



Journal Home Page: [www.jmatpro.ir](http://www.jmatpro.ir)

## Structure-Mechanical Properties Relationship in Resistance Spot Welding of AISI304 Austenitic Stainless Steel

Mir Javad Mirnajd Gerami<sup>1\*</sup>, Mehdi Farajpour<sup>1</sup>, Majid Poranvari<sup>2</sup>, Eslam Ranjbar Nodeh<sup>3</sup>

1- Department of Engineering, Islamic Azad University, East Tehran branch Tehran, Iran

2- Department of Materials Science Engineering, Sharif University, Tehran, Iran

3- Department of Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received: 29 May 2010

Accepted: 19 Aug. 2010

#### Keywords:

Resistance spot weld  
Austenitic stainless steel  
Failure mode  
Mechanical properties

### ABSTRACT

This paper aims at investigating on the influence of welding current on the quality of AISI304 resistance spot welds. Mechanical properties of the spot welds (peak load, failure energy and failure mode) were evaluated using tensile-shear test. The relationships among welding current, weld fusion zone characteristics and failure behavior were studied. Generally, it was observed that increasing fusion zone size is accompanied by an increase in load carrying capacity and energy absorption capability. However, when expulsion occurs, despite of almost constant weld fusion zone size, energy absorption capability reduces significantly due to increase in electrode indentation depth. Considering the failure mechanism in the tensile-shear test, minimum required fusion zone size to ensure the pullout failure mode was estimated using an analytical model.

\*Corresponding author: Mir Javad Mirnajd Gerami, [jmgerami@alum.sharif.edu](mailto:jmgerami@alum.sharif.edu)



## ارتباط ساختار و خواص مکانیکی در جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای فولاد زنگ نزن آستنی ۳۰۴ AISI

میرجواد میرنجدگرامی<sup>۱\*</sup>، مهدی فرچپور<sup>۱</sup>، مجید پورانوری<sup>۲</sup>، اسلام رنجبرنوده<sup>۳</sup>

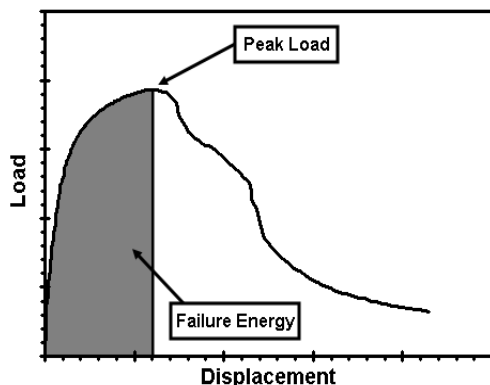
۱- دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران شرق (قیامدشت)، تهران، ایران

۲- دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

۳- دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

چکیده	اطلاعات مقاله
این مقاله به بررسی تاثیر جریان جوشکاری بر کیفیت جوش‌های مقاومتی نقطه‌ای فولاد زنگ نزن آستنی ۳۰۴ می‌پردازد. برای ارزیابی خواص مکانیکی (ماکزیم نیرو، انرژی شکست و مود شکست) از آزمایش کشش-برش استفاده شد. ارتباط بین جریان جوشکاری، مشخصه‌های ساختاری و رفتار شکست جوش‌های نقطه‌ای بررسی شد. بررسی‌ها نشان داد به طور کلی با افزایش قطر دکمه نیروی ماکزیمم و انرژی شکست افزایش می‌یابد. اما با وقوع بیرون‌زدگی مذاب علیرغم ثابت بودن قطر دکمه جوش، به دلیل افزایش عمق فرورفتگی الکتروود انرژی شکست به‌طور قابل توجهی افت می‌کند. با توجه به مکانیزم شکست در آزمایش کشش-برش با استفاده از یک مدل تحلیلی حداقل قطر دکمه‌ی جوش برای حصول مود شکست محیطی تخمین زده شد.	تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۳/۸ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۹/۵/۲۸ واژگان کلیدی: جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای فولاد زنگ نزن مود شکست خواص مکانیکی

بیشتر باشد، اطمینان به جوش در شرایط ضربه‌ای مثل تصادفات بیشتر است [۱].  
در این مقاله تاثیر جریان جوشکاری بر مشخصه‌های هندسی جوش، خواص مکانیکی جوش و مود شکست بررسی شده است.



شکل ۱- شماتیک منحنی بار-جابجایی در آزمایش کشش- برش

Fig. 1. Schematic curve load-displacement in the tensile-cutting test

## ۲- روش تحقیق

از ورق فولادی زنگ نزن آستنیتی با ترکیب شیمیایی داده شده در جدول ۱ به عنوان فلز پایه استفاده شد. ترکیب شیمیایی بدست آمده مطابق ترکیب شیمیایی فولاد AISI 304 می‌باشد.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی ورق فولاد زنگ نزن آستنیتی مورد استفاده در این پژوهش

Table 1. Chemical composition of austenitic stainless steel sheets used in this study

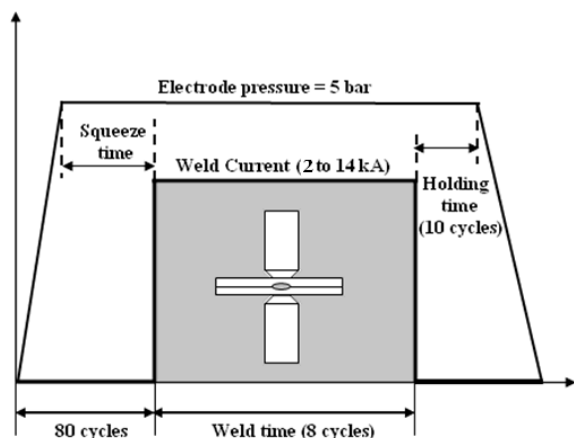
Element	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	Cu	Nb	Fe
304	0.035	1.08	0.038	0.004	0.388	18.47	9	0.561	0.462	0.016	Base

## ۱- مقدمه

جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای اصلی‌ترین فرایند در اتصال ورق‌های فلزی بویژه در صنایع خودروسازی است. هر خودرو امروزی بین ۲۰۰۰ تا ۵۰۰۰ جوش نقطه‌ای در بدنه‌ی خود دارد. قابلیت اعتماد به خودرو در شرایط تصادف به طور قابل توجهی تحت تاثیر کارایی مکانیکی جوش‌های مقاومتی نقطه‌ای دارد. اخیراً استفاده از فولادهای زنگ نزن در بدنه‌ی خودرو مطرح شده است، بنابراین بررسی رفتار جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای این مواد برای توسعه‌ی کاربرد آنها از اهمیت زیادی برخوردار خواهد بود.

مشخصه‌های کارایی جوش معمولاً به استحکام استاتیکی و دینامیکی آن اشاره دارد. آزمایش کشش- برش به علت سادگی و اینکه بسیاری از سازه‌های جوشکاری نقطه‌ای شده برای تحمل بارهای کششی- برشی طراحی می‌شوند، رایج‌ترین آزمایشی است که برای ارزیابی رفتار مکانیکی جوش‌های نقطه‌ای در شرایط استاتیکی استفاده می‌شود. پارامتری که غالباً از نمودار بار-جابجایی حاصل از آزمایش کشش- برش برای توصیف رفتار مکانیکی جوش‌های نقطه‌ای استفاده می‌شود، ماکزیم نیرو است. برای توصیف کامل‌تر رفتار مکانیکی یک جوش نقطه‌ای علاوه بر این پارامتر از انرژی متناظر با نقطه ماکزیم استفاده شده است. انرژی شکست ماکزیم بیانگر قابلیت جذب انرژی یک جوش نقطه‌ای است و هرچه این مقدار

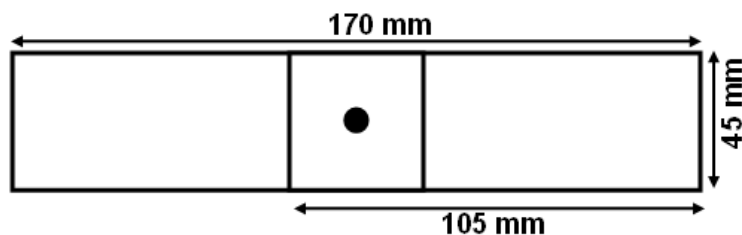
در امتداد فصل مشترک دو ورق ۲۰ میکرون بالاتر از خط مرکز، با استفاده از یک دستگاه ریزسختی سنج با بار ۱۰۰ گرم بدست آمد.



شکل ۲- برنامه‌ی جوشکاری مورد استفاده در این پژوهش

Fig. 2. Welding program used in this study

برای جوشکاری با یک دستگاه جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای A با ظرفیت ۱۲۰ kVA و با استفاده از الکترودهای Cu+Cr+Zr از گروه A مطابق کلاس دو دسته بندی RWMA به قطر ۷ mm انجام شد. شماتیک برنامه‌ی جوشکاری در شکل ۲ نشان داده شده است. برای بررسی‌های ساختاری از عملیات استاندارد متالوگرافی برای آماده سازی نمونه‌ها استفاده شد. قطر دکمه‌ی جوش (اندازه دکمه‌ی جوش در راستای طولی ورق) با استفاده از اچ میکروساختاری با محلول 2 ml (ورق) با استفاده از اچ میکروساختاری از محلول ماربل گیری شد. برای اچ میکروساختاری از محلول ماربل (10gCuSO<sub>4</sub>, 50 ml HCl, 50 ml H<sub>2</sub>O) [۲] استفاده شد. برای بررسی تشکیل رسوب کاربرد کرم در منطقه‌ی متأثر از حرارت از اچ ماراکومی (10g KOH, 10g K<sub>3</sub>[Fe(CN)<sub>6</sub>], 100 ml H<sub>2</sub>O) [۲] که بسیار حساس به ذرات غنی از کرم است، استفاده شد. پروفیل سختی طولی



شکل ۳- شماتیک ابعاد نمونه‌ی آزمایش کشش- برش

Fig. 3. Schematic sample size tensile - Cutting test

گردید. با استفاده از نمودار نیرو-جابجایی مقدار ماکزیمم نیرو و ماکزیمم انرژی شکست و با استفاده از نمونه‌های شکسته شده، مود شکست برای هر نمونه تعیین شد. برای بررسی مکانیزم و محل شروع شکست در مود محیطی، سطح مقطع شکست نمونه‌های کشش-برش مورد بررسی متالوگرافی قرار گرفت.

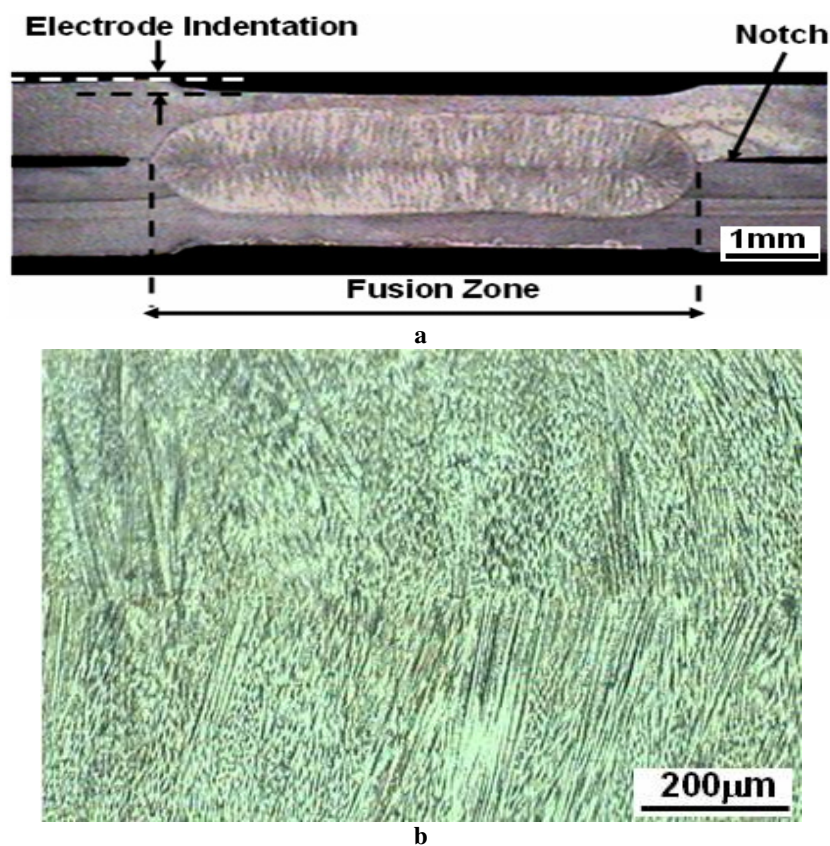
نمونه‌های آزمایش کشش- برش طبق استاندارد AWS/ANSI/SAE/D8.9-97 تهیه شدند [۳]. ابعاد آزمایش کشش-برش در شکل ۳ نشان داده شده است. آزمایش کشش-برش به وسیله‌ی یک دستگاه آزمایش کشش اینسترون با سرعت ۲ میلی‌متر بر دقیقه انجام شد و نمودار نیرو-جابجایی به صورت همزمان ثبت

۳- نتایج و بحث

۳-۱- ساختار منطقه‌ی اتصال

شکل ۴-ا ماکروساختار یک جوش مقاوم‌تی نقطه‌ای فولاد زنگ نزن ۳۰۴ را نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود تشکیل یک جوش نقطه‌ای موجب ایجاد تغییرات ساختاری و هندسی در ورق فلز پایه می‌شود. ایجاد یک جوش نقطه‌ای از نظر هندسی موجب ایجاد یک شیار طبیعی در محل اتصال دو ورق می‌شود (شکل ۴-ا)، که رفتار مکانیکی یک جوش را به شدت تحت تاثیر قرار می‌رود. همچنین فشار الکتروود حین سیکل حرارتی

جوش موجب ایجاد فرورفتگی الکتروود (شکل ۴-ا) و ایجاد یک محل تمرکز تنش در لبه‌ی فرورفتگی می‌شود. به علت سیکل حرارتی فرایند جوشکاری نقطه‌ای یک ساختار ناهمگن در محل اتصال تشکیل می‌شود. محل اتصال را می‌توان به ۳ منطقه فلز جوش، منطقه‌ی متأثر از حرارت و فلز پایه تقسیم کرد: فلز جوش (دکمه‌ی جوش): این منطقه حین جوشکاری، ذوب شدن را تجربه کرده و دوباره منجمد می‌شود. ساختار ریختگی دکمه‌ی جوش موید این امر می‌باشد.



شکل ۴-ا- ماکروساختار ب- ریزساختار یک جوش نقطه‌ای در فولاد زنگ نزن آستنی‌تی

Fig. 4. a) Macrostructure, b) microstructure a boiling point in austenitic stainless steel

استفاده در این پژوهش فولاد زنگ نزن آستنیتی استحاله ناپذیر است بنابراین تغییرات فازی در این منطقه مشاهده نمی‌شود. با این وجود ساختار دانه‌ای در این منطقه تحت تاثیر فرایند جوشکاری تغییر کرده و مقداری رشد دانه در مجاورت دکمه‌ی جوش مشاهده شد. البته قابل ذکر است وسعت رشد دانه در فولادهای آستنیتی به مراتب کمتر از فولادهای فریتی است [۲].

یکی از مشکلات جوشکاری ذوبی فولادهای زنگ نزن آستنیتی رسوب مرز دانه‌ای کاربیدهای کرم می‌باشد که می‌تواند به طور قابل توجهی مقاومت به خوردگی جوش این فولادها را کاهش دهد. برای بررسی تشکیل این رسوبات در منطقه‌ی متأثر از حرارت از اچ موراکامی که بسیار حساس به ذرات غنی از کرم است، استفاده شد. اما هیچ اثری از کاربید کرم در این منطقه مشاهده نشد. این امر را می‌توان به سرعت بالای سرد شدن در فرایند جوش کاری نقطه‌ای مربوط کرد. سرعت بالای سرد شدن موجب کاهش زمان توقف در محدوده‌ی رسوب کاربید کرم می‌شود. علاوه بر سرعت بالای سرد شدن مقدار کربن پایین فولاد مورد استفاده نیز از تشکیل این رسوبات مضر جلوگیری کرده است.

### ۳-۲- پروفیل سختی جوش

یک پروفیل سختی نمونه در شکل ۵ نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود بر خلاف پروفیل سختی جوش‌های نقطه‌ای فولادهای کم کربن [۶]، تغییرات سختی در امتداد محل اتصال زیاد نیست. با این وجود سختی دکمه جوش و منطقه‌ی متأثر از حرارت مقداری کمتر از سختی فلز پایه است. سختی پایین‌تر دکمه‌ی جوش نسبت به فلز پایه را می‌توان به ساختار ریختگی و وجود دانه‌های ستونی درشت در آن نسبت

ریزساختار دکمه‌ی جوش در شکل ۴-b نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود ساختار دکمه‌ی جوش کاملاً آستنیتی است. از دیاگرام شیفلر می‌توان برای پیش‌بینی ریزساختار دکمه‌ی جوش در اتصالات فولادهای زنگ‌نزن استفاده کرد در این دیاگرام با استفاده از دو پارامتر نیکل معادل و کروم معادل (به ترتیب روابط ۱ و ۲) می‌توان ریزساختار منطقه‌ی ذوب شده در جوش فولادهای زنگ نزن را پیش‌بینی کرد [۲].

$$(Ni)_{eq} = Ni + 30C + 0.5Mn \quad (1)$$

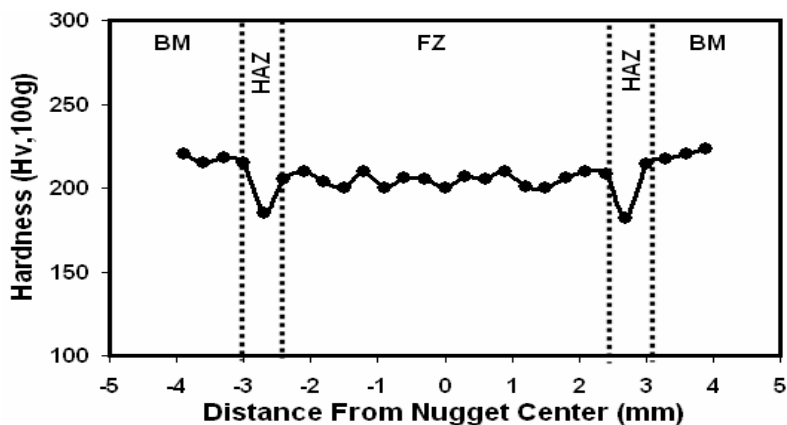
$$(Cr)_{eq} = Cr + Mo + 1.5Si + 0.5Nb \quad (2)$$

با توجه به ترکیب شیمیایی فولاد مورد استفاده و روابط فوق، مقادیر کروم معادل و نیکل معادل به ترتیب برابر ۱۹٪ و ۱۰.۵٪ محاسبه می‌شوند. با توجه به مقادیر بدست آمده، نمودار شیفلر یک ریزساختار آستنیتی-فریتی با درصد تقریبی ۸٪ فریت را برای دکمه‌ی جوش پیش‌بینی می‌کند که این پیش‌بینی با داده‌های تجربی بدست آمده (کاملاً آستنیتی) همخوانی ندارد. دلیل این امر را می‌توان به سرعت بالای سرد شدن در فرایند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای مرتبط کرد. لازم به ذکر است که این دیاگرام برای پیش‌بینی ساختار فلز جوش در فرایندهای جوشکاری قوسی با سرعت سرد شدن پایین‌تر مناسب است. ولگر [۴] گزارش کرد سرعت سرد شدن در فرایند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای هنگامی که زمان نگهداری صفر باشد، به  $1 \text{ Ks}^{-1}$  می‌رسد. با افزایش زمان نگهداری به علت اثر کوینچ الکترودهای مسی، سرعت سرد شدن تا بیشتر از  $1 \text{ Ks}^{-1}$  می‌رسد [۵]. این سرعت سرد شدن در دیگر فرایندهای مرسوم جوشکاری بوجود نمی‌آید.

منطقه‌ی متأثر از حرارت: سیکل حرارتی جوش در این منطقه موجب ذوب نشده ولی باعث تغییرات ساختاری در این منطقه می‌شود. از آنجایی که فلز پایه‌ی مورد

کاربیدی در فرایند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای قابل توجه نیست. بنابراین کاهش جزیبی سختی در منطقه‌ی متأثر از حرارت را می‌توان به رشد دانه در این منطقه وابسته کرد.

داد. سختی منطقه‌ی متأثر از حرارت در فولادهای زنگ نزن آستینیتی به وسیله‌ی دو پدیده‌ی رشد دانه و رسوب کاربرد کنترل می‌شود. همانطور که ذکر شد، رسوبات



شکل ۵- پروفیل سختی نمونه یک جوش نقطه‌ای ورق فولادی زنگ نزن ۳۰۴

Fig. 5. Hardness profiles of a sample point weld stainless steel 304 sheets

منطقه III: در این منطقه آهنگ رشد دکمه کاهش می‌یابد.

منطقه IV: در این منطقه که همراه با بیرون زدگی مذاب است، قطر دکمه‌ی جوش تقریباً ثابت است.

در واقع یکی از مهمترین فاکتورهای کنترل کننده‌ی رشد دکمه مقاومت الکتریکی دینامیکی دکمه‌ی جوش حین فرایند است، با افزایش قطر دکمه‌ی جوش مقاومت الکتریکی دینامیکی آن کاهش می‌یابد. این مطلب به همراه افزایش اتلاف حرارت تولید شده با افزایش جریان جوشکاری و اتلاف حرارت ناشی از بیرون زدگی مذاب، می‌تواند روند مشاهده شده را توضیح دهد [۶].

همانطور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، عمق فرورفتگی الکترود در ورق‌ها نیز می‌تواند تاثیر بسزایی بر رفتار مکانیکی جوش‌های نقطه‌ای داشته باشد. همانطور که ملاحظه می‌شود با افزایش جریان جوشکاری به علت

### ۳-۳- تاثیر جریان جوشکاری بر مشخصه‌های ماکروساختاری جوش

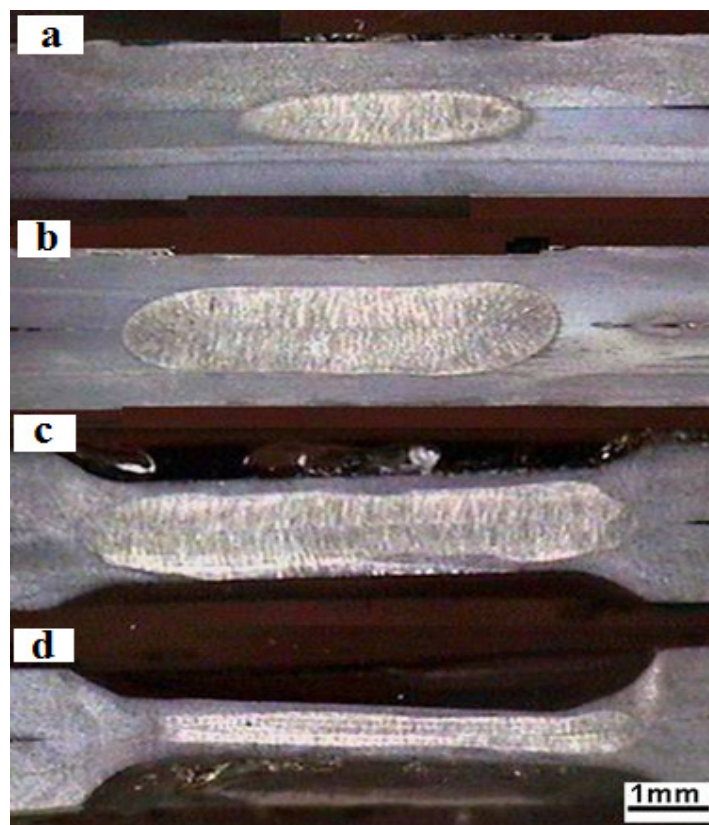
قطر دکمه‌ی جوش مهمترین پارامتر کنترل کننده‌ی استحکام مکانیکی جوش‌های نقطه‌ای است. شکل ۶ ماکروساختار جوش را جریان‌های مختلف را نشان می‌دهد. تغییرات قطر دکمه‌ی جوش بر حسب جریان جوشکاری در شکل ۷ رسم شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، این نمودار به ۴ منطقه‌ی مجزا تقسیم می‌شود:

منطقه: در این منطقه مقدار حرارت تولیدی برای ذوب کردن ورق کافی نبوده و هیچ دکمه‌جوشی تشکیل نشده است.

منطقه II: در این منطقه دکمه‌ی جوش تشکیل شده و آهنگ رشد آن سریع است.

عمق نفوذ جوش افزایش یافته، اما پس از آن روندی روبه کاهش دارد. علت این است که با افزایش جریان رشد طولی و عرضی به طور همزمان افزایش پیدا می کند، اما از مرحله ای به بعد با افزایش جریان، افزایش عمق فرورفتگی الکترودها در ورق مانع افزایش عمق نفوذ می شود.

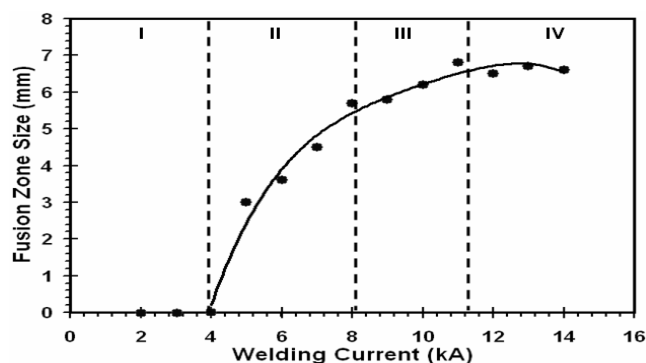
افزایش حرارت تولیدی، بالا رفتن دمای فصل مشترک الکتروود-ورق و در نتیجه افزایش قابلیت تغییر فرم پلاستیک ورقها تحت فشار الکتروودها، عمق فرورفتگی الکتروودها افزایش می یابد. همچنین با توجه شکل ۶ می توان دریافت که با افزایش جریان تا یک حد بحرانی



شکل ۶- تغییرات مشخصه های هندسی با افزایش جریان جوشکاری a-۶ کیلوآمپر، b-۸ کیلوآمپر c-۱۲ کیلوآمپر d-۱۳ کیلوآمپر: قطر دکمه ی کوچک (شکل a) در جریان های جوشکاری پایین موجب شکست فصل مشترکی می شود. افزایش بیش از حد جریان جوشکاری (شکل d) موجب افزایش مقدار فرورفتگی الکتروود در ورق، کاهش عمق نفوذ جوش و کاهش قابل توجهی در انرژی شکست می شود.

**Fig.6.** Geometric changes characters with increase welding flow, a) 6 kA, b) 8 kA, c) 12 kA, d) 13 kA: diagonal of little button (a) Welding in low flows are a common cause failure of the season. Increase over current welding (d) Increase the amount of depression in the electrode plate, reducing penetration weld and a significant is decrease in fracture energy.



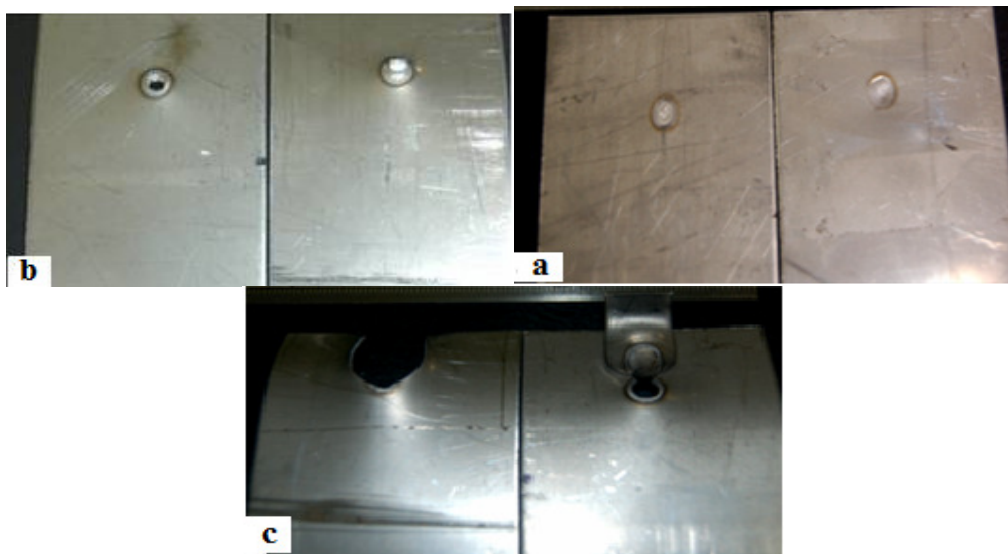


شکل ۷- تغییرات قطر دکمه‌ی جوش بر حسب جریان جوشکاری  
**Fig. 7.** Changes diagonal of weld button by welding flow

یک ورق صورت می‌گیرد. ظرفیت تحمل نیرو و قابلیت جذب انرژی در مود فصل مشترکی کم‌تر از مود محیطی است [۶-۸]. بنابراین برای اینکه جوش‌های نقطه‌ای در حین سرویس دچار تخریب زودرس نشوند، متغیرهای فرایند باید به‌گونه‌ای تنظیم شوند که از دستیابی به مود شکست محیطی اطمینان حاصل گردد.

### ۳-۴- مود شکست

مود شکست جوش‌های نقطه‌ای یک معیار کیفی از کیفیت جوش است. به‌طور کلی، جوش‌های نقطه‌ای در دو مود فصل مشترکی و محیطی دچار شکست می‌شوند. در شکست فصل مشترکی، شکست از طریق اشاعه ترک از میان دکمه جوش صورت می‌گیرد و در مود شکست محیطی، شکست با بیرون کشیده شدن دکمه جوش از



شکل ۸- مود شکست‌های مختلف مشاهده شده (a) مود فصل مشترکی (b) مود محیطی (c) مود محیطی + پارگی ورق

**Fig. 8.** Mode of failures observed, a) mode interface, b) mode peripheral, c) mode peripheral + tear sheets

جدول ۲- تاثیر جریان جوشکاری بر قطر دکمه‌ی جوش، رخ دادن بیرون زدگی مذاب و مود شکست

**Table 2.** Welding current effect on the weld button diameter, melt protrusion occurred and failure mode

welding flow (kA)	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Mode of failures	IF	IF	IF	PF	PF+ST	PF+ST	PF	PF+ST	PF+ST	PF+ST
diagonal of weld button (mm)	3	3.6	4.5	5.8	5.7	6	6.8	6.5	6.7	6.6
Melt protrusion	No	No	No	No	No	light	medium	medium	intense	intense

IF: مود فصل مشترکی، PF: مود محیطی، ST: پارگی ورق

If: Interfacial mode, PF: Pherpheral mode, ST: Sheet traring

مکانیزم و محل شکست، از این مدل برای تحلیل و پیش‌بینی مود شکست در جوش‌های نقطه‌ای ورق فولادی زنگ نزن آستنیتی کار حاضر، استفاده می‌شود. براساس کار پورانوری و همکارانش [۶] قطر دکمه‌ی بحرانی (حداقل حداقل قطر دکمه جوش لازم برای دستیابی به مود شکست محیطی) را می‌توان از رابطه‌ی زیر بدست آورد:

$$d_{cr} = 4t \frac{(\sigma_{UTS})_{FL}}{\tau_{WN}} \quad (3)$$

شکل ۹ تصویر سطح مقطع نمونه‌ی شکسته شده در آزمایش کشش-برش را نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود برخلاف جوش نقطه‌ای‌های ورق‌های فولادی کم کربن که در فلز پایه دچار شکست می‌شوند [۶] شکست در منطقه‌ی متأثر از حرارت و در مجاورت دکمه‌ی جوش شکست آغاز شده است. این امر را می‌توان به افت سختی ناشی از رشد دانه در منطقه‌ی متأثر از حرارت مرتبط کرد. از آنجایی که بدست آوردن استحکام برشی و کششی مناطق مختلف جوش نقطه‌ای از روش آزمایش کردن مستقیم مشکل است، بنابراین با توجه به اینکه استحکام کششی مواد با سختی آنها رابطه‌ی مستقیم دارد، در اینجا از نسبت سختی استفاده می‌شود. اما برای فولاد AISI 304 اطلاعات زیادی در مورد نسبت استحکام کششی به استحکام برشی وجود نداشت، اما در

نمونه‌هایی از شکست فصل مشترکی، شکست محیطی و شکست محیطی به همراه پارگی ورق، در شکل ۸ آمده است. تاثیر جریان جوشکاری بر مد شکست جوش‌های نقطه‌ای در جدول ۲ آمده است. همان طور که مشاهده می‌کنید افزایش جریان جوشکاری، موجب تغییر مد شکست از فصل مشترکی به محیطی می‌شود.

### ۳-۵- تحلیل مود شکست

استانداردهای صنعتی مختلف یک حداقل قطر دکمه‌ی جوش برای اطمینان از حصول مود شکست محیطی ارایه می‌دهند. برای مثال استاندارد AWS/ANSI/SAE [۲] رابطه‌ی زیر را پیشنهاد داده‌اند:

$$d = 4\sqrt{t} \quad (2)$$

که در آن  $t$  ضخامت ورق برحسب mm است. براساس این رابطه حداقل قطر دکمه‌ی جوش موردنیاز برای حصول مود شکست محیطی در مورد ورق فولادی زنگ نزن با ضخامت mm ۱/۲ برابر ۴/۳۸ خواهد بود. اما همانطور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، دکمه جوشی با قطر ۴/۵ نیز در مود فصل مشترکی دچار شکست شده است.

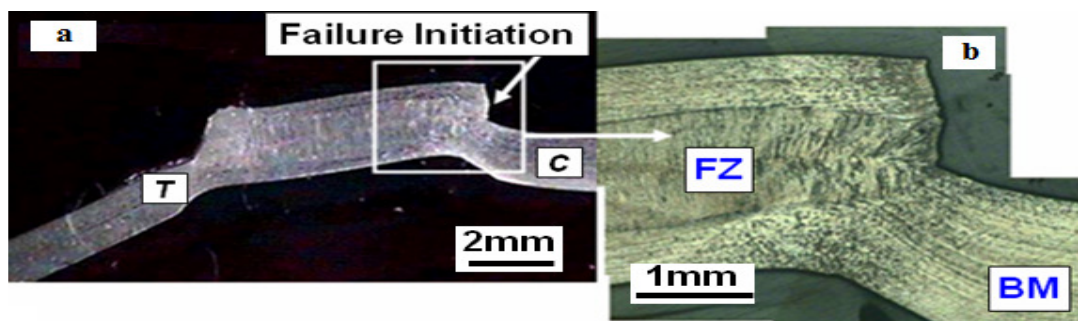
در بررسی‌های قبلی [۶] یک مدل تحلیلی برای تخمین حداقل حداقل قطر دکمه جوش لازم برای دستیابی به مود شکست محیطی ارایه شده است. در اینجا براساس

قطر بحرانی برای فولاد مورد استفاده در این پژوهش برابر ۵/۴۷ محاسبه می‌شود. همانطور که از جدول ۲ ملاحظه می‌شود، این مقدار به خوبی مرز بین مود فصل مشترکی و محیطی را مشخص می‌سازد.

تنها منبع یافت شده، نسبت استحکام برشی به استحکام کششی ۰/۷۵ گزارش شده است [۹]. بنابراین داریم:

$$d_{cr} = 4t \frac{(\sigma_{UTS})_{HAZ}}{\tau_{WN}} = 4t \frac{H_{HAZ}}{0.75 \times H_{WN}} = 5.34t \frac{H_{HAZ}}{H_{WN}} \quad (\epsilon)$$

نسبت سختی دکمه جوش به سختی منطقه‌ی متأثر از حرارت تقریباً برابر ۱/۱۷ است. بنابراین طبق رابطه‌ی ۴



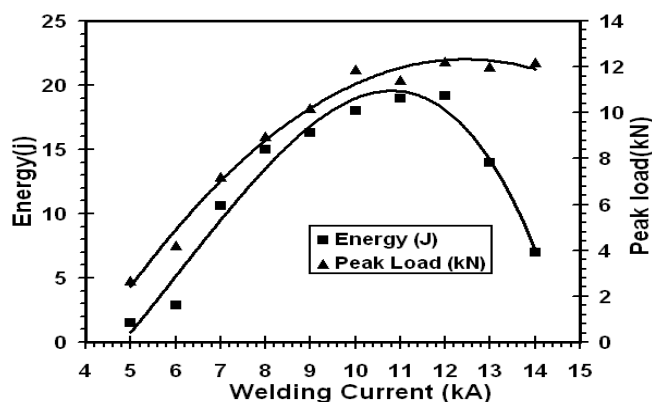
شکل ۹- (a) تصویر کلی سطح مقطع شکست را نشان می‌دهد. (b) محل شروع شکست (محلی که در اثر تنش کششی گردنی شده و شکست از آنجا آغاز شده است) را نشان می‌دهد. جدایش نهایی در محلی که در معرض تنش فشاری قرار گرفته، رخ داده است. C بیانگر محلی است که در معرض تنش‌های فشاری است و T بیانگر محلی است که در معرض تنش‌های کششی است.

**Fig. 9.** a) Overall picture shows the fracture cross section, b) Zero failure (local tensile stress caused by cervical fracture and started from there) shows. The final separation in the local compressive stresses were exposed, occurred. c) Indicating that the local compressive stresses are exposed and T indicate that the local tensile stress is exposed.

بستگی دارد. با افزایش قطر دکمه، مقاومت آن در برابر چرخش بیشتر خواهد شد. این امر توزیع تنش‌ها در فصل مشترک و محیط دکمه‌ی جوش را تحت تاثیر قرار می‌دهد. از طرف دیگر هرچه مساحت ناحیه‌ی اتصال بیشتر باشد، مقاومت به شکست فصل مشترکی بیشتر می‌شود. هر دو عامل مستقیماً موجب افزایش نیروی لازم برای شکست می‌شود. تغییرات نیروی ماکزیمم بر حسب قطر دکمه‌ی جوش در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود با افزایش قطر دکمه نیروی ماکزیمم افزایش می‌یابد. در واقع مهمترین پارامتر کنترل کننده‌ی ظرفیت تحمل نیرو، قطر دکمه‌ی جوش است.

### ۳-۶- رفتار مکانیکی

شکل ۱۰ تغییرات نیروی ماکزیمم و انرژی شکست جوش‌های نقطه‌ای را بر حسب جریان جوشکاری نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود با افزایش جریان جوشکاری نیروی ماکزیمم جوش افزایش می‌یابد. اما در جریان‌های بالا نیروی ماکزیمم تقریباً ثابت است. استحکام شکست جوش‌های نقطه‌ای به مود شکست و مکانیزم شکست آنها وابسته است. بنابراین استحکام جوش در به مشخصه‌های هندسی جوش به ویژه قطر دکمه جوش (که در درجه‌ی اول به وسیله‌ی پارامترهای جوشکاری کنترل می‌شود) و استحکام محل شکست

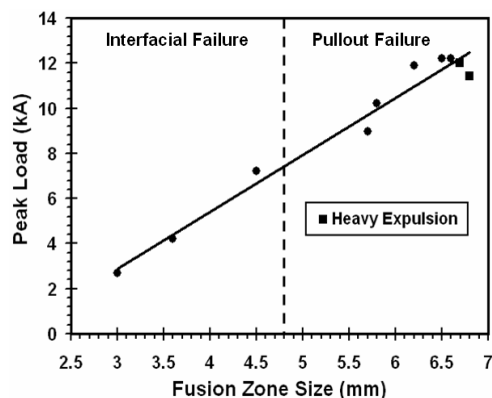


شکل ۱۰- تاثیر جریان جوشکاری بر نیروی ماکزیمم و انرژی شکست

Fig. 10. Effect of welding flow on maximum force and break energy

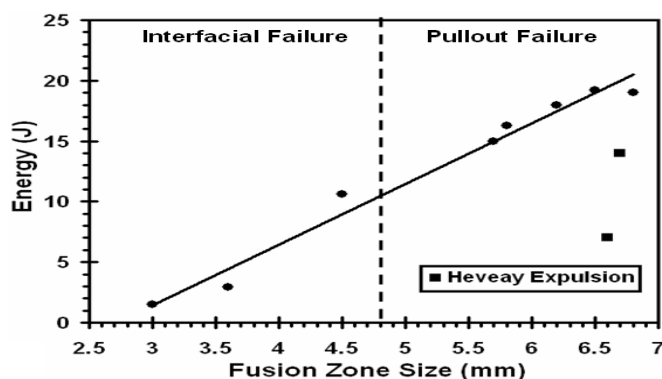
بیشتری به میزان فرورفتگی الکتروود در ورق دارد. همانطور که در شکل ۱۲ مشاهده می شود، تا پیش از بیرون زدگی شدید مذاب تقریباً یک رابطه خطی بین انرژی شکست و قطر دکمه جوش وجود دارد، اما پس از آن به علت افزایش عمق فرورفتگی انرژی شکست بطور قابل توجهی کاهش می یابد. بنابراین همانطور که قبلاً ذکر شد، برای توصیف کامل کیفیت یک جوش نقطه ای علاوه بر نیروی ماکزیمم، باید تغییرات انرژی شکست نیز بررسی شود.

همانطور که در شکل ۱۰ مشاهده می شود با افزایش جریان جوشکاری، انرژی شکست جوش های نقطه ای افزایش می یابد، اما با وقوع بیرون زدگی مذاب انرژی شکست به شدت کاهش می یابد. با افزایش جریان جوشکاری احتمال و شدت بیرون زدگی مذاب افزایش می یابد (جدول ۲). شدت بیرون زدگی مذاب در جریان های ۱۳ و ۱۴ کیلوآمپر شدیدتر از دیگر جریان هاست. علت این امر را می توان به عمق فرورفتگی الکتروود زیاد در این شرایط مرتبط کرد (شکل ۶-d). بنابراین می توان نتیجه گرفت انرژی شکست حساسیت



شکل ۱۱- تاثیر قطر دکمه جوش بر نیروی ماکزیمم

Fig. 11. Effect of diagonal of weld button on maximum force



شکل ۱۲- تاثیر قطر دکمه‌ی جوش بر انرژی شکست

Fig. 12. Effect of diagonal of weld button on break energy

#### مراجع

- [1] M. Zhou, H. Zhang, S.J. Hu, "Relationship between quality and attributes of spot welds", Welding Journal, Vol. 83, 2003, pp. 72-77.
- [2] J.C. Lippold, D.J. Kotecki, "Welding Metallurgy and Weld ability of Stainless Steels", John Wiley & Sons, 2005.
- [3] Recommended Practices for Test Methods and Evaluation the Resistance Spot Welding Behavior of Automotive Sheet Steels, ANSI/AWS/SAE D8.9-97.
- [4] M. Volger: "Investigation of resistance spot weld formation", PhD thesis, Stanford University, Palo Alto, CA, USA, 1993.
- [5] W. Chuko W, J.E. Gould, "Development of appropriate resistance spot welding practice for transformation-hardened steels-phase 2: evaluation of post-weld cooling rate techniques", Report to the American Iron and Steel Institute, 2002.
- [6] M. Pouranvari, H.R. Assgari, S. Mosavizadeh, P. Marashi, M. Goodarzi, "Effect of weld nugget size on overload failure mode of resistance spot welds", Science and Technology of Welding and Joining, Vol. 12, 2007, pp. 217-225.
- [7] Y.J. Chao, "Failure mode of spot welds:

#### ۴- نتیجه‌گیری

- ۱- مقدار قطر دکمه‌ی جوش پیشنهادی استاندارد AWS/ANSI/SAE برای حصول مود شکست محیطی در ورق فولادی زنگ نزن آستنیتی ۳۰۴ در آزمایش کشش-برش کافی نیست.
- ۲- محل شکست جوش‌های نقطه‌ای ورق فولادی زنگ نزن ۳۰۴ در مود محیطی در لبه‌ی دکمه‌ی جوش و در منطقه‌ی متأثر از حرارت است.
- ۳- بطور کلی پیش از بیرون زدگی مذاب شدید یک رابطه‌ی خطی بین قطر دکمه‌ی جوش و خواص مکانیکی جوش (نیروی ماکزیمم و انرژی شکست) وجود دارد.
- ۴- در جریان‌های بیش از حد بالا، به علت رخ دادن شدید بیرون زدگی مذاب که همراه با فروفتگی شدید الکتروود در ورق‌ها می‌باشد، انرژی شکست جوش‌ها به شدت کاهش می‌یابد.

#### تشکر و قدردانی

این پروژه با حمایت‌های مالی دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شرق انجام شده است.

of spot welds", *Finite Element in Analysis and Design*, Vol. 35, 2000, pp. 17-39.

[9] <http://www accuratescrew.com/info/material.htm>

interfacial versus pull out", *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol.8, 2003, pp. 133-137.

[8] X. Deng, W. Chen, G. Shi, "Three-dimensional finite element analysis of the mechanical behavior