



## The effects of Nb content on the glass forming ability, thermal stability, and hardness properties of Ni-Co-W-B bulk metallic glasses

Hakan Şahin<sup>1\*</sup>, Aytekin Hiti<sup>2</sup>, Ziya Özgür Yazıcı<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Technology Application and Research Center, Afyon Kocatepe University, 03200, Afyonkarahisar, Türkiye

<sup>2</sup>Department of Materials Science and Engineering, Afyon Kocatepe University, Afyonkarahisar 03200, Türkiye

### Highlights:

- Nb addition improved the GFA of  $\text{Ni}_{36.3}\text{Co}_{25}\text{W}_{23.7}\text{B}_{15}$  from 0.5 mm to 1 mm
- Crystallization temperature ( $T_x$ ) rose from 909 K to 942 K with Nb substitution
- Nb addition did not have a negative effect on the microhardness values of the alloys

### Keywords:

- Bulk metallic glass
- Glass forming ability
- Thermal properties
- Metal matrix composite
- Microhardness

### Article Info:

Research Article

Received: 12.03.2025

Accepted: 30.11.2025

### DOI:

10.17341/gazimmfd.1656203

### Acknowledgement:

This study was supported by The Scientific and Technological Research Council of Turkey (TUBITAK) under project number 214M111

### Correspondence:

Author: Hakan Şahin

e-mail:

hakansahin@aku.edu.tr

phone: +90 544 354 2942

### Graphical/Tabular Abstract

The study investigated the effects of substituting Nb for W on the glass-forming ability (GFA), thermal stability, and hardness properties of  $\text{Ni}_{36.3}\text{Co}_{25}\text{Nb}_x\text{W}_{(23.7-x)}\text{B}_{15}$  ( $x = 2-10$ ) bulk metallic glasses. Addition of Nb to the  $\text{Ni}_{36.3}\text{Co}_{25}\text{W}_{23.7}\text{B}_{15}$  alloy increased the GFA of the alloys from 0.5 mm to 1 mm and increased the crystallization temperature ( $T_x$ ) of the alloy with 10% Nb from 909 K to 942 K, as can be seen from Table A. However, increasing Nb addition limited further improvement in GFA as it increased the probability of precipitation of  $\text{Ni}_3(\text{NbW})$  phase in the structure. The improved GFA and  $T_x$  in Ni-Co-W-B alloys enhance their potential for use as precursors for tough and hard composites. The increase in Nb content in the alloys did not have a negative effect on the microhardness values.

**Table A.** Thermal properties of the alloys ( $T_g$ ,  $T_x$ , and  $T_i$ ), GFA parameters, critical casting thickness ( $D_{\max}$ ), and microhardness values.

Alloy	$T_g$ (K)	$T_x$ (K)	$T_i$ (K)	$T_g / T_i$	$T_x / (T_i + T_g)$	$D_{\max}$ (mm)	$H_v$
$\text{Ni}_{36.3}\text{Co}_{25}\text{W}_{23.7}\text{B}_{15}$	851	909	1614	0.5272	0.368	0.5mm	1151
$\text{Ni}_{36.3}\text{Co}_{25}\text{Nb}_2\text{W}_{21.7}\text{B}_{15}$	862	924	1594	0.5408	0.376	1mm	1101
$\text{Ni}_{36.3}\text{Co}_{25}\text{Nb}_6\text{W}_{17.7}\text{B}_{15}$	872	937	1550	0.5626	0.387	1mm	1118
$\text{Ni}_{36.3}\text{Co}_{25}\text{Nb}_{10}\text{W}_{13.7}\text{B}_{15}$	881	942	1514	0.5819	0.393	1mm	1100

### Purpose:

The aim of this study is to increase the glass forming ability of the Ni-Co-W-B alloy family, in which high toughness and hardness phases can be precipitated as a result of appropriate heat treatment, by adding Nb. In this way, to increase the potential of use in the production of metal matrix composite (MMC) materials where high toughness and hardness are desired.

### Theory and Methods:

High-purity metal powders were prepared in appropriate compositions and pre-alloyed using a vacuum arc furnace. The alloys were then cast into copper molds of varying thicknesses, and the changes in glass forming ability were investigated through XRD and DSC analyses.

### Results:

With the addition of Nb, the  $T_i$  temperatures of the alloys decreased significantly, while the  $T_g$  and  $T_x$  temperatures increased. It was determined that the glass-forming ability of all three alloys was limited to 1 mm. It was observed that the increase in glass-forming ability was not proportional to the calculated  $T_{ig}$  and  $\gamma$  parameters. It has been determined that the increased Nb content facilitates the formation of the  $\text{Ni}_3(\text{Nb,W})$  phase, which consequently limits the glass-forming ability to 1 mm.

### Conclusion:

This study aimed to improve the glass-forming ability of the Ni-Co-W-B metallic glass alloy to enhance its potential for use as a precursor in the production of MMC materials with high toughness and hardness. Initially exhibiting a glass-forming ability of 0.5 mm and a  $T_x$  temperature of 909 K, the  $\text{Ni}_{36.3}\text{Co}_{25}\text{W}_{23.7}\text{B}_{15}$  alloy was modified with Nb, enhancing its glass-forming ability to 1 mm and increasing the  $T_x$  temperature to 942 K.



## Ni-Co-W-B iri hacimli metalik cam alaşımına Nb ilavesinin alaşımın camlaşma kabiliyeti, termal stabilitesi ve sertlik özelliklerine etkisinin incelenmesi

Hakan Şahin<sup>1\*</sup>, Aytekin Hiti<sup>2</sup>, Ziya Özgür Yazıcı<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi (TUAM), 03200, Afyonkarahisar, Türkiye

<sup>2</sup>Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü, 03200, Afyonkarahisar, Türkiye

### Ö N E Ç İ K A N L A R

- Nb ilavesi,  $Ni_{36.3}Co_{25}W_{23.7}B_{15}$  alaşımının GFA'sını 0,5 mm'den 1 mm'ye yükseltmiştir
- %10 atomik Nb ilave edilen alaşımın kristalleşme sıcaklığı ( $T_x$ ), 909 K'den 942 K'ye yükselmiştir
- Nb ilavesi, alaşımların mikro sertlik değerleri üzerinde negatif bir etki göstermediği gözlemlenmiştir

### Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 12.03.2025

Kabul: 30.11.2025

### DOI:

10.17341/gazimmfd.1656203

### Anahtar Kelimeler:

İri hacimli metalik camlar,  
camlaşma kabiliyeti,  
termal özellikler,  
metal matrisli kompozitler

### ÖZ

Bu çalışmada,  $Ni_{36.3}Co_{25}Nb_xW(23.7-x)B_{15}$  ( $x = 2-10$ ) iri hacimli metalik cam alaşımındaki W elementi miktarı azaltılarak Nb elementinin eklenmesi ile alaşımın camlaşma kabiliyeti (GFA), termal kararlılığı ve mikrosertlik özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Alaşıma Nb elementi eklenmesindeki amaç alaşımın camlaşma kabiliyetini artırarak, yüksek tokluk ve yüksek sertliğe sahip metal matrisli kompozit malzeme üretiminde metalik camların öncül olarak kullanım potansiyelini arttırmaktır.  $Ni_{36.3}Co_{25}W_{23.7}B_{15}$  alaşımına Nb eklenmesi, alaşımın GFA'sını 0,5 mm'den 1 mm'ye çıkarmış ve kristalleşme sıcaklığını ( $T_x$ ) 909 K'den 942 K'ye çıkardığı tespit edilmiştir. Ancak alaşıma eklenen Nb miktarı artıkça  $Ni_3(NbW)$  fazının çökme olasılığının da arttığı gözlemlenmiş ve herne kadar alaşımın GFA'sını iki katına çıkarsa da 1mm ile sınırlı kalmasına da neden olduğu belirlenmiştir. Ni-Co-W-B alaşımlarındaki iyileştirilmiş GFA ve  $T_x$ , bu alaşımların tok ve sert kompozitler için öncül olarak kullanım potansiyellerini arttırmaktadır. Ayrıca geliştirilen alaşımların mikrosertlik değerlerinde büyük bir değişim gözlemlenmemiştir.

## Ni-Co-W-B iri hacimli metalik cam alaşımına Nb ilavesinin alaşımın camlaşma kabiliyeti, termal stabilitesi ve sertlik özelliklerine etkisinin incelenmesi

### H I G H L I G H T S

- The addition of Nb increased the GFA of the  $Ni_{36.3}Co_{25}W_{23.7}B_{15}$  alloy from 0.5 mm to 1 mm
- The crystallization temperature ( $T_x$ ) of the alloy with atomic 10 at. % Nb added increased from 909 K to 942 K
- It was observed that the addition of Nb did not have a negative effect on the microhardness values of the alloys

### Article Info

Research Article

Received: 12.03.2025

Accepted: 30.11.2025

### DOI:

10.17341/gazimmfd.1656203

### Keywords:

Bulk metallic glasses,  
glass forming ability,  
thermal properties,  
metal matrix composites

### ABSTRACT

In this study, the effects of reducing the amount of W element and adding Nb element in the bulk metallic glass alloy  $Ni_{36.3}Co_{25}Nb_xW(23.7-x)B_{15}$  ( $x = 2-10$ ) on the glass forming ability (GFA), thermal stability and microhardness properties of the alloy were investigated. The purpose of adding Nb element to the alloy is to increase the glass forming ability of the alloy and thus increase the potential of using metallic glasses as precursors in the production of metal matrix composite materials with high toughness and high hardness. It was found that the addition of Nb to the  $Ni_{36.3}Co_{25}W_{23.7}B_{15}$  alloy increased the GFA of the alloy from 0.5 mm to 1 mm and increased the crystallization temperature ( $T_x$ ) from 909 K to 942 K. However, it was observed that as the amount of Nb added to the alloy increased, the probability of precipitation of the  $Ni_3(NbW)$  phase also increased, and although it doubled the GFA of the alloy, it was determined that it also caused it to remain limited to 1 mm. The improved GFA and  $T_x$  in Ni-Co-W-B alloys increases the potential of these alloys to be used as precursors for tough and hard composites. Additionally, no major change was observed in the microhardness values of the developed alloys.

## 1. Giriş (Introduction)

Metalik camlar, 1960 yılında keşfedilmelerinden bu yana geliştirilmekte olan yeni tip mühendislik malzemeleridir [1]. Fiziksel, kimyasal, mekanik ve manyetik özellikleri nedeniyle savunma, havacılık, uzay, elektrik-elektronik ve otomotiv endüstrileri gibi kritik endüstriyel sektörlerde kullanılan önemli bir malzeme türüdür [2, 3]. Teknolojik gelişmelere paralel olarak her geçen gün malzemelerin kullanım koşulları daha zorlu ortamlara dayanıklı hale gelmek zorundadır. Uygulama alanına bağlı olarak yüksek mukavemet, yüksek tokluk ve yüksek sıcaklıklarda oksidasyona karşı direnç gibi özellikler istenmektedir. Bu gereksinimleri karşılayan malzeme türlerinden biri de metal matrisli kompozit (MMK) malzemelerdir [4-6]. MMK'ler, metalik bir matris içinde dağıtılmış takviye bileşenlerinden oluşan ileri mühendislik malzemeleridir [7]. MMK'lerin temel amacı, metallerin yüksek mukavemetini, sünekliğini ve tokluğunu, seramik veya elyaf gibi takviye malzemelerinin sertlik, yüksek sıcaklık dayanımı ve aşınma direnci gibi üstün özellikleriyle birleştirmektir. MMK'ler, daha yüksek mukavemet-ağırlık oranları, termal kararlılık, aşınma direnci ve korozyon direnci sunarak geleneksel metallerin sınırlamalarını aşar. Sonuç olarak, otomotiv, havacılık, savunma ve elektronik gibi endüstrilerdeki yüksek performanslı uygulamalarda tercih edilirler. MMK'lerin üretimi genellikle toz metalürjisi, eriyik döküm, sıvı infiltrasyon ve sıcak presleme gibi tekniklerle gerçekleştirilir. Ancak matris ile takviye malzemeleri arasındaki ara yüz bağlanma kalitesi, dağıtım homojenliği ve üretim maliyetleri gibi zorluklar MMK'lerin endüstriyel alanda yaygın olarak uygulanabilirliğini sınırlayabilmektedir. Bu nedenle, son yıllarda nano takviyelere, yüzey modifikasyon tekniklerine ve yenilikçi üretim yöntemlerine odaklanan araştırmalar artmıştır. İri hacimli metalik cam alaşımları, yüksek tokluk ve sertliğe sahip MMK'ler üretmek için öncül olarak kullanılabilen bir malzeme grubudur [8]. Uygun bileşimdeki metalik cam alaşımının kontrollü bir şekilde (yaşlandırma süreci yoluyla) kristalleşme sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklara ısıtılmasıyla, yapıda kısmen kontrollü kristaller çökeltilir [9-11]. Böylelikle yapıda hem tokluk hem de sertliği sağlayabilecek kristal yapılar kontrollü bir şekilde çökeltilir. Öyle ki, literatürde sertlik değerleri çok yüksek olan benzer çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmalarda alaşımların yapılarında  $Cr_{23}C_6$ ,  $Fe_3B$ ,  $(Co, Fe)_2B$ ,  $(Fe, Cr)_{23}(C, B)_6$ ,  $(Co, Fe)_{21}Ta_2B_6$  gibi sertlik değerleri çok yüksek olan fazlar çökelmektedir. Ancak bu çalışmalarda sentezlenen kompozitlerin hiçbiri sünek faz(lar) içermediğinden yüksek tokluğa sahip değildirlir. İri hacimli metalik camlardan elde edilen kompozitlerin hem yüksek sertliğe hem de tokluğa sahip olması için, sistemde yüzey merkezli kübik (FCC) yapıya sahip Ni ve Cu bazlı fazlar ile borür ve karbür gibi yüksek sertliğe sahip fazlar aynı anda bulunmalıdır.  $Ni_{36.3}Co_{25}W_{23.7}B_{15}$  alaşımı ısıtma işlemiyle yapıda hem sünek ve hem de sert fazların çökeltilmediği literatürdeki ilk Ni bazlı iri hacimli metalik camdır [12]. Yapılan çalışmalar,  $Ni_{36.3}Co_{25}W_{23.7}B_{15}$  iri hacimli metalik cam alaşımının uygun sıcaklıklarda ısıtma işlemiyle kristalleştirildiğinde, yüzey merkezli kübik (YMK) (Ni, Co, W) katı çözeltilisi ve 4300 HV sertliğe sahip ultra sert ortorombik CoWB fazlarının [13] çökelmediği belirtilmiştir. Ayrıca yapılan çalışmalarda alaşımın tokluğunun  $6,45 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  ve sertliğinin ise 1151 HV olduğu bildirilmiştir [13]. Bu bulgular, Ni-Co-W-B metalik cam alaşımının yüksek tokluk ve sertliğe sahip metal matris kompozit malzemeler üretmek için öncül olarak kullanılabilmesini göstermektedir. Ancak,  $Ni_{36.3}Co_{25}W_{23.7}B_{15}$  alaşımının kritik döküm kalınlığı yalnızca 0,5 mm kalınlık ile sınırlıdır. Ni-Co-W-B metalik cam alaşım ailesinin yüksek sertlik ve tokluğa sahip MMK malzemelerin üretimi için öncül olarak kullanım potansiyelini arttırabilmek için camlaşma kabiliyetinin artırılması gerekmektedir. Metalik camların MMK üretiminde öncül olarak kullanılmasına yönelik birincil yaklaşımlardan biri, amorf halde elde edilen tozların

kullanılarak çeşitli eklemeli imalat (3D yazıcılar) üretim yöntemleriyle üretim yapılmasıdır [15-18]. Çeşitli eklemeli imalat yöntemleri kullanılarak istenilen şekilde ve amorf yapıda elde edilen ilk ürüne daha sonra uygun ısıtma işlemleri uygulanarak yüksek tokluk ve yüksek sertliğe sahip fazların çökeltilmesi sağlanarak MMK ürünler elde edilebilir. Ayrıca, metalik camların eklemeli imalat süreçleri sırasında karşılaşılan mikro çatlak problemlerinin oluşumunu önlemek için kullanılacak tozların hem yüksek cam oluşturma kabiliyetine hem de elde edilecek ilk ürünün amorf yapıda oluşabilmesi için yüksek kristalleşme sıcaklığına sahip olması gerekmektedir [19, 20]. Bu nedenlerden dolayı da bu alaşım ailesinin düşük cam oluşturma yeteneğinin artırılması gerekmektedir. Bu çalışmada,  $Ni_{36.3}Co_{25}W_{23.7}B_{15}$  alaşımı Nb ile modifiye edilmiş ve  $Ni_{36.3}Co_{25}W_{23.7-x}B_{15}$  ( $x=0-10$ ) alaşımları sentezlenmiştir. Alaşımın cam oluşturma kabiliyetini arttırmak için Nb'nin seçilmesinin nedeni, Nb-W faz diyagramında gösterildiği gibi, W'ye kıyasla önemli ölçüde daha düşük erime sıcaklığına sahip olması ve birbirleri içinde tamamen çözünebilmeleridir.

## 2. Deneysel Metot (Experimental Method)

### 2.1. Malzemeler ve Hazırlama Teknikleri (Materials and Preparation Techniques)

$Ni_{36.3}Co_{25}W_{23.7}B_{15}$  alaşımının Nb ile modifiye edilerek  $Ni_{36.3}Co_{25}W_{23.7-x}B_{15}$  ( $x=0-10$ ) alaşımlarının sentezlenmesi için yüksek saflıktaki Nikel (Ni), Kobalt (Co), Tungsten (W), Bor (B), ve Niyobyum (Nb) element tozları kullanılmıştır. Bu çalışmada, Nb ilavesinin farklı oranlardaki etkilerini incelemek amacıyla, alaşımın özelliklerinde anlamlı (marjinal) değişiklikler yaratabileceği öngörülen üç farklı oran (%2, %6 ve %10) tercih edilmiştir. Bu seçim, araştırma grubumuzun aynı alaşım sistemi üzerine daha önce gerçekleştirdiği sistematik çalışmalar sonucunda elde edilen ön bulgulara dayanmaktadır. Söz konusu oranların mekanik ve yapısal özellikler üzerinde belirgin etkiler gösterebileceği yönündeki gözlemlerimiz doğrultusunda, bu kompozisyonlara odaklanılmıştır. Kullanılan tozların özellikleri Tablo 1' de verilmiştir.

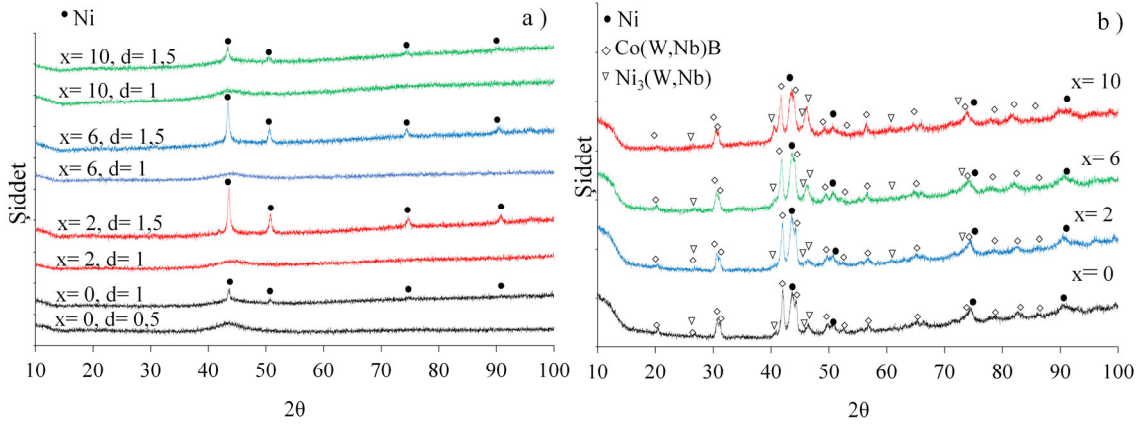
Saf toz halindeki elementler uygun kompozisyonlarda hassas bir şekilde tartılıp manuel olarak karıştırıldıktan sonra hidrolik pres yardımı ile preslenerek tabletler haline getirilmiştir. Presleme işlemi tek eksenli hidrolik bir pres ile  $80 \text{ MPa}$ 'lık basınç uygulanarak 10 mm çapında ve yaklaşık olarak 5-6 mm yüksekliğinde tabletler halinde numuneler elde edilecek şekilde yapılmıştır. Elde edilen bu tabletler  $3,5 \times 10^{-4}$  mbar vakum seviyesine düşebilen, inert atmosfer ortamında yüksek sıcaklıklarda ergitme işlemi yapabilen vakum ark ocağında ergitilerek ana alaşımlar elde edilmiştir. Ana alaşımların homojen bir şekilde ergimesi için ergitme işlemi alaşımı her defasında ters çevirmek suretiyle 3 kez tekrarlanmıştır. Ergitme işlemi 1.2-1.3 atm. basınca sahip yüksek saflıktaki argon ortamında yapılmıştır ve ayrıca oksitlenmeyi engellemek için oksijen afinitesi yüksek olan Titanyum (Ti) elementlerinden oluşan bir fedai alaşımı kullanılmıştır. Hazırlanan tabletlerin ergitilmesi ile hazırlanan ana alaşımlar küçük parçalara kırılarak vakum ark ergitme ocağında yüksek saflıktaki argon atmosferinde emme döküm yöntemi ile çeşitli kalınlıklarda ve uzunluklarda plaka ve silindirik şeklinde dökümleri yapılmıştır. Vakum ark ergitme yöntemi ile emme döküm yöntemi, iri hacimli metalik cam elde etmek için en çok kullanılan yöntemlerden biridir. Döküm işlemi yapılırken alaşımın daha hızlı soğuyarak hızlı bir şekilde katılaşabilmesi için termal iletkenliği yüksek olan % 99.8 saflığa sahip bakır kalıplar kullanılmıştır. 0,5 mm kalınlığındaki numuneler, 3 mm genişliğinde ve 6 mm uzunluğundaki plakalar şeklinde, 1 mm ve 1,5 mm kalınlığındaki numuneler ise 20 mm uzunluğunda silindirik şekilde dökümleri yapılmıştır.

**Tablo 1.** Alaşımların hazırlanmasında kullanılan element tozlarının özellikleri  
(Properties of elemental powders used in the preparation of alloys)

Alaşım Elementleri	Tane boyutu (µm)	Safılık derecesi (ağ.%)	Atomik yarıçapı $r_a$ (nm)	Atom numarası (Z)
Nikel (Ni)	3	99,9	0,124	28
Kobalt (Co)	<2	99,8	0,125	27
Tungsten (W)	1-5	99,9	0,136	74
Niyobyum (Nb)	1-5	99,8	0,142	41
Bor (B)	<100	>99,9	0,136	42

**Tablo 2.** Isıl işlem uygulanmış numunelerde çökelen fazların Rietveld metodu ile hesaplanan hacim yüzdeleri ve kafes parametreleri  
(Volume fractions and lattice parameters of the precipitated phases in heat-treated samples calculated by the Rietveld method)

Alaşım	Faz	Faz yüzdesi (%)	a (nm)	b (nm)	c (nm)
$Ni_{36,3}Co_{25}W_{23,7}B_{15}$	Ni (Fm3m)	60.274	3.591	-	-
	CoWB (Pnma)	33.287	5.734	3.242	6.650
	$Ni_3W$ (Pmnn)	6.439	4.979	4.295	4.730
$Ni_{36,3}Co_{25}Nb_{10}W_{13,7}B_{15}$	Ni (Fm3m)	25.110	3.598	-	-
	CoWB (Pnma)	35.931	5.767	3.258	6.680
	$Ni_3(NbW)$ (Pmnn)	38.959	5.137	4.185	4.447

**Şekil 1.** a)  $Ni_{36,3}Co_{25}Nb_xW_{23,7-x}B_{15}$  ( $x=0-10$ ) alaşımlarının XRD desenleri, b)  $Ni_{36,3}Co_{25}Nb_xW_{23,7-x}B_{15}$  ( $x=0-10$ ) alaşımlarının ısıl işlem görmüş numunelerinin XRD desenleri(a) XRD patterns of  $Ni_{36,3}Co_{25}Nb_xW_{23,7-x}B_{15}$  ( $x=0-10$ ) alloys, b) XRD patterns of heat-treated samples of  $Ni_{36,3}Co_{25}Nb_xW_{23,7-x}B_{15}$  ( $x=0-10$ ) alloys )

## 2.2. Malzemelerin karakterizasyonu (Characterization of materials)

Alaşımların amorf ve kristal fazları Bruker marka D8 Advanced model XRD cihazı kullanılarak belirlenmiştir. Analizler,  $2\theta = 10$  ila  $100^\circ$  tarama açıları arasında,  $\lambda = 1.54 \text{ \AA}$  dalga boyuna sahip Cu-K $\alpha$  X ışınları kullanılarak Vantech dedektörü ile 90 dk.lık analiz süresi şartlarında gerçekleştirilmiştir. Amorf yapıda olmayan numunelerde çökelen fazların belirlenmesinde Bruker Diffraet. Suit. Eva değerlendirme programından faydalanılmıştır. Ayrıca ısıl işlem görmüş numunelerde çökelen fazların kafes parametreleri ve faz yüzdelere belirlenmesi Bruker Diffrac Topas 4.2 yazılımı ile Rietveld analizi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Alaşımların termal özelliklerinin belirlenmesi için DSC/TG analizleri 20 K/dk. ısıtma hızı ile inert argon atmosferinde ve 1840 K sıcaklığına kadar çıkılarak gerçekleştirilmiştir. Alaşımların cam geçiş sıcaklıkları ( $T_g$ ) ve kristalizasyon sıcaklıkları ( $T_x$ ) değerleri ısıtma sırasında, likidüs sıcaklıkları ( $T_l$ ) ve ergime sıcaklıkları ( $T_m$ ) ise soğutma esnasındaki değerler ölçülerek belirlenmiştir. Numunelerin mikrosertlik analizleri Shimadzu HMV-2L-ASSY model cihaz kullanılarak 15 saniye boyunca 2,94 N yük uygulanarak gerçekleştirilmiştir.

## 3. Sonuçlar ve Tartışmalar (Results and Discussions)

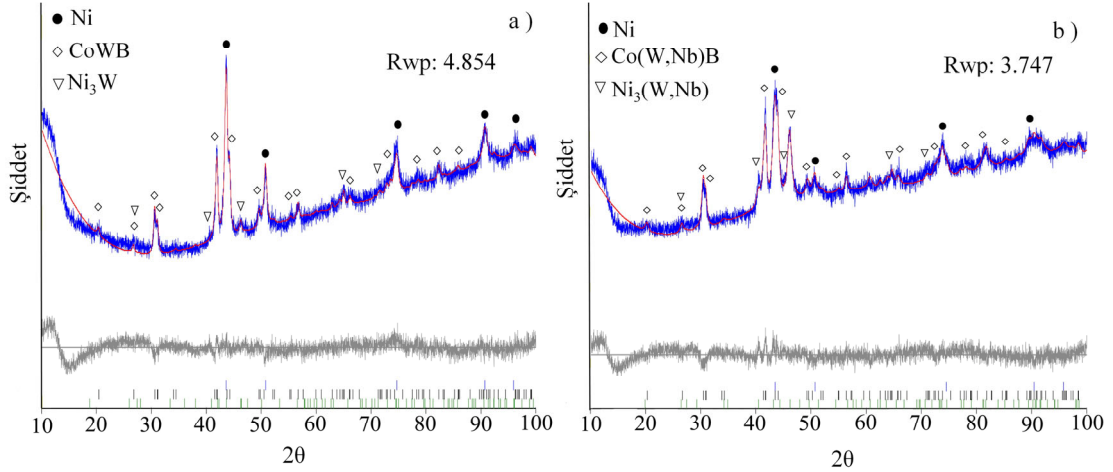
### 3.1. XRD ve Termal Analiz Sonuçları (XRD and Thermal Analysis Results)

Şekil 1a, farklı döküm kalınlıklarına sahip alaşım numunelerinin XRD analiz sonuçlarını göstermektedir. 0,5 mm kalınlığına sahip  $Ni_{36,3}Co_{25}W_{23,7}B_{15}$  alaşım numuneleri amorf bir yapı sergilerken, 1 mm kalınlığındaki numuneler YMK yapısına sahip Ni katı çözelti fazını içermektedir. Ayrıca yapılan XRD analizi sonuçlarına göre %2, %6 ve %10 Nb içeren alaşımların 1 mm kalınlığındaki numunelerinin amorf yapıda olduğu belirlenmiştir. Bu alaşımların 1,5 mm kalınlığındaki numunelerinde, Ni katı çözelti (NiSS) fazının önemli ölçüde çökeldiği yapılan XRD analizleri ile tespit edilmiştir. Bu çalışmada, hazırlanan alaşımların cam oluşturma yeteneklerini değerlendirmek için literatürde yaygın olarak kullanılan indirgenmiş cam geçiş sıcaklığı ( $T_{rg}$ ) [21, 22] ve gama ( $\gamma$ ) [23] parametreleri kullanılmıştır. Ancak hazırlanan alaşımların cam oluşturma kabiliyetindeki artışın, hesaplanan  $T_{rg}$  ve  $\gamma$  parametrelerinin gösterdiği artış kadar marjinal olmadığı yapılan XRD analizleri sonuçlarında

görülmüştür. Hazırlanan alaşımların cam oluşturma kabiliyetindeki artışın hesaplanan  $T_g$  ve  $\gamma$  parametreleriyle neden uyumadığını anlamak için amorf numuneler 1100 K'de 15 dakika ısıtılma tabii tutulmuş ve çöken fazlar tanımlanmıştır. Şekil 1b'de ısıtılma işlemi numunelerinden elde edilen XRD sonuçları gösterilmektedir. XRD analiz sonuçlarına göre, YMK yapıya sahip Niss fazı ile ortorombik yapıdaki Co(W, Nb)B ve  $Ni_3(W, Nb)$  fazlarının çökeldiği belirlenmiştir. Şekil 2a ve Şekil 2b, baz alaşım ( $Ni_{36.3}Co_{25}W_{23.7}B_{15}$ ) ve  $Ni_{36.3}Co_{25}Nb_{10}W_{13.7}B_{15}$  alaşımlarına uygulanan ısıtılma işleminden sonra yapılan XRD analizleri verilerinden elde edilen Rietveld analiz sonuçlarını göstermektedir. Elde edilen verilere dayanarak, baz alaşımının ısıtılma işleminden sonra yapısında hacimce %6,439  $Ni_3W$  fazı çökeldiği, %10 at. Nb ile modifiye edilmiş alaşımın ise yapısında

hacimce %38,959  $Ni_3(NbW)$  fazının çökeldiği belirlenmiştir. Tablo 2'de çöken fazların Rietveld yöntemi ile hesaplanan hacim oranları ve kafes parametreleri gösterilmektedir.

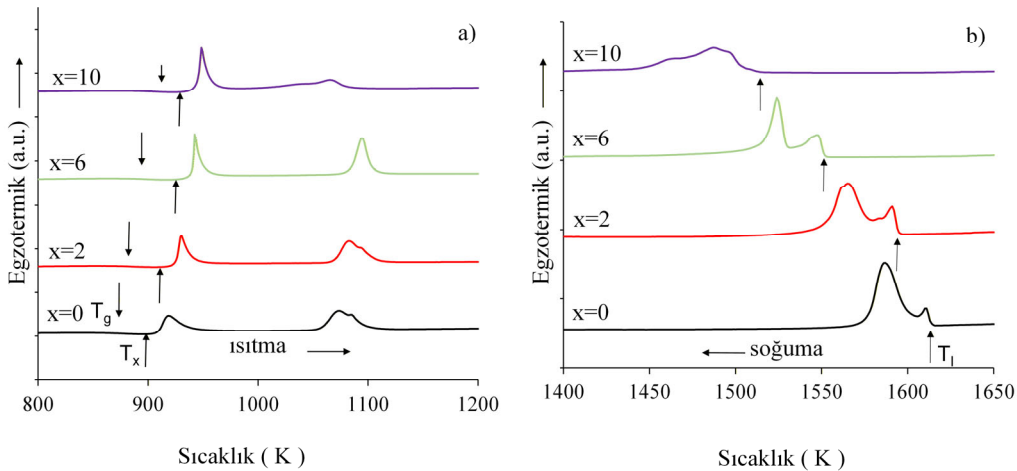
Şekil 3 a ve b alaşımların DSC analizi sonuçlarını göstermektedir. Baz alaşımın  $T_g$  ve  $T_x$  değerleri sırasıyla 851 K ve 909 K olarak belirlenmiştir. Nb ilavesiyle hem  $T_g$  hem de  $T_x$  sıcaklıkları artmıştır. Ayrıca alaşımların  $T_1$  sıcaklıkları artan Nb içeriğiyle önemli ölçüde azalmıştır. Atomik %10 Nb içeren alaşımın  $T_g$  ve  $T_x$  sıcaklık değerleri sırasıyla 881 K ve 942 K olarak ve  $T_1$  sıcaklık değeri ise 1514 K olarak ölçülmüştür. Tablo 3'te alaşımların termal özellikleri ( $T_g$ ,  $T_x$ ,  $T_1$ ) ve kritik döküm kalınlıkları listelenmiştir.



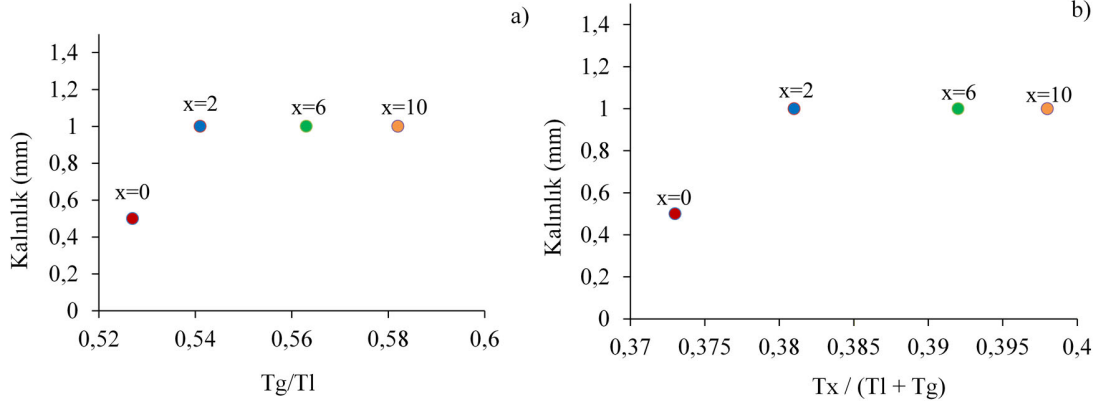
**Şekil 2.** 1100 K'de 15 dakika ısıtılma tabii tutulan numunelerden elde edilen XRD verilerinin Rietveld sonuçları a)  $Ni_{36.3}Co_{25}W_{23.7}B_{15}$  alaşımı ve b)  $Ni_{36.3}Co_{25}Nb_{10}W_{13.7}B_{15}$  alaşımı. Ham veri, hesaplanan ve fark verileri sırasıyla mavi, kırmızı ve gri renklerle gösterilmiştir (The results of the Rietveld refinement of XRD data obtained from samples subjected to heat treatment at 1100 K for 15 minutes c)  $Ni_{36.3}Co_{25}W_{23.7}B_{15}$  alloy and d)  $Ni_{36.3}Co_{25}Nb_{10}W_{13.7}B_{15}$  alloy. Observed, calculated, and different data are indicated by blue, red, and gray colors, respectively)

**Tablo 3.** Alaşımların termal özellikleri ( $T_g$ ,  $T_x$  ve  $T_1$ ), GFA parametreleri, kritik döküm kalınlığı ( $D_{max}$ ) ve mikrosertlik değerleri (Thermal properties of the alloys ( $T_g$ ,  $T_x$ , and  $T_1$ ), GFA parameters, critical casting thickness ( $D_{max}$ ), and microhardness values)

Alaşım	$T_g$ (K)	$T_x$ (K)	$T_1$ (K)	$T_g / T_1$	$T_x / (T_1 + T_g)$	$D_{max}$ (mm)	$H_v$	Ref.
$Ni_{36.3}Co_{25}W_{23.7}B_{15}$	851	909	1614	0.5272	0.368	0.5mm	1151	[14]
$Ni_{36.3}Co_{25}Nb_2W_{21.7}B_{15}$	862	924	1594	0.5408	0.376	1mm	1101	
$Ni_{36.3}Co_{25}Nb_6W_{17.7}B_{15}$	872	937	1550	0.5626	0.387	1mm	1118	
$Ni_{36.3}Co_{25}Nb_{10}W_{13.7}B_{15}$	881	942	1514	0.5819	0.393	1mm	1100	



**Şekil 3.**  $Ni_{36.3}Co_{25}Nb_xW_{23.7-x}B_{15}$  ( $x=0-10$ ) amorf alaşımlarının DSC eğrileri. (a) cam geçiş sıcaklıkları, (b) erime noktaları (DSC curves of  $Ni_{36.3}Co_{25}Nb_xW_{23.7-x}B_{15}$  ( $x=0-10$ ) amorphous alloys. (a) glass transition temperatures, (b) melting points)



**Şekil 4.**  $Ni_{36.3}Co_{25}Nb_xW_{23.7-x}B_{15}$  ( $x=0-10$ ) alaşımlarına Nb ilavesiyle a) kalınlık ve indirgenmiş cam geçiş sıcaklığı, b) kalınlık ve gama parametresi arasındaki ilişkiyi gösteren şematik gösterim (Schematic representation showing the relationship between, a) thickness and reduced glass transition temperature, b) thickness and gamma parameter in  $Ni_{36.3}Co_{25}Nb_xW_{23.7-x}B_{15}$  ( $x=0-10$ ) alloys with Nb addition)

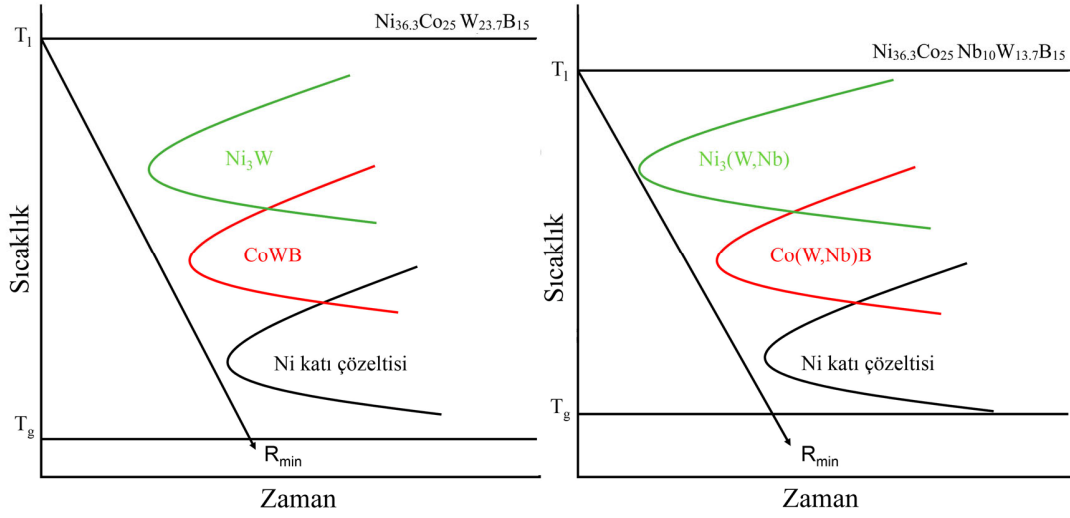
### 3.2. Mekanik Özellikler (Mechanical Properties)

Önceki çalışmalarda, baz alaşım  $Ni_{36.3}Co_{25}W_{23.7}B_{15}$ 'in mikro sertlik değerlerinin 1151 HV olduğu belirlenmiştir. Yapılan çalışmada Nb içeriği arttıkça alaşımların mikro sertlik değerlerinin bir miktar düştüğü görülmüştür. Atomik %10 Nb içeren alaşımın mikro sertlik değeri 1100 HV olarak ölçülmüştür. Alaşımların mikro sertlik değerleri Tablo 3'te verilmiştir.

Termal analiz sonuçları incelendiğinde, Nb ilavesinin artmasıyla alaşımların  $T_l$  sıcaklıklarının azaldığı,  $T_g$  ve  $T_x$  sıcaklıklarının ise arttığı gözlemlenmiştir.  $T_{rg}$  ve  $\gamma$  parametreleri literatürde metalik cam alaşımlarının cam oluşturma kabiliyetlerini tahmin etmek için kullanılan önemli parametrelerdendir. Bu çalışmada, hazırlanan alaşımların cam oluşturma yeteneklerini değerlendirmek için bu kriterler kullanılmıştır. Hazırlanan alaşımlar için  $T_{rg}$  ve  $\gamma$  değerlerinin Nb ilavesiyle arttığı gözlemlenmiştir. Bu artış, alaşımların cam oluşturma özelliklerinin Nb ilavesiyle iyileşmesi gerektiğini göstermektedir. Beklendiği üzere, XRD analiz sonuçları Nb içeren alaşımların daha yüksek cam oluşturma kabiliyetine sahip olduğunu göstermiştir. W-W bağlarının kohezyon enerjisinin (859 kJ/mol), Nb-W bağlarınınkinden (796 kJ/mol) daha yüksek olduğundan ve Nb'nin alaşımdaki diğer elementlerle bağlanma enerjileri W'nin bağlanma enerjisinden daha düşük olduğundan, amorf yapısı içerisinde atomlar arasındaki genel bağlanma enerjisi azalmıştır [24, 25]. Bu da Nb ilavesi arttıkça alaşımların ergime sıcaklıklarının önemli ölçüde azalmasına sebep olmuştur. Nb içeren alaşımların  $T_l$  sıcaklıkları azalırken,  $T_g$  ve  $T_x$  sıcaklıklarında hafif bir artış gözlemlenmiştir. Bu artışın sebebinin Nb'nin alaşımların kristalleşme kinetiğini yavaşlatmış olması olarak düşünülmektedir. Bunun nedeni Nb atomlarının alaşımdaki atom hareketliliğini azaltması ve kristalleşme sürecini daha zor hale getirmesi olabilir [26]. Ayrıca, literatürde birçok çalışmada, Nb'nin alaşımın viskozitesini artırdığını ve böylelikle  $T_g$  ve  $T_x$  sıcaklıklarını yükselttiği vurgulanmıştır. Viskozitedeki bu değişim alaşımların termal kararlılığını ve camlaşma yeteneğini artırır [27, 28]. Nb'nin alaşımların cam oluşturma yeteneği üzerindeki diğer bir olumlu etkisi de, Nb ilavesinin kısa menzilli ölçekte Nb merkezli kümelerin oluşumunu mümkün kılmadır. Bu kümeler kristalleşmeyi zorlaştırarak cam yapısını stabilize eder. Nb ilavesi atomların orta mesafedeki düzenlemelerinde yoğun paketlenmiş yapılar oluşturur. Gevşek paketlenmiş yapıların yoğun paketlenmiş yapılara dönüşmesi malzemenin yapısal kararlılığını artırır ve kristalleşmeye karşı direnç sağlar [29]. Ayrıca, aşırı soğutulmuş sıvıda Nb elementi yapıdaki atomların daha homojen bir şekilde dağılmasını sağlayarak sıvının cam fazına geçişini kolaylaştırır [30, 31]. Ancak alaşımların cam oluşturma

kabiliyetindeki iyileşme,  $T_{rg}$  ve  $\gamma$  parametrelerindeki artış kadar belirgin değildir. Alaşımların cam oluşturma kabiliyetleri artan Nb içeriğiyle iyileşmiş olsa da, hazırlanan üç alaşımın kritik döküm kalınlığı 1 mm ile sınırlı kalmıştır. Özellikle, % 10 at. Nb içeren alaşım en yüksek  $T_{rg}$  ve  $\gamma$  parametre değerlerine sahip olmasına rağmen, cam oluşturma yeteneği diğer Nb modifiyeli kompozisyonlarla aynı seviyede kalmıştır. Şekil 4'den de görüleceği gibi alaşımların cam oluşturma kabiliyetlerinde beklenen artışın  $T_{rg}$  ve  $\gamma$  parametrelerindeki artışla orantılı olmamıştır.

Cam oluşturma kabiliyetinde beklenen artışın  $T_{rg}$  ve  $\gamma$  parametrelerindeki artışla orantılı olarak neden gerçekleşmediğini anlamak için amorf numunelere 1100 K sıcaklıkta 15 dakika süreyle ısıtım uygulanmıştır. Böylece yapıda çöken kristalin fazlar tespit edilerek camlaşma kabiliyetindeki artışın neden  $T_{rg}$  ve  $\gamma$  parametreleri ile uyumlu olmadığı anlaşılmasına çalışılmıştır. Isıtım sıcaklığı DSC analiz verileri değerlendirilerek belirlenmiştir. Şekil 1b'de görüldüğü gibi aynı koşullar altında ve eşit numune miktarlarıyla gerçekleştirilen XRD analizi sonuçları, Nb elementinin ilavesi arttıkça  $Ni_3(NbW)$  fazını temsil eden piklerin şiddetlerinin önemli ölçüde arttığını göstermiştir. Pik şiddetlerindeki artış, alaşımlara daha fazla Nb eklendikçe  $Ni_3(NbW)$  fazının oluşumunun arttığını göstermektedir. Nitekim Rietveld analiziyle bunun doğru olduğu teyit edilmiştir. XRD analiz sonuçlarına göre, Rietveld analizi kullanılarak hesaplanan çökelmiş fazların hacim yüzdeleri, baz alaşımdaki  $Ni_3W$  fazının %6,439 olduğunu, buna karşılık % 10 at. Nb ilavesiyle hazırlanan alaşımdaki  $Ni_3(Nb,W)$  fazının %38,959'a kadar önemli ölçüde arttığını göstermiştir. Alaşımların cam oluşturma kabiliyetine Nb ilavesinin etkisini, Şekil 5'de görüldüğü gibi zaman-sıcaklık-dönüşüm diyagramlarında şematik olarak gösterebiliriz. Daha önce de belirtildiği gibi, bu durum alaşımların cam oluşturma kabiliyetindeki artışın hesaplanan  $T_{rg}$  ve  $\gamma$  parametrelerindeki artış eğilimiyle uyumsuz olduğunu açıklayabilir. Nb ilavesi arttıkça alaşım içerisinde  $Ni_3(W,Nb)$  fazının çökmesi kolaylaşmaktadır. Şekil 5 bu durumu zaman-sıcaklık-dönüşüm diyagramında şematik bir gösterimle göstermektedir. Kompozisyondaki Nb miktarının artırılması,  $Ni_3(W, Nb)$  fazının C-eğrisinin konumunun sola kaymasına neden olabilir. Bu nedenle, döküm sırasında, bu fazın eriyik içerisinde çökmesi aynı soğutma koşulları altında daha kolay hale gelebilir. Kısacası, daha büyük çaplı numuneler üretilirken soğutma hızı yetersiz olduğundan, yapıdaki  $Ni_3(W, Nb)$  nano çökeltileri çekirdeklenmeyi tetikleyerek cam oluşumunu olumsuz etkilemiştir. Bu da alaşımların camlaşma kabiliyetlerinin 1mm ile sınırlı kalmasına neden olmuştur. Ölçülen sertlik değerlerine göre elde edilen amorf alaşımlarda önemli bir değişim gözlemlenmemiştir. Nitekim geliştirilen alaşımların mikro sertlik değerlerinin  $Ni_{36.3}Co_{25}W_{23.7}B_{15}$



**Şekil 5.**  $Ni_{36.3}Co_{25}Nb_xW_{23.7-x}B_{15}$  ( $x=0-10$ ) alaşımlarına Nb ilavesiyle zaman-sıcaklık-dönüşüm diyagramındaki değişimin şematik gösterimi

(Schematic representation of the change in the time-temperature-transformation diagram with the addition of Nb to the  $Ni_{36.3}Co_{25}Nb_xW_{(23.7-x)}B_{15}$  ( $x=0-10$ ) alloys)

alaşımına kıyasla yaklaşık 50 HV azaldığı gözlemlenmiştir. W'yi Nb ile değiştirmek yapıdaki W-W bağlarının sayısının azalmasına ve W-Nb bağlarının sayılarının artmasına neden olmuştur. W-W bağlarının kohezyon enerjisi (859 kJ/mol) Nb-W bağlarının kohezyon enerjisinden (796kJ/mol) daha yüksek olduğundan, amorf fazın atomları arasındaki genel kohezyon enerjisi azaldığı için elde edilen alaşımların sertlikle sonuçlarında bir miktar düşüş gözlemlenmiştir [32-34].

#### 4. Sonuçlar (Conclusions)

$Ni_{36.3}Co_{25}Nb_xW_{(23.7-x)}B_{15}$  ( $x=2-10$ ) bileşimindeki alaşımlar hazırlanarak, cam oluşturma kabiliyetleri, ısıl kararlılıkları ve mikrosertlik özellikleri incelenmiştir. Alaşımlara Nb ilavesiyle  $T_1$  sıcaklıkları önemli oranda azalırken,  $T_g$  ve  $T_x$  sıcaklıkları artmıştır. Her üç alaşımların cam oluşturma kabiliyetleri 1 mm olduğu belirlenmiştir. Cam oluşturma kabiliyetindeki artışın hesaplanan  $T_{rg}$  ve  $\gamma$  parametreleriyle orantılı olmadığı gözlemlenmiştir. Bunun nedeninin, artan Nb miktarının, eriyik içerisinde nano boyuttaki  $Ni_3(W, Nb)$  fazının çökmesine yol açtığı yapılan analizlerde belirlenmiştir. Ayrıca alaşımların mikro sertlik ölçümlerinde önemli bir değişiklik görülmemiştir.

Bu çalışma, yüksek tokluk ve sertliğe sahip MMK malzemeleri üretmek için Ni-Co-W-B metalik cam alaşımının bir öncül malzeme olarak kullanım potansiyelini artırmak için cam oluşturma yeteneğini geliştirmeyi amaçlamaktadır. Başlangıçta 0,5 mm'lik cam oluşturma yeteneği ve 909 K'lik  $T_x$  sıcaklığı sergileyen  $Ni_{36.3}Co_{25}W_{23.7}B_{15}$  alaşımı, Nb ile modifiye edilerek cam oluşturma yeteneği 1 mm'ye çıkarılmış ve  $T_x$  sıcaklığı 942 K'ye çıkarılmıştır. Hem camlaşma kabiliyetindeki hem de  $T_x$  sıcaklığındaki bu olumlu gelişmeler Ni-Co-W-B alaşım ailesinin yüksek tokluk ve yüksek sertliğe sahip MMK malzemelerin üretiminde öncül olarak kullanım potansiyelini arttırmıştır.

#### Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 214M111 proje numarasıyla desteklenmiştir.

#### Kaynaklar (References)

1. Klement, W., Willen, R. H., Duwez, P., Non-crystalline structure in solidified gold-silicon alloys, *Nature*, 187 (4740), 869-870, 1960.
2. Inoue, A., Takeuchi, A., Recent development and application products of bulk glassy alloys, *Acta Material*, 59 (6), 2243-2267, 2011.
3. D., C., Hofmann, Andersen, L., M., Kolodziejcka, J., Roberts, S., N., Borgonia, J., P., Johnson, William, L., Kenneth, S., V., Kennett, A. Optimizing bulk metallic glasses for robust, highly wear-resistant gears, *Advanced Engineering Materials*, 19 (1), 1-10, 2017.
4. Lindroos, V., K., Talvitie, M. J., Recent advances in metal matrix composites, *Journal of Materials Processing Technology*, 53, 273-284, 1995.
5. Suresh Kumar, S., Thirumalai Kumaran, S., Velmurugan, G., Perumal, A., Sekar, S., Uthayakumar, M., Physical and mechanical properties of various metal matrix composites: A review, *Materials Today: Proceedings*, 50 (5), 1022-1031, 2022.
6. Şenel M.C., Taşkın A., Demir M., Gürbüz M., The effect of induction heat treatment on mechanical and tribological properties of Si3N4 and graphene reinforced Al6061 matrix composites, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 39 (3), 1567-1581, 2024.
7. Rashid, A. L., Muhammad, J., Asif, A. L., Aqib, M. K., Material characteristics and machinability of metal matrix composite materials: A critical review on recent advances and future perspectives, *Measurement*, 242 (B), 115839, 2025.
8. Jayalakshmi, S., Arvind Singh, R., Gupta, M., Metallic glasses as potential reinforcements in al and mgmatrices: A Review, *Technologies*, 6 (2), 1-17, 2018.
9. Fornell, J., Gonzalez, S., Rossinyol, E., Surinach, S., Enhanced mechanical properties due to structural changes induced by devitrification in Fe-Co-B-Si-Nb bulk metallic glass, *Acta Materialia*, 58 (18), 6256-6266, 2010.
10. Han, J., Wang, C., Kou, S., Liu, X., Thermal stability, crystallization behavior, vickers hardness and magnetic properties of Fe-Co-Ni-Cr-Mo-C-B-Y bulk metallic glasses, *Trans. Nonferrous Met. Soc.*, 23 (1), 148-155, 2013.
11. Hitit, A., Geçgin, M., Öztürk, P., effect of annealing on microstructure and microhardness of Co-Fe-Ni-Ta-B-Si bulk metallic glass, *J. Mater. Sci. Technol.*, 31 (2), 148-152, 2015.
12. Hitit, A., Yazıcı, Z. Ö., Şahin, H., Öztürk, P., Aşgın, A. M. Hitit, B., A novel Ni-based bulk metallic glass containing high amount of tungsten and boron, *Journal of Alloys and Compounds*, 807, 151661, 2019.

13. Zakharev, Z. Zlateva, R., Petrov, K., Microhardness and high-temperature oxidation stability of CoWB, *Journal of the Less Common Metals*, 117 (1-2), 129-133, 1986.
14. A. Hitit, Z. O. Yazici, P. Öztürk, H. Sahin, A. M. Asgin, B. Hitit, A Ni-CoWB composite developed by devitrification of Ni-Co-W-B bulk metallic glass, *Materials Science & Engineering A*, 803, 140479, 2021.
15. Sohrabi, N. Jhabvala, J. Logé, R. E., Additive manufacturing of bulk metallic glasses process, challenges and properties: A Review, *Metals*, 11 (8), 1-59, 2021.
16. Sohrabi, N., Jhabvala, J., Kurtuldu, G., Frison, R., Parrilli, A., Stoica, M., Neels, A., Löffler, J. F., Logé, R. E., Additive manufacturing of a precious bulk metallic glass, *Applied Materials Today*, 24, 101080, 2021.
17. Lu, Y., Huang, Y., Wu, J., Laser additive manufacturing of structural graded bulk metallic glass, *Journal of Alloys and Compounds*, 766, 506-510, 2018.
18. Işılak C., Ünal G., Yılmazoğlu G., Üzel U., Durgut R., Uğuz A., Joining AlSi10Mg plates produced by additive manufacturing with MIG method and optimization of welding parameters, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University* 40 (1), 573-586, 2025.
19. Li, N., Zhang, J., Xing, W., Ouyang, D., Liu, L., 3Dprinting of Fe-based bulk metallic glass composites with combined high strength and fracture toughness, *Materials and Design*, 143, 285-296, 2018.
20. Sohrabi, N. Schawe, J. E.K. Jhabvala, J., Löffler, J. F., Logé, R. E., Critical crystallization properties of an industrial grade Zr-based metallic glass used in additive manufacturing, *Scripta Materialia*, 199, 113861, 2021.
21. Lu, Z.P., Tan, H., Li, Y., Ng, S.C., The correlation between reduced glass transition temperature and glass forming ability of bulk metallic glasses, *Scripta mater*, 42, 66-673, 2000.
22. Lu, Z.P., Lia, Y., Ng, S.C., Reduced glass transition temperature and glass forming ability of bulk glass forming alloys, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 270, 103-114, 2000.
23. Lu, Z.P., Liu, C.T., A new glass-forming ability criterion for bulk metallic glasses, *Acta Materialia*, 50, 3501-3512, 2002.
24. Brazhkin, V.V., Lyapin, A.G., Hemley, R.J., Harder than diamond: Dreams and reality, *Philosophical Magazine*, 82 (2), 231-253, 2002.
25. Liang, J. C., Li, X. W., Wu, J. C., Wei, Z. X., Wang, X. L., First-principles study on structural stability, electronic structure and mechanical properties of VB group transition metal tungsten alloys W-TM (TM=V, Nb, Ta), *Materials Today Communications*, 38, 107920, 2024.
26. Wang, T., Yang, X., Li, Q., Effect of Cu and Nb additions on crystallization kinetics of Fe<sub>80</sub>P<sub>13</sub>C<sub>7</sub> bulk metallic glasses, *Thermochimica Acta*, 579, 9-14, 2014.
27. Mukherjee, S., Schroers, J. Zhou, Z., Johnson, W.L., Rhim, W. K., Viscosity and specific volume of bulk metallic glass-forming alloys and their correlation with glass forming ability, *Acta Materialia*, 52, 3689-3695, 2004.
28. Evenson, Z., Raedersdorf, S., Gallino, I. Busch, R., Equilibrium viscosity of Zr-Cu-Ni-Al-Nb bulk metallic glasses, *Scripta Materialia*, 63, 573-576, 2010.
29. Samavatian, M. Gholamipour, R. Samavatian, V. Farahani, F., Effects of Nb minor addition on atomic structure and glass forming ability of Zr<sub>55</sub>Cu<sub>30</sub>Ni<sub>5</sub>Al<sub>10</sub> bulk metallic glass, *Materials Research Express*, 6 (6), 1-17, 2019.
30. Suoa Z.Y., Qiua K., Q. Lia Q., F. Rena Y., L. Hu, Z., Q., Effect of Nb on glass forming ability and plasticity of (Ti-Cu) based bulk metallic glasses, *Materials Science and Engineering A* 527, 2486-2491, 2010.
31. Caoa, G. Lua, K. Liub, G. Zonga, H. Balab, H. Zhang, B., Improving the glass-forming ability and the plasticity of Zr-Cu-Al bulk metallic glass by addition of Nb, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 513, 105-110, 2019.
32. Jiao, W., Wang, X. L., Lan, S., Pan, S. P., Lu, Z. P., Propensity of bond exchange as a window into the mechanical properties of metallic glasses, *Applied Physics Letters*, 106, 061910, 2015.
33. Zhang, X., Lai, L., Xiao, S., Zhang, H., Zhang, F., Li, N., Guo, S., Effect of W on the thermal stability, mechanical properties and corrosion resistance of Fe-based bulk metallic glass, *Intermetallics*, 143, 107485, 2022.
34. Ma, L., Wang, L., Zhang, T., Inoue, A., Effect of Nb addition on glass-forming ability, strength, and hardness of Fe-B-Zr amorphous alloys, *Materials Research Bulletin*, 34 (6), 915-920, 1999.