



Superelastic anisotropy and meso-scale interface regions in textured NiTi sheets

Çağatay Elibol*

Department of Materials Science and Technology, Faculty Science, Turkish-German University, Istanbul, 34820, Turkey

Highlights:

- Analyses of localized deformation using digital image correlation
- Characterization of meso-scale martensite/austenite interface transition regions
- Interaction between superelastic anisotropy, crystallographic texture, localized deformation and specimen geometry

Keywords:

- Crystallographic texture
- Superelastic anisotropy
- SMAs
- DIC
- Localization of SIMT

Article Info:

Research Article
Received: 18.06.2020
Accepted: 08.04.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.754732

Acknowledgement:

The author gratefully thanks Prof. Dr. Martin F.-X. Wagner for the fruitful discussions and valuable comments.

Correspondence:

Author: Çağatay Elibol
e-mail: elibol@tau.edu.tr
phone: +90 542 617 1785

Graphical/Tabular Abstract

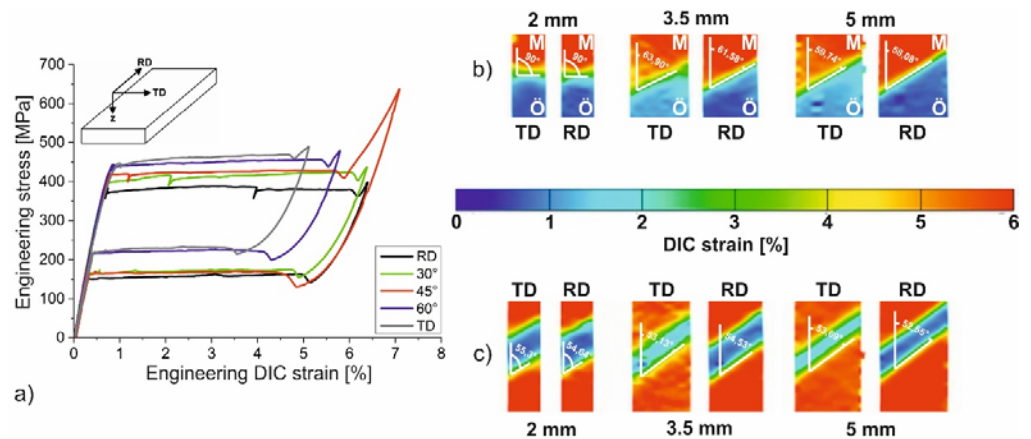


Figure A. (a) Engineering stress-strain curves of band specimens with varying orientation in relation to the rolling direction (RD) and the transverse direction (TD) showing superelastic anisotropic behavior; DIC-local surface strain fields for different widths and orientations of specimens and the formed meso-scale martensite-austenite interfaces shortly after the start of martensitic phase transformation (b) and shortly before the completion of martensitic phase transformation (c)

Purpose: The aim of this study to characterize the effects of crystallographic texture and specimen geometry on the mechanical behavior and on the localized deformation (formation and growth of martensite bands) of polycrystalline NiTi superelastic sheets.

Theory and Methods:

In this study, the mechanical behavior of band specimens cut from the textured NiTi sheet along different directions with respect to the rolling direction was analyzed under uniaxial tensile loading. During the stress-induced martensitic transformation (SIMT), local surface strain fields are recorded by in-situ optical technique known as digital image correlation (DIC) in order to characterize meso-scale interface regions formed during the localization of the deformation in detail.

Results:

The results of the present study show that the mechanical behavior of the material has a clear directional dependency and that the orientation/texture effect on the macroscopic mechanical characteristics is reduced with decreasing width/thickness ratio of the specimen. Furthermore, it is observed that the martensite/austenite interface formed in localized deformation has different angles to the load direction for different sample geometries and orientations and that the interface angle changes continuously during SIMT.

Conclusion:

The material exhibits superelastic anisotropic behavior depending on the crystallographic texture. Continuing change of the interface angle cannot be directly explained by texture effects or Schmid coefficient. This may be pure mechanically caused by additional bending moments affecting the material. The results provide new insights into the interaction of crystallographic texture, SIMT characteristics, superelastic anisotropy and specimen geometry which is essential for engineering applications of NiTi.



Tekstüre NiTi levhalarda süperelastik anizotropi ve mezo ölçekli arayüzey bölgeleri

Çağatay Elibol*

Türk-Alman Üniversitesi, Fen Fakültesi, Malzeme Bilimi ve Teknolojileri Bölümü, 34820, Beykoz İstanbul, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Dijital görüntü korelasyonu ile deformasyon lokalizasyonu analizi
- Mezo ölçekli martenzit/östenit arayüzey geçiş bölgesi karakterizasyonu
- Süperelastik anizotropi, kristalografik tekstür, deformasyon lokalizasyonu ve geometri ilişkisi

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi
Geliş: 18.06.2020
Kabul: 08.04.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.754732

Anahtar Kelimeler:

Kristalografik tekstür,
süperelastik anizotropi,
Şekil hafızalı alaşımlar,
DIC,
SIMT lokalizasyonu

ÖZ

NiTi şekil hafızalı alaşımların tipik üretim yöntemleri arasında, malzemede kristalografik tekstüre ve süperelastik anizotropik davranışa yol açan çekme ve haddelme işlemleri bulunmaktadır. Bu nedenle, yöne bağlı malzeme özelliklerinin ve altta yatan mekanizmaların derinlemesine araştırılarak anlaşılması; farklı mekanik özellikler gerektiren uygulamalar için uygun malzeme tekstürü oluşturabilmek adına üretim prosesinin tasarlanmasına yardımcı olacaktır. Süperelastik NiTi'nin, çekme yüklenmesi altında lokalize deformasyon sergilemektedir. Gerilim kaynaklı indüklenmiş martenzitik faz dönüşümü (SIMT) esnasında, makroskobik deformasyon sadece, tamamiyle martenzitik ve tamamiyle östenitik bölgeler arasında oluşan mezo ölçekli arayüzey bölgelerinde gerçekleşmektedir. Bu yüzden, lokalize deformasyonda bu geçiş bölgelerinin detaylı karakterizasyonu teknik açıdan kritik bir öneme sahiptir. Bu çalışma kapsamında, kristalografik tekstürün ve numune geometrisinin polikristalin NiTi süperelastik sac levhaların mekanik davranışı ve lokal deformasyon karakteristiği üzerine etkisi sistematik bir şekilde analiz edilmiştir. Dijital görüntü korelasyonu (DIC) tekniği ile lokal yüzey gerinim alanları deformasyon sırasında ölçülerek, arayüzey geçiş bölgeleri detaylıca karakterize edilmiştir. Malzemenin mekanik davranışının belirgin şekilde yöne bağlı olduğu ve numune genişliği/kalınlığı oranının düşmesiyle oryantasyon/tekstür etkisinin azaldığı saptanmıştır. Tekstür ve geometriye bağlı olarak martenzit/östenit arayüzeyinin farklı açılarda oluştuğu ve faz dönüşümü süresince değiştiği gözlenmiştir. Sonuçlar, faz dönüşüm özellikleri, tekstür, süperelastik anizotropi ve numune geometrisi arasındaki, NiTi malzemenin mühendislik uygulamaları açısından büyük öneme sahip etkileşime dair yeni anlayışlar kazandırmaktadır.

Superelastic anisotropy and meso-scale interface regions in textured NiTi sheets

H I G H L I G H T S

- Analyses of localized deformation using digital image correlation
- Characterization of mesoscale martensite/austenite interface transition regions
- Interaction between superelastic anisotropy, crystallographic texture, localized deformation and specimen geometry

Article Info

Research Article
Received: 18.06.2020
Accepted: 08.04.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.754732

Keywords:

Crystallographic texture,
superelastic anisotropy,
SMAs,
DIC,
localization of SIMT

ABSTRACT

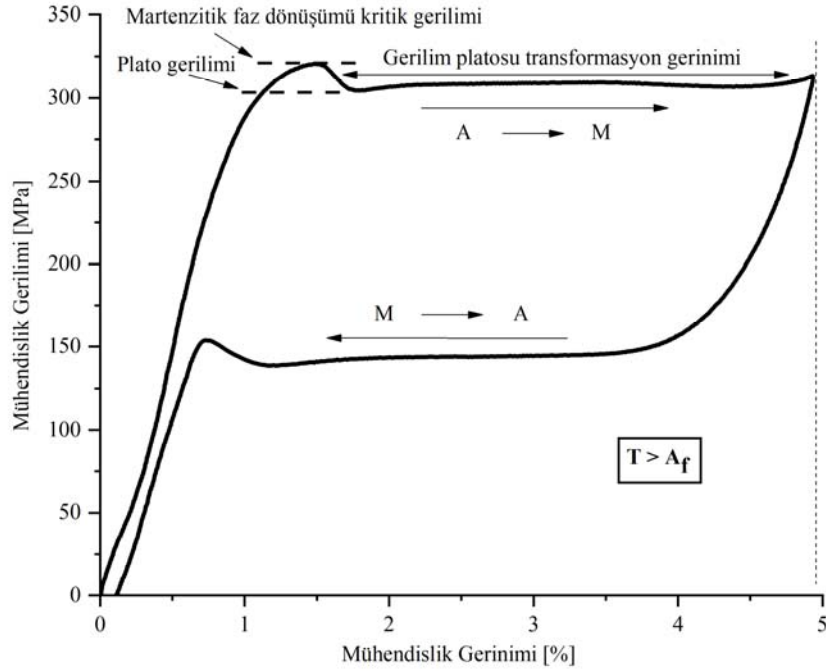
Typical manufacturing processes of NiTi shape memory alloys (SMAs) involve drawing and rolling operations leading to crystallographic texture and superelastic anisotropic behavior. Therefore, an in-depth understanding of directional material properties and underlying mechanisms may help to guide the production process to create suitable textures for applications requiring different mechanical properties. During stress-induced martensitic transformation (SIMT), macroscopic deformation occurs only in the meso-scale interface regions between fully martensitic and fully austenitic regions. In case of localized deformation, the detailed characterization of these transition regions is therefore of crucial practical importance. In this study, the effects of crystallographic texture and specimen geometry on mechanical/localized deformation behavior of polycrystalline NiTi superelastic sheets were systematically analyzed. Local surface strain fields are recorded during deformation by digital image correlation (DIC) in order to characterize interface regions in detail. The results show that the mechanical behavior has a clear directional dependency, and that the orientation/texture effect is reduced with decreasing width/thickness ratio of specimen. For different sample geometries and orientations, martensite/austenite interface has different angles which changes during SIMT. The results provide new insights into the interaction of crystallographic texture, SIMT characteristics, superelastic anisotropy and specimen geometry which is essential for engineering applications of NiTi.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Şekil hafızalı alaşımlar (İng. shape memory alloys, SMA), ısı veya mekanik aktivasyona maruz bırakıldıklarında deformasyon öncesi şekillerine geri dönebilme / orijinal şekillerini hatırlama yeteneğine sahip fonksiyonel malzemelerdir. Temel olarak, kristalografik açıdan tersinir (termoelastik) martenzitik faz dönüşümüne dayanan iki tür benzersiz şekil hafıza davranışı söz konusudur [1-3]: *Şekil Hafıza Etkisi* ve *Süperelastisite*. Şekil Hafıza Etkisi, martenzitik faz dönüşümünün yüksek sıcaklık fazı östenit bölgesinden soğutma yolu ile ısı olarak indüklenmesi ve akabinde deformasyonun martenzitik ikiz sınırlarının hareketi neticesinde gerçekleşmesi esasına dayanmaktadır [4-5]. Deformasyon sonrası, kritik dönüşüm sıcaklığının (östenit bitiş sıcaklığı) üzerine malzemenin ısıtılması ile orijinal şekle dönüş sağlanmaktadır. Süperelastisite ise, östenit fazından gerilimle tetiklenmiş, tersinir martenzitik faz dönüşümüne (İng. stress-induced martensitic transformation, SIMT) dayanmaktadır ve alaşıma östenit bitiş sıcaklığının (A_f) üzerinde (östenit fazda) iken uygulanan deformasyon sonucu martenzitik faza geçiş sonrası deformasyonun ortadan kalkması ile malzemenin orijinal şeklini, herhangi bir sıcaklık değişimi olmaksızın geri kazanabilme yeteneğini ifade etmektedir [6, 7]. Eş atomlu bileşimli süperelastik NiTi şekil hafızalı alaşımlar, sadece malzemeye uygulanan çekme gerilmesinin kaldırılması ile %10'a kadar gerinimi geriye döndürme yeteneğine sahiptir [8, 9]. Tipik süperelastik gerilim-gerinim

eğrisi, çekme deformasyonu esnasında genellikle düz bir gerilim platosu sergiler (Şekil 1). Bu nedenle, süperelastisite lineer olmayan karakterini vurgulamak amacı ile İngilizce literatürde *pseudoelasticity* olarak da adlandırılmaktadır. Şekil hafızalı alaşımlar; şekil hafıza etkisi, süperelastiklik, yüksek mukavemet, yorulma dayanımı, biyouyumluluk ve korozyon direnci gibi üstün fonksiyonel özellikleri ile biyomedikal (kemik doku mühendisliği, stentler, diş ve ortopedik implantlar vb.) [10, 11], robotik ve aktüatör (eyleyici)/sensör bazlı endüstriyel uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadır [12, 13]. NiTi şekil hafızalı alaşımların, özellikle çekme gerilimi altında *deformasyon lokalizasyonu* (martenzit bant oluşumu ve büyümesi) sergilediği bilinmektedir [14-16]. Bu davranış, düşük alaşımlı ferritik çeliklerde [17] gözlemlenen tipik Lüders bant oluşumuna benzerliği ile *Lüders benzeri makroskobik deformasyon modu* olarak adlandırılabilir [18-20]. Deformasyonun lokalize olması durumunda, malzemede meydana gelen lokal ve nominal gerilim ve gerilimler birbirlerine göre büyük farklılıklar gösterdiğinden, lokalize /heterojen deformasyonun [9] ve malzemenin deformasyon davranışına etkileyen parametrelerin (mikroyapı, tekstür, sıcaklık, deformasyon hızı vb.) derinlemesine incelenmesi teknik açıdan büyük bir öneme sahiptir [21-23].

Şekil hafızalı alaşımların çoğu mühendislik uygulamalarında levha, çubuk veya boru formunda, üretim prosesi kaynaklı şiddetli tekstüre edilmiş çok kristalli malzemeler kullanılmaktadır. Bu nedenle, NiTi alaşımında mekanik ve



Şekil 1. Gerilim kaynaklı indüklenmiş martenzitik faz dönüşümüne (SIMT) dayanan östenitik NiTi şekil hafızalı alaşımların çekme yüklenmesi altında sergilediği tipik süperelastik/psödoelastik mekanik davranış (Typical superelastic/pseudoelastic mechanical behavior of austenitic NiTi under tension in connection with SIMT)

termomekanik anizotropi detaylı bir şekilde literatürde incelenmiş ve çok kristalli NiTi şekil hafızalı alaşımında tercihli tane yönelmesinin (tekstür), malzemede meydana gelen faz dönüşümünün ve gerilim-gerinim anizotropisinin başlıca nedeni olarak değerlendirilebileceği ortaya konmuştur [21, 22, 24]. Oluşan kristalografik tekstür, süperelastik anizotropiyi beraberinde getirmekte ve böylelikle haddelenmiş çok kristalli NiTi levhanın farklı yönlerde farklı makroskobik mekanik davranış sergilemesine sebep olmaktadır [25]. Kristalografik tekstürün, malzemenin *makroskobik* mekanik özelliklerine (örn. martenzitik dönüşüm başlangıç gerilimi, dönüşüm/transformasyon gerinimi) etkisi detaylıca analiz edilmiş olmasına rağmen, bu konuda sınırlı sayıda çalışma bulunmakla beraber, malzemenin *lokal* deformasyon davranışı (lokal gerinim dağılımı) – martenzit bant oluşumu/büyümesi ve martenzit/östenit arayüzünde oluşan lokal gerinim alanı – üzerine kristalografik tekstür etkisi yeterince karakterize edilmemiş / anlaşılammıştır.

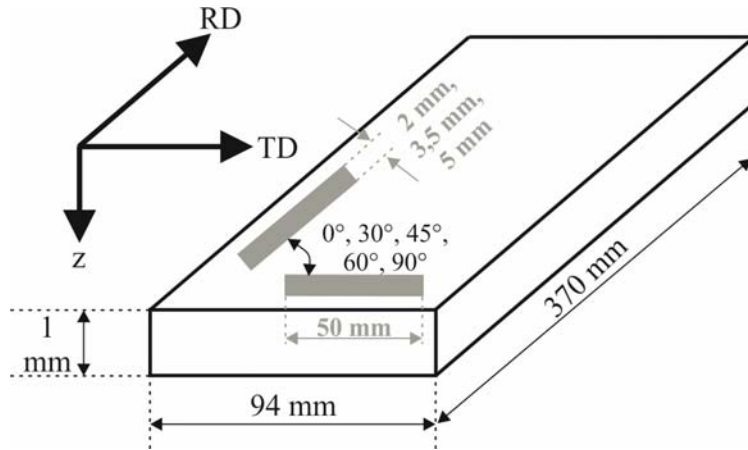
Bu çalışmada, haddeleme sonucu ön-tekstüre edilmiş, süperelastik (östenitik) NiTi şekil hafızalı levhadan hadde yönüne göre farklı yönlerde alınan bant numunelerin makroskobik mekanik davranışı ve (martenzit bant oluşumu ve büyümesi neticesinde meydana gelen deformasyon lokalizasyonunun ayrıntılı olarak karakterize edilebilmesi adına) in-situ optik bir ölçüm yöntemi olan dijital görüntü korelasyonu (İng. digital image correlation, DIC) vasıtası ile lokal yüzey gerinim alanları, numuneler çekme testlerine tabi tutularak sistematik olarak analiz edilmiştir. Farklı numune yönelmelerinin kristalografik tekstüre bağlı olarak, gerilim-gerinim eğrisinin; plato gerilimi, martenzitik faz dönüşümü başlangıç gerilimi/gerinimi, total transformasyon gerinimi/plato uzunluğu gibi karakteristikleri ve martenzitik faz dönüşümü esnasında oluşan *mezo ölçekli* martenzit/östenit arayüzey geçiş bölgesi şekli ve açısı üzerine etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Bunun yanı sıra, numune geometrisinin (genişliğinin) malzemenin makroskobik mekanik davranışı ve deformasyon lokalizasyonu üzerine etkisi irdelenmiştir. Böylelikle süperelastik, çok kristalli NiTi şekil hafızalı levhada, faz

dönüşüm özellikleri, kristalografik tekstür, süperelastik anizotropi ve numune geometrisi arasındaki etkileşim ortaya konularak tartışılmıştır.

2. DENEYSEL METOT (EXPERIMENTAL METHOD)

Bu çalışmada, *Memry Corp.* firmasından temin edilen 50,9 at.-% Ni nominal alaşım kimyasal bileşimine sahip, 1 mm kalınlığında, 370 mm uzunluğunda ve 94 mm genişliğinde haddelenmiş çok kristalli NiTi sac levha kullanılmıştır. Sac levhadan, hadde yönüne (RD) göre farklı yönlerde (0°, 30°, 45°, 60° ve 90° (TD)) ve farklı genişliklerde (2 mm, 3,5 mm ve 5 mm) numune uzunluğu 50 mm, kalınlığı ise 1 mm olacak şekilde bant numuneler su jeti yöntemi ile kesilerek alınmıştır (Şekil 2).

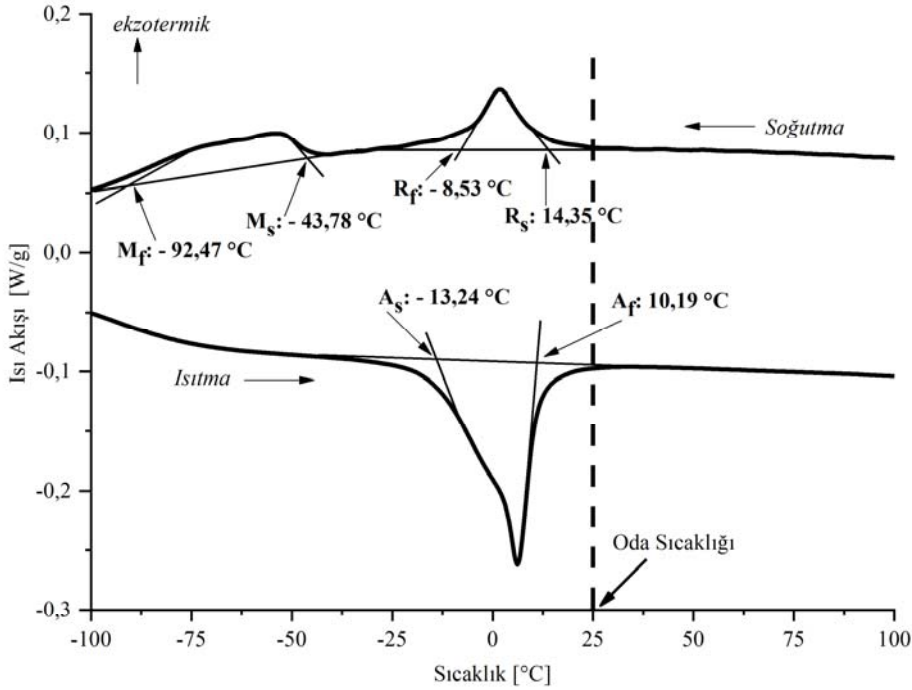
Karakteristik faz dönüşüm (transformasyon) sıcaklıklarının belirlenmesinde, diferansiyel tarama kalorimetresi (İng. Differential Scanning Calorimetry, DSC) kullanılmıştır. Sabit bir ısıtma/soğutma hızında (10K/dk) ve ASTM-2004-03 [26] standardı doğrultusunda uygulanan DSC testlerinde, numune öncelikle oda sıcaklığından 150 °C'ye ısıtılarak 3 dakika beklendikten sonra -150 °C'ye soğutulmuştur. Yeni bir 3 dakikalık beklemin ardından numune tekrar 150 °C'ye ısıtılmıştır. Malzeme, ısıtma anında tek basamak faz dönüşümü sergilerken (martenzit B19' → östenit B2), soğutma esnasında ise kübik B2 kristal yapılı östenit fazı, romboedrik R martenzitik ara fazına dönüştükten sonra monoklinik B19' martenzit dönüşümü (gerçekleşmektedir) (Şekil 3). Bu tipik çift basamaklı martenzitik faz dönüşümü, yapıda oluşan Ni açısından zengin, yarı kararlı Ti_3Ni_4 partiküllerinin hem alaşım bileşimi hem de yapıdaki iç gerilmeler bağlamında matriste meydana getirdiği homojensizliklere bağlanmaktadır [27, 28]. Karakteristik faz dönüşüm sıcaklıkları, DSC eğrisinde görülen ekzo- ve endotermik pikler üzerinden belirlenmiş olup, Şekil 3'te verilmiştir. Östenit başlangıç (A_s) ve bitiş sıcaklığı (A_f) - 13,24 °C ve 10,19 °C olarak ölçülmüş olup, bu çalışma kapsamında tüm mekanik testlerin gerçekleştirildiği oda sıcaklığında malzeme östenit fazındadır ve dolayısıyla ideal bir süperelastik (psödoelastik) davranış sergilemektedir.



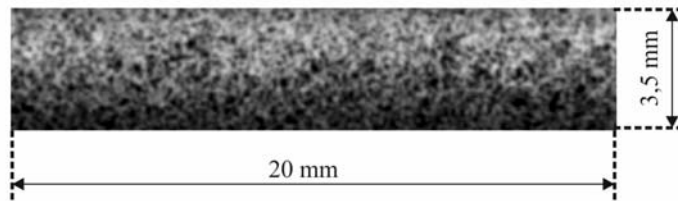
Şekil 2. Hadde yönüne (RD) göre farklı yönlerde NiTi sac levhadan alınan bant numune geometrileri (Geometries of band specimens taken from the NiTi sheet in various angles to RD)

Tek eksenli çekme testleri, *Zwick Allround-Line 20 kN* konvansiyonel çekme/basma test cihazında pozisyon kontrolü altında oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Malzemenin termomekanik davranışı üzerine martenzitik faz dönüşümünün *gizli ısı* (İng. latent heat / self-heating of the specimen) etkisini minimize etmek adına 10^{-4} s^{-1} gibi oldukça düşük bir deformasyon hızı tercih edilmiştir. 1 mm kalınlığındaki çok kristalli NiTi sac levhadan, hadde yönüne (RD) göre 0° , 30° , 45° , 60° ve 90° (TD) yönlerde alınan, 2 mm, 3,5 mm, 5 mm genişliğe ve 20 mm serbest uzunluğa sahip bant numuneler çekme testine tabi tutulmuştur. Bu testler esnasında, temassız in-situ optik dijital görüntü korelasyonu (DIC) tekniği ile yüzey yer değiştirmeleri ve gerinimleri ölçülmüştür. Tam alan yüzey yer değiştirme ve deformasyon analizine imkân veren bu yöntem, numune yüzeyinin deformasyon neticesinde değişen konum koordinatlarının tespiti ilkesine dayanmaktadır. Farklı zamanlardaki (deformasyon öncesi ve esnasında) numune yüzey konum koordinatlarının kıyaslanması neticesinde yer değiştirme alanları belirlenebilmekte ve oluşan yer

değiştirme gradyanları üzerinden lokal yüzey gerinimleri matematiksel olarak kolaylıkla hesaplanabilmektedir [29, 30]. DIC tekniği, böylelikle deformasyon sırasında meydana gelen gerinim lokalizasyonun gözlenmesine olanak sağladığından, martenzitik bant oluşumu ve büyümesine eşlik eden *mezo ölçekli* martenzit/östenit arayüzeyi geçiş bölgesinin karakterize edilmesi adına çok uygundur. Tek bir CCD kamera ile numune yüzeyinde iki boyutta yer değiştirmeler belirlenebilirken (2D-DIC), ikinci bir CCD kamera kullanımı sonucu üç boyutta tespit mümkün olmaktadır (3D-DIC). Numune yüzeyindeki konum (piksel) koordinatlarının tespit ve takip edilebilmesi için numune yüzeyinde rastgele gri seviyesi yoğunluk dağılımı sağlanacak şekilde benekleme işlemi gerçekleştirilmelidir. Bu amaçla, basit bir boya püskürtücü yardımı ile numune yüzeyine siyah ve beyaz boya püskürtülmek suretiyle NiTi bant numune yüzeyinde oluşturulan tekrarsız, isotrop ve yüksek kontrastlı desen örnek olarak Şekil 4'te gösterilmiştir. Bu çalışmada gerçekleştirilen çekme testlerinde, 2D-DIC yüzey görüntüleri optik eksenli numune



Şekil 3. NiTi sac levha numuneye ait DSC eğrisi ve karakteristik faz dönüşüm sıcaklıkları (DSC thermogram and characteristic phase transformation temperatures of NiTi sheet specimen)



Şekil 4. 3,5 mm kalınlığındaki NiTi bant numune yüzeyinde yapay olarak üretilmiş tipik, yüksek kontrastlı, tekrarsız DIC benek deseni (Surface of 3.5 mm wide NiTi band sample with a typical random DIC speckle pattern produced artificially)

yüzeyine dik şekilde konumlanmış, 2358x1728 piksel çözünürlüğe ve 1 Hz kare hızına sahip bir CCD kamera yardımı ile kaydedilmiştir. DIC yöntemine entegre çalışan ARAMIS yazılım paketi [31] ile deformasyon öncesi ve esnasında kaydedilen görüntüler proses edilerek, sanal ekstansometre analizi uygulanmak suretiyle yüzey gerinim alanları ve lokal deformasyon ölçümü yaklaşık 10 μ m/piksel gerinim çözünürlüğü ile hassas bir şekilde gerçekleştirilmiştir.

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

3.1. Kristalografik Tekstürün Mekanik Davranışa Etkisi (Textur Effect on Mechanical Behavior)

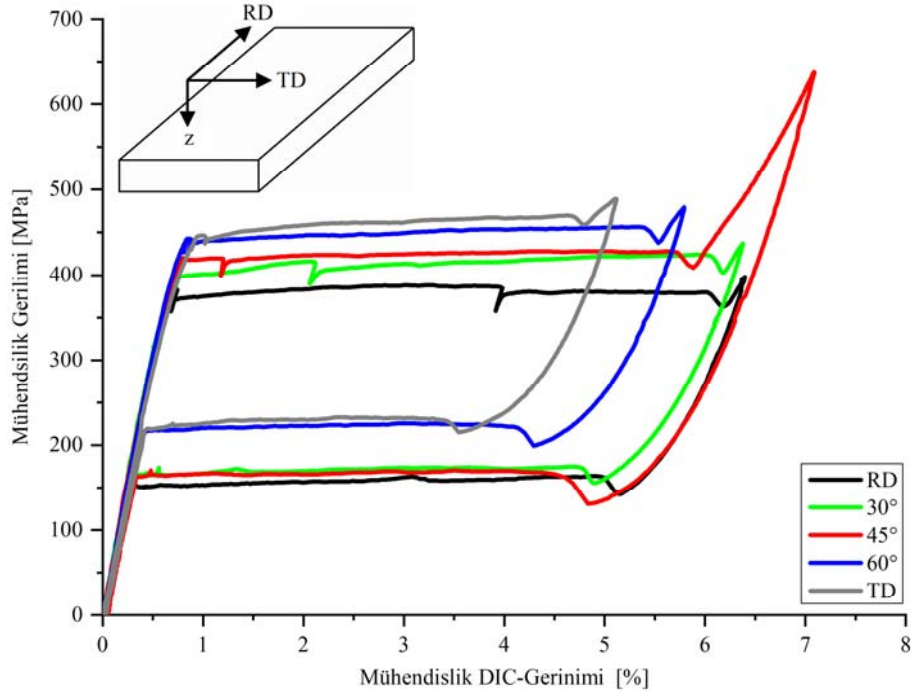
Haddeleme sonucu oluşan hadde tekstürünün malzemenin mekanik davranışı (makroskobik gerilim-gerinim eğrisi) ve lokalize olan deformasyon/martenzitik faz dönüşümü üzerine etkisini irdelemek adına, 1mm kalınlığındaki süperelastik NiTi sac levhadan haddeleme yönüne göre Şekil 2’de gösterilen açılarda 5 mm genişlikte numuneler alınarak, 10⁻⁴ s⁻¹ deformasyon hızında tek eksenli çekme testlerine tabi tutulmuştur. Şekil 5’te elde edilen mühendislik gerilim-gerinim eğrileri verilmiştir. Süperelastik *anizotropik* malzeme davranışı açıkça gözlenmektedir [8, 21, 25, 32]: Farklı numune oryantasyonları, farklı plato gerilimi (martenzitik faz dönüşüm / transformasyon gerilimi) / plato uzunluğu (transformasyon gerinimi) değerlerine yol açmaktadır. Artan açı ile beraber gerilim platosu sistematik

bir şekilde kısalmakta ve martenzitik faz dönüşümünün gerçekleştiği plato gerilimi artış göstermektedir: 90° için plato gerilim değeri, 0°’de gözlenen plato gerilimine kıyasla yaklaşık 80 MPa daha yüksek iken, transformasyon gerinimi yaklaşık %1,7 daha düşüktür.

Tablo 1’de görüldüğü üzere, hadde yönüne transvers (90°) doğrultuda (TD) ölçülen, östenit-martenzit faz dönüşümü başlangıcındaki ortalama makroskobik gerinim değeri diğer doğrultularda elde edilen gerinim değerlerine kıyasla en yüksektir. TD numunelerde transformasyon başlangıcındaki daha yüksek makroskobik gerinim, haddeleme yönünde tercihli tane yönelmesine dik doğrultuda alınan bu numunelerde oluşan elverişsiz kristalografik tekstür göz önüne alındığında anlaşılır bir durum olarak ortaya çıkmaktadır.

Tablo 1. Martenzit faz dönüşümü başlangıcındaki ortalama gerinim değerleri
(Averaged macroscopic strains at the beginning of SIMT)

| Numune Oryantasyonu (Tekstür) | Martenzit Faz Dönüşümü Başlangıcındaki Ortalama Makroskobik Gerinim [%] |
|----------------------------------|---|
| RD | 0,70 |
| 30 | 0,76 |
| 45 | 0,77 |
| 60 | 0,85 |
| TD | 1 |



Şekil 5. Hadde yönüne (RD) göre farklı oryantasyonlardaki 5 mm’lik bant numunelere ait mühendislik gerilim-gerinim eğrileri; TD: hadde yönüne dik yön

(Engineering stress-strain curves of 5 mm wide specimens with varying orientation in relation to the rolling direction (RD); TD: transverse direction)

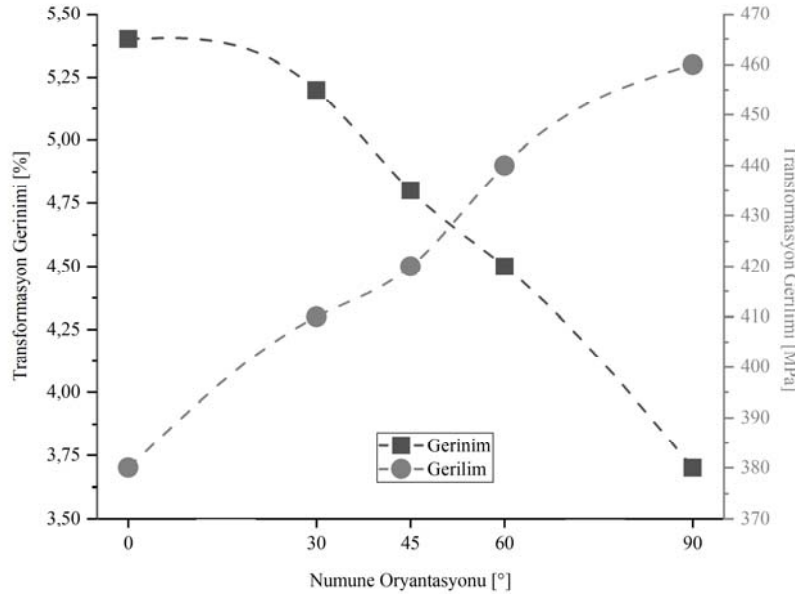
NiTi ikili alaşım sisteminde, martenzit ve östenit fazları arasındaki kafes oryantasyon ilişkisine bağlı olarak tek östenit ana fazından toplamda 12 adet eşdeğer martenzit varyantı (farklı oryantasyona sahip her bir birim hücre) meydana gelebilmektedir. Östenit fazının elastik deformasyonu sonrası, öncelikli olarak yüklemeye yönüne göre en elverişli, kafes distorsiyon enerjisini minimize edecek şekilde oryante olmuş ve mümkün olan en yüksek transformasyon gerinimi verecek ikizlenmiş yapıdaki martenzit varyantları gerilim platosu boyunca oluşmaktadır [33]. Yük boşaldığında ise tüm martenzit varyantları östenit fazının yüksek simetrisi nedeni ile orijinal östenit oryantasyonuna dönerler [1]. Haddeleme işlemi esnasında malzemede tane yapısı hadde yönünde uzamaktadır. Böylelikle birim uzunluk başına tane sınırları sayısı transvers (hadde yönüne 90°) doğrultuda, hadde yönüne kıyasla (0°) oldukça fazladır. Haddeleme esnasında yapıdaki taneler kolay deforme olacakları ve yüksek gerinim değeri sağlayacakları şekilde rotasyona ve şekil değişimine uğrayarak belli hadde tekstürlerinin oluşmasına sebep olurlar. Literatürde, NiTi sac levha malzemeler için haddeleme yönünde yüksek geri alınabilir transformasyon gerinimi sağlayan, elverişli bir oryantasyon olan tipik $\{110\}$ hadde tekstürü raporlanmıştır [25, 34, 35]. Şekil 6'da çekme testlerinden elde edilen gerilim-gerinim eğrilerinden saptanan transformasyon gerilim/gerinim değerleri ve hadde yönüne göre numune alma açısı (tekstür) arasındaki ilişki gösterilmektedir. Literatürdeki verilerle uyum sağlayacak şekilde, elverişli $\{110\}$ hadde tekstürünün olduğu haddeleme yönünde en yüksek transformasyon gerinimi (plato uzunluğu) elde edilmiştir. Açının artmasıyla beraber transformasyon gerinimi lineer bir şekilde düşüş göstermektedir. Bu durum direkt olarak malzemede oluşan

tekstürün bir sonucu olmakla beraber, transvers (90°) yönde alınmış numunede oluşan tekstür giderek $\{001\}$ oryantasyonuna yaklaşmakta ve geri alınabilir deformasyon bağlamında elverişsiz bir hal almaktadır [35, 36]. Malzeme haddeleme yönünden ne kadar uzaklaşırsa, kayma için Schmid katsayısı da o kadar düşmektedir. Transvers doğrultuda ise, kayma düzlemine aktarılan gerilim sıfır olduğundan, bu doğrultuda elde edilen Schmid katsayısı da sıfır değerini almaktadır. Bu durum, TD NiTi sac levha malzemeler için de pek çok çalışmada raporlanmıştır [25, 34, 37]. Azalan Schmid katsayısı ile beraber, Şekil 6'da da açıkça görüldüğü gibi haddeleme yönünden uzaklaşıldıkça martenzitik faz dönüşümü için gerekli çekme (transformasyon) gerilimi yükselmektedir.

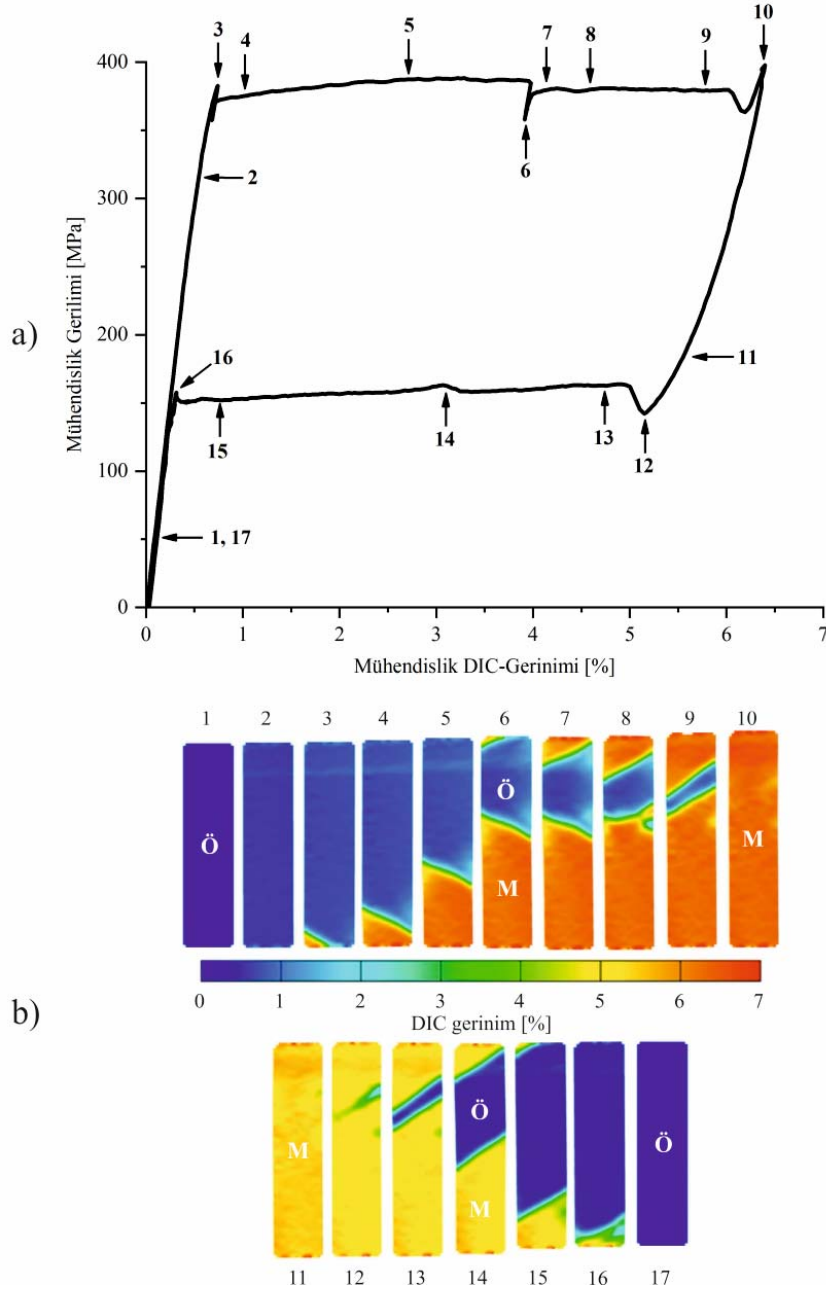
3.2. Deformasyon Lokalizasyonu ve Mezo Ölçekli Martenzit/Östenit Arayüzey Geçiş Bölgeleri

(Localized Deformation and Meso-scale Martensite/Austenite Interface Transition Regions)

Süperelastik NiTi şekil hafızalı alaşımlarda, çekme yüklenmesi altında gerilimle tetiklenmiş faz dönüşümüne bağlı meydana gelen deformasyonun martenzit bant oluşumu ve büyümesi ile lokalize olma eğilimi sergilediği pek çok çalışmada raporlanmıştır [9, 38, 39]. Şekil 7a ve Şekil 7b'de süperelastik NiTi sac levha numuneye ait mühendislik gerilim-gerinim eğrisi ve DIC tekniği ile ölçülmüş gerinim alanları verilmiştir. Yüksek gerinim alanları (kırmızı) gerilimle tetiklenen martenzit fazını (M), düşük gerinim alanları (mavi) ise östenit fazını (Ö) göstermektedir. Uygulanan gerilim kritik seviyeye ulaştığında östenit \rightarrow martenzit faz dönüşümü başlayarak, lokalize olmuş yüksek gerinim (martenzit) bantları oluşmakta ve devam eden



Şekil 6. Transformasyon gerinimi, transformasyon gerilimi ve numune oryantasyonu arasındaki ilişki (Transformation strain and stress depending to the orientation of the specimens)



Şekil 7. (a) Çekme yüklenmesi altında, 10^{-4} s $^{-1}$ deformasyon hızında elde edilen mühendislik gerilim-gerinim eğrisi; (b) DIC lokal yüzey gerinim alanları

((a) Engineering stress-strain curve of 5 mm wide RD specimen under tension (strain rate $\approx 10^{-4}$ s $^{-1}$); (b) DIC local strain field images)

deformasyon ile beraber numune boyunca büyümektedir (Nokta 3, Şekil 7a ve Şekil 7b). Düşük deformasyon hızına rağmen, numunenin transformasyon arayüzeyinde kendi kendine lokal olarak ısınması (İng. self-heating) ile östenit fazı stabilize olur ve martenzit oluşumu için gerekli kritik gerilim eşiği yükselir. Bu nedenle, o noktadaki bant büyümesinin durduğu ve daha düşük (oda) sıcaklıktaki östenitik bölgede ikinci bir bant oluşumu gözlenmektedir (Nokta 6, Şekil 7a ve Şekil 7b). Martenzitik ve östenitik alanlardaki gerinim değeri deformasyon boyunca sabit

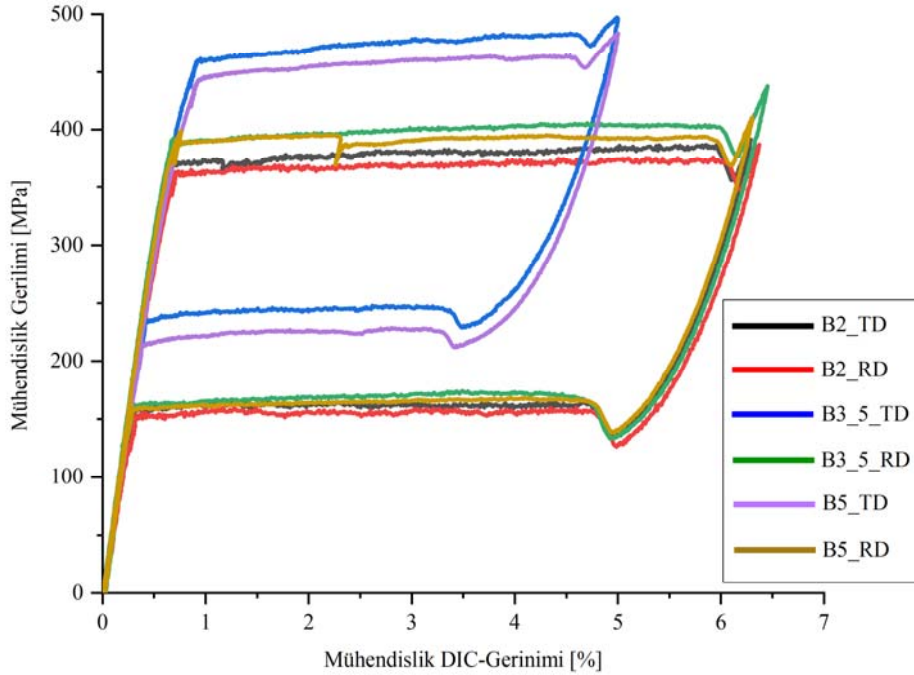
kalmakta ve martenzit bölgesi içindeki gerinim değeri gerilim platosu sonundaki gerinime (yaklaşık %6 – kırmızı), östenit bölgesi gerinim değeri ise gerilim platosu başındaki elastik gerinime (yaklaşık %0,7 – mavi) karşılık gelmektedir. Tamamıyla martenzitik ve tamamıyla östenitik bölge arasında bir *mezo ölçekli* M/Ö arayüzeyi oluşmaktadır. Bu geçiş bölgesinde malzeme sürekli, değişken aksel gerinim ve martenzit hacim oranı sergilemektedir. Deformasyon, sadece bu arayüzey geçiş bölgesinde gerçekleşirken diğer bölgelerde deformasyon hızı sıfıra eşittir. Yükün

boşaltılması esnasında, martenzit → östenit faz dönüşümü neticesinde de benzer davranış gözlenmektedir. Bant oluşumu ile beraber lokal (transformasyon) deformasyon hızı aniden yükselirken; buna bağlı olarak meydana gelen negatif gerilim hızı sonucu sabit nominal makroskobik deformasyon hızı (elastik deformasyon hızı + transformasyon/lokal deformasyon hızı ~ sabit) göz önüne alındığında gerilim-gerinim eğrisinde bir yumuşama (gerilimde düşme) gözlenmektedir (Nokta 3 ve 6, Şekil 7a ve Şekil 7b). Aynı ilişki sonucu, büyüyen iki bandın plato sonunda birbirleri ile karşılaşması ile son östenitik bölgenin aniden martenzite dönüşmesi sonucu lokal deformasyon hızı kısa süreliğine artmakta ve bu da makroskobik gerilim-gerinim eğrisinde gerilimde düşmeye yol açmaktadır (Nokta 9-10 arası bölge).

NiTi şekil hafızalı alaşımlarda plato boyunca deformasyon, arayüzey geçiş bölgesinde yoğunlaştığından, bu bölgenin detaylı analizi teknik açıdan büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle, numune geometrisinin ve oryantasyonunun (kristalografik tekstür) makroskobik gerilim-gerinim eğrisi, deformasyon/ transformasyon/ lokalizasyon davranışı ve gerinim alanları üzerine etkisi sistematik bir şekilde irdelenmiştir. 1 mm kalınlığındaki haddelenmiş çok kristalli NiTi sac levhadan hadde yönünde (RD) ve transvers yönde (TD) 2 mm, 3,5 mm ve 5 mm genişlikte numuneler alınarak çekme yüklenmesi altında karakterize edilmiştir. Şekil 8'de farklı genişliklere sahip, RD ve TD bant numunelere ait $10^{-4} s^{-1}$ deformasyon hızında elde edilmiş çekme eğrileri verilmiştir. Kristalografik tekstür kaynaklı olarak, TD

numunelerde RD numunelere kıyasla daha yüksek bir plato gerilimi meydana gelirken, transformasyon gerinimi daha düşüktür. Bu tipik etki, 2 mm genişlikteki numunede daha az belirgin bir şekilde ortaya çıkmaktadır. 2 mm genişliğindeki numunede yaklaşık 10 MPa'lık bir plato gerilimi artışı gözlenirken, 3,5 mm ve 5 mm genişlikteki numuneler benzer ve yaklaşık 80 MPa'lık bir artış sergilemektedir. Azalan numune genişliği ile beraber numune genişliği / numune kalınlığı (1 mm) oranı da azalarak 1'e yaklaşmaktadır ve böylelikle numune oryantasyonunun transformasyon gerinimi ve plato gerilimi üzerine etkisi azalmaktadır.

Farklı numune genişliği ve oryantasyonunun *mezo ölçekli* arayüzey geçiş bölgesi üzerine etkisi incelendiğinde ise, arayüzeyin farklı açılarda oluştuğu ve deformasyonun ilerlemesi ile bu açının değiştiği gözlenmiştir. Ayrıca, numune genişliğinin ve kristalografik tekstürün testlerin gerçekleştirildiği deformasyon hızında ($10^{-4} s^{-1}$) faz dönüşümü esnasında oluşan martenzit bant sayısı üzerine belirgin bir etkisi saptanmamıştır. Bu noktada, tekstürden bağımsız olarak, artan deformasyon hızı ve bununla beraber biriken gizli ısı çoklu bant oluşumunu tetiklemekte olduğu bilinmektedir [40]. Burada dikkat çekici husus ise; 2 mm genişlikteki numunenin, arayüzey oluşumundan kısa bir süre sonra, 90°'lik bir açı ile diğer numunelerden ayrılması (Şekil 9a) ve farklı genişliklerdeki tüm numunelerde oluşan iki M/Ö arayüzeylerinin plato sonunda birbiriyle buluşmasından (faz dönüşümünün tamamlanmasından) az önce yaklaşık 53-54°'lik bir açı almalarıdır (Şekil 9b). Test edilen diğer paralel numunelerle de benzer davranış

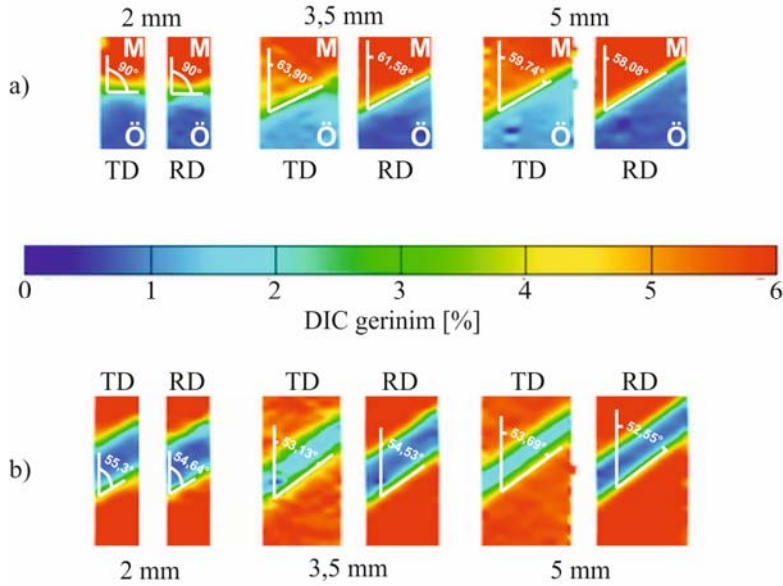


Şekil 8. Haddeleme yönünde (RD) ve hadde yönüne dik (transvers) yönde (TD), farklı genişliklerde (2 mm, 3,5 mm ve 5 mm) bant numunelere ait mühendislik gerilim-gerinim eğrileri
(Engineering stress-strain curves of samples at RD (rolling direction) and at TD (transverse direction) with different widths of 2, 3.5 and 5 mm)

gözlenmiştir. Bunun yanında, arayüzey genişliği, %100 martenzit ve %100 östenit bölgesi arasında oluşan geçiş bölgesinin genişliği olarak, DIC gerinim alanı görüntülerinin alındığı zaman için tanjant yöntemi ile belirlenmiştir. Tablo 2’de faz dönüşümü başlangıcından hemen sonra ve tamamlanmasından az önce saptanan arayüzey açıları ve genişlikleri farklı numune oryantasyonları ve genişlikleri için özetlenmiştir. Numune genişliği ve oryantasyonunun oluşan M/Ö arayüzeyinin genişliği üzerine belirgin bir etkisi olmadığı açıkça görülmektedir.

Deformasyon esnasında meydana gelen iki arayüzey birbirine yaklaştıkça, numune eksenine açısı küçülmekte, birleşmeden az önce ise yaklaşık 54°’lik bir açı sergilemektedir. Literatürde, her ne kadar faz dönüşümü esnasında oluşan arayüzey açısına dair çalışmalar bulunsada bu araştırmalarda numune genişliğinin kalınlığına oranı 1’den çok yüksek olan numuneler çalışılmış olup, test süresince sabit/stabil bir arayüzey açısından bahsedilmektedir [40-42]. Mao vd. [41], 0,6 mm kalınlıkta ve 3,5 mm genişlikte NiTi

bant numuneleri çekme testlerine tabi tutarak belirli bir arayüzey açısı gelişimini analiz etmişlerdir. Martenzitik faz dönüşümü esnasında stabil bir arayüzey açısının meydana gelmesini tekstür etkisine ve Schmid katsayısı ilişkisine dayandırmaktadırlar: Kayma sisteminde, her martenzit maksimum Schmid katsayısı ile oluşmaktadır. Yapıdaki tek bir taneden başlayarak, aynı şekilde komşu tanelerde de iç gerilmeler neticesinde yüksek Schmid katsayısına sahip sistemler aktive edilmektedir. Böylelikle, tane sınırlarının ötesinde tüm numune kesiti boyunca stabil martenzit arayüzeyleri/cepheleri oluşmaktadır. Bunun yanında, komşu taneye etkiye gerilim alanı, çekme/deformasyon doğrultusunda martenzit varyantlarının oluşumunu tetiklemektedir [40, 41]. Buna göre, kuvvetli tekstüre olmuş bir malzemede oluşan *mezo ölçekli* martenzit/östenit geçiş bölgesi açısının hesaplanması, tekstürün ana bileşeni için maksimum Schmid katsayısının yönünün tespiti ile mümkündür. Bu yaklaşımın, çok ince taneli malzemelerde geçerliliği tartışmalı olmakla birlikte, arayüzey açısının deformasyon süresince neden sürekli değiştiğini de tam



Şekil 9. Farklı numune oryantasyonları (TD ve RD) ve genişlikleri (2 mm, 3,5 mm, 5 mm) için DIC - lokal gerinim alanları ve oluşan mezo ölçekli M/Ö arayüzeyi: (a) martenzitik faz dönüşümünün başlangıcından az sonra; (b) martenzitik faz dönüşümünün tamamlanmasından az önce
(DIC- local surface strain fields for different widths and orientations of specimens and the formed meso-scale martensite-austenite interface: (a) shortly after the start of martensitic phase transformation; (b) shortly before the completion of martensitic phase transformation)

Tablo 2. Numune oryantasyonları ve genişliklerine bağlı, martenzitik faz dönüşümünün başlangıcından az sonra ve tamamlanmasından az önce oluşan arayüzey açıları ve genişlikleri
(Interface angle and width depending on the sample orientation and width of the band specimens shortly after the start of martensitic phase transformation and shortly before the completion of martensitic phase transformation)

| | Numune Genişliği | | | | | |
|-----------------------------------|------------------|-------|--------|-------|-------|-------|
| | 2 mm | | 3,5 mm | | 5 mm | |
| | TD | RD | TD | RD | TD | RD |
| Açı (Faz Dönüşümü Başlangıcı) (°) | 90 | 90 | 63,90 | 61,58 | 59,74 | 58,08 |
| Açı (Faz Dönüşümü Sonu) (°) | 55,3 | 54,64 | 53,13 | 54,53 | 53,69 | 52,55 |
| Arayüzey Genişliği (mm) | 1,12 | 1,14 | 1,23 | 1,22 | 1,25 | 1,24 |

anlamı ile açıklamadığı ortadadır. Ayrıca numune geometrisinin (özellikle kritik bir numune genişliği/kalınlığı oranının altında) oluşan arayüzey açısı üzerine belirgin bir etkisi olduğu gözlenmiştir. Bu durum, tekstür ve/veya Schmid katsayısı etkisi bazında açıklanamamaktadır. Şekil 9'da (ve Tablo 2'de) net bir şekilde görüldüğü üzere, belli bir genişliğin altında numunede meydana gelen M/Ö arayüzeyinin numune eksenine açısı, çekme yüklenmesi süresince sürekli değişim göstermektedir. 3,5 mm ve 5 mm genişliğe sahip numunelerde faz dönüşümü başlangıcını takiben yaklaşık 60°'lik bir arayüzey açısı ortaya çıkarken, 2 mm'lik numunede bu açı 90° olarak saptanmıştır. Daralan numune ile birlikte numune genişliğinin numune kalınlığına (1 mm) oranı azalmakta ve giderek 1 değerine yaklaşmaktadır. 2 mm genişliğindeki nispeten dar numune, 2/1 düşük geometri faktörü neticesinde, transformasyon başlangıcında eksenel simetrik tel malzemeler (1/1) gibi davranmakta ve 90°'lik bir açı oluşturduğu gözlenmektedir. İlerleyen deformasyon ile beraber, faz dönüşümünün tamamlanmasına doğru ise, diğer daha geniş, 3,5/1 ve 5/1 geometri faktörüne sahip bant numuneler ile uyumlu bir şekilde yaklaşık 54°'lik bir arayüzey açısı sergilediği görülmektedir. Sistematik bir şekilde tespit edilen, tekstür etkisi ve Schmid katsayısı üzerinden direkt açıklanamayan (malzemenin makroskobik mekanik davranışının aksine), arayüzey açısının deformasyon sırasında sürekli değişmesi ve farklı numune geometrilerinde farklı açılarının oluşması durumu, numunenin çekme testi öncesi alt ve üst çeneye bağlantısının malzemenin lokal transformasyon davranışı (oluşan *mezo ölçekli* M-A arayüzeyi) üzerine olası etkisini akla getirmektedir. Çekme testi esnasında, numune derinliğinde etkiyen basma kuvvetlerine ek olarak, alt sabit çenenin üst hareketli çeneye göre hafif asimetric ayarlanması sonucu bükme ve burma gerilimlerinin üst üste binmesi durumu meydana gelebileceği düşünülmektedir.

Bu çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar ışığında, yüklenme doğrultusu ve transformasyon esnasında oluşan M/Ö arayüzeyinin arasında gerçek anlamda karakteristik bir açı oluşmadığı, açının deformasyon süresince sürekli bir değişim gösterdiği görülmektedir. Arayüzey açısının yüklenme süresince sürekli değişmesi, malzemeye etkiyen ilave bükme momentleri sonucu safi mekanik kaynaklı olmakla beraber, tekstür bu anlamda ikincil bir rol üstlenmektedir. Ayrıca, numune genişliğinin oluşan arayüzey genişliğine belirgin bir etkisi saptanmamış olmakla beraber, literatürdeki veriler ile uyuyacak şekilde M/Ö arayüzey geçiş bölgesinin genişliği numunenin kalınlığı ile aynı büyüklüktedir [43]. Bunun yanı sıra, malzemede oluşan kristalografik tekstürün makroskobik çekme eğrileri üzerine etkisi sistematik bir şekilde analiz edilerek, NiTi bant numunelerde süperelastik anizotropik malzeme davranışı açıkça ortaya konmuştur. Elde edilen sonuçlar, literatürde karşılaşılan transformasyon gerinimine, Schmid katsayısı – numune oryantasyonu ilişkisine ve NiTi sac levhalarda gerçekleştirilen mekanik analizlere dair veriler ile örtüşmektedir [35, 36, 41]. NiTi malzeme üretiminde haddeleme sonucu meydana gelen kristalografik tekstür, malzemenin mekanik davranışını belirleyen anizotropik

karakteristiği de beraberinde getirmektedir. Bu nedenle, malzemede oryantasyona bağlı özelliklerin ve bunlara sebep olan mekanizmaların detaylı analizi ve kavranması büyük önem taşımaktadır.

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışma neticesinde malzeme davranışına ve esas teşkil eden mekanizmalara dair kazanılan anlayış, farklı büyüklüklerde plato gerinimi ve gerilimi gerektiren farklı uygulama alanları için, malzeme geometrisinin makroskobik mekanik özellikler ve deformasyon lokalizasyonu üzerine etkisi de göz önünde bulundurularak uygun malzeme tekstürünün oluşturulması adına yardımcı olabilir. Böylelikle, bilinçli ve hedefe yönelik malzemede oluşturulan tekstür ile istenen malzeme özelliklerinin daha da iyileştirilmesi mümkündür. Bu çalışma kapsamında, kristalografik tekstürün ve numune geometrisinin malzemenin mekanik davranışına ve *mezo ölçekli* martenzit/östenit arayüzey oluşumu ile gerçekleşen deformasyon lokalizasyonu üzerine etkisi sistematik bir şekilde araştırılmış olup, elde edilen önemli sonuçlar aşağıda listelenmiştir.

- Süperelastik NiTi sac levhadan haddeleme yönüne göre farklı açılarda alınan bant numunelere ait mühendislik gerilim-gerinim eğrileri, kristalografik tekstüre bağlı malzemenin süperelastik anizotropik davranış sergilediğini göstermektedir. Hadde yönüne göre artan açı ile beraber martenzitik faz dönüşümü için gerekli kritik gerilim değeri (plato gerilimi) ve faz dönüşümü başlangıcındaki ortalama gerinim değeri artarken, plato/transformasyon gerinimi azalmaktadır.
- 2 mm genişliğe sabit TD ve RD dar numunelerde plato gerilimi ve uzunluğu üzerine kristalografik tekstür kaynaklı etki daha geniş numunelerde gözlenene kıyasla oldukça düşüktür. Dolayısıyla, numune genişliğinin numune kalınlığına (1 mm) oranı 1'e yaklaştıkça numune oryantasyonunun transformasyon gerinimi ve plato gerilimi üzerine etkisi yok denecek kadar azalmaktadır.
- Malzeme tek eksenli çekme yüklenmesi altında, martenzit bant oluşumu ve büyümesi ile deformasyon lokalizasyonu sergilemektedir. Numune kalınlığı ile aynı kalınlıkta oluşan *mezo ölçekli* martenzit/östenit arayüzey geçiş bölgesinde malzemenin, sürekli değişken eksenel gerinim ve martenzit hacim oranı sergilediği DIC tekniği ile saptanmış olup, deformasyon sadece oluşan bu arayüzey geçiş bölgesinde gerçekleşmektedir. Tamamıyla martenzitik ve tamamıyla östenitik bölgede deformasyon hızı teorik olarak sıfırdır.
- Numune genişliği ve kristalografik tekstürün, gerilim kaynaklı indüklenmiş martenzitik faz dönüşümü esnasında oluşan M/Ö arayüzeyinin genişliği üzerine belirgin bir etkisi saptanmamıştır. Arayüzey geçiş bölgesinin genişliği direkt olarak numune kalınlığı ile ilintilidir.
- Farklı numune geometrileri ve oryantasyonlarının malzemenin lokal deformasyon karakteristiği üzerine etkisi incelendiğinde, M/Ö arayüzeyinin numune yüklenme eksenine göre farklı açılarda oluştuğu ve

transformasyonun sonuna doğru tüm numunelerde bu açının değişerek 53°-54°'lik bir değer aldığı görülmüştür. Ayrıca, testlerin gerçekleştirildiği deformasyon hızında (10^{-4} s^{-1}) numune geometrisi ve oryantasyonunun oluşan transformasyon cephelerinin (martenzit bantlarının) sayısı üzerine bir etkisi saptanmamıştır.

- 2 mm'lik genişlik ile incelenen en dar bant numune, düşük numune genişliği/kalınlığı oranı ile ekselel simetrik malzeme (örneğin; tel malzeme 1/1) karakteri sergileyerek, transformasyonun başlangıcı ile diğer daha geniş numunelerin aksine 90°'lik bir açı sergilemektedir. Ancak, deformasyon devamı ile bu açı da sürekli değişerek faz dönüşümünün tamamlanmasından az önce diğer geniş numunelere benzer bir değer almaktadır. Gerçek anlamda karakteristik bir açının oluşmaması ve açının deformasyon süresince sürekli değişmesi, kristalografik tekstür etkisi ve Schmid katsayısı üzerinden direkt açıklanamamakla birlikte, bu durumun safi mekanik kaynaklı; malzemeye etkileyen ilave bükme momentleri sonucu ortaya çıktığı düşünülmektedir. Numunenin çekme testi öncesi, üst ve alt çene arasında (hafif) asimetrik pozisyonlanması ile malzemeye etkileyen basma kuvvetlerine ek olarak bükme ve burma gerilimlerinin ortaya çıkma durumu söz konusudur. Bu nedenle, tanımlı bir açı ile numunelerin test öncesi kasten asimetrik pozisyonlandığı sistematik mekanik testlerin planlanarak, in-situ DIC yüzey gerinim alanlarının analizi ile bu ilişkinin derinlemesine irdelenmesi önerilmektedir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Yazar, Prof. Dr. Martin F.-X. Wagner'e oldukça verimli bilimsel tartışmalar ve değerli yorumları için teşekkür eder.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Otsuka K., Wayman C.M., Shape memory materials, Cambridge University Press, Cambridge, 1998.
- Aslantaş K., Kaynak Y., Micro milling of NiTi shape memory alloy and determination of critical chip thickness, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 34 (3), 1201-1211, 2019.
- Çakmak Ö., Kaya M., Akıllı Malzeme Şekil Hafızalı Aşamaların Termodinamiği, Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi, 6 (2), 541-555, 2017.
- Acar E., Şekil hafızalı aşamaların biyomedikal uygulamaları, Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, 14, 134-144, 2018.
- Liu Y., Detwinning process and its anisotropy in shape memory alloys, Smart Materials, 4234, 82-93, 2001.
- Otsuka K., Ren X., Physical metallurgy of Ti-Ni-based shape memory alloys, Progress in Materials Science, 50, 511-678, 2005.
- Miyazaki S., Fu Y.Q., Huang W.M., Thin Film Shape Memory Alloys: Fundamentals and Device Applications, Cambridge University Press, Cambridge, 2009.
- Grassi E.N.D., Chagnon G., Oliveira H.M.R., Favier D., Anisotropy and Clausius-Clapeyron relation for forward and reverse stress-induced martensitic transformations in polycrystalline NiTi thin walled tubes, Mechanics of Materials, 2020.
- Reedlunn B., Churchill C.B., Nelson E.E., Daly S.H., Shaw J.A., Tension, compression and bending of superelastic shape memory alloy tubes, J. Mech. Phys. Solids, 63, 506-537, 2014.
- Bhardwaj A., Gupta A.K., Padisala S.K., Poluri K., Characterization of mechanical and microstructural properties of constrained groove pressed nitinol shape memory alloy for biomedical applications, Materials Science & Engineering C, 102, 730-742, 2019.
- Li H.F., Nie F.L., Zheng Y.F., Cheng Y., Wei S.C., Valiev R.Z., Nanocrystalline $\text{Ti}_{49.2}\text{Ni}_{50.8}$ shape memory alloy as orthopaedic implant material with better performance, Journal of Materials Science & Technology, 35, 2156-2162, 2019.
- Kadir M.R.A., Dewi D.E.O., Jamaludin M.N., Nafea M., Ali M.S.M., A multi-segmented shape memory alloy-based actuator system forendoscopic applications, Sensors and Actuators A: Physical, 296, 92-100, 2019.
- Modabberifar M., Spenko M., A Shape Memory Alloy-Actuated Gecko-Inspired Robotic Gripper, Sensors and Actuators A: Physical, 2018.
- Jiang D., Kyriakides S., Landis C.M., Propagation of Phase Transformation Fronts in Pseudoelastic NiTi Tubes Under Uniaxial Tension, Extreme Mechanics Letters, 2017.
- Bian X., Saleh A.A., Pereloma E.V., Davies C.H.J., Gazder A.A., A digital image correlation study of a NiTi alloy subjected to monotonic uniaxial and cyclic loading-unloading in tension, Materials Science & Engineering A, 726, 102-112, 2018.
- Zheng L., He Y., Moumni Z., Lüders-like band front motion and fatigue life of pseudoelastic polycrystalline NiTi shape memory alloy, Scripta Materialia, 123, 46-50, 2016.
- Lu H.-H., Guo H.-K., Liang W., Li J.-C., Zhang G.-W., Li T.-T., High-temperature Laves precipitation and its effects on recrystallisation behaviour and Lüders deformation in super ferritic stainless steels, Materials and Design, 188, 108477, 2020.
- Gao S., Bai Y., Zheng R., Tian Y., Mao W., Shibata A., Tsuji N., Mechanism of huge Lüders-type deformation in ultrafine grained austenitic stainless steel, Scripta Materialia, 159, 28-32, 2019.
- Beardsmore D.W., Quinta da Fonseca J., Romero J., English C.A., Ortner S.R., Sharples J., Sherry A.H., Wilkes M.A., Study of Lüders phenomena in reactor pressure vessel steels, Materials Science & Engineering A, 588, 151-166, 2013.
- Hallai J.F., Kyriakides S., Underlying material response for Lüders-like instabilities, Int. J. of Plasticity, 47, 1-12, 2013.
- Wang L., Ma L., Liu C., Zhong Z.Y., Luo S.N., Texture-induced anisotropic phase transformation in a NiTi shape memory alloy, Materials Science & Engineering A, 2018.
- Weafer F.M., Guo Y., Bruzzi M.S., The effect of crystallographic texture on stress-induced martensitic

- transformation in NiTi: A computational analysis, *J. of Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 53, 210-217, 2016.
23. Gall K., Sehitoglu H., The role of texture in tension-compression asymmetry in polycrystalline NiTi, *Int. J. Plast.* 15, 69-92, 1999.
 24. Kim K., Daly S., The effect of texture on stress-induced martensite formation in nickel-titanium, *Smart Mater. Struct.* 22, 075012, 2013.
 25. Liu Y., The superelastic anisotropy in a NiTi shape memory alloy thin sheet, *Acta Materialia*, 2015.
 26. ASTM Standard 2004-03: Standard test method for transformation temperature measurement of nickel-titanium shape memory alloy by thermal analysis, 2003.
 27. Zhou T., Yu C., Kang G., Kan Q., Fang D., A crystal plasticity based constitutive model accounting for R phase and two-step phase transition of polycrystalline NiTi shape memory alloys, *International Journal of Solids and Structures*, 2020.
 28. Feng B., Kong X., Hao S., Liu Y., Yang Y., Yang H., Guo F., Jiang D., Wang T., Ren Y., Cui L., In-situ synchrotron high energy X-ray diffraction study of micro-mechanical behaviour of R phase reorientation in nanocrystalline NiTi alloy, *Acta Materialia*, 2020.
 29. Mehdikhani M., Aravand M., Sabuncuoglu B., Callens M.G., Lomov S.V., Gorbatikh L., Full-field strain measurements at the micro-scale in fiber-reinforced composites using digital image correlation, *Composite Structures*, 140, 192-201, 2016.
 30. Hung P.-C., Voloshin A.S., In-plane Strain Measurement by Digital Image Correlation, *J. of the Braz. Soc. of Mech. Sci. & Eng.*, XXV (3), 215-221, 2003.
 31. GOM Gesellschaft für optische Messtechnik mbH (Braunschweig, Germany), Software "ARAMIS" v6.3.1 Optical Deformation Analysis, 2010.
 32. Gao S., Yi S., Experimental study on the anisotropic behavior of textured NiTi pseudoelastic shape memory alloys, *Materials Science & Engineering A*, 362, 107-111, 2003.
 33. Sridhar S.K., Stebner A.P., Rollett A.D., Statistical variations in predicted martensite variant volume fractions in superelastically deformed NiTi modeled using habit plane variants versus correspondence variants, *International Journal of Solids and Structures*, 2020.
 34. Chang S.H., Wu S.K., Textures in cold-rolled and annealed Ti₅₀Ni₅₀ shape memory alloy, *Scripta Materialia*, 50, 937-941, 2004.
 35. Inoue H., Miwa N., Inakazu N., Texture and Shape Memory Strain in TiNi Alloy Sheets, *Acta Mater.*, 44 (12), 4825-4834, 1996.
 36. Miyazaki S., No V.H., Kitamura K., Khantachawana A., Hosoda H., Texture of Ti-Ni rolled thin plates and sputter-deposited thin films, *International Journal of Plasticity*, 16, 1135-1154, 2000.
 37. Mulder J.H., Thoma P.E., Beyer J., Anisotropy of Thermal Fatigue Properties of Cold-Rolled TiNi Sheet, *Materials Characterization*, 32, 161-168, 1994.
 38. Liu Y., Xie Z., Van Humbeeck J., Delaey L., Asymmetry of stress-strain curves under tension and compression for NiTi shape memory alloys, *Acta Mater.*, 46 (12), 4325-4338, 1998.
 39. Shaw J.A., Kyriakides S., Initiation and propagation of localized deformation in elasto-plastic strips under uniaxial tension, *International J. of Plasticity*, 13 (10), 837-871, 1998.
 40. Shaw J.A., Kyriakides S., On the nucleation and propagation of phase transformation fronts in a NiTi alloy, *Acta Mater.*, 45 (2), 683-700, 1997.
 41. Mao S.C., Han X.D., Zhang Z., Wu M.H., The nano- and mesoscopic cooperative collective mechanisms of inhomogeneous elastic-plastic transitions in polycrystalline TiNi shape memory alloys, *Journal of Applied Physics*, 101, 103522, 2007.
 42. Daly S., Ravichandran G., Bhattacharya K., Stress-induced martensitic phase transformation in thin sheets of Nitinol, *Acta Mater.*, 55, 3593-3600, 2007.
 43. He Y.J., Sun Q.P., Macroscopic equilibrium domain structure and geometric compatibility in elastic phase transition of thin plates, *International Journal of Mechanical Sciences*, 52, 198-211, 2010.

