



# Evaluation of the Effect of Heat Treatment Parameters on Mechanical Properties of Architected Steel Incorporated Low Carbon Steel and Aluminum 6061

Alireza Amanollahi<sup>1</sup>, Mehdi Raeissi<sup>2</sup>, Navid Saeidi<sup>3\*</sup>, Iman Ebrahimzadeh<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Master of Science, Department of Materials Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran.

<sup>2</sup>Assistant Professor, Department of Materials Engineering, Faculty of Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.

<sup>3</sup>Assistant Professor, Department of Metallurgy Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

<sup>4</sup>Assistant Professor, Advanced Materials Research Center, Department of Materials Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran.

## ARTICLE INFO

### Article Type:

Original Research

**Received:** 02.27.2022

**Revised:** 04.06.2022

**Accepted:** 04.25.2022

### Keyword:

Architected Steel

Lightweight Steel

Cold Roll Bonding

Heat Treatment

Mechanical Properties

### \*Corresponding Author:

Navid Saeidi

**Email:** [navidsae@gmail.com](mailto:navidsae@gmail.com)

## ABSTRACT

Employing lightweight steel in the transportation industry, particularly the automotive industry, has received a great deal of attention in recent years, and much research has been undertaken to replace the low carbon steel used in the transportation industry with lighter materials. In the present study, a new class of lightweight steel called architected steel comprising of alternating layered structure of steel and aluminum was produced. Cold rolling process was employed to make a connection between a simple low carbon steel and 6061 aluminum alloy. In order to improve the inter-layer connection and properties of the product, the prepared samples were subjected to annealing treatment at different times (30-120 min) and temperatures (400-500° C). Finally, after examining the conditions of different annealing processes, the best cycle to achieve an appropriate combination of strength and ductility was determined. Based on the findings, the best mechanical properties (610 MPa UTS and 16.1% elongation) was obtained in the specimen annealed at 400°C for 90 min.



---

## EXTENDED ABSTRACT

---

### Introduction

Evaluation of design concept is seen to have a crucial part in maintaining competition in international marketplaces, which are impacted by the fast-paced competitive environment. Rapid technical advancements, changing customer needs, and increasing business competition encourage corporations to provide products that are higher in quality and cheaper in cost as quickly as possible. However, there is risk and uncertainty involved in this process. These factors should be considered in order to quickly reduce potential difficulties and assure the success of product development. A poor choice of design concept for a specific product might increase development costs, lead to fundamental changes, and jeopardize the progress of the product as a whole. It is challenging to make up for the shortcomings at this stage of product design. Therefore, the concept of final design at the initial stage of development may be considered the most significant stage among the stages of new product development due to its dangerous function in subsequent design activities. The purpose of this paper is to propose a systematic method for dealing with subjectivity and ambiguity in order to evaluate the design concept.

### Methodology

Determining the relative importance of the evaluation attributes and ranking the alternatives are the two key components of evaluating the design concepts. Both elements should be considered at once to eliminate bias in the evaluation process. This paper proposes an integrated approach by incorporating rough numbers in the analysis hierarchy process (AHP) and TOPSIS technique to manage ambiguity and subjectivity in product design evaluation. To determine the relative importance, the rough number is integrated into the AHP. The TOPSIS technique based on rough numbers for evaluating design concepts is then presented in the study. The relative importance of each attribute and the final ranking of alternatives can be determined without the need for any additional auxiliary information by combining the rough hierarchical analysis process and rough TOPSIS technique. As a result, the proposed method effectively reflects the decision-makers' accurate perception and increases the certainty of the evaluation of design concepts.

### Results and discussion

To evaluate the design concept, the proposed method was utilized to choose the idea of concentrate powder for laundry of all types of clothing and textiles with a laundry machine. Concentrate refers to the fact that you can wash a large volume of clothes without using much powder. Ultra-concentrated powder can efficiently and effectively remove even the most difficult stains from clothing. Therefore, this product's benefits include its capacity to effectively remove stains, especially from colored clothing, and keep the stability of the clothing's color. In light of this decision to make ultra-concentrated laundry powder, the design and research and development units developed the

appropriate designs based on the factors influencing the idea of ultra-concentrated laundry powder design. Therefore, it became essential to evaluate the product's conceptual design. Five different conceptual designs exist for the company that produces concentrated powder. To determine which of these five alternatives is best for designing the following stages, the design concept must be evaluated. Seven attributes including production cost, formulation and raw materials, compliance with current standards, customer needs analysis, suitable and pleasing design, convenient maintenance requirements, and product compatibility with the environment were primarily addressed in the first stage of design. One of these, the cost of production, had a cost-like aspect while others had a profit-like nature. In order to evaluate the various powder design alternatives, five specialists were requested to act as decision-makers and offer their opinions. This evaluation can often be broken down into two stages: evaluating the attributes using a rough AHP, and then ranking the alternatives using a rough TOPSIS.

Rough AHP was conducted to determine the weights of these seven criteria, and pairwise comparison questionnaires were distributed to five respondents. All experts completed their questionnaires in a completely consistent manner, and on the basis of this, rough numbers representing the weights of the attributes were determined. Five alternatives were chosen as the Omo ultra-concentrated laundry powder design concept for the production of Omo ultra-concentrated laundry powder and considering the seven attributes listed above. The information pertaining to each concept for each of the seven attributes was identified by 12 experts. In order to choose the best design concept for the production design of Omo ultra-concentrated laundry powder, five design alternatives were carefully evaluated and ranked using the TOPSIS technique based on rough numbers. According to the ranking rules of rough numbers, concept A1 had the highest priority, and concepts A4, A5, A2, and A3 received priorities from 2 to 5, respectively.

## Conclusion

This paper proposed an integrated rough AHP and TOPSIS technique based on rough numbers in order to control ambiguity and subjectivity to address the subjectivity that currently exists in design concept evaluation. In order to capture individual preferences and measurement ambiguities, this study used approximate numbers. Initially, these numbers were used into the AHP to determine the relative weight of each attribute. They were then combined with TOPSIS to prioritize the alternatives. Combining the rough AHP and rough TOPSIS allowed the determination of the relative weights of each attribute and the ranking of the chosen alternatives. Finally, the proposed approach was applied to a case study to demonstrate the efficiency and effectiveness of the evaluation of design concept. The findings demonstrated the applicability of the suggested method, which was based on rough numbers, to many group decision-making contexts. In the future, a variety of other methods, including analytic network process, DEMATEL, Promethee, and even their integrated models, can be used in combination with the rough number to broaden the application areas and remove ambiguities in subjective decision-making conditions.

## بررسی تأثیر پارامترهای عملیات حرارتی بر خواص مکانیکی فولاد معماری شده بر پایه فولاد کم کربن و آلومینیوم ۶۰۶۱

علیرضا امان‌الهی<sup>۱</sup>، مهدی رئیسی<sup>۲</sup>، نوید سعیدی<sup>۳\*</sup>، ایمان ابراهیم‌زاده<sup>۴</sup>

- ۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مواد، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران.
- ۲- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی مواد، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران.
- ۳- استادیار، گروه مهندسی متالورژی، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران.
- ۴- استادیار، مرکز تحقیقات مواد پیشرفته، دانشکده مهندسی مواد، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران.

### چکیده

### اطلاعات مقاله

استفاده از فولادهای سبک در صنایع حمل و نقل به خصوص خودروسازی امروزه بسیار مورد توجه قرار گرفته است و در جهت جایگزینی فولاد کم کربن مورد استفاده در صنایع حمل و نقل با مواد سبک‌تر تحقیقات بسیاری صورت گرفته است. در این راستا در پژوهش حاضر دسته‌جدیدی از فولادهای سبک با عنوان فولادهای معماری شده با ساختار لایه‌ای متناوب فولاد و آلومینیوم تولید شد. بدین منظور با استفاده از فرآیند اتصال نوردی سرد میان یک فولاد ساده کم کربن و آلومینیوم ۶۰۶۱، فولاد معماری شده مورد نظر ساخته شد و به منظور بهبود اتصال و خواص مکانیکی، محصول تولیدی مورد عملیات حرارتی آنیل در دما (۴۰۰ تا ۵۰۰ درجه سانتیگراد) و زمان‌های متفاوت (۳۰ تا ۱۲۰ دقیقه) قرار گرفت. در نهایت پس از بررسی شرایط فرایند آنیل در دماها و زمان‌های مختلف بهترین سیکل برای دستیابی به استحکام نهایی و انعطاف‌پذیری مطلوب تعیین گردید. بر این اساس بهترین استحکام نهایی (۶۱۰ MPa) و انعطاف‌پذیری (۱/۱۶ درصد) مربوط به نمونه آنیل شده در دمای ۴۰۰°C به مدت زمان ۹۰ دقیقه بود.

### نوع مقاله: مقاله پژوهشی

دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۱۲/۰۸

بازنگری مقاله: ۱۴۰۱/۰۱/۱۷

پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۲/۰۵

### کلید واژگان:

شبکه‌های اجتماعی  
گراف‌های پیچیده  
بیشینه‌سازی تأثیر  
یادگیری عمیق  
خودرمن‌نگارهای خلوت

\*نویسنده مسئول: نوید سعیدی

پست الکترونیکی:

[navidsae@gmail.com](mailto:navidsae@gmail.com)

## مقدمه

امروزه استفاده از فولادهای سبک در صنایع حمل و نقل بسیار مورد توجه قرار گرفته است. دو عنصر آلومینیوم و منیزیم به علت وزن کم، مهم‌ترین عناصر قابل استفاده در ساخت این فولادها هستند. با توجه به هزینه و فرایند تولید، استفاده از آلومینیوم نسبت به منیزیم مطلوب‌تر می‌باشد ولی مشکل فولادهای با میزان آلومینیوم بالا، انعطاف‌پذیری نسبتاً پایین این فولادها در دمای اتاق است که کاربرد آن‌ها را محدود می‌سازد. به‌تازگی از فرایند اتصال نوردی سرد به‌طور گسترده‌ای در اتصال فلزات همسان یا ناهمسان در حالت جامد استفاده شده است. در حقیقت این روش، نوعی فرایند جوش حالت جامد است که در آن، تغییر شکل پلاستیک فلز منجر به ایجاد پیوند می‌شود. محصول نهایی در این فرایند به شکل ورق یا نوار است و از آن جایی که مواد مورد استفاده در آن می‌تواند متنوع باشد، امکان نوآوری‌های زیادی را فراهم می‌آورد [۱؛ ۲]. موادی مانند فولاد، آلومینیوم، مس، روی، منیزیم و ... در این فرایند استفاده شده‌اند. در این میان، ورق لایه‌ای آلومینیوم- فولاد به علت خواص منحصر به فردی چون استحکام ویژه بالا، مقاومت به خوردگی و صرفه اقتصادی در صورت داشتن استحکام پیوند مناسب می‌تواند جایگزین فولادهای مورد استفاده در صنایع حمل و نقل باشد.

اتصال نوردی سرد شامل تعبیه یک ورق فلزی بر روی ورقی دیگر و عبور آنها از میان دو غلطک به‌منظور اتصال و کاهش ضخامت هم‌زمان در حالت جامد می‌باشد. مهم‌ترین مسئله، ایجاد پیوند متالورژیکی میان دو فلز غیریکسان و استحکام آن می‌باشد. معمولاً پس از عملیات نورد، محصول دوفلزی برای کاهش کرنش باقی‌مانده ناشی از نورد و بهبود استحکام، تحت عملیات حرارتی قرار می‌گیرد [۳]. یکی از مراحل مهم در فرایند اتصال نوردی سرد، آماده‌سازی سطوح از طریق برس‌کاری است. مشخص شده است که عملیات برس‌کاری سبب ایجاد مناطق موج‌دار تپه‌ای شکل در سطح تماس می‌شود که به آنها زبانه (لایه‌ی پوشش) گفته می‌شود. عرض زبانه‌ها در حدود ۵۰ تا ۱۰۰ میکرومتر است. ضمن آن‌که ماهیت این زبانه‌ها به دلیل کار سختی شدیدی که بر روی آنها ناشی از عملیات برس‌زنی صورت می‌گیرد، نسبتاً ترد است [۴؛ ۵]. براساس تحقیقات انجام شده، به دلیل نورد در دمای پایین، سازوکار عمده در این فرایند، براساس نظریه‌ی لایه‌ی نازک می‌باشد. در این نظریه، زمانی که دو سطح شکننده به یکدیگر فشرده می‌شوند، شکسته می‌شوند و روی یکدیگر گسترش می‌یابند. همچنین هرکدام از فلزات در این فرایند در طول ترک‌های ایجاد شده بر سطح فلز دیگر نیز اکستروژن می‌شود و موجب ایجاد جوش سرد می‌گردد. گفته شده است که اگر ضخامت لایه‌ی اکسیدی در سطح فلز از یک مقدار مشخص بیشتر باشد، شکستن و خرد شدن آن در حین تغییر شکل پلاستیک لایه‌های فلزی، باعث ایجاد مشکلاتی در ایجاد پیوند فلزی لایه‌ها می‌شود [۶]. از طرف دیگر، لایه‌ی اکسیدی به‌صورت یک لایه به هم پیوسته در فصل مشترک از تماس سطوح تمیز دو فلز جلوگیری می‌کند [۶؛ ۷]. از این رو ضخامت کم لایه‌ی اکسیدی از یک طرف و پیوستگی نداشتن آن در سطوح لایه‌های فلزی، شرایط مطلوب‌تری را برای اتصال لایه‌های فلزی به‌وجود می‌آورد. در آزمایش‌هایی که کاراکازوف در مورد جوش سرد بین نمونه‌های نازک مس و آلومینیوم با تغییر ضخامت لایه اکسیدی در آلومینیوم از ۱۰ تا ۱۰۰ آنگستروم انجام داد، مشخص گردید وقتی ضخامت لایه اکسید آلومینیوم کمتر از ۳۰ آنگستروم باشد اتصال یکنواخت و مطلوب خواهد بود [۷]. واضح است که برخی از خواص نهایی محصول روش اتصال نوردی سرد (CRB<sup>1</sup>)، به ماهیت و خواص فلز مورد استفاده بستگی دارد. همچنین با توجه به شرایط کاری و به‌کار بردن نوآوری‌هایی در چیدمان و تعداد لایه‌ها می‌توان خواص مطلوبی به‌دست آورد. با این وجود در یک ترکیب

<sup>1</sup> Cold Rolled Bonding

یکسان از نوع و چیدمان لایه‌های فلزی متفاوت، میزان برقراری پیوند و خواص مکانیکی از برخی عوامل متأثر است. این عوامل به اختصار شامل میزان ضخامت اولیه [۸]، آماده‌سازی سطح [۹]، میزان کاهش ضخامت [۱۰]، عملیات حرارتی پیش از نورد [۱۰] و پس از نورد [۱۱؛ ۱۲]، سرعت نورد [۱۳]، حضور ذرات [۱۴-۱۶] و رسوبات [۱۷؛ ۱۸] در فصل مشترک هستند.

برای هر ترکیب دوفلزی، زمان و دمای بهینه‌ای برای دست‌یابی به استحکام پیوند مناسب وجود دارد. این امر ناشی از منظم شدن آرایش اتمی در فصل مشترک پیوند است و از آن جایی که در عملیات آنیل، انرژی لازم برای تبلور مجدد تأمین می‌گردد؛ زمان و دمای مناسب آنیل وابسته به میزان تغییر فرم در حین نورد نیز می‌باشد [۱۲]. افزایش دمای آنیل بهبود استحکام پیوند را موجب می‌شود و این افزایش استحکام تا زمان تشکیل لایه ترکیبات بین‌فلزی در فصل مشترک ادامه خواهد داشت. تحقیقات زیادی درباره تشکیل لایه ترد ترکیبات بین‌فلزی در آنیل پس از نورد صورت گرفته است. از میان ترکیبات آهن و آلومینیوم، سه فاز  $\zeta$  ( $FeAl_2$ )،  $\eta$  ( $Fe_2Al_5$ ) و  $\theta$  ( $Fe_4Al_{13}$ ) در اثر آنیل تشکیل می‌شود و به دلیل تردی باعث افت استحکام پیوند می‌گردند [۱۹]. در رابطه با این لایه بین‌فلزی و حداکثر ضخامت مجاز آن برای آن که تأثیر منفی بر استحکام پیوند نداشته باشد، نظرات گوناگونی وجود دارد. در تحقیقی، این ضخامت ۲/۶ میکرومتر گزارش شده است [۲۰] در حالی که برخی از محققان، ضخامت کمتر از ۴ تا ۵ میکرومتر را برای جلوگیری از اثرات مخرب فاز ترد بین‌فلزی، مناسب می‌دانند [۱۸؛ ۲۱؛ ۲۲].

با توجه به بررسی تحقیقات پیشین می‌توان گفت یکی از مشکلات اساسی در تولید ورق‌های چند لایه فولادی/آلومینیومی، وجود ترکیبات بین‌فلزی ترد در فصل مشترک اتصال است که تأثیر مخربی بر استحکام پیوند لایه‌ها دارد؛ از این رو خواص مکانیکی مجموعه کامپوزیت لایه‌ای تا حد زیادی به استحکام فصل مشترک لایه‌ها وابسته است. بر این اساس، مطالعه رفتار تشکیل ترکیبات بین‌فلزی در سیکل‌های مختلف عملیات حرارتی کاربردی ضروری به نظر می‌رسد. در این راستا، در تحقیق حاضر، آلیاژ آلومینیوم با قابلیت پیرسختی (آلیاژ ۶۰۶۱) و فولاد کم‌کربن st3۳۷ برای تولید کامپوزیت سبک‌وزن با استفاده از فرایند اتصال نوردی سرد مورد استفاده قرار گرفت و تأثیر متغیرهای عملیات حرارتی بر ریزساختار و استحکام پیوند بین لایه‌ها در ورق کامپوزیتی تولیدشده ارزیابی گردید.

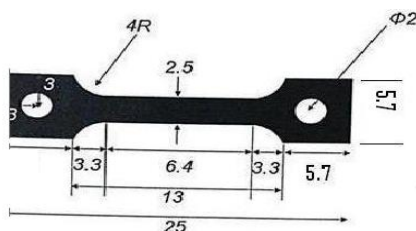
## مواد و روش تحقیق

برای انجام اتصال نوردی سرد، از آلومینیوم ۶۰۶۱ و فولاد st3۳۷ استفاده گردید. ترکیب شیمیایی آلومینیوم و فولاد مورد استفاده در جدول ۱ آورده شده است. آلومینیوم ۶۰۶۱ عملیات حرارتی‌پذیر می‌باشد و قابلیت ایجاد پیرسختی در آن وجود دارد. همچنین فولاد st3۳۷ متداول، در دسترس و مقرون‌به‌صرفه است و برای مصارف صنعتی، خواص مکانیکی قابل‌قبولی دارد. برای ایجاد شرایط پیرسازی، آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ در دمای  $550^{\circ}C$  به مدت یک ساعت قرار داده شد تا انحلال رسوب در آن صورت گیرد و سپس برای دست‌یابی به ساختار فوق‌اشباع، در آب کوئنچ شد. در ادامه، فرایند اتصال نوردی سرد صورت گرفت و در نهایت ورق نوردشده به مدت‌زمان‌های ۴ و ۶ ساعت در کوره موفلی تحت اتمسفر هوا و در دمای  $200^{\circ}C$  تحت عملیات پیرسختی قرار گرفت. همچنین به‌منظور حذف هرگونه اثر کار سختی قبلی در ورق فولادی پیش از اتصال نوردی سرد، ورق فولاد st3۳۷ به مدت ۱ ساعت در دمای  $600^{\circ}C$  آنیل شد [۱۰].

جدول ۱. ترکیب شیمیایی ورق‌های فلزی مورد استفاده در این تحقیق.

عنصر (%wt)	C	Si	Mn	P	S	Mo	Cr	Fe
فولاد کربنی ساده	۰.۰۵	۰.۰۵	۰.۲	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۲	۰.۰۱	بقیه
عنصر (%wt)	Si	Fe	Cu	Mn	Zn	Mg	Al	
آلومینیوم	۰.۵۶	۰.۳۹	۰.۱۷	۰.۰۰۸	۰.۲۹	۰.۸۵		بقیه

پس از تمیزکاری سطحی و در شرایطی که یک ورق آلومینیومی در میان دو ورق فولادی قرار داشت، عملیات نورد انجام گرفت. ضخامت اولیه ورق‌های فولادی ۱/۵ میلی‌متر و آلومینیومی ۱/۴ میلی‌متر بود که پس از نورد این ضخامت به ۱/۵ میلی‌متر معادل ۶۵ درصد کاهش ضخامت (اختلاف بین ضخامت اولیه و نهایی تقسیم بر ضخامت اولیه) رسید. سپس برای افزایش استحکام پیوند میان لایه‌ها، عملیات آنیل در سه دمای ۴۰۰، ۴۵۰ و ۵۰۰ C<sup>o</sup> در چهار زمان ۳۰، ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ دقیقه صورت پذیرفت و سپس به بررسی نتایج آزمون کشش این نمونه‌ها (نمونه‌ها در راستای RD تهیه شدند) و مقایسه آنها پرداخته شد. آزمون کشش ساده براساس استاندارد ASTM E۸ انجام و برای هر نمونه ۳ بار تکرار در نظر گرفته شد. شکل ۱ نمای کلی و ابعاد نمونه کشش را نشان می‌دهد. شایان ذکر است که انتخاب دما و زمان عملیات آنیل براساس تجربیات قبلی نویسنده انتخاب شد. براساس این تجربیات در دماهای کمتر از ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد استحکام پیوند بسیار ضعیف می‌باشد و در دماهای بالای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد ترکیبات بین فلزی موجب تضعیف بیش از حد فصل مشترک و اتصال می‌شوند.



شکل ۱. ابعاد نمونه کشش بر حسب میلی‌متر.

همچنین برای بررسی استحکام پیوند فصل مشترک در ورق‌های اتصال نوردی سرد شده از آزمون لایه کنی<sup>۱</sup> مطابق استاندارد ASTM-D۱۸۷۶-۰۱ استفاده شد.

به‌منظور بررسی ریزساختار ورق‌های تولیدی، پس از ماند گرم نمونه‌ها و مرحله سنباده‌زنی، عملیات پولیش با استفاده از پودر آلومینا (اندازه ذرات ۱ میکرومتر) انجام شد. برای حکاکی (اچ) نمونه‌ها از محلول (۸۰ mL H<sub>2</sub>O و ۸ mL ۹۵-۹۵% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) استفاده شد. در نهایت، تصویربرداری و بررسی ریزساختار میکروسکوپی با استفاده از میکروسکوپ نوری مدل Nikon EPIPHOT ۳۰۰ انجام شد. اندازه دانه در هر دما با استفاده از نرم‌افزار پردازش تصویر ImageJ و روش رهگیری خطی<sup>۲</sup> مطابق استاندارد ASTM E۱۱۲ محاسبه شد. به‌منظور بررسی دقیق‌تر

<sup>۱</sup> Peeling

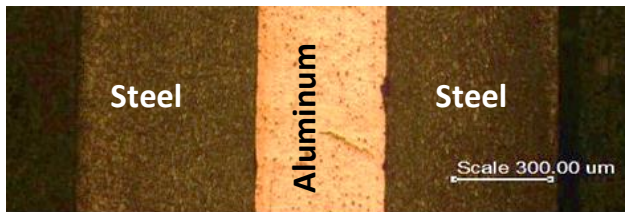
<sup>۲</sup> Linear intercept method

ریزساختار فصل مشترک، از دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی LEO ۴۳۵VP و VEGA مدل Tescan XMU استفاده گردید.

## نتایج و بحث

### بررسی و مشخصه‌یابی نمونه اتصال نوردی سرد شده

شکل ۲ تصویر ماکروسکوپی و همچنین تصویر میکروسکوپ نوری از سطح مقطع نمونه تولید شده توسط فرایند CRB را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل و آنالیز تصویری انجام گرفته بر روی آن ملاحظه می‌شود که میزان کاهش ضخامت در ورق فولادی به‌طور میانگین ۶۴/۵ درصد و در ورق آلومینیومی ۷۱/۴ درصد و در مجموع ۶۶/۷ درصد می‌باشد. با توجه به آنکه استحکام تسلیم فولاد St۳۷ برابر ۳۷۰ MPa و استحکام تسلیم آلومینیوم ۶۰۶۱ نیز حدود ۱۵۰ MPa می‌باشد، این اختلاف در کاهش ضخامت (که مقدار آن حدود ۷ درصد است) قابل پیش‌بینی است.



ب

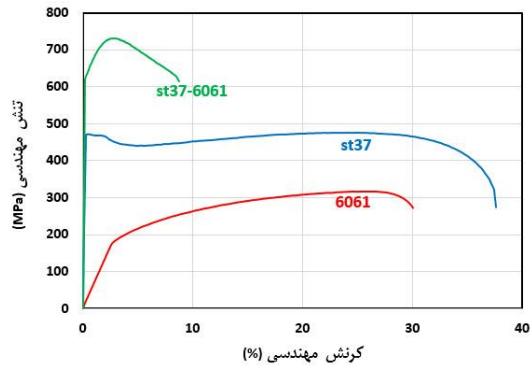


الف

شکل ۲. الف) تصویر ماکروسکوپی از مقطع نمونه تولیدشده و، ب) تصویر میکروسکوپ نوری از مقطع نمونه اتصال نوردی سرد شده.

### مقایسه رفتار کششی ورق‌های معماری شده/کامپوزیتی و منولیتیک

به‌منظور بررسی تأثیر فرایند اتصال نوردی سرد بر خواص مکانیکی، رفتار مکانیکی ورق‌های منولیتیک ۶۰۶۱ و St۳۷ تحت شرایطی مشابه با اتصال نوردی سرد ورق کامپوزیتی تحت آزمون کشش، مطالعه شد. شکل ۳ منحنی تنش- کرنش مهندسی این سه ورق را با هم مقایسه کرده است.



شکل ۳. مقایسه منحنی تنش- کرنش مهندسی آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱، فولاد st۳۷ و ورق کامپوزیتی متشکل از این دو فلز که با استفاده از فرایند اتصال نوردی سرد تولید شده است. شرایط نورد برای نمونه‌های مونولیتیک مشابه با ورق کامپوزیتی بوده است.

مطابق شکل ۳ استحکام نهایی برای فولاد ۴۷۵ MPa و برای آلیاژ آلومینیوم ۳۱۸ MPa است (استحکام نهایی فولاد st۳۷ مورد بررسی در این تحقیق با آنچه در استاندارد DIN ۱۷۱۰۰ آمده است مقایسه شد و تطبیق خوبی مشاهده شد. استحکام نهایی آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ تا حدودی بالاتر از محدوده نمونه استاندارد آنیل شده است؛ بنابراین به نظر می‌آید که فرایند آنیل تکمیل نشده است). در حالی که استحکام نهایی ورق کامپوزیتی از هر دو لایه بیشتر و حدود ۷۱۳ MPa است. مقادیر مربوط به ازدیاد طول کلی نیز برای فولاد و آلومینیوم به ترتیب حدود ۳۷ و ۳۰ درصد به دست آمد که هر دو از ازدیاد طول ورق کامپوزیتی (حدود ۱۳ درصد) بیشتر است. مطابق با فرمول مربوط به کامپوزیت‌ها (قانون مخلوط‌ها)، این دو ویژگی باید دارای مقداری بین مقادیر آن به‌تنهایی و متناسب با نسبت کسر حجمی سه لایه باشد، در حالی که این نمودار، حاکی از افزایش استحکام و کاهش انعطاف‌پذیری پس از اتصال نوردی سرد نسبت به استحکام و انعطاف‌پذیری هر دو لایه است. به نظر می‌رسد علت این موضوع، نحوه اتصال بین لایه‌ها باشد. همان‌طور که توضیح داده شد برای ایجاد پیوند باید لایه تردتر شروع به ترک خوردن کند و لایه نرم‌تر در این ترک‌ها اکستروود شود [۵]. همین تغییر شکل حاصل از اکستروود و سیلان لایه‌ها در یکدیگر، موجب می‌گردد فصل مشترک در این حالت بسیار قوی‌تر از حالتی باشد که لایه‌های فولاد و آلومینیوم بدون درگیری مکانیکی کنار هم قرار بگیرند و به همین دلیل خواص مکانیکی مطلوب‌تری را از خود بروز می‌دهد.

از جمله سایر عوامل مؤثر در افزایش استحکام ورق کامپوزیتی نسبت به اجزای تشکیل‌دهنده آن موارد زیر نیز می‌تواند باشد:

- وجود ذرات بین فلزی با استحکام بالا (رسوبات  $Fe_2Al_5$  با سختی بیش از ۱۰۰۰ HV [۲۳]) در ریزساختار نمونه کامپوزیتی: همان‌طور که در بخش ۳-۶ نشان داده شده است، این رسوبات در فصل مشترک فولاد و آلومینیوم به میزان قابل توجهی ایجاد شده‌اند.
- وجود گرادیان کرنشی قابل توجه در فصل مشترک دو لایه: نشان داده شده است که ساختار گرادینانی (وجود گرادیان کرنش در ساختار) می‌تواند موجب افزایش استحکام ماده شود [۲۴]. اختلاف قابل توجه تنش تسلیم

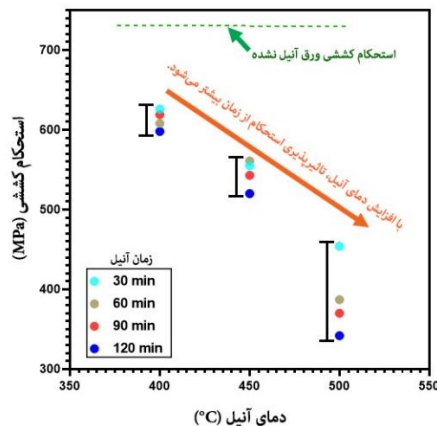
فولاد و آلومینیوم طبیعتاً موجب ایجاد گرادیان کرنش در نزدیکی فصل مشترک این دو ماده می‌شود؛ بنابراین همان‌طور که بیان شد انتظار می‌رود که این گرادیان کرنشی نیز در استحکام بخشی ماده، تأثیرگذار باشد.

### بررسی چگالی ورق فولادی معماری شده/کامپوزیتی

چگالی محاسبه شده برای ورق فولادی تولید شده به روش نورد سرد اتصالی با استفاده از نسبت ضخامت لایه‌های فولاد و آلومینیوم تعیین شده در تصویر متالوگرافی شکل ۲ و همچنین روش ارشمیدس برابر ۶/۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب به دست آمد. به عبارتی ورق کامپوزیتی یا فولاد معماری شده حاضر، حدود ۱۸ درصد (اختلاف دانسیته فولاد کم‌کربن و فولاد معماری شده تقسیم بر دانسیته فولاد کم‌کربن) از فولاد کم‌کربن (با چگالی  $gr/cm^3$  ۷/۸) سبک‌تر است.

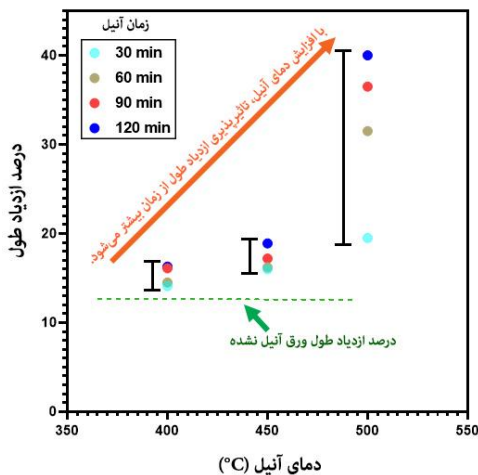
### تأثیر زمان و دمای آنیل بر خواص مکانیکی

از آنجایی که در نمودار تنش-کرنش نمونه‌های معماری شده/کامپوزیتی استحکام تسلیم مشخصی وجود ندارد، معیار مطالعه، خواص مکانیکی دو ویژگی استحکام نهایی و درصد ازدیاد طول قرار داده شد. تأثیر دو متغیر دما و زمان آنیل بر رفتار کششی نمونه‌های نورد اتصالی در شکل ۴ آورده شده است. ملاحظه می‌شود که افزایش دمای آنیل در تمامی زمان‌ها، منجر به کاهش استحکام نهایی شده است. علت این امر آن است که با افزایش دما، فرایندهای بازایی و تبلور مجدد تسهیل می‌شود و منجر به کاهش دانسیته نابه‌جایی‌ها و در نتیجه، افت استحکام نهایی می‌گردد. با بررسی تأثیر زمان آنیل بر استحکام نهایی در دمای ثابت می‌توان مشاهده کرد که با افزایش زمان در دمای  $400^{\circ}C$  و  $450^{\circ}C$  کاهش اندکی در استحکام نهایی به وجود آمده است در حالی که این کاهش برای دمای  $500^{\circ}C$  مشهودتر است. از این مشاهده می‌توان نتیجه گرفت که در دمای کمتر از  $500^{\circ}C$ ، شرایط از نظر سینتیکی برای بازایی و تبلور مجدد چندان فراهم نمی‌باشد و برای وقوع آن به زمان طولانی‌تری نیاز است، در حالی که در دمای  $500^{\circ}C$  و بیش از آن بازایی و تبلور مجدد با سرعت زیادی رخ داده و استحکام نهایی به شدت افت کرده تا جایی که برای دمای  $500^{\circ}C$  و زمان ۱۲۰ دقیقه مشاهده می‌شود مقدار آن بیش از ۵۵ درصد نسبت به پیش از عملیات آنیل کاهش داشته است.



شکل ۴. تأثیر عملیات حرارتی آنیل بر استحکام نهایی ورق‌های اتصال نوردی سرد شده.

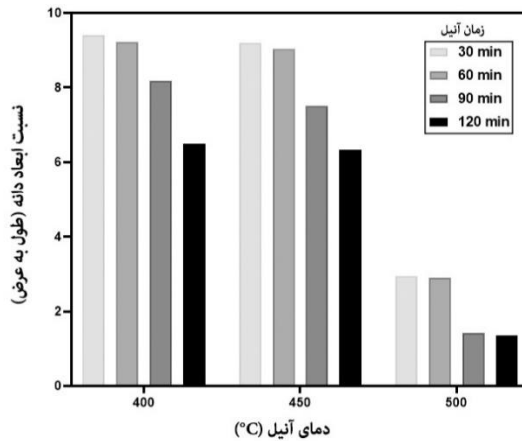
تأثیر دما و زمان آنیل بر میزان ازدیاد طول در شکل ۵ نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود تغییرات ازدیاد طول کاملاً در جهت عکس تغییرات استحکام نهایی بوده و افزایش دما و زمان، منجر به افزایش ازدیاد طول شده است. با توجه به تغییرات استحکام نهایی، این نتایج کاملاً قابل پیش‌بینی هستند و علت آن نیز پدیده بازیابی و تبلور مجدد است. در این نمودار نیز مشاهده می‌شود افزایش زمان در دمای ۴۰۰ و ۴۵۰°C تأثیر اندکی دارد در حالی که در دمای ۵۰۰°C منجر به افزایش چشمگیر ازدیاد طول تا بیش از ۳ برابر نسبت به شرایط آنیل شده دارد.



شکل ۵. تأثیر عملیات حرارتی آنیل بر انعطاف پذیری نمونه اتصال نوردی سرد شده.

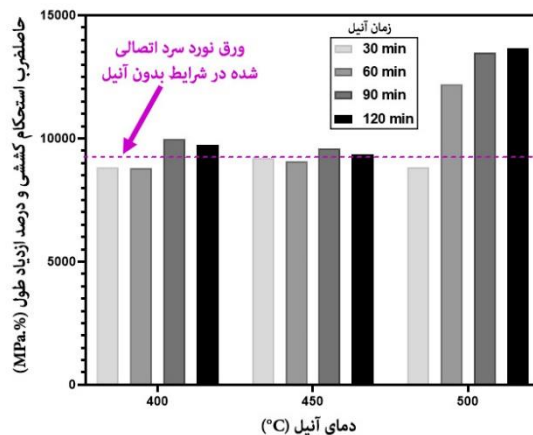
ارزیابی نسبت ابعاد دانه<sup>۱</sup> در حالت‌های متفاوت آنیل می‌تواند برای بررسی دقیق‌تر پدیده‌های بازیابی و تبلور مجدد در لایه فولادی نورد شده، سودمند باشد. بر این اساس در شکل ۶ تأثیر زمان آنیل در دمای ۴۰۰، ۴۵۰ و ۵۰۰°C را بر نسبت ابعاد دانه‌های فولاد S۲۳۷ پس از عملیات اتصال نورد نمایش داده شده است. همان‌گونه که در این تصویر مشخص است، در دمای ۴۰۰ و ۴۵۰°C، حتی در زمان ۱۲۰ دقیقه نیز دانه‌ها حالت کشیده خود را حفظ کرده‌اند (نسبت ابعادی بیشتر از ۶) در حالی که در دمای ۵۰۰°C از زمان ۳۰ دقیقه به بعد وقوع پدیده تبلور مجدد و هم‌محور شدن دانه‌ها مشاهده می‌گردد (نسبت ابعادی کمتر از ۲/۵). براساس این مشاهدات و نتایج آزمون کشش می‌توان نتیجه گرفت در دمای کمتر از ۵۰۰°C، تنها پدیده بازیابی، موجب افت استحکام نهایی و افزایش انعطاف‌پذیری می‌شود و گذشت زمان، تأثیر چشمگیری بر تغییرات آن ندارد. در حالی که در دمای ۵۰۰°C و بالاتر از این دما، وقوع تبلور مجدد تغییرات استحکام نهایی و انعطاف‌پذیری با شدت بیشتری رخ می‌دهد و زمان نیز این تغییرات را تشدید می‌کند.

<sup>1</sup> Aspect ratio



شکل ۶. تاثیر دما و زمان آنیل بر نسبت ابعاد دانه‌بندی در ریزساختار لایه فولادی ورق کامپوزیتی.

از آنجا که عملیات حرارتی آنیل موجب می‌شود استحکام و انعطاف‌پذیری در دو جهت مخالف هم تغییر کند، در این تحقیق، از حاصل ضرب استحکام نهایی در میزان ازدیاد طول ( $W$ ) به‌عنوان معیاری برای مقایسه خواص مکانیکی و مقاومت در برابر تغییر فرم پلاستیک استفاده گردید. این معیار در حقیقت بالانس بین استحکام و انعطاف‌پذیری را نشان می‌دهد و در بسیاری از تحقیقات [۲۵-۲۹] یک مبنای مقایسه اولیه برای ارزیابی رفتار شکل‌پذیری و خواص مکانیکی مواد معرفی شده است. در شکل ۷ تغییرات معیار  $W$  نسبت به دما و زمان آنیل نشان داده شده است.



شکل ۷. تأثیر عملیات حرارتی آنیل بر حاصل ضرب استحکام نهایی و انعطاف‌پذیری در ورق‌های نورد سرد اتصالی شده.

با توجه به نتایج این شکل، ۴ نمونه‌های زیر که دارای بالاترین مقدار حاصل ضرب استحکام نهایی و انعطاف‌پذیری بودند به‌عنوان نمونه‌های شاخص انتخاب گردیدند تا با بررسی‌های تکمیلی، زمان و دمای بهینه برای دست‌یابی به خواص مکانیکی و استحکام پیوند مناسب، مشخص گردد.

- ۱- نمونه اتصال نوردی سرد شده بدون آنیل
- ۲- نمونه آنیل‌شده به مدت ۹۰ دقیقه در  $400^{\circ}\text{C}$
- ۳- نمونه آنیل‌شده به مدت ۹۰ دقیقه در دمای  $450^{\circ}\text{C}$
- ۴- نمونه آنیل‌شده به مدت ۱۲۰ دقیقه در  $500^{\circ}\text{C}$ .

### تأثیر عملیات آنیل بر کیفیت اتصال در فصل مشترک

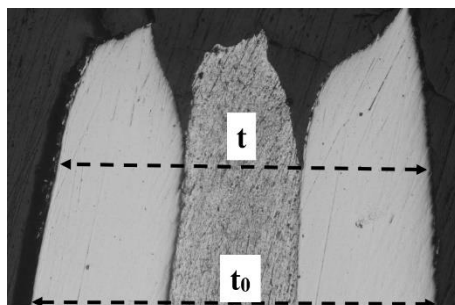
در مورد ترکیب اتصال نوردی دو فلز متفاوت، علاوه بر استحکام نهایی و انعطاف‌پذیری، استحکام پیوند در فصل مشترک از جمله خواص مکانیکی مهم می‌باشد که بررسی آن از اهمیت زیادی برخوردار است. در این تحقیق، استحکام پیوند در دو شرایط بارگذاری مختلف زیر بررسی شد:

- ۱- بارگذاری کششی تک‌محوری و اندازه‌گیری کرنش گسیختگی و
  - ۲- آزمایش لایه‌کنی معمولی و اندازه‌گیری نیروی لایه‌کنی.
- در حالت اول، فصل مشترک تحت نیروهای برشی قرار می‌گیرد در حالی که در حالت دوم، فصل مشترک تحت نیروهای نرمال قرار می‌گیرد.

به‌منظور بررسی این ویژگی مهم در ابتدا به بررسی مقطع نمونه‌های آزمون کشش پرداخته می‌شود. بدین منظور پس از انجام آزمون کشش روی نمونه‌های شاخص، سطح مقطع آنها توسط میکروسکوپ نوری مطالعه شد. در شکل ۸ مقطع یکی از این نمونه‌ها نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در ابتدا تغییر شکل به‌صورت یکنواخت در هر سه لایه رخ داده است و پس از رسیدن به ضخامت بحرانی  $t_c$ ، فصل مشترک‌ها جدا شد و در نهایت پدیده گلوبی شدن به‌صورت مجزا در هر لایه اتفاق افتاد.

با انجام پردازش تصویر روی ریزساختار نمونه‌های مختلف، این ضخامت بحرانی اندازه‌گیری شد و با توجه به ضخامت اولیه هر نمونه، کرنش حقیقی که در آن گسستگی فصل مشترک اتفاق افتاده است براساس رابطه (۳-۱) محاسبه گردید.

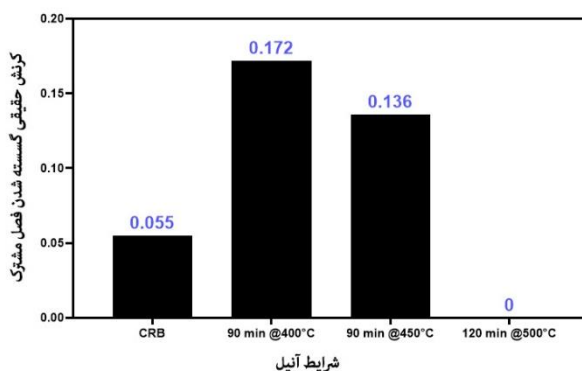
$$\varepsilon = -\ln t/t_0 \quad (1-3)$$



شکل ۸. تصویر متالوگرافی مقطع ورق اتصال نوردی سرد شده پس از آزمون کشش.

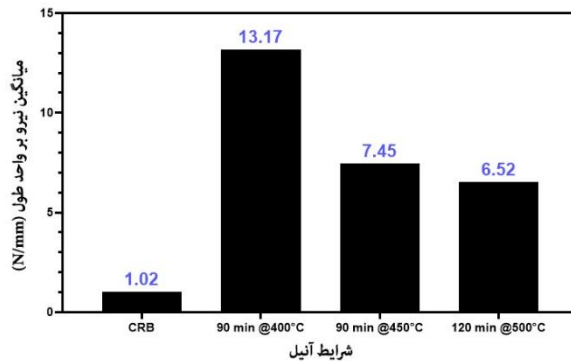
نتایج بررسی کرنش گسستگی در فصل مشترک در شکل ۹ نشان داده شده است. بر اساس این نمودار می‌توان مشاهده کرد که کرنش گسستگی در فصل مشترک با افزایش دما و زمان آنیل در ابتدا افزایش یافت و پس از رسیدن به مقدار بهینه‌ای با افت روبه‌رو شد. علت آن که مقدار کرنش برای دو آنیل‌شده در دمای  $500^{\circ}\text{C}$  به مدت‌زمان‌های ۹۰ و ۱۲۰ دقیقه، برابر صفر گزارش شده است آن است که پس انجام آزمون کشش روی دو نمونه مذکور، لایه‌های فولادی و آلومینیومی به‌طور کامل از یکدیگر جدا شدند و مقدار ضخامت در محل گسستگی فصل مشترک، معادل ضخامت اولیه نمونه‌ها بود.

همان‌طور که پیش از این اشاره شد عملیات حرارتی پس از فرایند اتصال نوردی سرد، باعث افزایش استحکام پیوند دو فلز در فصل مشترک می‌شود و این افزایش تا زمانی ادامه پیدا می‌کند که شرایط ترمودینامیکی و سینتیکی برای ایجاد ترکیبات بین‌فلزی در این منطقه فراهم گردد. پس از این مرحله و با جوانه‌زنی و رشد این ترکیبات ترد در فصل مشترک، استحکام پیوند کاهش می‌یابد [۳۰]. با توجه به مطالب فوق و نتایج به دست آمده می‌توان نتیجه گرفت ترکیبات بین فلزی آهن و آلومینیوم از دمای  $450^{\circ}\text{C}$  شروع به تشکیل نموده‌اند و در دمای  $500^{\circ}\text{C}$  با رشد کامل خود در فصل مشترک، استحکام پیوند را به‌طور کامل از بین برده‌اند.



شکل ۹. تغییرات کرنش حقیقی گسسته شدن فصل مشترک ورق اتصال نوردی سرد شده با تغییر پارامترهای عملیات حرارتی.

برای بررسی دقیق‌تر استحکام پیوند در نمونه‌های شاخص، نمونه‌های منتخب که در بخش ۳-۳ به آن اشاره شد برای آزمون لایه‌کنی تهیه و این آزمون انجام شد. در این آزمون، دو سر لبه آزاد از ورق دو فلزی در فک دستگاه کشش قرار گرفت و با اعمال نیروی کششی این لایه‌ها از یکدیگر جدا شدند. در شکل ۱۰، میانگین نیروی اعمال شده بر واحد طول از فصل مشترک برای گسستن اتصال برای چهار نمونه شاخص موردنظر آورده شده است.

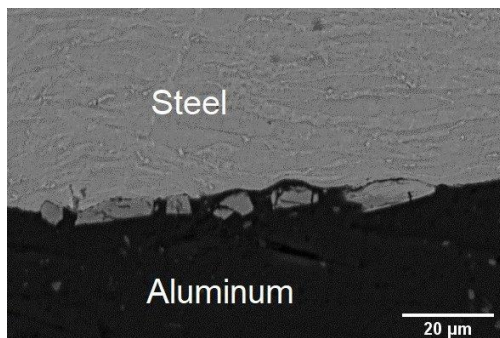


شکل ۱۰. تأثیر پارامترهای عملیات حرارتی آنیل بر استحکام پیوند فصل مشترک ورق اتصال نوردی سرد شده در آزمون لایه‌کنی.

نتایج فوق نیز حاکی از آن است که با انجام عملیات حرارتی آنیل، استحکام پیوند قوی‌تر می‌شود و این روند تا زمان تشکیل رسوبات بین‌فلزی در فصل مشترک ادامه پیدا می‌کند. دمای شروع جوانه‌زنی و تشکیل این رسوبات  $^{\circ}\text{C}$  ۴۵۰ می‌باشد و با افزایش دما و زمان این رسوبات رشد می‌کند و به علت تردی ذاتی این ترکیبات و ایجاد نشدن پیوند مناسب با فاز زمینه، باعث می‌شوند با اعمال نیروی کمتری لایه‌های فلزی از یکدیگر جدا شوند.

### مطالعه ریزساختار میکروسکوپی در فصل مشترک اتصال فولاد- آلومینیوم

همان‌گونه که در نتایج گذشته مشاهده گردید فصل مشترک میان فولاد و آلومینیوم در تعیین خواص مکانیکی نقش به‌سزایی ایفا می‌کند ضمن آن‌که وجود پیوند قوی در فصل مشترک میان لایه‌های متفاوت فولاد و آلومینیوم برای کاربردی بودن محصول تولیدی، از جمله ضروریات است. در این راستا بررسی تصاویر میکروسکوپ الکترونی روشی فصل مشترک از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. بدین منظور ابتدا تصویر مقطع نمونه اتصال نوردی سرد شده بدون آنیل در شکل ۱۱ بررسی می‌گردد.



شکل ۱۱. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از ورق اتصال نوردی سرد شده.

در شکل ۱۱ (الف) آثار شکستگی و ترک در سطح فولاد و سیلان آلومینیوم در میان این ترک‌ها کاملاً مشهود است. می‌توان گفت علت اصلی اتصال و پیوند میان فولاد و آلومینیوم همین اکسترود آلومینیوم و درهم‌تنیدن دو فلز بوده است. در ارتباط با مکانیزم پیوند در اتصالات نوردی دما پایین، نظرات متعددی ارائه شده است. دو مورد از مهم‌ترین این مکانیزم‌ها عبارتند از:

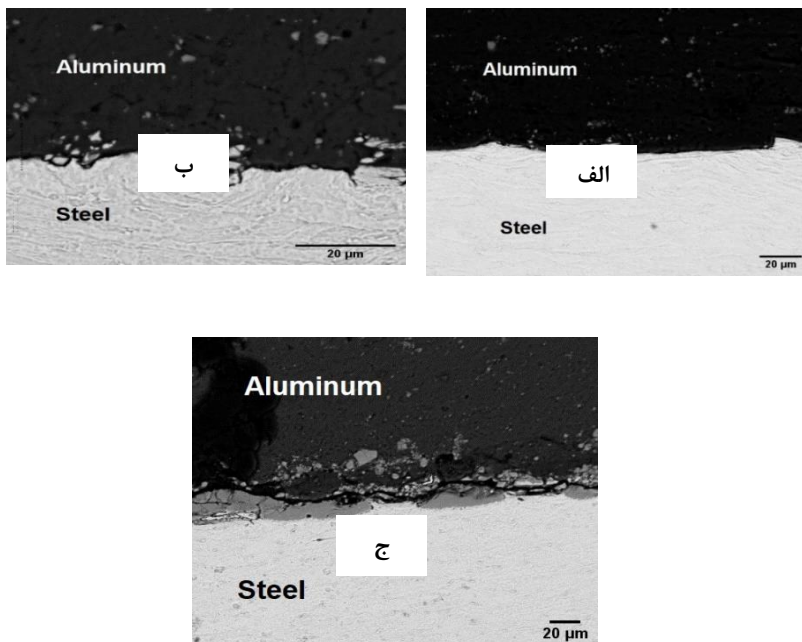
- ۱- **تئوری فیلم:** براساس این تئوری اگر دو سطح تمیز فلزی بسیار نزدیک به هم قرار گیرند یک پیوند بین آنها ایجاد می‌شود. ولی از آنجا که معمولاً در سطح فلزات پوسته‌های اکسیدی نازیک وجود دارد، لازم است که مقداری تغییر فرم پلاستیک در محل تماس انجام شود تا این پوسته‌های اکسیدی شکسته شوند و تماس بی‌واسطه فلز-فلز ایجاد شود.
- ۲- **سد انرژی:** براساس این تئوری حتی اگر دو سطح فلزی تمیز کاملاً در تماس با هم قرار بگیرند پیوند ایجاد نمی‌شود و باید ابتدا بر یک سد انرژی غلبه کرد. بر این اساس اگر جهت‌گیری شبکه‌های کریستالی در محل تماس فلز-فلز متفاوت باشند، اتصال صورت نمی‌گیرد؛ بنابراین باید مقداری انرژی مصرف شود تا جهت‌گیری کریستالی در محل تماس تغییر کند. توضیحات کامل‌تر در این ارتباط در مراجع [۳۱]-[۳۳] آورده شده است.

شکل ۱۲ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از فصل مشترک اتصال را در ۳ نمونه شاخص یا منتخب را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد در نمونه آنیل‌شده در دمای  $400^{\circ}\text{C}$  به مدت زمان ۹۰ دقیقه، فصل مشترک مشابه پیش از آنیل می‌باشد و هیچ‌گونه رسوبی دیده نمی‌شود. در حالی که در نمونه آنیل‌شده در  $450^{\circ}\text{C}$  به مدت ۹۰ دقیقه، رسوبات ریز در فصل مشترک تشکیل شده‌اند که در شکل ۱۲ (ب) مشخص شده است. اندازه این رسوبات حدود  $4\ \mu\text{m}$  می‌باشد و مطابق پژوهش‌های انجام شده قبلی [۱۱] باعث افت استحکام پیوند می‌گردد که این امر در نتایج مربوط به بررسی استحکام فصل مشترک خود را نشان داد و باعث شد که استحکام پیوند نسبت به نمونه آنیل‌شده در  $400^{\circ}\text{C}$ ، دچار افت گردد.

تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح مقطع نمونه آنیل‌شده در دمای  $500^{\circ}\text{C}$  به مدت ۱۲۰ دقیقه، پس از آزمون کشش در شکل ۱۲ (ج) نشان داده شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد تقریباً در تمام طول فصل مشترک فولاد و آلومینیوم، لایه‌ای از رسوب بین‌فلزی به ضخامت حدود  $10\ \mu\text{m}$  تشکیل شده است. این لایه بین‌فلزی

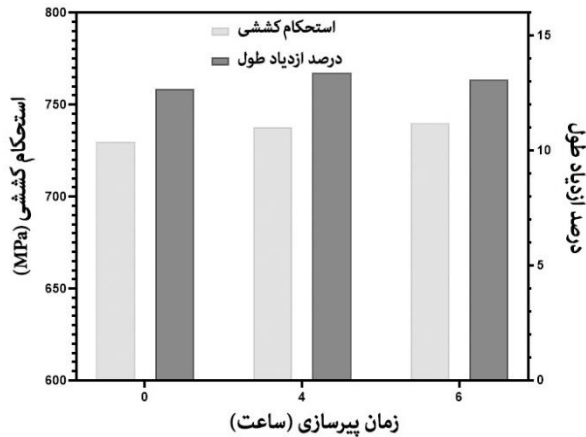
ترد بوده و از آنجایی که ترک میان رسوب و آلومینیوم ایجاد شده است، پیوند مستحکمی نیز با آلومینیوم برقرار نکرده و بنابراین در اثر اعمال تنش، این پیوند از هم گسسته شده و سبب جدا شدن لایه‌های آلومینیومی و فولادی از یکدیگر شده است.

بررسی مشخصه‌یابی EDS انجام شده روی این رسوبات نشان داد که این رسوبات از نوع  $Fe_2Al_5$  هستند. این رسوبات دارای ساختار BCC هستند [۲۳]؛ بنابراین همان‌طور که در تصاویر SEM نیز مشاهده شد انتظار می‌رود که نزدیکی این ساختار و در نتیجه پیوستگی آن با فولاد هم بیشتر از آلومینیوم باشد.



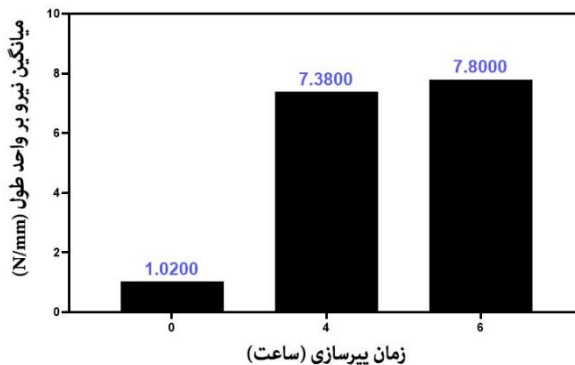
شکل ۱۲. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح مقطع ورق‌های آنیل شده تحت دما و زمان الف)  $400^{\circ}C$  - ۹۰ دقیقه، ب)  $450^{\circ}C$  - ۹۰ دقیقه، ج)  $500^{\circ}C$  - ۱۲۰ دقیقه پس از انجام فرایند اتصال نوردی سرد.

تأثیر زمان پیرسختی بر استحکام نهایی و درصد ازدیاد طول ورق سه‌لایه کامپوزیتی در شکل ۱۳ نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است با انجام عملیات پیرسختی، تغییر قابل توجهی در استحکام و انعطاف‌پذیری ورق ایجاد نشده است. از این‌رو می‌توان استدلال کرد که خواص مکانیکی ورق سه‌لایه اتصال نوردی سرد شده تنها متأثر از فولاد و ریزساختار آن است و عملیات حرارتی تأثیرگذار بر آلومینیوم به‌تنهایی نمی‌تواند سبب تغییر خواص گردد.



شکل ۱۳. تأثیر زمان پیرسازی بر استحکام نهایی و درصد ازدیاد طول ورق‌های اتصال نوردی سرد شده.

به‌منظور بررسی تأثیر عملیات پیرسختی بر استحکام پیوند، نتایج آزمون لایه‌کنی برای ورق اتصال نوردی سرد شده قبل و بعد از عملیات پیرسختی در شکل ۱۴ با هم مقایسه شده است. این نمودار حاکی از آن است که برخلاف استحکام و انعطاف‌پذیری، استحکام پیوند در اثر این عملیات بهبود پیدا می‌کند که مقدار آن حدود ۶۰ درصد نمونه آنیل‌شده در دمای  $400^{\circ}\text{C}$  به مدت ۹۰ دقیقه است. بررسی دقیق‌تر مکانیزم تأثیر پیرسختی نیازمند بررسی‌های دقیق ریزساختاری و مشاهده رسوبات ایجاد شده در نتیجه فرایند پیرسختی با استفاده از میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) است که در حال حاضر برای نویسندگان ممکن نیست.



شکل ۱۴. تأثیر عملیات حرارتی پیرسازی بر استحکام اتصال فصل مشترک در آزمون لایه‌کنی.

## نتیجه گیری

- در این پژوهش با استفاده از فرایند اتصال نوردی سرد میان فولاد st37 و آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱، ورق کامپوزیتی سبک‌وزن ساخته شد و با انجام عملیات حرارتی آنیل و پیرسازی در دماها و زمان‌های متفاوت نتایج زیر به دست آمد:
- ۱- مکانیزم اتصال لایه‌های فولاد و آلومینیوم به صورت ایجاد ترک و شکستگی در سطح لایه فولادی و اکستروژ آلومینیوم در این ترک‌ها بوده است. به دلیل درگیر شدن لایه‌های فلزی در یکدیگر مطابق مکانیزم گفته شده، خواص مکانیکی نمونه اتصال نوردی سرد شده از نمونه نورد شده هرکدام از لایه‌ها به تنهایی، مطلوب‌تر است.
  - ۲- برای دماهای آنیل کمتر از  $500^{\circ}\text{C}$ ، ریزساختار لایه فولادی تنها دچار بازیابی می‌گردد؛ از این رو تغییرات خواص مکانیکی نسبت به زمان تغییر چندانی ندارد. در حالی که در دمای  $500^{\circ}\text{C}$ ، تبلور مجدد رخ می‌دهد و سبب کاهش استحکام نهایی به میزان ۵۵٪ و افزایش انعطاف‌پذیری تا ۳ برابر نسبت به شرایط پیش از آنیل می‌شود.
  - ۳- در دمای آنیل  $450^{\circ}\text{C}$ ، تشکیل ذرات رسوبات بین‌فلزی آهن و آلومینیوم در فصل مشترک کاهش استحکام پیوند را به دنبال دارد. همچنین در دمای آنیل  $500^{\circ}\text{C}$  نیز این رسوبات به شکل لایه‌ای پیوسته با ضخامت  $10\ \mu\text{m}$  تشکیل می‌شود و این لایه رسوب بین فلزی منجر به از بین رفتن استحکام فصل مشترک می‌گردد.
  - ۴- برای ورق سه‌لایه معماری شده/کامپوزیتی شامل فولاد st37 و آلومینیوم ۶۰۶۱ که توسط فرایند اتصال نوردی سرد و تحت کاهش ضخامت ۶۵ درصد تولید شد، بهترین استحکام نهایی (۶۱۹ MPa) و انعطاف‌پذیری (۱۶/۱ درصد) مربوط به نمونه آنیل شده در دمای  $400^{\circ}\text{C}$  به مدت ۹۰ دقیقه بود.
  - ۵- نسبت استحکام به وزن در مطلوب‌ترین نمونه فولاد معماری شده ۹۶/۷ است، ضمن آن‌که انعطاف‌پذیری این آن نیز در حدود ۱۶ درصد به دست آمد.
- با انجام عملیات پیرسازی روی نمونه فولاد معماری شده استحکام و انعطاف‌پذیری تغییر چندانی نداشتند ولی استحکام پیوند در اثر این عملیات به‌طور قابل توجهی بهبود پیدا کرد.

## References

- [1] Pan, D., Gao, K., & Yu, J. (1989). Cold roll bonding of bimetallic sheets and strips. *Materials Science and Technology*, 5(9), 934-939. <https://doi.org/10.1179/mst.1989.5.9.934>
- [2] Wu, H-Y., Lee, S., & Wang, J-Y. (1998). Solid-state bonding of iron-based alloys, steel-brass, and aluminum alloys. *Journal of Materials Processing Technology*, 75(1-3), 173-179. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(97\)00323-3](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(97)00323-3)
- [3] Da Silva, L., El-Sharif, M., Chisholm, C., & Laidlaw, S. (2014, May 21-23). *A review of the cold roll bonding of AlSn alloy/steel bimetal strips*. 23rd International Conference on Metallurgy and Materials, Brno, Czech Republic. <https://researchonline.gcu.ac.uk/en/publications/a-review-of-the-cold-roll-bonding-of-alsn-alloy-steel-bimetal-str>
- [4] Bay, N. (1981, April 10-12). *Cold pressure welding-a theoretical model for the bond strength*. Spring Residential Conference Joining of Metals, Practice and

- Performance, United Kingdom. <https://orbit.dtu.dk/en/publications/cold-pressure-welding-a-theoretical-model-for-the-bond-strength>
- [5] Mohamed, H. A., & Washburn, J. (1975). Mechanism of solid state pressure welding. *Welding Journal Research Supplement*, 54(9), 302-310. <https://escholarship.org/content/qt12s2n08k/qt12s2n08k.pdf>
- [6] Bay, N. (1983). Mechanisms producing metallic bonds in cold welding. *Welding journal Research Supplement*, 62(5), 137-142. [http://files.aws.org/wj/supplement/WJ\\_1983\\_05\\_s137.pdf](http://files.aws.org/wj/supplement/WJ_1983_05_s137.pdf)
- [7] Byrne, S., & Miller, A. (1982). Effect of atmospheric pollutant gases on the formation of corrosive condensate on aluminum. In *Atmospheric Corrosion of Metals*. American Society for Testing and Materials International. <https://books.google.com/books?id=IQRtVnfCJbsC>
- [8] Movahedi, M., Madaah-Hosseini, H. R., & Kokabi, A. H. (2008). The influence of roll bonding parameters on the bond strength of Al-3003/Zn soldering sheets. *Materials Science and Engineering: A*, 487(1), 417-423. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2007.10.019>
- [9] Gao, C., Li, L., Chen, X., Zhou, D., & Tang, C. (2016). The effect of surface preparation on the bond strength of Al-St strips in CRB process. *Materials & Design*, 107, 205-211. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.05.112>
- [10] Jamaati, R., & Toroghinejad, M. R. (2010). Investigation of the parameters of the cold roll bonding (CRB) process. *Materials Science and Engineering: A*, 527(9), 2320-2326. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2009.11.069>
- [11] Li, B. M., Han, J. F., Xu, G. M., & Cui, J. (2005). Effect of cold-rolling and annealing on interfacial structures and properties of A500/steel bimetal strip. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* 15(4), 754-758. [https://www.researchgate.net/publication/280055389\\_Effect\\_of\\_cold-rolling\\_and\\_annealing\\_on\\_interfacial\\_structures\\_and\\_properties\\_of\\_A500steel\\_bimetal\\_strip](https://www.researchgate.net/publication/280055389_Effect_of_cold-rolling_and_annealing_on_interfacial_structures_and_properties_of_A500steel_bimetal_strip)
- [12] Quadir, M. Z., Wolz, A., Hoffman, M., & Ferry, M. (2008). Influence of processing parameters on the bond toughness of roll-bonded aluminium strip. *Scripta Materialia*, 58(11), 959-962. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2008.01.022>
- [13] Manesh, H. D., & Shahabi, H. S. (2009). Effective parameters on bonding strength of roll bonded Al/St/Al multilayer strips. *Journal of Alloys and Compounds*, 476(1-2), 292-299. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2008.08.081>
- [14] Alizadeh, M., & Paydar, M. H. (2009). Study on the effect of presence of TiH<sub>2</sub> particles on the roll bonding behavior of aluminum alloy strips. *Materials & Design*, 30(1), 82-86. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.04.058>
- [15] Jamaati, R., & Toroghinejad, M. R. (2010). Effect of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nano-particles on the bond strength in CRB process. *Materials Science and Engineering: A*, 527(18-19), 4858-4863. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.04.020>
- [16] Lu, C., Tieu, K., & Wexler, D. (2009). Significant enhancement of bond strength in the accumulative roll bonding process using nano-sized SiO<sub>2</sub> particles. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(10), 4830-4834. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2009.01.003>
- [17] Jamaati, R., & Toroghinejad, M. R. (2011). Cold roll bonding bond strengths: review. *Materials Science and Technology*, 27(7), 1101-1108. <https://doi.org/10.1179/026708310X12815992418256>

- [18] Wang, Q., Leng, X-S., Yang, T-H., & Yan, J-C. (2014). Effects of Fe—Al intermetallic compounds on interfacial bonding of clad materials. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 24(1), 279-284. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(14\)63058-2](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(14)63058-2)
- [19] Manesh, H. D., & Taheri, A. K. (2003). Bond strength and formability of an aluminum-clad steel sheet. *Journal of Alloys and Compounds*, 361(1-2), 138-143. [https://doi.org/10.1016/S0925-8388\(03\)00392-X](https://doi.org/10.1016/S0925-8388(03)00392-X)
- [20] Chen, G., Li, J. T., Yu, H. L., Su, L. H., Xu, G. M., Pan, J. S., You, T., Zhang, G., Sun, K. M., & He, L. Z. (2016). Investigation on bonding strength of steel/aluminum clad sheet processed by horizontal twin-roll casting, annealing and cold rolling. *Materials & Design*, 112, 263-274. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.09.061>
- [21] Akramifard, H. R., Mirzadeh, H., & Parsa, M. H. (2014). Cladding of aluminum on AISI 304L stainless steel by cold roll bonding: Mechanism, microstructure, and mechanical properties. *Materials Science and Engineering: A*, 613, 232-239. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.06.109>
- [22] Springer, H., Kostka, A., Payton, E. J., Raabe, D., Kaysser-Pyzalla, A., & Eggeler, G. (2011). On the formation and growth of intermetallic phases during interdiffusion between low-carbon steel and aluminum alloys. *Acta Materialia*, 59(4), 1586-1600. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2010.11.023>
- [23] Liu, Y., Zhao, H., & Peng, Y. (2020). Metallurgical reaction and joining phenomena in friction welded Al/Fe joints. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 107(3), 1713-1723. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05128-w>
- [24] Wu, X. L., Jiang, P., Chen, L., Zhang, J. F., Yuan, F. P., & Zhu, Y. T. (2014). Synergetic Strengthening by Gradient Structure. *Materials Research Letters*, 2(4), 185-191. <https://doi.org/10.1080/21663831.2014.935821>
- [25] Hance, B. M. (2018). Advanced high-strength steel (AHSS) performance level definitions and targets. *Society of Automotive Engineers International Journal of Materials and Manufacturing*, 11(4), 505-516. <https://www.jstor.org/stable/26645077>
- [26] Hashimoto, S., Ikeda, S., Sugimoto, K-I., & Miyake, S. (2004). Effects of Nb and Mo Addition to 0.2%C-1.5%Si-1.5%Mn Steel on Mechanical Properties of Hot Rolled TRIP-aided Steel Sheets. *The Iron and Steel Institute of Japan International*, 44(9), 1590-1598. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.44.1590>
- [27] Huang, F., Chen, Q., Ding, H., Wang, Y., Mou, X., & Chen, J. (2021). Automotive Steel with a High Product of Strength and Elongation used for Cold and Hot Forming Simultaneously. *Materials*, 14(5), 1-10. <https://doi.org/10.3390/ma14051121>
- [28] Soliman, M., & Palkowski, H. (2008). On Factors Affecting the Phase Transformation and Mechanical Properties of Cold-Rolled Transformation-Induced-Plasticity–Aided Steel. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 39(10), 2513-2527. <https://doi.org/10.1007/s11661-008-9594-2>
- [29] Sugimoto, K-I., Tsunazawa, M., Hojo, T., & Ikeda, S. (2004). Ductility of 0.1-0.6C-1.5Si-1.5Mn Ultra High-strength TRIP-aided Sheet Steels with Bainitic Ferrite Matrix. *The Iron and Steel Institute of Japan International*, 44(9), 1608-1614. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.44.1608>
- [30] Movahedi, M., Kokabi, A. H., & Seyed Reihani, S. M. (2011). Investigation on the bond strength of Al-1100/St-12 roll bonded sheets, optimization and characterization. *Materials & Design*, 32(6), 3143-3149. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.02.057>

- [31] Ghalehbandi, S. M., Malaki, M., & Gupta, M. (2019). Accumulative Roll Bonding—A Review. *Applied Sciences*, 9(17), 1-32. <https://doi.org/10.3390/app9173627>
- [32] Khan, H. A., Asim, K., Akram, F., Hameed, A., Khan, A., & Mansoor, B. (2021). Roll Bonding Processes: State-of-the-Art and Future Perspectives. *Metals*, 11(9), 1-27. <https://doi.org/10.3390/met11091344>
- [33] Li, L., Nagai, K., & Yin, F. (2008). Progress in cold roll bonding of metals. *Science and Technology of Advanced Materials*, 9(2), 1-11. <https://doi.org/10.1088/1468-6996/9/2/023001>