

Haddeme ile Birleştirilen AISI 430/Al 1050 /AISI 304 Tabakalı Kompozitlerde Isıl İşlemin Ara Yüzey ve Mekanik Özelliklere Etkisi

Hüseyin DEMİRTAŞ^{1*}, Alper İNCESU¹

¹TOBB Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Karabük Üniversitesi, Karabük
(ORCID: [0000-0002-2442-2158](https://orcid.org/0000-0002-2442-2158)) (ORCID: [0000-0003-4404-4331](https://orcid.org/0000-0003-4404-4331))



Anahtar kelimeler:
Lamine kompozitler, Isıl işlem,
Mekanik özellikler, Mikroyapı analizi.

Öz

Bu çalışmada, haddeme işlemi ile AISI 304 östenitik paslanmaz çelik ve AISI 430 ferritik paslanmaz çelik sacları araya ticari saflıkta 1050 alüminyum levha konularak lamine kompozit üretilmiştir. Üretim sonrası farklı sıcaklık ve sürede ısıl işlem uygulanmış kompozit plakaların ara yüzey bağ mukavemeti, mikroyapısı ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Kompozitlerin mekanik özellikleri çekme testi, mikro sertlik ölçümü, sıyırma testi ile belirlenmiş, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve enerji dağılımı spektroskopisi (EDS) ile karakterize edilmiştir. Uygulanan ısıl işlem parametreleri arasında yüksek mekanik özellik (434,95MPa) ve süneklik (%27,16) sağlaması yönünden ve işlem kolaylığı bakımından 450°C-12 saat uygun görülmüştür. 550°C'de 12 saat yapılan ısıl işlem sonrasında ise katmanlar arasındaki bağ kuvvetinin sifıra yakın bir değere düştüğü belirlenmiştir.

Effect of Heat Treatment on Interface and Mechanical Properties of AISI 430/Al 1050/AISI 304 Layered Composites Joined by Rolling

Keywords: Laminated composites, Heat treatment, Mechanical properties, Microstructure analysis.

Abstract

In this study, a laminated composite was produced by placing a commercial grade 1050 aluminium sheet between AISI 304 austenitic stainless steel and AISI 430 ferritic stainless-steel sheets by rolling process. The interfacial bond strength, microstructure, and mechanical properties of the composite plates were investigated, which were heat-treated at different temperatures and times after production. The mechanical properties of the composites were determined by tensile test, microhardness measurement, peel test, and characterized by scanning electron microscopy (SEM) and energy distribution spectroscopy (EDS). Among the applied heat treatment parameters, 450°C-12 h was found suitable for high mechanical properties (435.95 MPa), ductility (27.16%), and ease of processing. After the heat treatment at 550°C for 12 h, it was determined that the bond strength between the layers decreased to a value close to zero.

1. Giriş

Paslanmaz çelikler, yapısal karbon çelikleri ile kıyaslandıklarında mükemmel korozyon dirençleri ve yüksek enerji emme özellikleri ile birlikte oldukça yaygın bir kullanım alanına

sahip olmuşlardır. Paslanmaz çelikler içerisinde de östenitik paslanmaz çelikler diğer paslanmaz çelikler ile kıyaslandıklarında yüzey kalitesi, şekillendirilebilirlik, korozyon ve aşınma direnci özellikleri bakımından bir adım öne çıkmaktadırlar [1]. Ancak östenitik paslanmaz çeliğin (ÖPÇ) pahalı

*Sorumlu yazar: hdemirtas@karabuk.edu.tr

Geliş Tarihi: 07.09.2021, Kabul Tarihi: 17.11.2021

olması yaygın kullanımını sınırlandırırken ferritik paslanmaz çeliklerin (FPÇ) oldukça ucuz olmaları ve iyi korozyon dirençlerinden dolayı geniş bir kullanım alanına sahiptirler [2].

Birbirine benzemeyen metal katmanlara sahip bimetal ve lamine metal kompozitler, iyi mekanik özelliklerin korozyon direnci ve yeterli kaynaklanabilirliğin ideal kombinasyonu nedeniyle, gemi yapımı, kimyasal ve petrol üretimi ile enerji santralleri ve baca gazı kükürt giderme tesisleri gibi çeşitli agresif alanlarda kullanılabilir [3]. Bu hafif hibrit malzemeler mükemmel mekanik özelliklere sahiptir ve tüm çelik parçalardan daha ekonomiktir, bu da artan bir uygulama yelpazesi sağlamaktadır. Nihai ürünün toplam maliyetini azaltmak için östenitik ve ferritik paslanmaz çelikler birlikte kullanılabilirler [4], [5]. Ancak, termal ve fiziksel özelliklerinin uyumsuzluğu nedeniyle ÖPÇ ve FPÇ'nin kaynak, eritme vb. ile birleştirilmesi sorunlara neden olmaktadır [6], [7]. Bu nedenle ÖPÇ ve FPÇ laminatların orta tabakasında sünek, hafif, korozyona dayanıklı ve ucuz alüminyum alaşımları ile katmanlı bir kompozit malzeme üretilmesi avantajlı olmuştur. Fe ve Al alaşımları arasındaki etkileşim, mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılan bimetal kompozitlere benzersiz özelliklerin bir kombinasyonunu getirmektedir [8].

Tek bir metal veya alaşımla karşılaştırıldığında, bimetal kompozit, iki bileşen metalden ve özel bir bölgeden, yani, kompozitin toplam özelliklerini önemli ölçüde etkileyebilecek ara yüzeye bitişik metalürjik bağlama geçiş bölgesinden (MBTZ) oluşmaktadır [9]. Ara yüzeydeki faz tipleri, fazların büyüme kinetiğine ve tabakalar arasındaki difüzyon sürecine bağlı olarak katmanlı kompozitlerin özelliklerini etkilemektedir. İntermetaliklerin oluşum ve büyüme mekanizmaları reaksiyon sıcaklığından ve fazların durumundan etkilenmektedir. Bundan dolayı reaksiyon sıcaklığının Al alaşımının erime sıcaklığının altında veya üstünde olması bimetal kompozitler için belirleyici faktör haline gelmektedir [10], [11].

Metal katmanlı kompozitler, alternatif teknolojiler kullanılarak çeşitli kimyasal ve fiziksel özelliklere sahip iki veya daha fazla malzeme türünün istiflenmesiyle üretilir ve belirgin avantajlara sahiptir [12]. Bazı mevcut üretim teknolojileri olarak haddeleme [13], patlayıcı kompozit [14], difüzyon kaynağı [15], döküm [16] ve toz metalürjisi sayılabilmektedir

[17]. Çok katmanlı lamine kompozitler için çeşitli imalat yöntemleri olmasına rağmen, basınca dayalı birleştirme esastır ve üretim verimliliği nedeniyle haddeleme yöntemi öne çıkmaktadır. Birbirine benzemeyen haddeleme ile bağlı metalik malzemelerin bazı kombinasyonları alüminyum/alüminyum [18], çelik/çelik [19], çelik/alüminyum [20] ve titanyum/çeliktir [21]. Katı faz halinde soğuk haddeleme işlemi, metalleri plastik deformasyonla birbirine bağlamaktadır. Soğuk haddelenmiş metallere arasında etkili bir metalürjik bağ elde etmek için birleştirilecek metallere kirlenmiş tabakasını çıkarmak çok önemlidir. Basınç, sıcaklık, deformasyon miktarı ve yüzey hazırlığının metallere soğuk merdane birleştirme kalitesini etkilediği belirtilmektedir [22]–[25]. Ayrıca, haddelemeden sonra uygulanan difüzyon tavlama ısı işlemi, ara yüzeydeki alaşım elementlerinin difüzyon davranışını harekete geçirmeyi amaçlamaktadır. Böylece ara yüzdeki bağlanma tipi mekanik bağlamadan metalürjik bağlamaya değişmektedir [26].

Talebian ve Alizadeh [27], haddeleme sonrası tavlamanın Al/çelik çok katmanlı kompozitin mikroyapısı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Çalışmalarının sonucunda, tavlama sıcaklığı ne kadar yüksek olursa, sürenin o kadar uzun olduğunu, ara yüzeylerde intermetalik fazların oluşumuna yol açan arayüzey element difüzyonunun daha belirgin olduğunu göstermişlerdir. Mendes ve diğerleri [28], kompozit plakanın bileşenlerinin birbirine karıştığını ve atomların ara difüzyonuna sahip olduğunu, ancak intermetalik bileşiklerin olmadığını bulmuşlardır. Takuda ve diğerleri [29], alüminyum/yumuşak çelik bimetal plakanın çekme özelliklerini ve şekillendirilebilirliğini araştırmış ve derin şekillendirme işleminde çekme özellikleri ile şekillendirilebilirlik arasında basit bir ilişki olmadığını bulmuşlardır. Ayrıca, sünek kırılma kriteri ile çelik/alüminyum/çelik lamine kompozitin derin çekmesindeki şekillendirme sınırını da tahmin etmişlerdir.

Literatürde katmanlı kompozitler ile ilgili çalışmalar olmasına rağmen ÖPÇ/Al/FPÇ kompozitlerin haddelemeden sonraki farklı ısı işlem parametrelerine bağlı olarak mekanik özelliklerindeki değişimler hakkında kapsamlı bir bilgi gözlemlenmemiştir [30]. Nitekim Li ve diğerleri, çeşitli ısı işlem koşulları altında bimetal kompozit ve yüksek sıcaklık işlemlerinden sonra ara yüzey bölgesinin mekanik ve kırılma özelliklerinin daha fazla çalışılması gerektiğini vurgulamışlardır [3]. Bu çalışmada, soğuk haddeleme işleminden sonra farklı parametrelerde

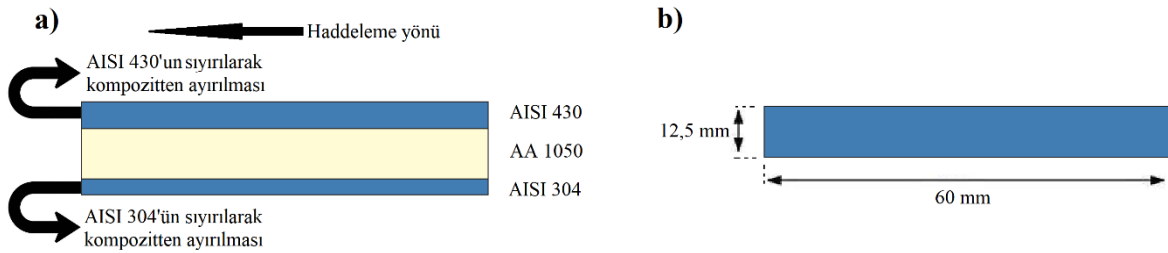
ısıtılma işlemi görmüş kompozitlerin mikroyapı ve mekanik özelliklerinin karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

2. Materyal ve Metot

Tabakalı metal kompozitler 0.40 mm kalınlığında AISI 304 östenitik paslanmaz çelik, 0.60 mm kalınlığında AISI 430 ferritik paslanmaz çelik ve 1.00 mm kalınlığında ticari saf Al (1050) sacların haddelenmesi ile üretilmiştir. Sac tabakalarının kimyasal bileşimleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Sac tabakaların kimyasal bileşimi (ağ. %).

	C	Cr	Ni	Si	Mn	P	S	Fe	Al
AISI 430	≤0,11	17,6	≤0,75	0,4	0,6	≤0,045	≤0,03	Kalan	-
AISI 304	≤0,08	19,2	9,17	0,32	1,86	≤0,045	≤0,03	Kalan	-
AA 1050	-	-	0,03	0,19	0,02	-	-	0,24	99,57



Şekil 1. Kompozit tabakalarının ayrılması (a) ve çekme numunelerinin (b) şematik gösterimi.

Haddelenmiş numuneler durgun havada soğumaya bırakılmıştır. Sonrasında haddelenerek üretilen kompozitler, 12 ve 24 saat 450 °C'de ve 12 saat 550 °C'de bir rezistans fırınında ısıtılıp fırında soğumaya bırakılmıştır. Mikroyapı analizi için numuneler haddelenme yönüne paralel ve dik olarak kesilmiştir. Zımparalama (1200p'ye kadar) ve ardından numunelere uygulanan parlatma (alümina-1µm) içeren metalografik yüzey hazırlama prosedürü uygulanmıştır. Tüm katmanlar, farklı bekleme sürelerinde %3 Nital ve Keller çözeltisi ile dağlanmıştır. Metalografik kesitler Carl Zeiss ULTRA PLUS FESEM marka alan emisyon taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak incelenmiştir. Enerji dağılımı spektroskopisi (EDS) ile donatılmış SEM, morfolojiyi araştırmak ve sac malzemelerin arayüzünde oluşan intermetaliklerin elementel dağılımını belirlemek için kullanılmıştır. EDS nokta analizinden elde edilen ortalama değerler ile oluşan intermetaliklerin bileşimleri elde edilmiştir.

Kompozit malzemeler, çelik saclar arasına bir Al sac yerleştirilip tek pasoda haddelenme ile üç katman halinde üretilmiştir. Haddelenmeden önce, sac yüzeylerinden oksitleri uzaklaştırmak ve tabakaların yüzey sürtünmesini artırmak için çelik saclar tel fırça ile mekanik olarak temizlenmiştir. Mekanik temizlemeden sonra paslanmaz çelik ve alüminyum bileşenler üst üste konularak bant konveyör üzerinde çelik yüzeyleri yaklaşık 600 °C olana kadar ısıtılmış, hemen ardından ısıtılan saclar haddelenerek birleştirilmiştir.

Mikrosertlik ölçümleri Q10 A+ QNESS cihazı ile yapılmıştır. Test parametreleri olarak iki farklı (0.1N ve 1N) yük ve 15 s bekleme süresi kullanılmıştır. Arayüzey boyunca sertlik dağılımları en az on farklı yerde ölçülmüş ve ortalama değerler rapor edilmiştir.

Farklı ısıtılma işlemi uygulanmış kompozit malzemeler ve bunların bileşenleri üzerinde sacın haddelenme yönüne paralel olarak tek eksenli çekme testleri yapılmıştır. Test edilen bileşen malzemelerinin her biri, üretilen kompozitlerden mekanik olarak sıyrılarak elde edilmiştir (Şekil 1a). Her bir çekme testi numunesi yaklaşık olarak 12,5 mm genişliğinde ve 60 mm uzunluğunda sahiptir (Şekil 1b). Çekme testleri, Zwick/Roell Z600 üniversal test makinesi ile oda sıcaklığında 10⁻³ 1/s deformasyon hızı ile gerçekleştirilmiştir.

Kompozitin metal katmanları arasındaki bağ gücü, ASTM-D903-93'e göre 180° sıyırma testi ile ölçülmüştür. Sıyırma testi, Zwick/Roell Z600 üniversal test makinesi tarafından 20 mm/dk. hızla gerçekleştirilmiştir. Sıyırma testinin numune boyutları 200 mm uzunluğunda ve 25 mm genişliğindedir. 540 °C'de ısıtılma işlemi yapılan kompozitlerde saclar

arasındaki bağ sıfıra yakın değerlere kadar düştüğü için sıyırma testi yapılmamıştır.

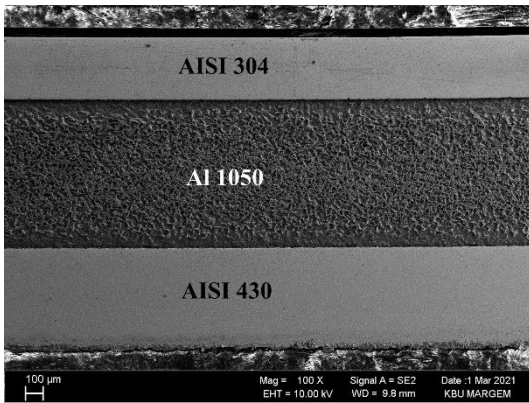
$$P_s = P_f / W \quad (1)$$

Sıyırma mukavemeti P_s , P_f 'nin ortalama sıyırma kuvveti (N) ve W 'nin numunenin genişliği (mm) olduğu formül 1'e göre hesaplanmıştır.

3. Bulgular ve Tartışma

Haddeleme sonrası kompozitlerin genel görüntüsü Şekil 2'de verilmiştir. Her tabakanın kalınlığı haddeleme yönü boyunca yaklaşık olarak aynı ve sürekli. Toplam kompozit kalınlığı haddelemeden sonra 2'den 1.86 mm'ye düşmüştür. Bu düşüşün beklenildiği gibi esas sebebi mukavemeti en düşük olan alüminyum sacın deformasyonudur. Ölçümler sonrası çelik saclarda kalınlık değişimlerinin sıfıra yakın olduğu belirlenmiştir.

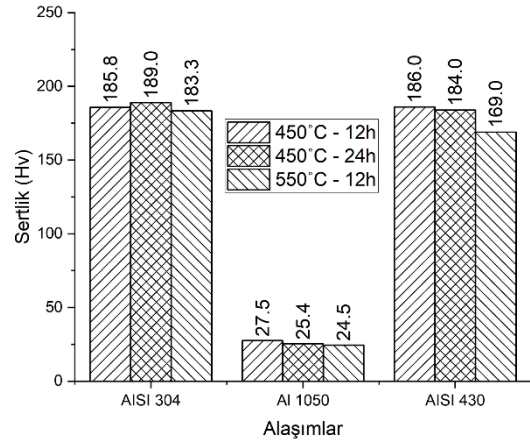
Haddeleme sonrası plastik deformasyon ile metallerin sertlikleri bir miktar artabilirken uygulanan ısı işlem ile genellikle düşmesi beklenmektedir. Bu değişimi belirlemek için ısı işlem görmüş kompozit saclarının ortalama mikro sertlik değerleri Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 2. Üretilen kompozitlerin haddeleme sonrası genel görüntüsü.

Isıl işlemden sonra, AISI304 tabakasının sertliği 450°C'de yapılan ısı işlemle birlikte biraz artmış fakat 550°C'de yapılan ısı işlem sonrasında tekrar düşmüştür. AISI430 tabakasının sertliği, artan ısı işlem süre ve sıcaklığı ile kademeli olarak düşmüştür. Al ise düşük erime sıcaklığından dolayı ısı işlemden orantısız olarak en fazla ölçüde etkilenmiş ve sertlikleri kademeli olarak düşmüştür. Ölçümlerin genelinde paslanmaz çelik sacların sertlik dağılımında önemli bir

farklılık bulunmazken, kompozitin en yumuşak bileşeni olan Al tabakasının sertliği sınırlara doğru yaklaşık %10 artmıştır. Sacların sertliklerindeki değişiklikler, karbür çökmesi, tane boyutu ve ayrıca dislokasyon ve artık gerilmeler ile ilişkilendirilebilir [31]. Saclarda meydana gelen deformasyon mekanik özellikleri önemli ölçüde etkiler. Haddeleme sonrası yan kesit görüntülerinde yapılan kalınlık ölçümlerinde paslanmaz çelik tabakanın kalınlığında önemli bir değişiklik ölçülmezken, Al tabakasının kalınlığı yaklaşık 1/6 oranında azalmıştır.



Şekil 3. Kompozit tabakalarının ortalama sertlik değerleri

AISI 304 sacının sertliğinde, ısı işlem sonrası daha farklı bir değişim belirlenmiştir. Bu konuda yapılan bir çalışmada [31] farklı deformasyon aşamalarında, tüm kompozit katmanlarda homojen olmayan mikro gerinim dağılımı meydana geldiği belirtilmiş ve deformasyon sırasında en sert katmanda daha yüksek mikro düzensizliklerin biriktiği kaydedilmiştir. Bu durum tabakanın sertliğindeki tutarsızlığın muhtemel sebebi olarak görülmüştür.

Sertliğin yanısıra diğer mekanik özelliklerin de ısı işlemden etkilenmesi kaçınılmaz bir durumdur. Kompozitlerin ve ayrı kompozit bileşenlerinin oda sıcaklığında mühendislik gerilme-gerinme eğrilerinden elde edilen ortalama akma mukavemeti, maksimum çekme mukavemeti ve kopma uzaması miktarları Tablo 2'de verilmiştir. Ayrıca ölçülen ortalama değerlere benzer örnek grafikler Şekil 4'te verilmiştir.

Kompozitlere uygulanan ısı işlem sıcaklık ve süresi ile genel olarak süneklikleri artarken akma dayanımının azaldığı gözlemlenmiştir. Üretim sonrası kompozitten ayrılan sacların mekanik özelliklerinde de kompozitin mekanik özelliklerinde benzer değişiklikler bulunmuştur. Kompozit bileşenlerinin mekanik özelliklerindeki bazı uyumsuzluklar ise gözardı edilmiştir. Bu ölçüm farklılıklarının kompozitlerin ayrılması esnasında yüzeyde oluşan kontrolsüz kusurların varlığından kaynaklandığı düşünülmektedir.

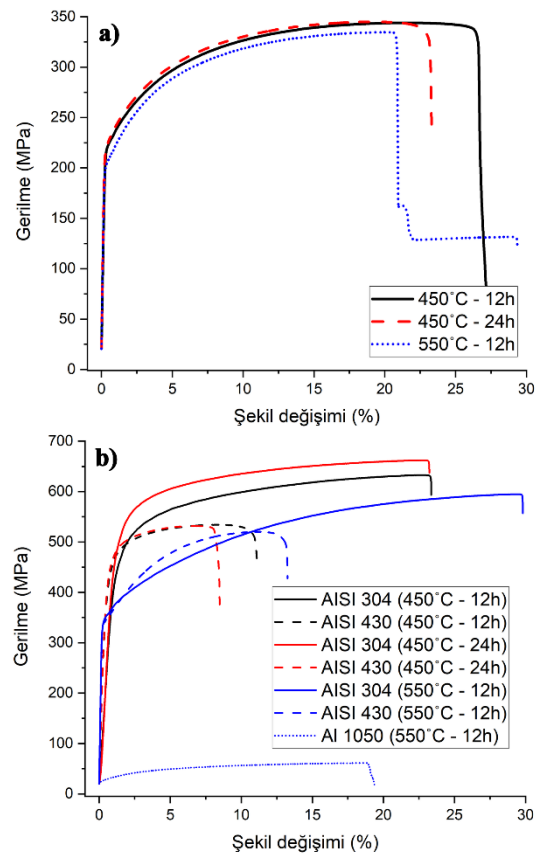
Tablo 2. Isıl işlem sonrası kompozitlerin ve bileşenlerinin çekme test sonuçları

Deney numuneleri	%0,2 Mukavemeti (MPa)	Akma	Çekme (MPa)	Mukavemeti	Kopma Uzaması (%)
AISI 304 (450 °C-12h)	429.75		632.83		22.04
AISI 430 (450 °C-12h)	402.47		534.18		10.66
Kompozit (450 °C-12h)	222.93		343.95		27.16
AISI 304 (450 °C-24h)	461.87		662.27		21.99
AISI 430 (450 °C-24h)	416.50		531.68		8.12
Kompozit (450 °C-24h)	223.86		345.03		23.05
AISI 304 (550 °C-12h)	347.50		594.89		29.50
AISI 430 (550 °C-12h)	341.43		520.23		13.01
Al 1050 (550 °C-12h)	27.99		68.38		17.18
Kompozit (550 °C-12h)	207.45		334.66		29.25

Kompozitlerin genel mekanik özelliklerinin her bir bileşeninin mekanik özelliğinin hacimce miktarı ile ilişkili olduğuna dair çalışmalar vardır. Takuda ve diğerleri alüminyum alaşımından ve çelik levhadan yapılmış tabakalı kompozitlerin uzamasının hacimce oran kuralıyla kabaca tahmin edilebilir olduğu bildirilmiştir [29]. Bu durumda kompozitin hacimce büyük bir kısmını oluşturan Al, mekanik özelliklerinde de belirleyici olması beklenir. Saf alüminyumun ticari formdaki sertliği ısıtılardan çok fazla etkilenmezken, deformasyonla sertleştirilmiş halde ısıtılardan büyük ölçüde etkilenilmekte, akma dayanımı deformasyon ile 5 kattan fazla artabilmektedir [32]. Sonuç olarak, Al'un mekanik özellikleri ilk aşamada haddelenmeden sonra artarken, ısıtılardan sonra azaldı ve bu konuda ısıtılama miktarı belirleyici olmuştur.

Tabakalı kompozitlerin mekanik özelliklerinin bileşenleri ve ara yüzleri ile ilişkisi Şekil 4'te net bir şekilde görülmektedir. Ara yüzey bağı kuvvetli olan kompozitler yekpare bir malzeme gibi çalışırken, ara yüzey bağı kötü olanlar bir arada bulunan farklı malzemeler gibi davranmaktadır. Sonraki kısımlarda sıyırma testi ve mikroyapı incelemelerinde açıklanacağı gibi 450°C'de yapılan ısıtılama sonrası iyi bir arayüzey oluşurken 550°C'de yapılan ısıtılama sonrası tabakalar neredeyse birbirinden ayrılmıştır. Çekme test grafiklerinde görüldüğü gibi 550°C'de ısıtılama yapılan kompozit diğerlerinden farklı olarak üç kademede hasara uğramıştır. İlk aşamada (yaklaşık %20) sünekliği en düşük olan AISI 430 paslanmaz kopmuş ve mukavemet büyük oranda düşmüştür. Sonrasında Al kopmuş (yaklaşık %22) ve mukavemet biraz daha düşmüştür. Son

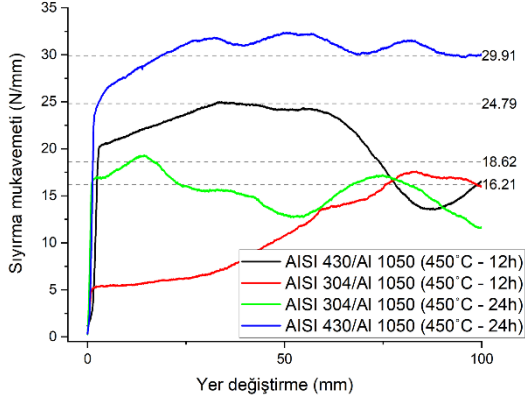
aşamada ise AISI 304 paslanmaz koparak süreç tamamlanmıştır.



Şekil 4. a) Kompozitlerin ve b) her bir kompozit bileşeninin çekme grafikleri.

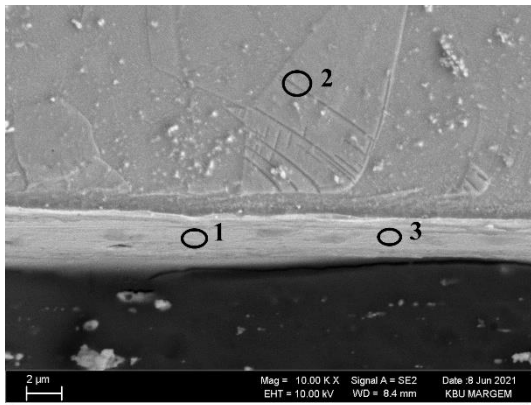
Sonuç olarak, Şekil 4a'da görüldüğü gibi en düşük süneklik, tabakalı kompozitin sünekliği hakkında belirleyicidir ve kompozitin uzaması, tek tek katman bileşenlerinin arasında bir değerdedir. Yani, kompozitin uzaması, en sünek bileşenden (AISI304) daha az, ancak en gevrek bileşenden (AISI430) daha fazla olacaktır. Bu aşamada kompozit davranışındaki belirleyici etken ise arayüzey bağı mukavemetidir. Ara yüzey bağlanma mukavemetinin tabakalı kompozit levhanın çekme uzaması üzerindeki etkisi araştırılmış

ve arayüzey bağ mukavemetinin artmasıyla çekme uzamasının arttığını göstermiştir [33]. Arayüzey bağ kuvvetini belirlemek için yapılan sıyırma testlerinin sonuçları Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 5. Farklı ısıl işlem görmüş kompozitlerin her iki yüzeylerinin 180° sıyırma test grafikleri.

Sıyırma testi, haddelenmiş ve farklı ısıl işlemler uygulanmış kompozitlerin her iki ara yüzeylerinden gerçekleştirilmiştir. Bu işlem bağlanma mukavemeti sıfıra yakın bir değerde olduğu için 550°C'de ısıl işlem yapılmış kompozitlere uygulanamamıştır. Testler sonrası grafik üzerinde verilen ortalama sıyırma mukavemetleri incelendiğinde 450°C'de yapılan ısıl işlemler sonrası artan ısıl işlem süresi ile her iki yüzeyde de bağlanmanın arttığı görülmektedir.

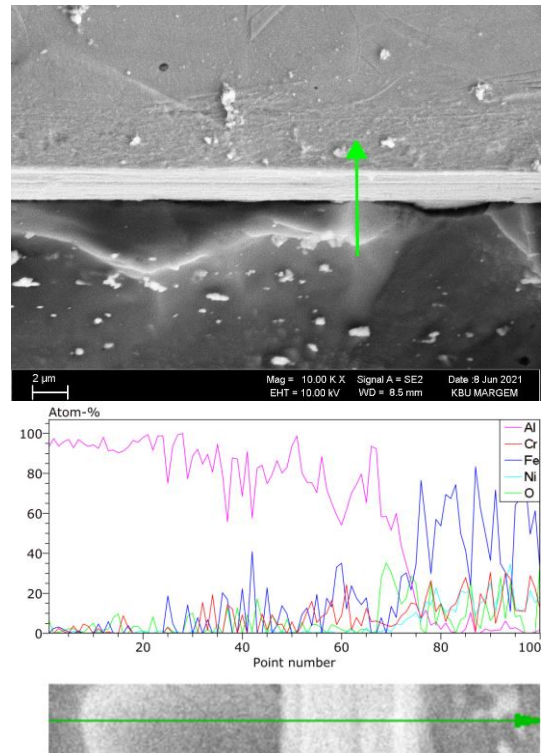


Şekil 6. 450°C'de 12 saat ısıl işlem sonrası Al-AISI304 katmanlarının ara yüzey görüntüsü ve alan EDX analizi

Yüzeyleri birbiri ile kıyaslandığında ise AISI430 ile Al arasında daha güçlü bir

bağlanma oluşmuştur. Oluşan bağlanmadaki değişimin nedenlerini belirlemek için mikroyapı incelemeleri yapılmıştır. Şekil 6'da 450°C'de 12 saat ısıl işlem sonrası hadde doğrultusundaki arayüzey görüntüsü verilmiştir.

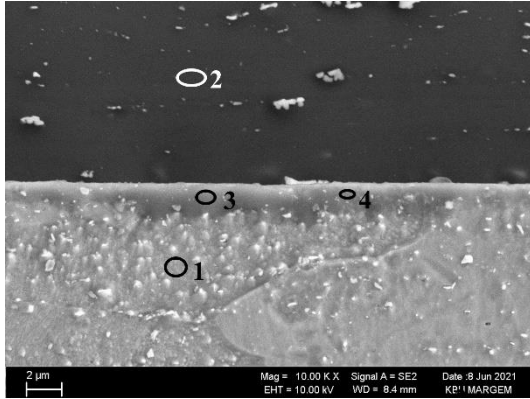
450°C'de 12 saat ısıl işlemden sonra Al-AISI304 katmanlarının ara yüzü genel olarak taranmış ve Şekil 6'da verilen yapıya benzer bir oluşum tespit edilmiştir. Benzer oluşum 450°C'de 24 saat ısıl işlemden sonra da gözlemlenmiştir (Şekil 7). Temel elementlerin (Al, Fe, Cr ve Ni) ara fazdaki dağılımı EDX nokta analizleri Şekil 6 ve EDX çizgi analizleri Şekil 7'de verilmiştir. Analizde sırasıyla Al ve AISI 304 levhalarından 3 ve 4 numaralı noktalar alınmıştır. EDX analizindeki 1 ve 3. noktalar ve çizgi EDX'deki değişimler ara fazın esas olarak Al ile birlikte Fe ve düşük miktarda diğer elementler belirlenmiştir. Fe-Al ikili sisteminde beş farklı faz bulunmasına rağmen genel olarak Fe₂Al₅ ve Fe₄Al₁₃ intermetalik katmanlar oluşturduğu bildirilmiştir [34]. Östenitik paslanmaz çelik ile ilgili bir çalışmada ise 18Cr-10Ni paslanmaz çeliğin sıvı alüminyum ile etkileşimi sonrasında çelik yüzeyinde (Fe, Cr, Ni)₂Al₅ bazlı bir tabaka rapor edilmiştir [35]. Yaptığımız analizlerde belirlenen ara fazın da (Fe, Cr, Ni)₂Al₅ oranına benzer olduğu ve bu fazın kalınlığı genel olarak 1µm olarak belirlenmiştir.



Şekil 7. 450°C'de 24 saat ısıl işlem sonrası Al-AISI304 katmanlarının ara yüzey görüntüsü ve çizgi EDX analizi

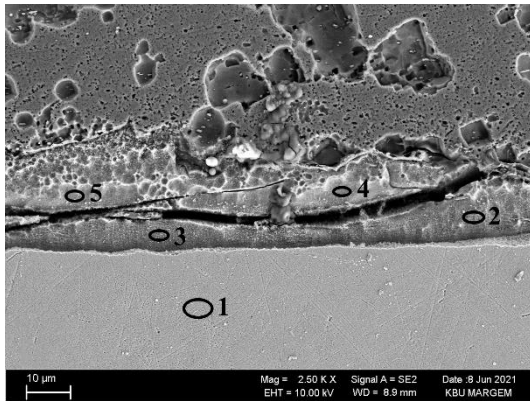
Kompozit levhaların haddelenme ve 450°C'de 12 saat ısıl işlemden sonraki Al ve AISI 430 arayüz

görünümü Şekil 8'de verilmiştir. Paslanmaz çelik yüzeyde görülen koyu gri fazların nokta EDS analizi (3. ve 4. noktalar) orantısal olarak incelendiğinde içinde az miktarda Cr içeren Fe₄Al₁₃ fazının varlığını göstermektedir. Bu konu ile ilgili yapılan bir çalışmada alüminyum eriyik içinde Fe-Cr (%10 ve %25 Cr) alaşımlarının çözünme süreci incelenmiş ve üniform bir Fe₂Al₅ tabakası ve Cr₂Al₁₃ içeren gözenekli bir Fe₄Al₁₃ tabakası şeklinde iki intermetalik tabakanın varlığı belirtilmiştir [36].



Atomik oran (%)					
Spektrum	O	Al	Fe	Cr	Ni
1	2,98	0,94	79,91	15,87	0,31
2	1,72	97,93	0,00	0,00	0,34
3	73,59	2,99	18,29	4,37	0,76
4	73,47	2,75	18,13	4,99	0,66

Şekil 8. 450°C'de 12 saat ısıtım sonrası Al-AISI430 katmanlarının ara yüzey görüntüsü ve alan EDS analizi

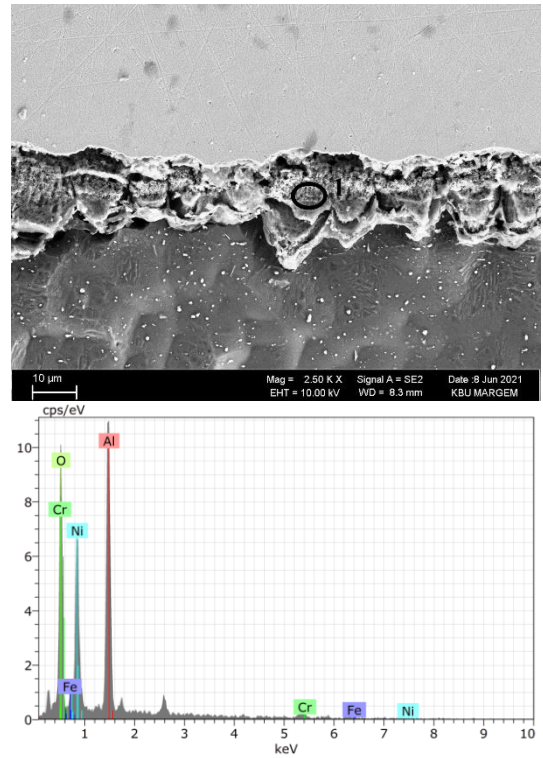


Atomik oran (%)					
Spektrum	O	Al	Fe	Cr	Ni
1	10,33	3,26	65,34	15,94	5,14
2	7,45	72,24	12,69	4,27	3,36
3	3,67	73,16	15,36	4,74	3,07
4	5,91	72,78	14,81	3,43	3,06
5	8,46	70,46	14,30	4,42	2,36

Şekil 9. 550°C'de 12 saat ısıtım sonrası Al-AISI430 katmanlarının ara yüzey görüntüsü ve alan EDS analizi

Kompozit levhaların haddelene ve 550°C'de 12 saat ısıtım sonrası arayüzey bağlanmalarının yaklaşık sıfıra indiği mekanik testlerde belirtilmiştir. Yapılan mikroyapı incelemelerinde Al-AISI430 arasında (Şekil 9) elementel oranlar incelendiğinde (Fe, Cr, Ni)₂Al₅ fazına benzediği görülmektedir. Diğer ısıtım işlemli numunelerden farklı olarak bu ısıtım işlemi sonrasında ara tabaka kalınlığı yaklaşık 10 µm civarındadır. Şekil 9'da da görüldüğü gibi oluşan fazlarda kısmen kontrast farkı gözlenirse de (2,3 ve 4,5) benzer element oranları tespit edilmiştir.

550°C'de 12 saat ısıtım sonrası Al-AISI304 arasında oluşum incelendiğinde (Şekil 10) genel olarak Al ve Cr oksitlerinden oluştuğu ve arayüzeyde bağlanmanın nerdeyse sona erdiği görülmektedir.



Şekil 10. 550°C'de 12 saat ısıtım sonrası Al-AISI304 katmanlarının ara yüzey görüntüsü ve alan EDS analizi.

Genel olarak, mikroyapı çalışmalarında, kalın ve belirgin oksit ve intermetalik tabakalarının oluştuğu belirlenmiştir. Bu da kompozitin mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilemiştir. Fe₂Al₅ intermetaliti, Al ve Fe arasında oluşan tüm alüminitler arasında en sert ve kırılabilir faz olarak tanımlanmıştır [37]. Bu nedenle Al-Fe ara yüzeyinde oluşan bu kırılabilir fazın kalınlığının artması katmanlı kompozitler arasındaki bağı azaltmış ya da bitirmiştir.

4. Sonuç ve Öneriler

Artan ısıtıl işlem sıcaklık ve süreleri sonrası Al ve AISI 430 tabakalarının sertliği kademeli olarak azalırken, AISI 304'ün sertliği ilk aşamada artıp sonrasında azalmıştır. Bu değişim genel olarak kompozitin levhalarına ayrı ayrı uygulanan çekme testlerinde de gözlenmiş %0,2 akma ve maksimum çekme mukavemeti benzer bir değişim sergilemiştir. Kompozitin genel çekme testi sonucunda ise akma ve maksimum çekmede ısıtıl işlemin belirgin bir etkisi görülmemiştir. Süneklikte ise belirgin bir fark oluşmuş, AISI 304'ün süneklik değişimine benzer bir değişim belirlenmiştir. Genel olarak kompozitte en düşük mekanik özellikler ve en yüksek süneklik 550°C'de 12 saat yapılan ısıtıl işlem sonrası ölçülmüştür.

450°C'de farklı sürelerde yapılan ısıtıl işlemlerde benzer ara yüzey oluşumları gözlemlenmiştir. Bu işlemler sonrası bağ kuvveti ısıtıl işlem süresinin artması ile bir miktar artmıştır. Ara yüzey incelemelerinde iki farklı süre uygulamasında da benzer oluşumlar gözlenmiştir. Al/AISI 430 arasında değişken kalınlıkta Fe₂Al₅ fazı, Al/AISI 304 arasında ise

ortalama 1µm kalınlığında (Fe, Cr, Ni)₂Al₅ fazı tespit edilmiştir. 550°C'de yapılan ısıtıl işlem sonrası ise ara yüzeyde kalın ve kırılmış Fe₂Al₅ intermetalığı ve metal oksitler gözlemlenmiştir. Bunlara bağlı olarak arayüzey bağ ölçülemeyecek kadar düşük olmuştur.

Teşekkür

Bu çalışma Karabük Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından desteklenmiştir (KBÜBAP-21-DS-093). Ayrıca malzeme tedariki için Kocaoğlu Paslanmaz firmasına teşekkür ederiz.

Yazarların Katkısı

Yazarların bu çalışmaya katkısı eşittir.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar

- [1] A. Dudek, B. Lisiecka, and R. Ulewicz, "The effect of alloying method on the structure and properties of sintered stainless steel," *Archives of Metallurgy and Materials*, vol. 62, pp. 281–287, 2017.
- [2] F. Presuel-Moreno, J. R. Scully, and S. R. Sharp, "Literature review of commercially available alloys that have potential as low-cost corrosion resistant concrete reinforcement," *Corrosion* 2009, 2009.
- [3] Z. Li *et al.*, "Interfacial characteristics and mechanical properties of duplex stainless steel bimetal composite by heat treatment," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 787, p. 139513, 2020.
- [4] G. Casalino, A. Angelastro, P. Perulli, C. Casavola, and V. Moramarco, "Study on the fiber laser/TIG weldability of AISI 304 and AISI 410 dissimilar weld," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 35, pp. 216–225, 2018.
- [5] M. H. Bina, M. Jamali, M. Shamanian, and H. Sabet, "Investigation on the resistance spot-welded austenitic/ferritic stainless steel," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 75, no. 9–12, pp. 1371–1379, 2014.
- [6] A. K. Lakshminarayanan, K. Shanmugam, and V. Balasubramanian, "Effect of welding processes on tensile and impact properties, hardness and microstructure of AISI 409M ferritic stainless joints fabricated by duplex stainless steel filler metal," *Journal of iron and steel research, International*, vol. 16, no. 5, pp. 66–72, 2009.
- [7] J. R. Berretta, W. de Rossi, M. D. M. das Neves, I. A. de Almeida, and N. D. V. Junior, "Pulsed Nd: YAG laser welding of AISI 304 to AISI 420 stainless steels," *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 45, no. 9, pp. 960–966, 2007.
- [8] G. Sharma *et al.*, "Novel development of nanoparticles to bimetallic nanoparticles and their composites: a review," *Journal of King Saud University-Science*, vol. 31, no. 2, pp. 257–269, 2019.
- [9] Z. Li *et al.*, "Hot deformation behaviour and interfacial characteristics of bimetal composite at elevated temperatures," *Intermetallics*, vol. 125, p. 106893, 2020.
- [10] V. Jindal, V. C. Srivastava, A. Das, and R. N. Ghosh, "Reactive diffusion in the roll bonded iron–

- aluminum system,” *Materials letters*, vol. 60, no. 13–14, pp. 1758–1761, 2006.
- [11] D. Naoi and M. Kajihara, “Growth behavior of Fe₂Al₅ during reactive diffusion between Fe and Al at solid-state temperatures,” *Materials Science and Engineering: A*, vol. 459, no. 1–2, pp. 375–382, 2007.
- [12] D. R. Lesuer, C. K. Syn, O. D. Sherby, J. Wadsworth, J. J. Lewandowski, and W. H. Hunt, “Mechanical behaviour of laminated metal composites,” *International Materials Reviews*, vol. 41, no. 5, pp. 169–197, 1996.
- [13] M. L. S. Jekla, O. NA, K. Materialih, I. Z. VRO, and I. M. Valjanjem, “Mechanical Properties of Laminated Steel-Based Composite Materials Fabricated by Hot Rolling,” *Materiali in tehnologije*, vol. 51, no. 4, pp. 557–561, 2017.
- [14] V. I. Mali *et al.*, “Microstructure and mechanical properties of Ti/Ta/Cu/Ni alloy laminate composite materials produced by explosive welding,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 93, no. 9, pp. 4285–4294, 2017.
- [15] K. Liu, Y. Li, C. Xia, and J. Wang, “Microstructural evolution and properties of TLP diffusion bonding super-Ni/NiCr laminated composite to Ti-6Al-4V alloy with Cu interlayer,” *Materials & Design*, vol. 135, pp. 184–196, 2017.
- [16] X. Gao, D. Wei, and Z. Jiang, “Analysis of temperature field in liquid-solid bimetal casting of laminated metal composite,” *Advanced Science Letters*, vol. 15, no. 1, pp. 48–52, 2012.
- [17] A. Farid and S. Guo, “On the processing, microstructure, mechanical and wear properties of cermet/stainless steel layer composites,” *Acta Materialia*, vol. 55, no. 4, pp. 1467–1477, 2007.
- [18] C. M. Cepeda-Jiménez, P. Hidalgo, M. Pozuelo, O. A. Ruano, and F. Carreño, “Influence of constituent materials on the impact toughness and fracture mechanisms of hot-roll-bonded aluminum multilayer laminates,” *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. 41, no. 1, p. 61, 2010.
- [19] Q. Huang, X. Yang, L. Ma, C. Zhou, G. Liu, and H. Li, “Interface-correlated characteristics of stainless steel/carbon steel plate fabricated by AAWIV and hot rolling,” *Journal of Iron and Steel Research International*, vol. 21, no. 10, pp. 931–937, 2014.
- [20] J. Yuan, Y. Pang, and T. Li, “Multilayer clad plate of stainless steel/aluminum/aluminum alloy,” *Journal of Wuhan University of Technology-Mater Sci Ed*, vol. 26, no. 1, pp. 111–113, 2011.
- [21] K. S. Lee, D. H. Yoon, S. E. Lee, and Y. S. Lee, “The effect of thermomechanical treatment on the interface microstructure and local mechanical properties of roll bonded pure Ti/439 stainless steel multilayered materials,” *Procedia Engineering*, vol. 10, pp. 3459–3464, 2011.
- [22] H. Danesh Manesh and A. Karimi Taheri, “Study of mechanisms of cold roll welding of aluminium alloy to steel strip,” *Materials science and technology*, vol. 20, no. 8, pp. 1064–1068, 2004.
- [23] T. Tabata, S. Masaki, and K. Azekura, “Bond criterion in cold pressure welding of aluminium,” *Materials Science and Technology*, vol. 5, no. 4, pp. 377–381, 1989.
- [24] J. An, Y. Lu, D. W. Xu, Y. B. Liu, D. R. Sun, and B. Yang, “Hot-roll bonding of Al-Pb bearing alloy strips and hot dip aluminized steel sheets,” *Journal of materials engineering and performance*, vol. 10, no. 2, pp. 131–135, 2001.
- [25] R. Cao, Y. Ding, Y. Yan, X. Zhang, and J. Chen, “Effect of heat treatment on interface behavior of martensite/austenite multilayered composites by accumulative hot roll bonding,” *Composite Interfaces*, 2019.
- [26] B. X. Liu *et al.*, “Deformation behavior and strengthening mechanisms of multilayer SUS304/Cr17 steels with laminate/network interface,” *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. 51, no. 7, pp. 3658–3673, 2020.
- [27] M. Talebian and M. Alizadeh, “Manufacturing Al/steel multilayered composite by accumulative roll bonding and the effects of subsequent annealing on the microstructural and mechanical characteristics,” *Materials Science and Engineering: A*, vol. 590, pp. 186–193, 2014.
- [28] A. Mendes, I. Timokhina, A. Molotnikov, P. D. Hodgson, and R. Lapovok, “Role of shear in interface formation of aluminium-steel multilayered composite sheets,” *Materials Science and Engineering: A*, vol. 705, pp. 142–152, 2017.
- [29] H. Takuda, H. Fujimoto, and N. Hatta, “Formabilities of steel/aluminium alloy laminated composite sheets,” *Journal of materials science*, vol. 33, no. 1, pp. 91–97, 1998.
- [30] F. Yoshida, R. Hino, and T. Okada, “Stretch bending and the subsequent straightening of sheet metal laminates,” in *Advances in Engineering Plasticity and its Applications*, Elsevier, 1993, pp. 1097–1104.
- [31] F. X. Yin, L. Li, Y. Tanaka, S. Kishimoto, and K. Nagai, “Hot rolling bonded multilayered composite steels and varied tensile deformation behaviour,” *Materials Science and Technology*, vol. 28, no. 7, pp.

783–787, 2012.

- [32] M. A. Abdulstaar, E. A. El-Danaf, N. S. Waluyo, and L. Wagner, “Severe plastic deformation of commercial purity aluminum by rotary swaging: Microstructure evolution and mechanical properties,” *Materials Science and Engineering: A*, vol. 565, pp. 351–358, 2013.
- [33] S. Nambu, M. Michiuchi, J. Inoue, and T. Koseki, “Effect of interfacial bonding strength on tensile ductility of multilayered steel composites,” *Composites Science and Technology*, vol. 69, no. 11–12, pp. 1936–1941, 2009.
- [34] K. Bouche, F. Barbier, and A. Coulet, “Intermetallic compound layer growth between solid iron and molten aluminium,” *Materials Science and Engineering: A*, vol. 249, no. 1–2, pp. 167–175, 1998.
- [35] V. I. Dybkov, “Interaction of 18Cr-10Ni stainless steel with liquid aluminium,” *Journal of Materials Science*, vol. 25, no. 8, pp. 3615–3633, 1990.
- [36] K. Barmak and V. I. Dybkov, “Interaction of iron-chromium alloys containing 10 and 25 mass% chromium with liquid aluminium Part I Dissolution kinetics,” *Journal of materials science*, vol. 38, no. 15, pp. 3249–3255, 2003.
- [37] S. Kobayashi and T. Yakou, “Control of intermetallic compound layers at interface between steel and aluminum by diffusion-treatment,” *Materials science and engineering: A*, vol. 338, no. 1–2, pp. 44–53, 2002.