +48 61 657 07 21; e-mail: justyna.rozwalka@inop.poznan.pl

* Corresponding author. Tel.: +48 61 657 05 55; fax: +48 61 657 07 21; e-mail: justyna.rozwalka@inop.poznan.pl

1. WSTĘP

O pożądanych właściwościach wyrobów w dużej mierze decydują warunki ich eksploatacji. Miedź i jej stopy znajdują szerokie zastosowanie w wyrobach, od których wymagane są m.in. wysokie właściwości elektryczne i cieplne, np. elektrody do zgrzewania punktowego, wymienniki ciepła, narzędzia do odlewania pod ciśnieniem itp. Chcąc zwiększyć zakres ich zastosowania, dąży się do zwiększenia stosunku wytrzymałości wyrobów do masy. Jak podają autorzy pracy [1], cel projektowanie nowych materiałów lub przez kontrolowanie mikrostruktury w procesach obróbki cieplno-mechanicznej na etapie przeróbki plastycznej i obróbki cieplnej po przeróbce plastycznej.

Autorzy pracy [2] wskazują, że największe perspektywy uzyskania materiałów o optymalnym zespole własności użytkowych takich, jak wysoka twardość i przewodność elektryczna, należy upatrywać w trójskładnikowych stopach miedzi, w których maksymalne umocnienie wydzieleniowe uzyskuje się przy określonym wymiarze wydzielonych cząstek. Stopy te powinny cechować się brakiem rozpuszczalności składników stopowych w temperaturze otoczenia oraz szerokim zakresem rozpuszczalności w stanie stałym w podwyższonej temperaturze (400–500°C). Przy wyborze stopu istotna jest nie tylko skuteczność umocnienia stopu przez fazę dyspersyjną, ale również i termiczna trwałość wydzielonych faz. Stopy z układu Cu-Cr wykazują bardzo dobre przewodnictwo elektryczne i wyraźnie wyższe, w porównaniu z czystą miedzią, właściwości wytrzymałościowe. Jednak ze względu na rodzaj wydzielonej fazy (koherentne wydzielienia chromu) i tendencję do koagulacji tych wydzieleni podczas eksploatacji w wysokich temperaturach badacze skierowali uwagę na stopy z układu CuCr1Zr.

Rozpuszczalność cyrkonu w miedzi jest przy niskich temperaturach, podobnie jak i chromu, bardzo mała. W stopach Cu-Cr dodatek cyrkonu zmienia morfologię wydzieleni chromu w miedzi oraz stabilizuje je (zmniejsza tendencję do koagulacji w wysokich temperaturach) i tym samym podwyższa żywotność materiału w warunkach eksploatacyjnych.

1. INTRODUCTION

The conditions under which products are operated determined the properties desired of them. Copper and its alloys find broad applications in products in which high electrical and thermal properties are required, e.g. point welding electrodes, heat exchangers, pressure casting tools, etc. Attempts are made to increase the ratio of products' strength to weight in order to increase the range of their applications. As the authors of work [1] show, this goal is usually achieved in two ways: by designing new materials or by controlling the microstructure in thermomechanical treatment processes at the plastic working stage and during heat treatment after plastic working.

The authors of article [2] indicate that the best perspectives for obtaining materials with an optimal set of functional properties, such as high hardness and electrical conductivity, should be sought in three-component copper alloys, in which maximum precipitation hardening is achieved at a specific dimension of precipitated particles. These alloys should be characterized by a lack of solubility of alloying components at room temperature and a wide solubility range in solid state at elevated temperature (400–500°C). When selecting an alloy, not just the effectiveness of alloy hardening by the dispersive phase is significant, but also the thermal stability of precipitated phases. Cu-Cr alloys exhibit very good electrical conductivity and strength properties that are considerably higher than pure copper. However, due to the type of precipitated phase (coherent chromium precipitations) and these precipitates' tendency to coagulate during operation at high temperatures, the researchers directed attention to CuCr1Zr alloys.

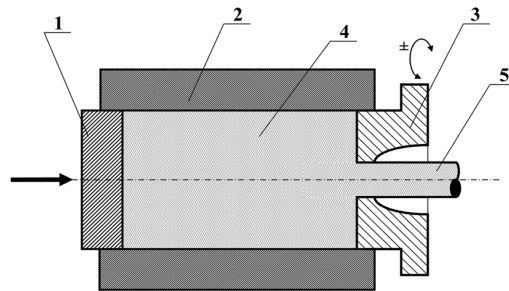
Zirconium's solubility in copper is very low at low temperatures, similarly to chromium. In Cu-Cr alloys, the addition of zirconium changes the morphology of chromium precipitates in copper and stabilizes them (reduces the tendency to coagulate at high temperatures), thus improving the material's lifetime under operating conditions.

Autorzy pracy postanowili zbadać właściwości mechaniczne stopu CuCr1Zr po procesie przeróbki plastycznej poprzez wyciskanie metodą KOBO i określić ich stabilność w podwyższonej temperaturze.

Współbieżne wyciskanie metodą KOBO (rys. 1) wykorzystuje w trakcie przebiegu całego procesu zjawisko permanentnej zmiany drogi odkształcenia, realizowane poprzez cykliczne, obustronne, plastyczne skręcanie metalu, co wprowadza go w stan charakterystyczny dla stanu cieczy pomimo zachowywania stanu stałego. W takich warunkach plastyczne płynięcie metalu przez oczko matrycy pod wpływem siły wyciskania (nacisku stempla) jest nadzwyczaj łatwe i nie wymaga żadnych specjalnych uwarunkowań odnośnie procesu, poza skorelowaniem częstości skręcania z prędkością wyciskania. W procesie KOBO ma miejsce silna ingerencja w mikro- i nanostrukturę metalu. W efekcie procesu drastycznie wzrasta koncentracja defektów sieci krystalicznej, w tym przede wszystkim defektów punktowych (defektów Frenkla) [3]. Jest to metoda dużych odkształceń plastycznych SPD (*Severe Plastic Deformation*) i stosowana do obróbki zarówno czystej miedzi, jak i jej eutektycznych stopów Cu-P i Cu-Ag [4, 5].

The authors of this article decided to investigate the mechanical properties of CuCr1Zr alloy after plastic working by KOBO extrusion and to determine the stability of this alloy at elevated temperature.

*KOBO co-extrusion (Fig. 1) utilizes the phenomenon of permanent change of deformation path occurring over the course of the process, which is effected by cyclic, two-way, plastic torsion of the metal, bringing it to a state characteristic of a liquid state despite the preservation of solid state. Under such conditions, plastic flow of metal through the opening of the die under the action of extrusion force (punch pressure) is extremely easy and does not require special process conditions besides the synchronization of torsion frequency with extrusion speed. Strong interference in the micro- and nano-structure of the metal takes place in the KOBO process. As an effect of the process, the concentration of defects in the crystalline lattice drastically increases, including point defects (Frenkl defects) above all [3]. This is an SPD (*Severe Plastic Deformation*) method that is applied to process pure copper as well as its eutectic alloys Cu-P and Cu-Ag [4, 5].*



Rys. 1. Schemat współbieżnego wyciskania metodą KOBO; 1 – stempel, 2 – pojemnik, 3 – cyklicznie obracana matryca z rowkami na powierzchni czołowej, 4 – wyciskany metal/wsad, 5 – wyrób [3]

Fig. 1. Diagram of direct extrusion by KOBO method; 1 – punch, 2 – container, 3 – periodically rotated die with grooves on face, 4 – extruded metal/charge, 5 – product

2. MATERIAŁ I METODYKA BADAŃ

W celu nadania stopowi CW106C (CuCr1Zr) dużej deformacji plastycznej podjęto próbę wyciśnięcia tego materiału metodą KOBO na Wydziale Metali Nieżelaznych Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Dostarczony materiał

2. RESEARCH MATERIAL AND METHODOLOGY

In order to endow CW106C (CuCr1Zr) alloy with high plastic deformation, an attempt was made to extrude this material using the KOBO method at the Faculty of Non-Ferrous Metals of AGH University of Science and Technology in Kra-

w stanie T6 okazał się zbyt twardy i nie udało się go przerobić plastycznie. W celu obniżenia twardości przeprowadzono przesykanie (parametry przedstawiono w tab. 1). Materiał przesycony udało się wycisnąć.

Parametry procesu KOBO zestawiono w tab. 2. Pręty na wyjściu z prasy chłodzono w powietrzu lub w wodzie. Podczas procesu wyciskania KOBO nastąpiła redukcja przekroju prętów z $\phi 40$ mm do ϕ ok. 12 mm, co dało stopień przerobu ok. 11,1, przy odkształceniu rzeczywistym ok. 2,4.

The material, delivered in T6 state, proved to be too hard, and the attempt of plastic working failed. Hyperquenching was performed to reduce hardness (parameters presented in Tab. 1). The hyperquenched material was extruded successfully.

The parameters of the KOBO process are given in Tab. 2. Rods were cooled in air or in water upon exiting the press. During the KOBO extrusion process, the cross-section of rods was reduced from $\phi 40$ mm to approx. $\phi 12$ mm, which yielded a reduction ratio of approx. 11.1 for an actual deformation of approx. 2.4.

Tab. 1. Parametry przesykania prętów ze stopu CW106C

Tab. 1. Hyperquenching parameters of CW106C alloy rods

Nr wariantu <i>Variant no.</i>	Temperatura, °C <i>Temperature, °C</i>	Czas, h <i>Time, h</i>	Ośrodek chłodzący <i>Cooling medium</i>
I	900	1	woda / water
II	1030		

Tab. 2. Parametry wyciskania prętów metodą KOBO

Tab. 2. KOBO extrusion parameters of rods

Parametr / <i>Parameter</i>	Wartość / <i>Value</i>	Jednostka / <i>Unit</i>
Prędkość wyciskania / <i>Extrusion rate</i>	0,2	mm/s
Siła wyciskania / <i>Extrusion force</i>	950–1000	kN
Kąt oscylacji matrycy / <i>Die oscillation angle</i>	+/- 8	stopnie / <i>degrees</i>
Częstotliwość obrotu matrycy / <i>Die rotation frequency</i>	5	Hz
Temperatura początkowa / <i>Initial temperature</i>	21	°C

Materiał badawczy ze stopu CW106C podzielono na 7 stanów, które zestawiono w tab. 3.

The tested material, CW106C alloy, was divided into 7 states, listed in Tab. 3.

Tab. 3. Warianty przygotowania materiału badawczego ze stopu CW106C

Tab. 3. Variants of preparing the tested material, CW106C alloy

Wariant przygotowania materiału <i>Variant of material preparation</i>	Opis / <i>Description</i>
I	Pręt w stanie dostawy (T6) <i>Rod in as-delivered state (T6)</i>
II	Wstępniak przesycony z temperatury 900°C w wodzie <i>Preform hyperquenched from 900°C in water</i>
III	Wstępniak przesycony z temperatury 1030°C w wodzie <i>Preform hyperquenched from 1030°C in water</i>
IV	Pręt uzyskany ze wstępniaka przesyconego z temperatury 900°C poprzez wyciskanie metodą KOBO z chłodzeniem w wodzie <i>Rod obtained from preform hyperquenched from 900°C by KOBO extrusion with water cooling</i>

Wariant przygotowania materiału <i>Variant of material preparation</i>	Opis / Description
V	Pręt uzyskany ze wstępniaka przesyconego z temperatury 900°C poprzez wyciskanie metodą KOBO z chłodzeniem w powietrzu <i>Rod obtained from preform hyperquenched from 900°C by KOBO extrusion with air cooling</i>
VI	Pręt uzyskany ze wstępniaka przesyconego z temperatury 1030°C poprzez wyciskanie metodą KOBO z chłodzeniem w wodzie <i>Rod obtained from preform hyperquenched from 1030°C by KOBO extrusion with water cooling</i>
VII	Pręt uzyskany ze wstępniaka przesyconego z temperatury 1030°C poprzez wyciskanie metodą KOBO z chłodzeniem w powietrzu <i>Rod obtained from preform hyperquenched from 1030°C by KOBO extrusion with air cooling</i>

Na próbce w stanie dostawy określono skład chemiczny stopu, za pomocą mikroanalizatora rentgenowskiego WDS (JEOL). Natomiast dla wszystkich 7 wariantów przygotowania materiału określono twardość i właściwości mechaniczne w statycznej próbie ściskania. Na próbkach w stanie wyjściowym oraz po wyciskaniu metodą KOBO określano właściwości wytrzymałościowe i plastyczne w statycznej próbie rozciągania.

Pomiary twardości wykonano na zgładach metalograficznych pobranych poprzecznie do kierunku wyciskania prętów. Pomiary wykonano metodą Vickersa przy obciążeniu 2,492 N za pomocą twardościomierza Vickersa (FM-800, Future-Tech Corp.).

Statystyczną próbę ściskania przeprowadzono za pomocą maszyny wytrzymałościowej (Instron 4483) w temperaturze pokojowej z prędkością przemieszczenia trawersy 2 mm/min, przy użyciu siły obciążającej do około 145 kN. Próbki walcowe z płaskimi czołami pobrano w taki sposób, że kierunek ich ściskania był równoległy do kierunku wyciskania materiału. Stosunek wysokości początkowej (h_0) do średnicy początkowej (d_0) wynosił ok. 1,12.

Statyczną próbę rozciągania przeprowadzono w temperaturze pokojowej oraz w temperaturze 450°C. Ze względu na małą ilość materiału badawczego pobrano nieznormalizowane próbki o długości całkowitej 15 mm i długości części równoległej 6 mm. Próbki rozciągano za pomocą stolika tensometrycznego (Mikrotest 5000HT, Gattan) z prędkością przemieszczenia trawersy 0,5 mm/min. Próbki do badań przygotowano za pomocą elektrodrażarki drutowej w taki sposób,

The alloy's chemical composition was determined in a sample in as-delivered state by means of a WDS X-Ray microanalyzer (JEOL). Hardness and mechanical properties, in a static compression test, were determined for all 7 variants of material preparation. Strength and plastic properties were determined for samples in initial state and after KOBO extrusion by means of a static tensile test.

Hardness measurements were conducted on metallographic specimens collected transversely to the direction of rod extrusion. Measurements were conducted using the Vickers method under a load of 2.492 N by means of a Vickers hardness tester (FM-800, Future-Tech Corp.).

The statistical compression test was performed by means of a strength tester (Instron 4483) at room temperature at a cross-bar speed of 2 mm/min, using loading force up to approx. 145 kN. Cylindrical samples with flat faces were collected in such a manner that the direction of their compression was parallel to the direction of material extrusion. The ratio of initial height (h_0) to initial diameter (d_0) was approx. 1.12.

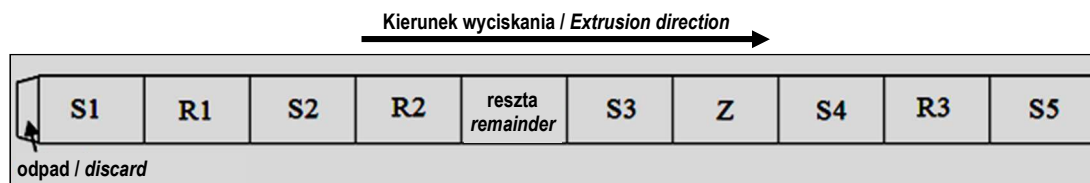
The static tensile test was performed at room temperature and at 450°C. Due to the small amount of test material, non-standard samples with a total length of 15 mm and a length of the parallel part equal to 6 mm were collected. Samples were subjected to tensile load on an extensometric table (Mikrotest 5000HT, Gattan) at a cross-bar speed of 0.5 mm/min. Test samples were prepared by means of wire electrical discharge machining in such a manner that the direction of their tension was parallel to the direction of mate-

że kierunek rozciągania próbek był równoległy do kierunku wyciskania materiału. Ponieważ nie dysponowano odpowiednim ekstensometrem, aby mierzyć wydłużenie rzeczywiste, wyniki próby rejestrowano w układzie naprężenie–przeszyczenie, natomiast wydłużenie próbek określono za pomocą znaczników naniesionych na próbki.

Na rys. 2 przedstawiono schemat pobrania próbek do badań z prętów wyciśniętych metodą KOBO.

rial extrusion. Because the appropriate extensometer was not available, test results were registered in a stress–displacement chart and sample elongation was determined by means of markers placed on samples in order to measure actual elongation.

Fig. 2 presents the scheme of collection of tests samples from rods extruded by the KOBO method.

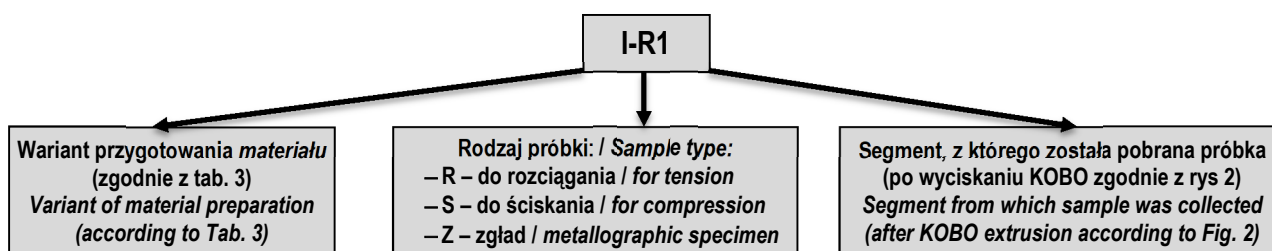


Rys. 2. Schemat podziału pręta wyciśniętego metodą KOBO na segmenty, z których pobrano próbki do badań

Fig. 2. Scheme of division of rod extruded by the KOBO method into segments from which test samples were collected

W celu weryfikacji jednorodności uzyskanych właściwości na długości prętów po procesie KOBO podzielono je na segmenty, które oznaczono literą i cyfrą (rys. 3). Litera oznaczała rodzaj zaplanowanego badania (S – ściskanie; R – rozciąganie; Z (zgląd) – pomiary twardości), natomiast cyfra rozróżnienie miejsca pobrania próbek. Wzrastająca wartość cyfr wskazuje kierunek wyciskania.

In order to verify the uniformity of obtained properties throughout the length of rods after the KOBO process, they were divided into segments designated by letter and numeral (Fig. 3). The letter denotes the type of planned test (S – compression; R – tension; Z (metallographic specimen) – hardness measurements), and the numeral differentiates between sample collection points. A growing value of numerals indicates progression along the direction of extrusion.



Rys. 3. Schemat oznaczania próbek pobranych z prętów wyciśniętych metodą KOBO

Fig. 3. Scheme of designating samples collected from rods extruded by the KOBO method

3. WYNIKI BADAŃ I DYSKUSJA

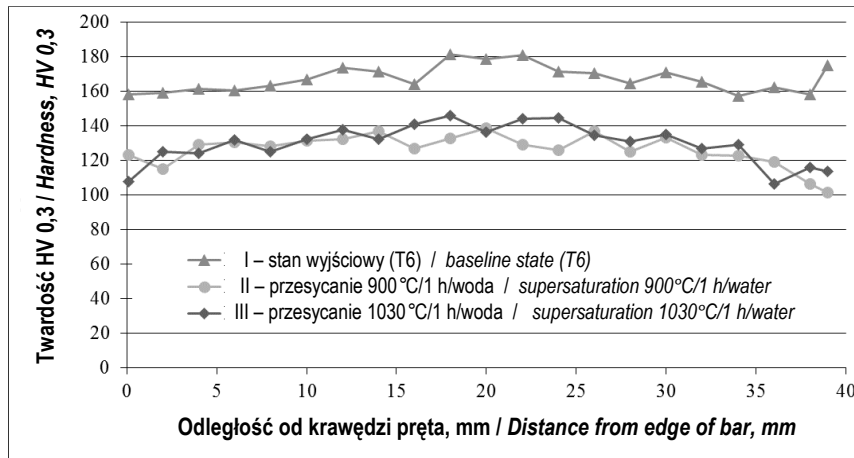
Stop CW106C oprócz miedzi może zawierać od 0,5 do 1,2% Cr oraz od 0,03 do 0,30% Zr. Na podstawie badania za pomocą mikroanalizatora rentgenowskiego ustalono, że badany stop zawiera 0,81% Cr i 0,12% Zr.

3. RESULTS AND DISCUSSION

CW106C alloy, besides copper, may also contain from 0.5 to 1.2% Cr and from 0.03 to 0.30% Zr. Based on X-Ray microanalyzer analysis, it was determined that the tested alloy contains 0.81% Cr and 0.12% Zr.

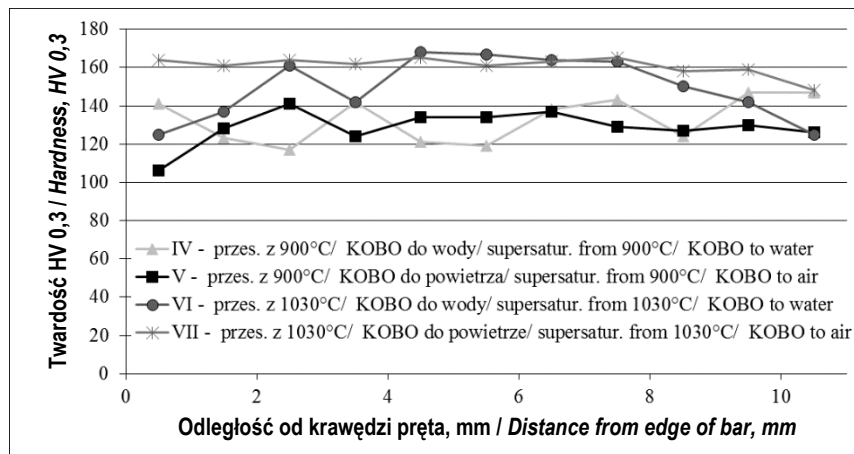
Wyniki pomiarów twardości zestawiono na rys. 4 i 5.

The results of hardness measurements are shown in Fig. 4 and 5.



Rys. 4. Rozkład twardości na przekroju poprzecznym pręta ze stopu CW106C w stanie T6 oraz we wstępniakach do procesu wyciskania KOBO

Fig. 4. Hardness distribution on cross-section of CW106C alloy rod in T6 state and in preforms for the KOBO extrusion process



Rys. 5. Rozkład twardości na przekroju poprzecznym prętów ze stopu CW106C po procesie wyciskania metodą KOBO

Fig. 5. Hardness distribution on cross-section of CW106C alloy rod after KOBO extrusion process

Przesycanie stopu CW106C spowodowało obniżenie jego twardości w stosunku do stanu wyjściowego (po wyciskaniu). W stanie wyjściowym stop CW106C charakteryzował się średnią wartością twardości ok. 167 HV 0,3. Natomiast po obu zabiegach przesycania, niezależnie od zastosowanej temperatury wytrzymywania (900, 1030°C), charakteryzował się średnią wartością twardości ok. 130 HV 0,3. Dalszy zabieg polegający na wyciskaniu stopu metodą KOBO materiału przesycanego z temperatury 900°C nie spowodował zmian w twardości materiału. Natomiast

Hyperquenching of CW106C alloy reduced its hardness relative to its initial state (after extrusion). In its initial state, CW106C alloy was characterized by an average hardness value of approx. 167 HV 0.3. After both hyperquenching treatments, regardless of the applied holding temperature (900, 1030°C), the material was characterized by an average hardness value of approx. 130 HV 0.3. Further processing involving KOBO extrusion of material hyperquenched from 900°C did not change the material's hardness. However, after KOBO extrusion of material hyperquenched

po procesie wyciskania KOBO materiału przesyconego z temperatury 1030°C nastąpił wzrost twardości do ok. 150 HV 0,3 przy wyciskaniu pręta do wody oraz do ok. 160 HV 0,3 przy wyciskaniu pręta do powietrza.

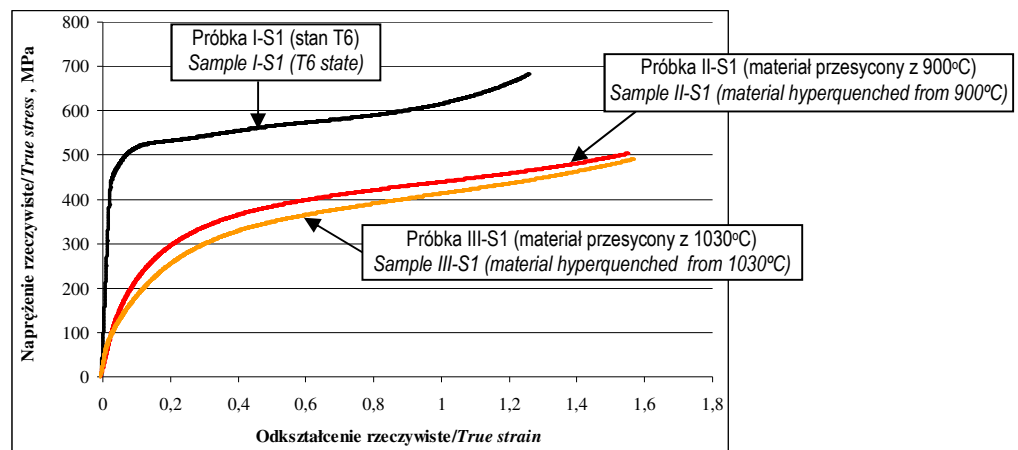
3.1. Statyczna próba ściskania

Wyniki statycznej próby ściskania próbek ze stopu CW106C przedstawiono na rys. 6–10 w formie krzywych zależności naprężenia rzeczywistego od odkształcenia rzeczywistego. Wszystkie próbki odkształcały się plastycznie, nie pękając.

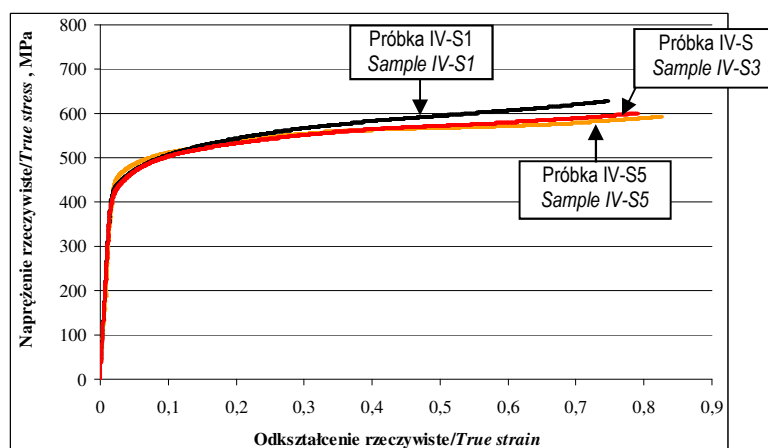
from 1030°C, hardness increased to approx. 150 HV 0.3 when the rod was extruded into water and to approx. 160 HV 0.3 when the rod was extruded into air.

3.1. Static compression test

The results of the static compression test of CW106C alloy samples are presented in Fig. 6–10 in the form of curves showing the dependency between actual stress and actual strain. All samples were plastically deformed, without cracking.

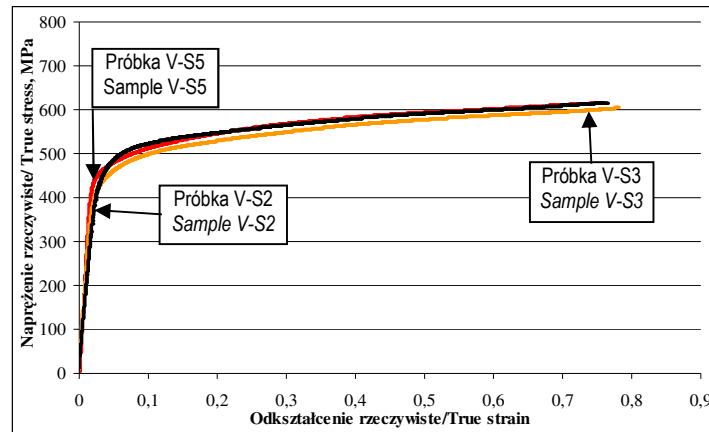


Rys. 6. Wybrane krzywe ściskania próbek ze stopu CW106C w stanie T6 (I-S1 oraz po przesycaaniu – II-S1; III-S1)
Fig. 6. Selected compression curves of CW106C alloy samples in T6 state (I-S1 and after hyperquenching – II-S1; III-S1)



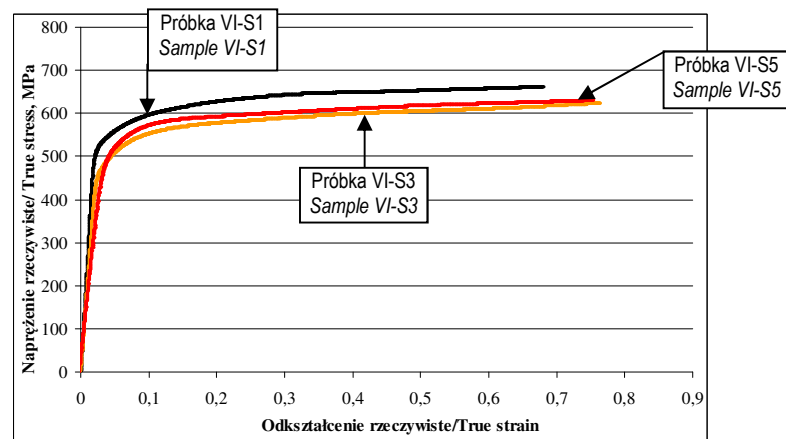
Rys. 7. Krzywe ściskania próbek ze stopu CW106C po procesie KOBO – wariant materiałowy IV (przesycaanie z 900°C/1 h/ woda, po procesie KOBO chodzenie w wodzie)

Fig. 7. Compression curves of CW106C alloy samples after the KOBO process – material variant IV (hyperquenching from 900°C/1 h/ water, water cooling after KOBO process)



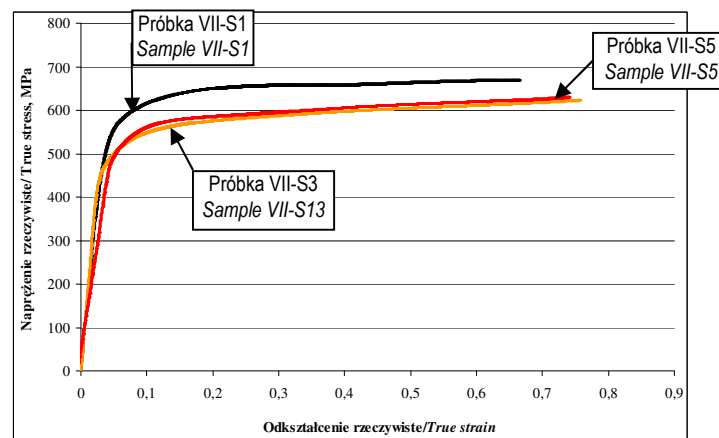
Rys. 8. Krzywe ściskania próbek ze stopu CW106C po procesie KOBO – wariant materiałowy V (przesykanie z 900°C/1 h/ woda, po procesie KOBO chodzenie w powietrzu)

Fig. 8. Compression curves of CW106C alloy samples after the KOBO process – material variant V (hyperquenching from 900°C/1 h/ water, air cooling after KOBO process)



Rys. 9. Krzywe ściskania próbek ze stopu CW106C po procesie KOBO – wariant materiałowy VI (przesykanie z 1030°C/1 h/ woda, po procesie KOBO chodzenie w wodzie)

Fig. 9. Compression curves of CW106C alloy samples after the KOBO process – material variant VI (hyperquenching from 1030°C/1 h/ water, water cooling after KOBO process)

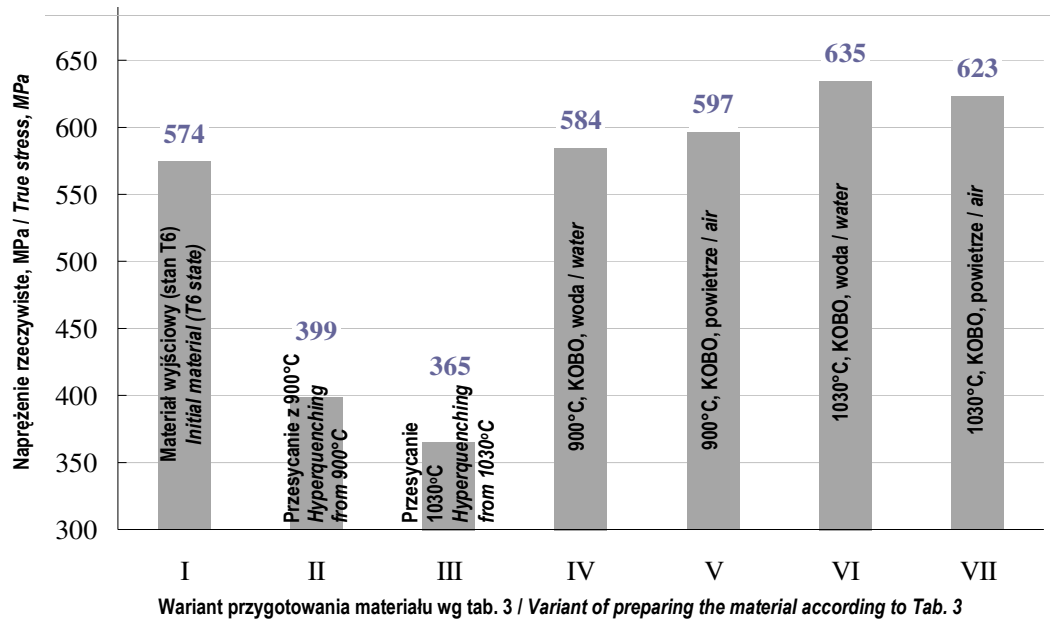


Rys. 10. Krzywe ściskania próbek ze stopu CW106C po procesie KOBO – wariant materiałowy VII (przesykanie z 1030°C/1 h/ woda, po procesie KOBO chodzenie w powietrzu)

Fig. 10. Compression curves of CW106C alloy samples after the KOBO process – material variant VII (hyperquenching from 1030°C/1 h/ water, air cooling after KOBO process)

W celach porównawczych na rys. 11 zestawiono wartości naprężenia rzeczywistego dla wszystkich badanych wariantów materiałowych przy tej samej wartości odkształcenia rzeczywistego $\epsilon=0,6$.

For the purposes of comparison, Fig. 11 shows real stress values for all tested material variants at the same value of actual strain $\epsilon=0.6$.



Rys. 11. Średnie naprężenia rzeczywiste wyznaczone dla wszystkich wariantów materiałowych w statycznej próbie ściskania przy tej samej wartości odkształcenia rzeczywistego $\epsilon=0,6$

Fig. 11. Average actual stresses determined for all material variants in the static compression test at the same value of actual strain $\epsilon=0.6$

Na podstawie wyników przedstawionych na rys. 6 można stwierdzić, że przesycanie materiału spowodowało obniżenie właściwości wytrzymałościowych. Naprężenie rzeczywiste potrzebne do uzyskania odkształcenia plastycznego materiału wyjściowego osiąga wartość ok. 450 MPa. Natomiast wartość naprężenia rzeczywistego potrzebna do odkształcenia plastycznego materiału po przesycaniu jest mniejsza, jednak ze względu na odmienny charakter przebiegu krzywej ściskania wyznaczenie go jest trudne.

Na podstawie wyników pokazanych na rys. 7 i 8 można stwierdzić, że proces wyciskania metodą KOBO spowodował zwiększenie właściwości wytrzymałościowych materiału wcześniej przesycanego z temperatury 900°C, a przebieg krzywej naprężenia rzeczywistego w funkcji odkształcenia rzeczywistego jest zbliżony do materiału w stanie T6. Ponadto nie stwierdzono istotnych różnic w przebiegu krzywych ściskania pomiędzy materiałem chłodzonym po wyciskaniu KOBO w wodzie (rys. 7) i w powietrzu (rys. 8).

Based on the results presented in Fig. 6, it can be stated that hyperquenching of the material caused a reduction of strength properties. The actual stress required to obtain plastic deformation of the initial material reaches a value of approx. 450 MPa. The actual stress value required for plastic deformation of the material after hyperquenching is lower, however it is difficult to determine due to the different nature of the compression curve's progression.

Based on the results shown in Fig. 7 and 8, it can be stated that the KOBO extrusion process caused an increase in the strength properties of material previously hyperquenched from 900°C, and the progression of the actual stress curve as a function of actual strain is similar to that of material in T6 state. Moreover, no significant differences were observed in the progression of compression curves between material cooled in water (Fig. 7) and in air (Fig. 8) after KOBO extrusion.

Krzywe umocnienia pokazane na rys. 9 i 10 pokazują zachowanie się stopu CW106C po przesycaaniu z temperatury 1030°C i wyciskaniu metodą KOBO odpowiednio do wody i do powietrza. Na ich podstawie można zauważyć, że materiał po procesie z takim wariantem obróbki cieplno-mechanicznej charakteryzuje się większymi właściwościami wytrzymałościowymi od materiału przesykanego z 900°C i procesie KOBO. Wartość naprężenia rzeczywistego potrzebna do odkształcenia materiału osiąga wartość ok. 480 MPa. Podobnie jak w przypadku materiału w stanie IV i V (przesykanie 900°C i proces KOBO) nie stwierdzono istotnych różnic w przebiegach krzywych umocnienia materiału chłodzonego w wodzie (rys. 9) i powietrzu (rys. 10). Należy podkreślić, że przebiegi krzywych materiału po przesycaaniu z temperatury 1030°C i wyciskaniu metodą KOBO są wyższe niż przebieg krzywej reprezentującej materiał w stanie T6.

Na podstawie rys. 11 można zauważyć, że przy takiej samej wartości odkształcenia rzeczywistego na poziomie $\epsilon=0,6$ najmniejszą średnią wartością naprężenia rzeczywistego charakteryzuje się materiał po przesycaaniu z temp. 1030°C (stan III) tj. 365 MPa oraz po przesycaaniu z temp. 900°C (stan II) tj. 399 MPa. Materiał w stanie T6 (stan I) oraz po przesycaaniu z 900°C i procesach KOBO (stan IV i V) osiągają podobne średnie wartości naprężenia rzeczywistego, osiągając odpowiednio 574 MPa – materiał w stanie T6, 584 MPa – materiał przesycony z temp. 900°C i poddany wyciskaniu KOBO z chłodzeniem w wodzie oraz 597 MPa materiał po przesycaaniu z temp. 900°C i wyciskaniu KOBO z chłodzeniem w powietrzu. Spośród badanych wariantów największe średnie wartości naprężeń rzeczywistych dla odkształcenia $\epsilon=0,6$ osiąga materiał przesycony z temp. 1030°C po procesie KOBO, zarówno po chłodzeniu w wodzie (635 MPa), jak i w powietrzu (623 MPa).

3.2. Statyczna próba rozciągania

Wyniki statycznej próby rozciągania materiału CW106C w stanie wyjściowym oraz po procesach KOBO przedstawiono w postaci krzywych zależności naprężenia od przemieszczenia na rys. 12–16 oraz w tab. 4, zestawiając wartości wytrzymałości na rozciąganie (R_m), dolnej granicy plas-

Hardening curves shown in Fig. 9 and 10 illustrate the behavior of CW106C alloy after hyperquenching from 1030°C and KOBO extrusion into air and into water accordingly. Based on these curves, it can be observed that the material after the process with this variant of thermomechanical treatment is characterized by greater strength properties than material hyperquenched from 900°C after the KOBO process. The actual stress value required to deform the material reaches a value of approx. 480 MPa. Similarly, as in the case of material in state IV and V (hyperquenching from 900°C and KOBO process), no significant differences were observed in the progressions of hardening curves between material cooled in water (Fig. 9) and in air (Fig. 10). It should be emphasized that the progressions of the curves of material after hyperquenching from 1030°C and KOBO extrusion reach a higher value than the progression of the curve representing material in T6 state.

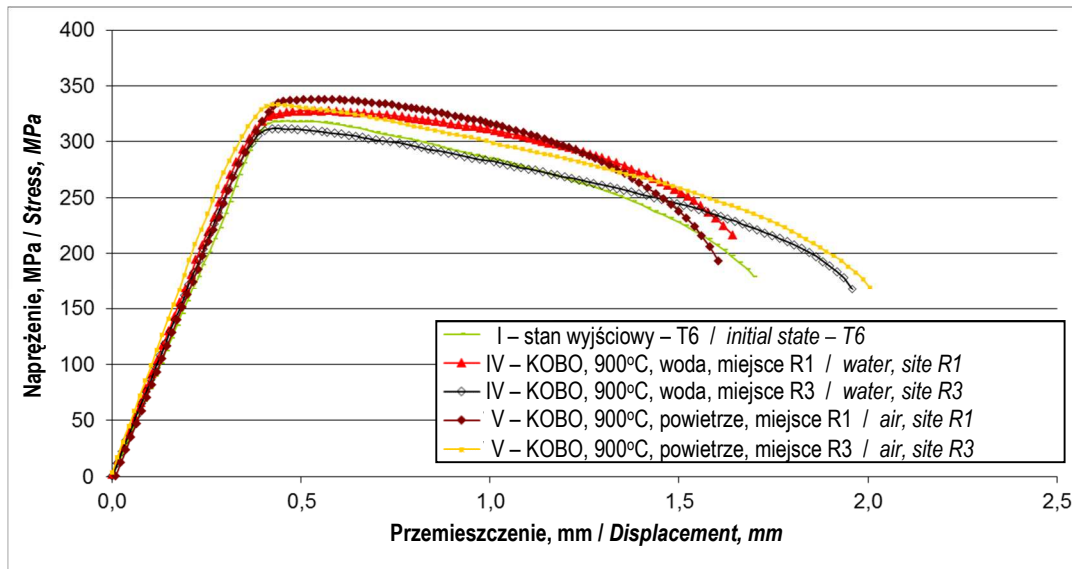
Based on Fig. 11, it can be observed that, at the same value of actual strain $\epsilon=0.6$, the lowest average value of actual stress is achieved by the material after hyperquenching from 1030°C (state III), i.e. 365 MPa, and by the material after hyperquenching from 900°C (state II), i.e. 399 MPa. Material in T6 state (state I) and material after hyperquenching from 900°C and KOBO processes (states IV and V) reach similar average real stress values, respectively, 574 MPa – material in T6 state, 584 MPa – material hyperquenched from 900°C and subjected to KOBO extrusion with water cooling and 597 MPa – material after hyperquenching from 900°C and KOBO extrusion with air cooling. Among the tested variants, the greatest values of real stress for strain $\epsilon=0.6$ were reached by material hyperquenched from 1030°C after the KOBO process, after both cooling in water (635 MPa) and in air (623 MPa).

3.2. Static tensile test

The results of the static tensile test of CW106C material in the initial state and after KOBO processes are presented in the form of stress-displacement curves in Fig. 12–16 and in Tab. 4, which lists values of tensile strength (R_m), lower yield point R_{eL} determined at room tempe-

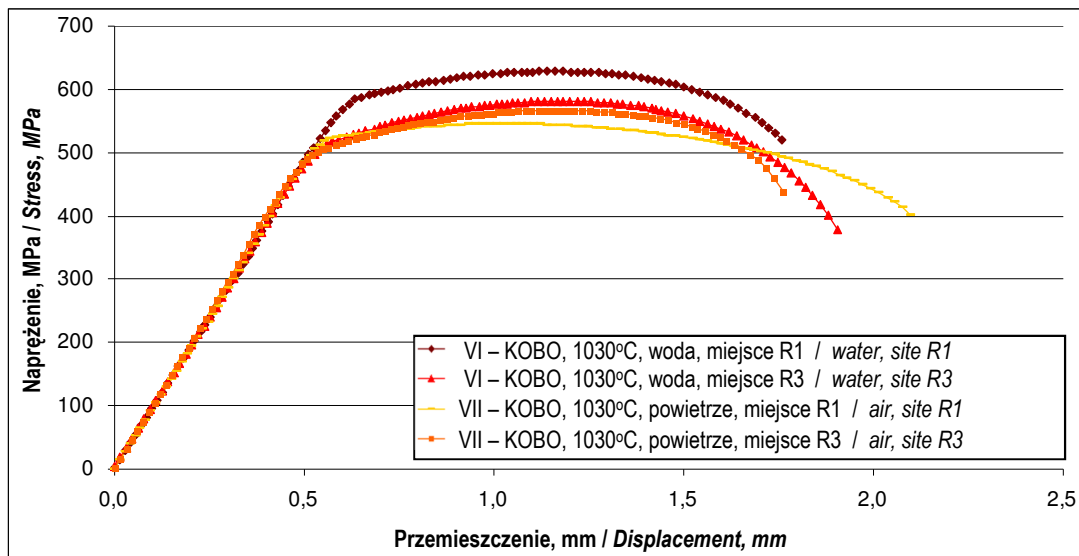
tyczności R_{eL} wyznaczonej w temperaturze otoczenia lub naprężenia uplastyczniającego σ_p wyznaczonego w temperaturze 450°C oraz wydłużenia A.

temperature or plasticizing stress σ_p , determined at 450°C, as well as elongation A.



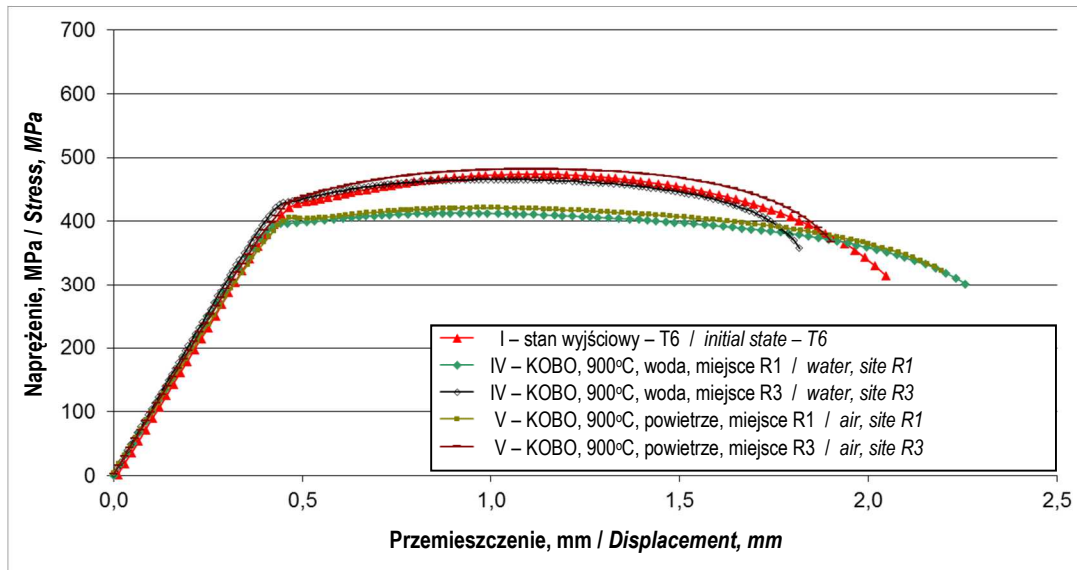
Rys. 12. Krzywe zależności naprężenia od przemieszczenia wyznaczone w statycznej próbie rozciągania przeprowadzonej w temperaturze pokojowej

Fig. 12. Stress–displacement curves determined in the static tensile test performed at room temperature



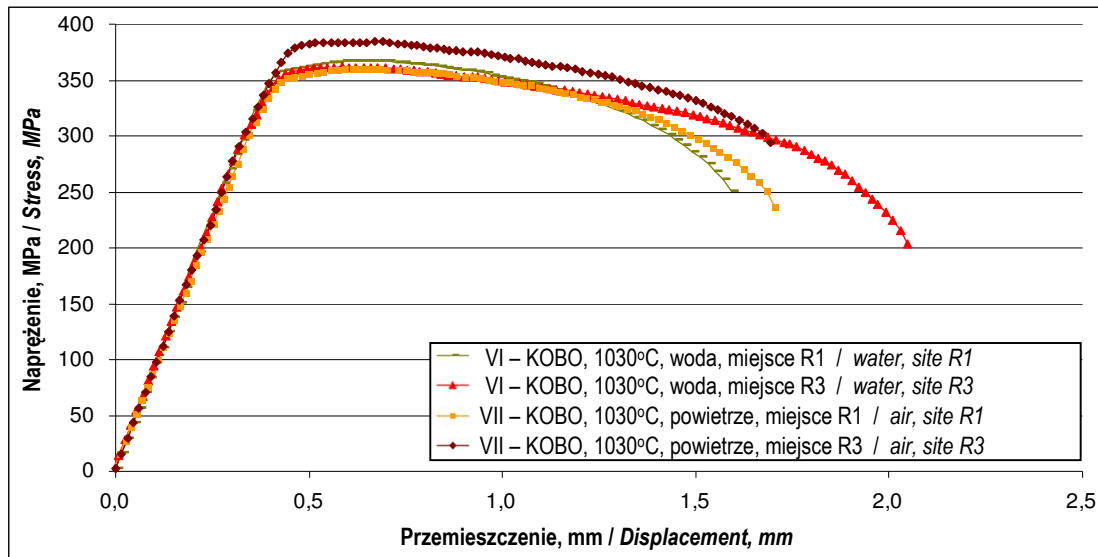
Rys. 13. Krzywe zależności naprężenia od przemieszczenia wyznaczone w statycznej próbie rozciągania przeprowadzonej w temperaturze pokojowej

Fig. 13. Stress–displacement curves determined in the static tensile test performed at room temperature



Rys. 14. Krzywe zależności naprężenia od przemieszczenia wyznaczone w statycznej próbie rozciągania przeprowadzonej w temp. 450°C

Fig. 14. Stress–displacement curves determined in the static tensile test performed at 450°C



Rys. 15. Krzywe zależności naprężenia od przemieszczenia wyznaczone w statycznej próbie rozciągania przeprowadzonej w temp. 450°C

Fig. 15. Stress–displacement curves determined in the static tensile test performed at 450°C

Tab. 4. Właściwości mechaniczne stopu CW106C wyznaczone w statycznej próbie rozciągania

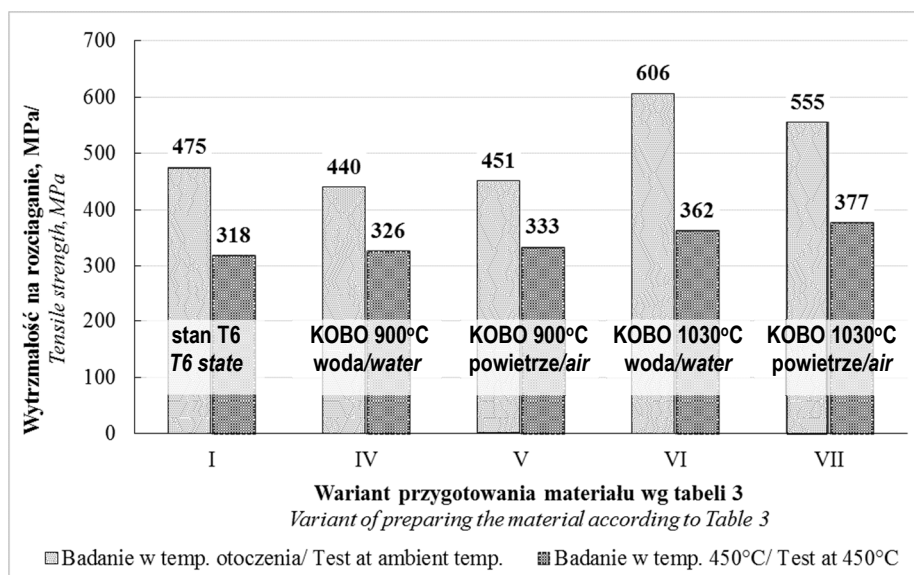
Tab. 4. Mechanical properties of CW106C alloy determined in the static tensile test

Wariant mat. – oznaczenie próbki Material variant – sample designation	Próba w temperaturze pokojowej Test at room temperature			Próba w 450°C Test at 450°C		
	R _m , MPa	R _{eL} , MPa	A, %	R _m , MPa	σ _p , MPa	A, %
I – stan / state T6	475	429	24,6	318	312	20,8
IV-pr. R1	413	397	26,5	312	308	24,3
IV-pr. R3	466	431	19,7	339	334	18,7
V-pr. R1	421	405	24,0	338	331	22,9
V-pr. R3	481	—	18,4	328	321	17,1

Wariant mat. – oznaczenie próbki <i>Material variant – sample designation</i>	Próba w temperaturze pokojowej <i>Test at room temperature</i>			Próba w 450°C <i>Test at 450°C</i>		
	R _m , MPa	R _{eL} , MPa	A, %	R _m , MPa	σ _p , MPa	A, %
VI-pr. R1	629	—	15,6	362	356	23,5
VI-pr. R3	582	—	24,2	361	350	19,6
VII-pr. R1	538	520	25,7	385	379	21,5
VII-pr. R3	571	—	16,9	368	359	16,2

Na rys. 16 przedstawiono zestawienie średnich wartości wytrzymałości na rozciąganie wszystkich badanych próbek ze stopu CW106C.

Fig. 16 shows average tensile strength values of all tested CW106C alloy samples.



Rys. 16. Zestawienie wartości wytrzymałości na rozciąganie próbek ze stopu CW106C

Fig. 16. Tensile strength values of CW106C alloy samples

W próbie rozciągania, prowadzonej zarówno w temperaturze pokojowej, jak i w temperaturze podwyższonej, zauważano nieznaczne różnice w wartości wytrzymałości na rozciąganie (maksymalnie 60 MPa) oraz w przebiegu krzywych rozciągania próbek pobranych z różnych segmentów tego samego pręta wyciskanego metodą KOBO.

Próbki w stanie T6 oraz po procesie wyciskania KOBO wstępniaków przesyconych z temperatury 900°C wykazywały zbliżone właściwości wytrzymałościowe podczas statycznej próby rozciągania, zarówno w temperaturze pokojowej (w granicach 413 do 481 MPa), jak i w 450°C (312–339 MPa). Wzrost właściwości wytrzymałościowych zaobserwowano natomiast w próbie rozciągania prowadzonej w temperaturze pokojowej prętów wyciskanych metodą KOBO ze wstęp-

Slight differences between tensile strength values (60 MPa maximum difference) and between the progressions of tensile curves of samples collected from different segments of the same KOBO-extruded rod were observed in the tensile test, performed at both room temperature and elevated temperature.

Samples in T6 state and samples after KOBO extrusion of preforms hyperquenched from 900°C exhibited similar strength properties in the static tensile test, at both room temperature (within the range from 413 to 481 MPa) and at 450°C (312–339 MPa). An increase of strength properties was observed in the tensile test performed at room temperature on rods extruded by the KOBO method from preforms hyperquenched from 1030°C. In this case, tensile strength for air cooling of the

niaków przesyconych z temperatury 1030°C. W tym przypadku wytrzymałość na rozciąganie przy chłodzeniu pręta w powietrzu wynosiła 538 i 571 MPa, natomiast przy chłodzeniu w wodzie 582 i 629 MPa.

4. WNIOSKI

W pracy rozpatrzono, czy można uzyskać zbliżone wartości właściwości wytrzymałościowych stopu CW106C (CuCr1Zr) po obróbce mechanicznej w stosunku do obróbki cieplnej (stan T6). Na podstawie uzyskanych wyników badań można stwierdzić, że:

- udało się wycisnąć stop CW106C metodą KOBO, a tym samym nadać mu dużą deformację plastyczną,
- metodą dużych odkształceń plastycznych (wyciskanie KOBO) można umocnić materiał przez umocnienie dyslokacyjne do tego stopnia, że wartości jego właściwości wytrzymałościowych przewyższają wartości uzyskane po obróbce cieplnej (stan T6),
- po wyciśnięciu metodą KOBO uzyskano stabilne właściwości mechaniczne na długości całej wypraski,
- przesykanie badanego stopu z temperatury 1030°C daje możliwość uzyskania większych wartości właściwości wytrzymałościowych w stosunku do przesykania z temperatury 900°C,
- w temperaturze 450°C dochodzi do spadku właściwości wytrzymałościowych o wartość od 25 do 40%.

PODZIĘKOWANIA

Praca była realizowana w ramach pracy statutowej Instytutu Obróbki Plastycznej BB .901.0041 „Badania technologii wytwarzania wyrobów metodami obróbki plastycznej oraz właściwości wyrobów i narzędzi do ich produkcji”.

rod amounted to 538 and 571 MPa, and for water cooling 582 and 629 MPa.

4. CONCLUSIONS

This article investigates whether similar values of strength properties of CW106C (CuCr1Zr) alloy can be obtained after mechanical treatment compared to heat treatment (T6 state). Based on the obtained tests results, it can be stated that:

- *CW106C alloy was successfully extruded by the KOBO method and thus endowed with severe plastic deformation,*
- *the severe plastic deformation method (KOB O extrusion) can be applied to harden material via dislocation hardening to a degree where the values of its strength properties exceed values obtained after heat treatment (T6 state),*
- *after KOB O extrusion, stable mechanical properties were obtained over the entire length of the extrudate,*
- *hyperquenching of the tested alloy from 1030°C makes it possible to obtain higher values of strength properties compared to hyperquenching from 900°C,*
- *at 450°C, strength properties decrease by 25 to 40%.*

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was realized within the framework of the statutory work of the Metal Forming Institute BB .901.0041 Research of production technology employing plastic working methods as well as the properties of products and tools used in production.

LITERATURA

- [1] Pietrzyk M., R. Kuziak. 2010. „Odkuwki z miedzi chromowej jako alternatywa wobec wyrobów stalowych”. *Mechanik* 4: 282–286.
- [2] Korbel A., W. Bochniak, A. Pawełek, F. Dobrzański, H. Dybiec. 1980. „Wpływ obróbki cieplnej na własności mechaniczne i elektryczne stopów miedzi”. *Rudy Metale* 25 (10): 431–440.
- [3] Bochniak W., A. Korbel, P. Ostachowski, S. Ziółkiewicz, J. Borowski 2013. „Wyciskanie metali i stopów metodą KOBO”. *Obróbka Plastyczna Metali XXIV* (2): 83–98.
- [4] Śmieszek Z., M. Woch, J. Stobrawa, Z. Rdzawski. 2004. „Wybrane materiały na osnowie miedzi o szczególnych właściwościach”. *Rudy Metale* 49 (5): 220–225.
- [5] Malec W., Ł. Marchewka, S. Książek, J. Stobrawa, L. Ciura, B. Cwolek, B. Juszczak. 2009. „Zastosowanie wyciskania metodą KOBO do produkcji spoiw AgCuTi”. *Hutnik Wiadomości Hutnicze* 76 (8): 625–628.

REFERENCES

- [1] Pietrzyk M., R. Kuziak. 2010. “Odkuwki z miedzi chromowej jako alternatywa wobec wyrobów stalowych”. *Mechanik* 4: 282–286.
- [2] Korbel A., W. Bochniak, A. Pawełek, F. Dobrzański, H. Dybiec. 1980. “Wpływ obróbki cieplnej na własności mechaniczne i elektryczne stopów miedzi”. *Rudy Metale* 25 (10): 431–440.
- [3] Bochniak W., A. Korbel, P. Ostachowski, S. Ziółkiewicz, J. Borowski 2013. “Extrusion of metals and alloys by KOBO method”. *Obróbka Plastyczna Metali XXIV* (2): 83–98.
- [4] Śmieszek Z., M. Woch, J. Stobrawa, Z. Rdzawski. 2004. “Wybrane materiały na osnowie miedzi o szczególnych właściwościach”. *Rudy Metale* 49 (5): 220–225.
- [5] Malec W., Ł. Marchewka, S. Książek, J. Stobrawa, L. Ciura, B. Cwolek, B. Juszczak. 2009. “Zastosowanie wyciskania metodą KOBO do produkcji spoiw AgCuTi”. *Hutnik Wiadomości Hutnicze* 76 (8): 625–628.