

# 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



## ار تباط ساختار و خواص مکانیکی در جوشکاری مقاومتی نقطهای فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI 304

میرجواد میرنجدگرامی'\*، مهدی فرجپور'، مجید پورانوری'، اسلام رنجبرنوده

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

چکیدہ	اطلاعات مقاله
این مقاله به بررسی تاثیر جریان جوشکاری بر کیفیت جوش های مقاومتی نقطـهای فـولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۰۶ میپردازد. برای ارزیابی خواص مکانیکی (ماکزیمم نیـرو، انـرژی شکست و مود شکست) از آزمـایش کشـش-بـرش اسـتفاده شـد. ارتبـاط بـین جریـان	تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۳/۸ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۹/٥/۲۸
جوشکاری، مشخصههای ساختاری و رفتار شکست جـوشهـای نقطـهای بررسـی شـد.	واژگان کلیدی:
بررسیها نشان داد به طورکلی با افزایش قطر دکمه نیـروی مـاکزیمم و انـرژی شکسـت افزایش مییابد. اما با وقوع بیرونزدگی مذاب علیرغم ثابت بودن قطر دکمـه جـوش، بـه دلیل افزایش عمق فرورفتگی الکترود انرژی شکست بهطور قابل توجهی افت میکند. بـا توجه به مکانیزم شکست در آذمایش کشش – برش با استفاده از یک مدل تحلیل حـداقا	جوشکاری مقاومتی نقطهای فولاد زنگ نزن مود شکست خواص مکانیکی
قطر دکمهی جوش برای حصول مود شکست محیطی تخمین زده شد. قطر دکمه می جوش برای حصول مود شکست محیطی تخمین زده شد.	

\* عهدهدارمكاتبات: ميرجواد ميرنجدگرامي، jmgerami@alum.sharif.edu

#### ۱ – مقدمه

جوشکاری مقاومتی نقطهای اصلی ترین فرایند در اتصال ورقهای فلزی بویژه در صنایع خودروسازی است. هـر خودرو امروزی بین ۲۰۰۰ تا ۵۰۰۰ جـوش نقطـهای در بدنهی خود دارد. قابلیت اعتماد به خودرو در شرایط تصادف به طور قابل توجهي تحت تاثير كارايي مكانيكي جـوش هـای مقاومتی نقطـهای دارد. اخیـرا اسـتفاده 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 معمولا به استحکام استاتیکی و دینامیکی آن اشاره دارد. آزمایش کشش– برش به علت سادگم، و اینکه بسیاری از سازههای جوشکاری نقطهای شده برای تحمل بارهای کششی- برشی طراحی می شوند، رایجترین آزمایشی است که برای ارزیابی رفتار مکانیکی جوش های نقطهای در شرایط استاتیکی استفاده می شود. پارامتری کے غالبا از نمودار بار-جابجایی حاصل از آزمایش کشش – برش برای توصیف رفتار مکانیکی جوش های نقطهای استفاده می شود، ماکزیمم نیرو است. برای توصیف کاملتر رفتار مکانیکی یک جوش نقط ای علاوه بر این پارامتر از انرژی متناظر با نقطه ماکزیمم استفاده شده است. انرژی شکست ماکزیمم بیانگر قابلیت جذب انرژی یک جوش نقطهای است و هرچه این مقدار

بیشتر باشد، اطمینان به جوش در شرایط ضربهای مثل تصادفات بيشتر است [1]. در این مقاله تاثیر جریان جوشکاری بر مشخصه های هندسی جوش، خواص مکانیکی جوش و مود شکست بررسی شده است.



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

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

۲ – روش تحقيق از ورق فولادی زنگ نزن آستنیتی با ترکیب شیمیائی داده شده در جدول ۱ به عنوان فلز یایه استفاده شد. ترکیب شیمیایی بدست آمده مطابق ترکیب شیمیایی فولاد AISI 304 مى باشد.

**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	С	Mn	Р	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

نشریه علم مواد، سال دوم، شماره سوم، تابستان ۱۳۸۹

52

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.



برای جوشکاری با یک دستگاه جوشکاری مقاومتی نقطامای A با ظرفیت ۱۲۰ kVA و با استفاده از الکترودهای Cu+Cr+Zr از گروه A مطابق کالاس دو دسته بندی RWMA به قطر mm انجام شد. شماتیک برنامهی جوشکاری در شکل ۲ نشان داده شده است. برای بر رسی های ساختاری از عملیات استاندارد متالوگرافی برای آماده سازی نمونهها استفاده شـد. قطـر دکمهی جوش (اندازه دکمهی جـوش در راسـتای طـولی ورق) با استفاده از اچ ماکروساختاری با محلول 2 ml HCl+1gr K<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>5</sub>+1gr CuCl<sub>2</sub>+100ml H<sub>2</sub>O اندازه 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 کاربید کرم در منطقهی متاثر از حـرارت از اچ مـاراكومى ( KOH, 10g ) بسیار حساس به [۲] (K<sub>3</sub>[Fe(CN)<sub>6</sub>], 100 ml H<sub>2</sub>O ذرات غني از كرم است، استفاده شد. يروفيل سختي طولي





گردید. با استفاده از نمودار نیرو –جابجایی مقدار ماکزیمم نیرو و ماکزیمم انرژی شکست و با استفاده از نمونه های شکسته شده، مود شکست برای هر نمونه تعیین شد. برای بررسی مکانیزم و محل شروع شکست در مود محیطی، سطح مقطع شکست نمونه های کشش –برش مورد بررسی متالو گرافی قرار گرفت. نمون به ای آزم ایش 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 میلی متر بر دقیقه انجام شد و نمودار نیرو -جابجایی به صورت همزمان ثبت

جوش موجب ایجاد فرورفتگی الکترود(شکل ٤-۵) و ایجاد یک محل تمرکز تنش در لبهی فرورفتگی می شود. به علت سیکل حرارتی فرایند جوشکاری نقط های یک ساختار ناهمگن در محل اتصال تشکیل می شود. محل اتصال را می توان به ۳ منطقه فلز جوش، منطقهی متاثر از حرارت و فلز پایه تقسیم کرد: فلز جوش (دکمهی جوش): این منطقه حین جوشکاری، ذوب شدن را تجرب کرده و دوباره منجمد می شود. ساختار ریختگی دکمهی جوش موید این امر می باشد. ۳- نتایج و بحث
۳-۱- ساختار منطقهی اتصال
شکل ٤-۵ ماکروساختار یک جوش مقاومتی نقطهای فولاد
زنگ نزن ۳۰٤ را نشان میدهد. همانطور که ملاحظه میشود تشکیل یک جوش نقطهای موجب ایجاد تغییرات ساختاری و هندسی در ورق فلز پایه میشود. ایجاد یک شیار طبیعی در محل اتصال دو ورق میشود (شکل٤-۵)، که رفتار مکانیکی یک جوش را به شدت تحت تاثیر قرار میرود. همچنین فشار الکترود حین سیکل حرارتی میرود. همچنین فشار الکترود حین سیکل حرارتی



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

ریزساختار دکمه ی جوش در شکل ٤- b نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می شود ساختار دکمه ی جوش کاملا آستنیتی است. از دیاگرام شیفلر می توان برای پیش بینی ریزساختار دکمه ی جوش در اتصالات فولادهای زنگ نزن استفاده کرد در این دیاگرام با استفاده از دو پارامتر نیکل معادل و کروم معادل (به ترتیب روابط ۱ و ۲) می توان ریزساختار منطقه ی ذوب شده در جوش فولادهای زنگ نزن را پیش بینی کرد[۲].

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

 $(Cr)_{eq} = Cr + Mo + 1.5Si + 0.5Nb$  (7)

با توجه به ترکیب شیمیایی فولاد مورد استفاده و روابط فوق، مقادیر کروم معادل و نیکل معادل بـه ترتیـب برابـر ١٩٪ و ١٠.٥٪ محاسبه مىشوند. با توجه به مقادير بدست آمده، نمودار شفیلر یک ریزساختار آستنیتی-فریتی با درصد تقریبی ۸٪ فریت را برای دکمهی جوش پیشبینی میکند که این پیش بینی با داده های تجربی بدست آمده (كاملا آستنیتی) همخوانی ندارد. دلیل این امر را می توان به سرعت بالای سرد شدن در فرایند جوشکاری مقاومتی نقطهای مرتبط کرد. لازم به ذکر است که این دیاگرام برای پیشبینی ساختار فلز جـوش در فراینـدهای جوشـکاری قوسی با سرعت سرد شدن پایین تر مناسب است. ولگر [٤] گزارش کرد سرعت سرد شدن در فرایند جوشکاری مقاومتی نقطهای هنگامی که زمان نگهداری صفر باشد، به ۱۰۰۰ Ks<sup>-1</sup> میرسد. با افزایش زمان نگهداری به علت اثر کوینچ الکترودهای مسی، سرعت سرد شدن تـا بیشـتر از ۲۰۰۰ Ks<sup>-1</sup> میرسد [۵]. این سرعت سرد شدن در دیگر فرایندهای مرسوم جوشکاری بوجود نمیآید. منطقهی متاثر از حرارت: سیکل حرارتی جـوش در ایـن منطقه موجب ذوب نشده ولى باعث تغييرات ساختارى در این منطقه میشود. از آنجایی که فلز پایهی مورد

استفاده در این پژوهش فولاد زنگ نزن آستنیتی استحاله ناپذیر است بنابراین تغییرات فازی در این منطقه مشاهده نمی شود. با این وجود ساختار دانه ای در این منطقه تحت تاثیر فرایند جوشکاری تغییر کرده و مقداری رشد دانه در مجاورت دکمه ی 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 مرزدانه ای کاربیدهای کرم می باشد که می تواند به طور قابل توجهی مقاومت به خوردگی جوش این فولادها را کاهش دهد. برای بررسی تشکیل این رسوبات در منطقه ی متاثر 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 می توان به سرعت بالای سرد شدن در فرایند جوش کاری نقطه ای مربوط کرد. سرعت بالای سرد شدن مقدار موجب کاهش زمان توقف در محدوده ی رسوب کاربید کرم می شود. 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 می شود بر خلاف پروفیل سختی جوشهای نقطهای فولادهای کم کربن [٦]، سختی در امتداد محل اتصال زیاد نیست. با این وجود سختی دکمه جوش و منطقهی متاثر از حرارت مقداری کمتر از سختی فلزپایه است. سختی پایین تر دکمهی جوش نسبت به فلز پایه را می توان به ساختار ریختگی و وجود دانههای ستونی درشت در آن نسبت کاربیدی در فرایند جوشکاری مقاومتی نقطهای قابل توجه نیست. بنابراین کاهش جزیی سختی در منطقهی متاثر از حرارت را می توان به رشد دانه در این منطقه وابسته کرد. داد. سختی منطقهی متاثر ازحرارت در فولادهای زنگ نزن آستنیتی به وسیلهی دو پدیدهی رشد دانـه و رسـوب کاربید کنترل میشود. همـانطور کـه ذکـر شـد، رسـوبات



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

منطق III : در ایـن منطقـه آهنـگ رشـد دکمـه کـاهش می یاید.

منطقهی IV :در این منطقه که همراه با بیرون زدگی مذاب است،قطر دکمهی جوش تقریبا ثابت است. در واقع یکی از مهمترین فاکتورهای کنترل کنندهی رشد دکمه مقاومت الکتریکی دینامیکی دکمه ی جوش حین فرایند است، با افزایش قطر دکمه ی 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،

می تواند روند مشاهده شده را توضیح دهد [7]. همانطور که در شکل ٦ مشاهده می شود، عمق فرورفتگی الکترود در ورق ها نیز می تواند تاثیر بسزایی بر رفتار مکانیکی جوش های نقطهای داشته باشد. همانطور که ملاحظه می شود با افزایش جریان جوشکاری به علت ۳-۳- تاثیر جریان جوشکاری بر مشخصههای ماکروساختاری جوش قطر دکمه ی جوش مهمترین پارامتر کنترل کننده ی استحکام مکانیکی جوش های نقطه ای است. شکل ٦ ماکروساختار جوش را جریان های مختلف را نشان می دهد. تغییرات قطر دکمه ی جوش بر حسب جریان می دهد. تغییرات قطر دکمه ی جوش بر حسب جریان می دهد. تغییرات قطر دکمه ی جوش بر حسب مریان می دهد. تغییرات قطر دکمه ی جوش بر حسب مریان می دهد. تغییرات قطر دکمه ی موش بر حسب مریان می دهد. تغییرات قطر دکمه ی موش بر حسب مریان می می در شکل ۷ رسم شده است. همانطور که می می در این منطقه مقدار حرارت تولیدی برای ذوب می منطقه: در این منطقه مقدار حرارت تولیدی برای ذوب منطقه: در این منطقه مقدار حرارت تولیدی برای ذوب منطقه II : در این منطقه دکمه ی جوش تشکیل شده و آهنگ رشد آن سریع است.

عمق نفوذ جوش افزایش یافته، اما پس از ان روندی روبه کاهش دارد. علت این است که با افزایش جریان رشد طولی و عرضی به طور همزمان افزایش پیدا میکند، اما از مرحلهای به بعد با افزایش جریان، افزایش عمق فرورفتگی الکترودها در ورق مانع افزایش عمق نفوذ میشود. افزایش حرارت تولیدی، بالا رفتن دمای فصل مشترک الکترود-ورق و در نتیجه افزایش قابلیت تغییر فرم پلاستیک ورقها تحت فشار الکترودها، عمق فرورفتگی الکترودها افزایش مییابد. همچنین با توجه شکل ٦ می توان دریافت که با افزایش جریان تا یک حد بحرانی



شکل ٦- تغییرات مشخصههای هندسی با افزایش جریان جوشکاری a-٦ کیلو آمپر، b- ۸ کیلو آمپر c- ۲ کیلو آمپر: قطر دکمه ی کوچک (شکل a) در جریان های جوشکاری پایین موجب شکست فصل مشترکی می شود. افزایش بیش از حد جریان جوشکاری (شکل د) موجب افزایش مقدار فرورفتگی الکترود 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.

57

www.SID.ir



Fig. 7. Changes diagonal of weld button by welding flow

۳-٤- مود شکست مود شکست جوش های نقطهای یک معیار کیفی از کیفیت جوش است. به طور کلی، جوش های نقطهای در دو مود فصل مشترکی و محیطی دچار شکست می شوند. در شکست فصل مشترکی، شکست از طریق اشاعه ترک از میان دکمه جوش صورت می گیرد و در مود شکست محیطی، شکست با بیرون کشیده شدن دکمه جوش از

یک ورق صورت می گیرد . ظرفیت تحمل نیرو و قابلیت جذب انرژی در مود فصل مشترکی کمتر از مود محیطی است [۸-٦]. بنابراین برای اینکه جوش های نقطهای در حین سرویس دچار تخریب زودرس نشوند، متغیرهای فرایند باید به گونهای تنظیم شوند که از دستیابی به مود شکست محیطی اطمینان حاصل گردد.



**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

جدول۲- 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 failuremode

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 پیش بینی مود شکست در جوش های نقطه ای ورق فولادی زنگ نزن آستنیتی کار حاضر، استفاده می شود. بر اساس کار پورانوری و همکارانش [7] قطر دکمه ی بحرانی (حداقل حداقل قطر دکمه جوش لازم برای دستیابی به مود شکست محیطی) را می توان از رابطه ی زیر بدست آورد:

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

شکل ۹ تصویر سطح مقطع نمونه ی شکسته شده در آزمایش کشش-برش را نشان می دهد. همانطور که ملاحظه می شود برخلاف جوش نقطه ای های ورق های فولادی کم کربن که در فلز پایه دچار شکست می شوند [7] شکست در منطقه ی متاثر از حرارت و در مجاورت دکمه ی جوش شکست آغاز شده است. این امر را می توان به افت سختی ناشی از رشد دانه در منطقه ی متاثر از حرارت مرتبط کرد. از آنجایی که بدست آوردن روش آزمایش کردن مستقیم مشکل است، بنابراین با توجه به اینکه استحکام کششی مواد با سختی آنها رابطه ی مستقیم دارد، در اینجا از نسبت سختی استفاده می شود. اما برای فولاد AISI 304 اطلاعات زیادی در مورد نداشت، اما در 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 جوش های نقطهای در جدول ۲ آمده است. همان طور که مشاهده میکنید افزایش جریان جوشکاری، موجب تغییر مد شکست از فصل مشترکی به محیطی می شود.

۳-٥- تحليل مود شكست

59

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

$$d = 4\sqrt{t} \tag{(Y)}$$

که در آن t ضخامت ورق برحسب mm است. براساس این رابطه حداقل قطر دکمه ی جوش موردنیاز برای حصول مود شکست محیطی در مورد ورق فولادی زنگ نزن با ضخامت ۱/۲ mm برابر ۶/۳۸ خواهد بود. اما همانطور که در جدول ۲ مشاهده می شود، دکمه جوشی با قطر ۶/۵ نیز در مود فصل مشترکی دچار شکست شده است. در بررسی های قبلی [٦] 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 ٥/٤٧ محاسبه می شود. همانطور که از جدول۲ ملاحظه می شود، این مقدار به خوبی مرز بین مود فصل مشترکی و محیطی را مشخص می سازد.

تنها منبع یافت شده، نسبت استحکام برشی به استحکام  
کششی ۰/۷۵ گزارش شده است [۹]. بنابراین داریم:  
$$d_{cr} = 4t \frac{(\sigma_{UTS})_{HAZ}}{\tau_{WN}} = 4t \frac{H_{HAZ}}{0.75 \times H_{WN}} = 5.34t \frac{H_{HAZ}}{H_{WN}}$$
 (٤)  
نسبت سختی دکمه جوش به سختی منطقهی متاثر از  
حرارت تقریبا برابر ۱/۱۷ است. بنابراین طبق رابطهی ٤



**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 دکمه ی جوش را تحت تاثیر قرار میدهد. از طرف دیگر هرچه مساحت ناحیه ی اتصال بیشتر باشد، مقاومت به شکست فصل مشترکی بیشتر میشود. هر دو عامل مستقیما موجب افزایش نیروی لازم برای شکست میشود. تغییرات نیروی ماکزیمم بر حسب قطر دکمه ی جوش در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه میشود با افزایش قطر دکمه نیروی کنیدم افزایش مییابد. در واقع مهمترین پارامتر کنترل کننده طرفیت تحمل نیرو، قطر دکمه ی جوش است.

۶.

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 تقریبا 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 پارمترهای جوشکاری کنترل می شود) و استحکام محل شکست

نشریه علم مواد، سال دوم، شماره سوم، تابستان ۱۳۸۹

60

۳-۲- رفتار مکانیکی



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

بیشتری به میزان فرورفتگی الکترود در ورق دارد. همانطور که در شکل ۱۲ مشاهده می شود، تا پیش از بیرون زدگی شدید مذاب تقریبا یک رایطهی خطی بین انرژی شکست و قطر دکمهی جوش وجود دارد، اما پس از آن به علت افزایش عمق فرورفتگی انرژی شکست بطور قابل توجهی کاهش می یابد. بنابراین همانطور که قبلا ذکر شد، برای توصیف کامل کیفیت یک جوش نقطهای 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 نقطهای 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 جریانهای ۳۱ و ۱۶ کیلو آمپر شدیدتر از دیگر جریانهاست. علت این امر را می توان به عمق فرورفتگی الکترود زیاد در این شرایط مرتبط کرد (شکل ۲-b). بنابراین می توان نتیجه گرفت انرژی شکست حساسیت



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



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:

٤-نتیجهگیری
۱- مقدار قطر دکمه ی جوش پیشنهادی استاندارد
۱- مقدار قطر دکمه ی جوش پیشنهادی استاندارد ورق فولادی زنگ نزن آستنیتی ۳۰٤ در آزمایش کشش برش کافی نیست.
۲- محل شکست جوشهای نقطهای ورق فولادی زنگ نزن ۲۰۰ در مود محیطی در لبهی دکمه ی جوش و در نزن ۲۰۰ در مود محیطی در لبهی دکمه ی جوش و در منطقه ی متاثر از حرارت است.
۳- بطور کلی پیش از بیرون زدگی مذاب شدید یک رابطه ی خطی بین از دکمه ی جوش و خواص مکانیکی جوش (نیروی ماکزیمم و انرژی شکست) و جود دارد.
۶- در جریانهای بیش از حد بالا، به علت رخ دادن شدید بیرون زدگی مذاب که مدید این میدید الکترود در ورقها می باشد، انرژی شکست و فرهما به شدید که شدید کاهش می بابد.

**تشکر و قدردانی** این پروژه با حمایتهای مالی دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شرق انجام شده است.

نشریه علم مواد، سال دوم، شماره سوم، تابستان ۱۳۸۹

62

### Archive of SID

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