

# سختپوشی فولاد گرمکار H11 (1/2343) به وسیله سوپر آلیاژ استلایت 6

مصطفی کاوسی سیسی<sup>1</sup>، فرشید مالک قاینی<sup>2\*</sup>

1- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی مواد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

2- استادیار بخش مهندسی مواد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

\*تهران، صندوق پستی 14125-143

fmalek@modares.ac.ir

(دریافت مقاله: شهریور 1382، پذیرش مقاله: اردیبهشت 1385)

**چکیده** - خستگی حرارتی، خستگی مکانیکی، سایش و تغییر شکل پلاستیک دمای بالا، سازوکارهای اصلی فرسایش قالبهای فورج گرم است. سختپوشی مناطق تحت تمرکز تنش این قالبها، به وسیله سوپر آلیاژهای پایه کبالت از قبیل استلایت 6، تأثیر بسیار زیادی بر افزایش عمر قالبها و بهبود عملکرد آنها دارد. سختی دمای بالا، مقاومت به گالینگ، مقاومت به خوردگی و اکسایش دمای بالا، مقاومت به سایش چسبان فلز به فلز و عدم بروز استحاله آلوتروپیک تا دمای  $1100^{\circ}\text{C}$ ، از خواص عمده این آلیاژ به شمار می‌روند. فولاد H11 که کاربرد بسیار گسترده‌ای در ساخت قالبهای فورج گرم دارند، به علت برخورداری از عناصر آلیاژی و در نتیجه سختی پذیری بالا، از حساسیت زیادی نسبت به سرعتهای سرد شدن زیاد و ترک هیدروژنی (HIC) برخوردار است. به همین دلیل در این مقاله پارامترهای مختلف سختپوشی فولاد مذکور به وسیله آلیاژ استلایت 6 به روش TIG در شرایط انتقال حرارت سه‌بعدی، بررسی شده است. با توجه به نتایج حاصل، امکان سختکاری این فولاد پس از سختپوشی آن با استلایت 6 وجود نداشته و توصیه می‌شود دماهای پیشگرم و بین‌پاسی سیکل سختپوشی آن در محدوده  $310-370^{\circ}\text{C}$  قرار داشته باشند. شدت جریان مناسب برای جوشکاری لایه اول با مفتولی به قطر  $3/2\text{mm}$  در حدود 80 الی 85 آمپر ارزیابی شده و لازم است برای حصول بیشینه سختی (41-42HRC) به وسیله سیکل مذکور، ضخامت لایه سختپوشی حداقل 3mm باشد. توصیه می‌شود انرژی ورودی سیکل جوشکاری کمتر از  $455\text{KJ/m}$  بوده و  $\Delta t_{8-5}$  آن در محدوده 6-15/3s قرار داشته باشد. همچنین توصیه می‌شود عملیات پسگرم این فولاد در محدوده دمایی  $425-500^{\circ}\text{C}$  به مدت 1 ساعت به ازای هر 30mm ضخامت انجام شود.

**کلید واژگان:** سختپوشی، سوپر آلیاژ استلایت 6، فولاد گرمکار H11، فولاد گرمکار 1/2343، قالبهای فورج گرم، سختی دمای بالا، جوش پذیری.

## 1- مقدمه

شکلدهی قطعه مورد نظر ایفا می‌کنند. مواد این قالبها با توجه به شرایط کاری حاکم و نوع تجهیزات، از میان فولادهای ابزار گرمکار انتخاب می‌شوند. فولاد H11 عضو گروه فولادهای گرمکار کروم‌دار است که چقرمگی و

آهنگری یا فورج گرم یکی از روشهای عمده شکلدهی فلزها است که قدمت آن به حدود 2000 سال پیش از میلاد مسیح می‌رسد. قالبهای فورج گرم نقش اصلی را در

روش جوشکاری TIG با جریان مستقیم الکتروود منفی (DCEN) و تکنیک بافتن برای سختپوشی استفاده شده است [3]. استفاده از تکنیک DCEN باعث کاهش خطر ورود تنگستن به حوضچه مذاب می‌شود. همچنین این فولاد از حساسیت بالایی نسبت به سرعت‌های سرمایش سریع برخوردار است. با استفاده از عملیات حرارتی پیشگرم و افزایش انرژی مؤثر ورودی به فلز پایه، سرعت خنک شدن قطعه کاهش می‌یابد. ضخامت قطعه نیز نقش به‌سزایی در سرعت خنک شدن پس از جوشکاری دارد. در حقیقت هدایت حرارتی در حالت انتقال حرارت سه‌بعدی (ضخامت بیشتر از 25mm) بیشینه می‌شود. لازم است ذکر شود که تغییرات نسبتاً کوچک در دماهای پیشگرم و بین‌پاسی می‌تواند به بروز تغییرات شدیدی در سرعت سرد شدن در محدوده دماهای بحرانی منجر شود. به‌طور کلی عملیات پیشگرم، هزینه‌بر بوده و ممکن است باعث ایجاد تغییرات ریزساختاری نامطلوبی در جوش و فلز پایه (مانند رسوب کاربید در مرز دانه‌های HAZ) شود. بنابراین لازم است با استفاده از آزمایش‌های مناسبی حداقل دمای پیشگرم مناسب و کمترین انرژی مؤثر ورودی به فلز پایه به‌دست آید. از طرفی در صورت افزایش دمای HAZ به بالاتر از دمای بحرانی  $A_{cm}$  بر اثر افزایش انرژی مؤثر ورودی به فلز پایه و کاهش سرعت سرد شدن، احتمال رسوب فاز پرویوتکتوئید (کاربیدهای آلیاژی) در مرز دانه‌های آستنیت اولیه افزایش یافته و در نتیجه، ریزساختار نامطلوبی با توجه به شرایط کاری حاکم بر قالبهای فورج گرم ایجاد می‌شود. بنابراین لازم است کمترین سرعت سرد شدن و کمترین انرژی مؤثر ورودی به فلز پایه برای جلوگیری از تشکیل چنین ریزساختاری در HAZ به‌دست آید.

در جوشکاری استلایت 6 به‌وسیله فرایندهای قوسی، درصد آهن لایه اول حدود 20 تا 30 درصد افزایش می‌یابد. بنابراین چقرمگی این لایه به شرط بروز نکردن جدایش شیمیایی، افزایش یافته و خواص مقاومت به سایش و مقاومت

مقاومت به شوک بالا، از بارزترین ویژگیهای آن به‌شمار می‌روند. فرسایش و پیری زودرس قالبهای فورج گرم در مناطق تمرکز تنش آنها از جمله مسائل حائز اهمیت برای صنایع فورج بوده و علاوه بر تأثیرگذاری منفی بر کیفیت قطعات تولید شده، بازدهی اقتصادی تولید و در نتیجه توان رقابت در بازار مصرف را به مقدار قابل‌توجهی کاهش می‌دهند. ترکهای حرارتی عامل اصلی فرسایش و پیری این قالبها است. این ترکها در نتیجه نوسانات دمایی و تنشی حاکم، در حین سرویس جوانه زده و رشد می‌کنند [1]. خوردگی و اکسایش سطح قالبها بر اثر استفاده از روانکار نامناسب، نرم شدن لایه‌های سطحی بر اثر دیکربوره شدن، کاهش استحکام و سختی داغ مواد قالب و تنشهای انبساطی و انقباضی ناشی از بروز استحاله‌های متوالی آستنیت (fcc) به مارتنزیت (bcc) و بعکس در سطوح داخلی قالب نیز تشکیل شبکه ترکهای حرارتی در این سطوح را تسریع می‌کنند. در واقع دمای سطوح داخلی قالب بر اثر تماس با ماده اولیه، تا حدود  $700-800^{\circ}\text{C}$  افزایش می‌یابد. بنابراین با توجه به شرایط دمایی حاکم، سختپوشی این سطوح به‌وسیله آلیاژهای مقاوم در برابر دمای بالا، مانند آلیاژهای پایه کبالت و پایه نیکل، یکی از موفقیت‌آمیزترین روشهای افزایش عمر قالبهای فورج گرم به‌شمار می‌رود. سوپرآلیاژ استلایت 6 معروفترین آلیاژ سختپوشی پایه کبالت است که به‌دلیل برخورداری از سختی بالا در دماهای بالاتر از  $620^{\circ}\text{C}$  کاربرد بسیار گسترده‌ای در سختپوشی سطوح در معرض دماهای بالا دارد. این آلیاژ تا دمای  $1100^{\circ}\text{C}$  فاقد استحاله آلوتروپیک است [2].

## 2- روش تحقیق

استحکام کششی و استحکام تسلیم فولاد H11 با سختی 50HRC در دمای اتاق، به‌ترتیب برابر  $1806\text{Mpa}$  و  $1482\text{Mpa}$  است [1]. بنابراین جوشکاری این فولاد با الکترودهای پوشش‌دار کم‌هیدروژن نیز همراه با خطر ترک هیدروژنی بوده [3] به همین دلیل در این تحقیق از

بسیار بیشتر از حالت کوئینچ - تمپر است، زیرا تحت این شرایط احتمال بروز ترکهای سرد و گرم - به دلیل کمتر بودن استحکام تسلیم و همچنین فقدان ریزساختارهای مارتنزیتی در آنها - کاهش می یابد [6, 7]. همچنین در صورت سختکاری قالبهای جوشکاری شده، غیریکنواختی ریزساختار HAZ تا حدود زیادی اصلاح شده و خواص خستگی و مکانیکی آن بهبود می یابد. بنابراین با طراحی آزمایشهای مناسب لازم است قابلیت سختکاری قالبهای سختپوشی شده در حالت آنیل را با توجه به ویژگیهای سوپرآلیاژ استلایت 6 بررسی کرد.

با توجه به مطالب فوق لازم است ریزساختار اولیه فلز پایه، انرژی مؤثر ورودی به فلز پایه، دماهای پیشگرم و پسگرم و نحوه خنک کردن پس از عملیات جوشکاری مطالعه و بررسی شوند. بنابراین به منظور بررسی نقش متقابل این پارامترها، حداقل  $2^5=32$  بلوک آزمایش مورد نیاز است که البته با تغییراتی در نحوه بررسی پارامترهای مختلف - که جزئیات آن در ادامه خواهد آمد - می توان تعداد بلوکهای آزمایش را کاهش داد. در این تحقیق از مفتول استلایت 6 با قطر  $3/2\text{mm}$  و 9 بلوک آزمایش با ابعاد  $75 \times 40 \times 30\text{mm}$  از جنس فولاد H11 در حالت آنیل استفاده شده است. تجزیه شیمیایی مفتول و فولاد استفاده شده به ترتیب در جدولهای 1 و 2 داده شده است.

به خوردگی آن کاهش می یابد [4]. به منظور حصول به خواص مقاومت به سایش و مقاومت به خوردگی مطلوب به وسیله این آلیاژ، لازم است با افزایش ضخامت لایه سختپوشی، اثر رقت به حداقل ممکن برسد [3]. از طرفی افزایش ضخامت لایه سختپوشی با توجه به قیمت بالای مفتول استلایت 6 (1/500/000 ریال برای هر کیلوگرم) و افزایش زمان سختپوشی، باعث افزایش هزینه ها و در نتیجه کاهش بازدهی اقتصادی فرایند می شود. بنابراین لازم است پس از تعیین پارامترهای مناسب جوشکاری، تعداد لایه ها و ضخامت بهینه برای رسوب آلیاژ سختپوشی با توجه به خواص مکانیکی مورد نیاز و شرایط کاری حاکم بر قالبها به دست آید.

با توجه به شدت تنشهای پسماند ناشی از جوشکاری فولاد H11، استفاده از عملیات حرارتی پسگرم ضروری به نظر می رسد. از سوی دیگر عملیات پسگرم باعث افزایش هزینه ها و همچنین کاهش سختی و استحکام فلز پایه (قالب) در اثر تمپر شدن آن می شود. میزان افت سختی باید با توجه به شرایط کاری حاکم بر قالبها و برای جلوگیری از بروز تغییر شکل پلاستیک در حین سرویس، کنترل شود [5]. بنابراین لازم است میزان کاهش سختی مجاز بر اثر عملیات پسگرم با طراحی آزمایشهای مناسب در این زمینه به دست آید. از سوی دیگر جوش پذیری فولادهای استحکام بالا در حالت آنیل

جدول 1 تجزیه شیمیایی مفتول استلایت 6 استفاده شده

| درصد وزنی عناصر آلیاژی |      |     |      |      |      |         |           |         | تجزیه شیمیایی |
|------------------------|------|-----|------|------|------|---------|-----------|---------|---------------|
| Cu                     | Mn   | Si  | Fe   | Mo   | Ni   | W       | Cr        | C       |               |
| -                      | 1/00 | 2/0 | 3/0  | 1/0  | 3/0  | 3/0-6/0 | 26/0-32/0 | 0/9-1/4 | ASME A5.13    |
| 0/02                   | 0/48 | 1/3 | 0/29 | 0/05 | 0/16 | 4/5     | 27/5      | 0/95    | شیمی تر       |

جدول 2 تجزیه شیمیایی فولاد H11(1/2343) استفاده شده

| درصد وزنی عناصر آلیاژی |           |           |           |      |           |           |           | تجزیه شیمیایی |
|------------------------|-----------|-----------|-----------|------|-----------|-----------|-----------|---------------|
| Cu                     | Mn        | Si        | Mo        | Ni   | V         | Cr        | C         |               |
| -                      | 0/30-0/50 | 0/90-1/20 | 1/10-1/40 | -    | 0/25-0/50 | 4/80-5/50 | 0/36-0/42 | DIN 17350     |
| 0/08                   | 0/45      | 1/14      | 1/16      | 0/31 | 0/42      | 5/17      | 0/39      | کوانتومتری    |

5- برش طولی نمونه‌های جوشکاری شده به دو قسمت تقریباً مساوی؛

6- سختکاری نیمه دوم نمونه‌های خام سختپوشی شده مطابق سیکل (شکل 1)؛

7- اندازه‌گیری ابعادی لایه سختپوشی شده؛

8- انجام مطالعات متالوگرافی و تهیه تصاویر متالوگرافی؛

9- انجام مطالعات سختی سنجی؛

10- بررسی نتایج و انتخاب پارامترهای بهینه برای سختپوشی.

### 3- بررسی و تحلیل نتایج

نتایج مطالعات انجام شده روی بلوکهای آزمایش در جدول و شکل‌های زیر ارائه شده است. در جدول 4 مشخصات لایه سختپوشی این بلوکها مانند ضخامت کل لایه، طول، پهنا، ضخامت و زمان جوشکاری هر پاس ارائه شده است.

مراحل انجام تحقیق را به صورت زیر می‌توان خلاصه کرد:

1- سختکاری 5 بلوک مطابق با سیکل (شکل 1)؛

2- سنباده‌زنی کلیه سطوح نمونه‌های سختکاری شده؛

3- جوشکاری سه‌لایه روی سطح  $75 \times 40 \text{mm}$  نمونه‌های آنیل (A) و سختکاری شده (H) به فاصله حداقل  $10 \text{mm}$  از لبه‌ها مطابق جدول 3 که زمان پس‌گرم نمونه‌ها در حدود 1 ساعت بوده و دمای بین‌پاسی آنها در حین جوشکاری، در محدوده دمای پیشگرم آنها نگهداری شده است. قطر الکتروود تنگستنی استفاده شده در این تحقیق  $2/4 \text{mm}$  و دبی گاز آرگون در تمامی موارد بر روی  $7 \text{l/min}$  تنظیم شده است [8]. شدت جریان آغاز و اتمام جوشکاری به منظور ممانعت از بروز ترک چاله جوش روی 30% جریان اصلی جوشکاری تنظیم شده است.

4- سنباده‌زنی، بازرسی چشمی و انجام آزمایش مایع نافذ روی نمونه‌های سختپوشی شده؛

جدول 3 پارامترهای سختپوشی بلوکها\*

| نحوه خنک‌شدن | دمای پس‌گرم (°C) | دمای پیشگرم (°C) | پارامترهای جوشکاری |              | سختی اولیه (HV) | نمونه | ردیف |
|--------------|------------------|------------------|--------------------|--------------|-----------------|-------|------|
|              |                  |                  | ولتاژ (ولت)        | جریان (آمپر) |                 |       |      |
| کوره         | 520-570          | 200-250          | 11/6               | 100          | 200             | A1    | 1    |
| کوره         | 520-570          | 200-250          | 13                 | 130          | 200             | A2    | 2    |
| کوره         | 550-600          | 350-400          | 11/6               | 100          | 200             | A3    | 3    |
| کوره         | 550-600          | 350-400          | 13                 | 130          | 200             | A4    | 4    |
| هوا          | -                | -                | 11                 | 85           | 549             | H5    | 5    |
| کوره         | 550-600          | 200-250          | 12/1               | 110          | 549             | H6    | 6    |
| هوا          | 550-600          | 200-250          | 13/5               | 140          | 549             | H7    | 7    |
| کوره         | 550-600          | 350-400          | 12/1               | 110          | 549             | H8    | 8    |
| هوا          | 550-600          | 350-400          | 13/5               | 140          | 549             | H9    | 9    |

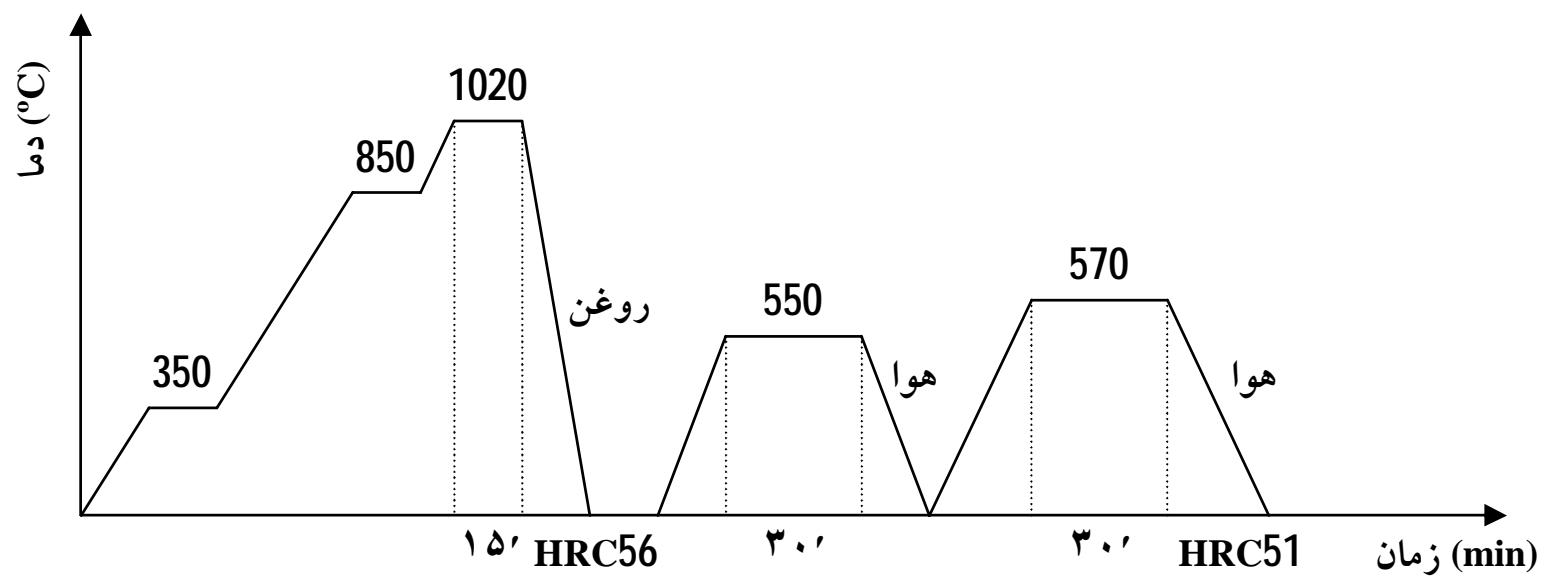
\*ترتیب جوشکاری هر نمونه: 1- لایه اول: سه پاس کنار هم با متوسط طول  $55 \text{mm}$

2- لایه دوم: دو پاس کنار هم با متوسط طول  $55 \text{mm}$

3- لایه سوم: یک پاس با متوسط طول  $55 \text{mm}$

به ترتیب بیانگر حالت آنیل و سختکاری شده نمونه‌ها بوده و حروف A و F در انتهای نام هر تصویر به ترتیب بیانگر سرد شدن نمونه پس از عملیات جوشکاری در مجاورت هوا یا در داخل کوره بوده و اعداد بعدی به ترتیب بیانگر شدت جریان جوشکاری، دمای متوسط پیشگرم و دمای متوسط پسگرم است.

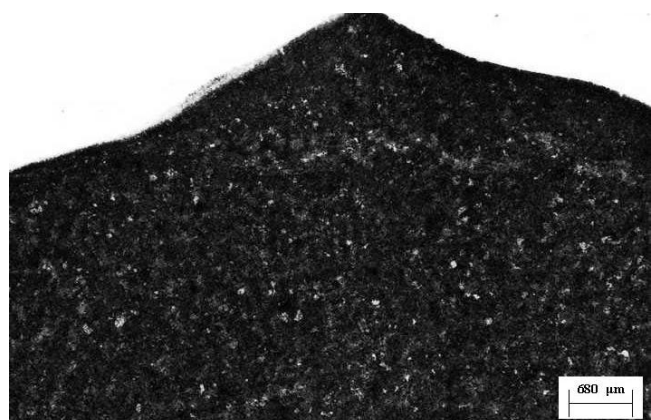
در شکل 2 ریزساختارهای فصل مشترک و HAZ بلوکهای آنیل - که در شرایط مختلفی سختپوشی شده‌اند - قبل و پس از سختکاری نشان داده شده است. در شکل 3 ریزساختارهای فصل مشترک و HAZ بلوکهایی که در حالت آبدار تحت شرایط مختلف سختپوشی شده‌اند، نشان داده شده است. حروف H, A در ابتدای نام این تصاویر



شکل 1 سیکل سختکاری بلوکها

جدول 4 مشخصات لایه سختپوشی بلوکها

| مشخصات هر پاس    |            |           |          | ضخامت کل لایه (mm) | جنس (DIN) | نمونه | ردیف |
|------------------|------------|-----------|----------|--------------------|-----------|-------|------|
| زمان جوشکاری (S) | ضخامت (mm) | پهنا (mm) | طول (mm) |                    |           |       |      |
| 50               | 0/67       | 7         | 55       | 2/01               | 1/2343    | A1    | 1    |
| 40               | 0/93       | 9         | 55       | 2/79               | 1/2343    | A2    | 2    |
| 50               | 1/4        | 8/7       | 55       | 4/2                | 1/2343    | A3    | 3    |
| 40               | 1/7        | 11        | 55       | 5/1                | 1/2343    | A4    | 4    |
| 55               | 0/33       | 4/2       | 55       | 1                  | 1/2343    | H5    | 5    |
| 50               | 0/8        | 9         | 55       | 2/4                | 1/2343    | H6    | 6    |
| 40               | 1/17       | 10/5      | 55       | 3/51               | 1/2343    | H7    | 7    |
| 50               | 1/6        | 10/3      | 55       | 4/8                | 1/2343    | H8    | 8    |
| 40               | 2          | 11/5      | 55       | 6                  | 1/2343    | H9    | 9    |



1H100-225-545F (ب)



1A100-225-545F (الف)



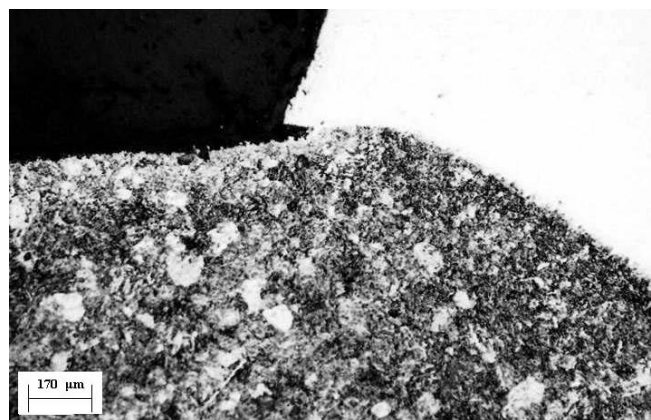
2H130-225-545F (ت)



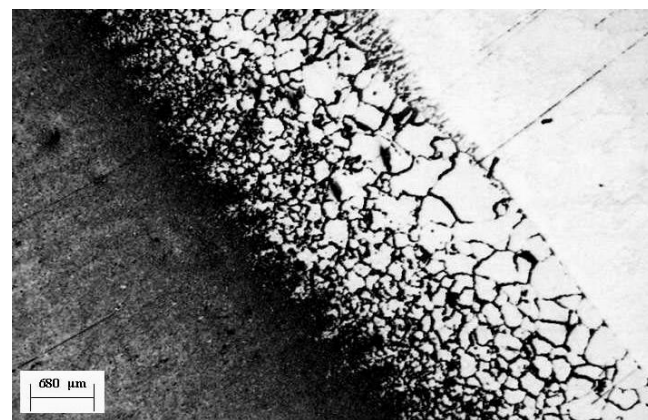
2A130-225-545F (پ)



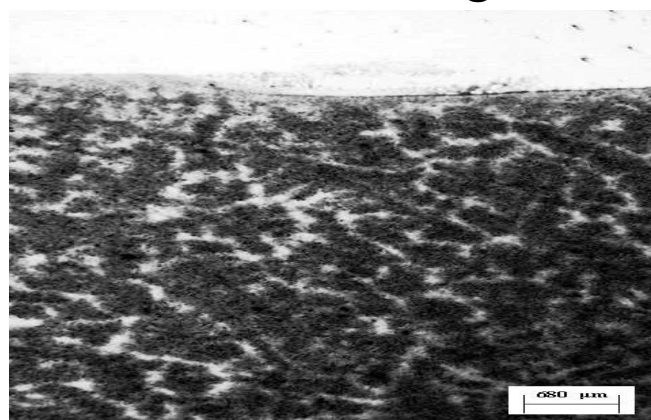
2H130-225-545F (ث)



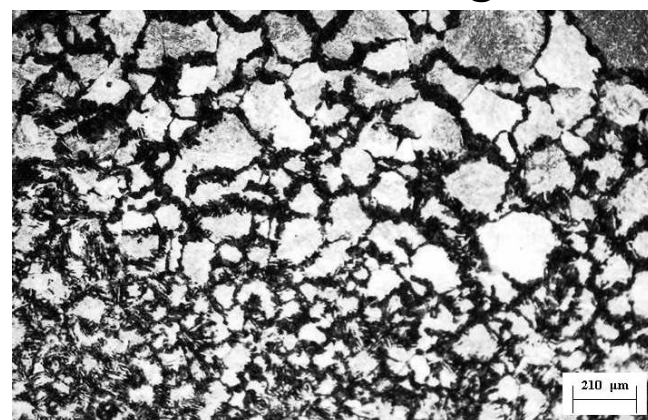
3H100-375-575F (چ)



3A100-375-575F (ج)



4H130-375-575F (خ)



4A130-375-575F (ح)

شکل 2 تصاویر متالوگرافی فصل مشترک و HAZ بلوکهای فولاد 1/2343 که در حالت آنیل در شرایط مختلف سختپوشی شده‌اند. تصاویر سمت راست: ریزساختارهای قبل از سختکاری و تصاویر سمت چپ: ریزساختارهای پس از سختکاری. محلول اچ: ویللا

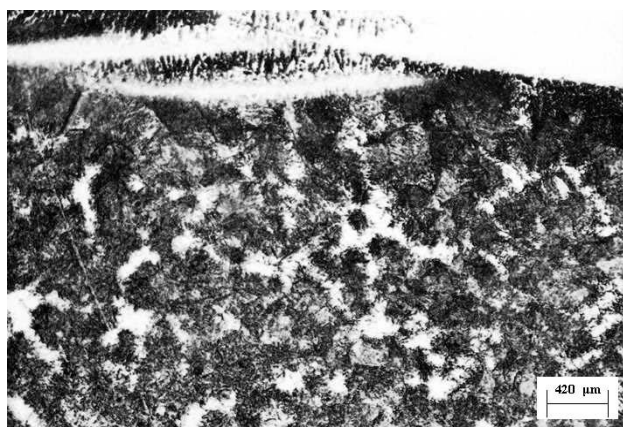


انرژی مؤثر ورودی به فلز پایه از معادله (4)، برای محاسبه مدت زمان سرد شدن از دمای  $800^{\circ}\text{C}$  به  $500^{\circ}\text{C}$  از معادلات (5 و 6) برای محاسبه درصد رقت حجمی پاس اول فلز جوش از معادله (7) استفاده شده است [3، 7، 9، 10]. لازم است ذکر شود که راندمان روش جوشکاری TIG در معادله (4) به طور متوسط در حدود  $0/43$  [9، 10] و ضریب هدایت حرارتی فولاد H11 در معادله (6) در دمای  $649^{\circ}\text{C}$  در حدود  $26/8\text{J/m.s.}^{\circ}\text{k}$  در نظر گرفته شده است [11].

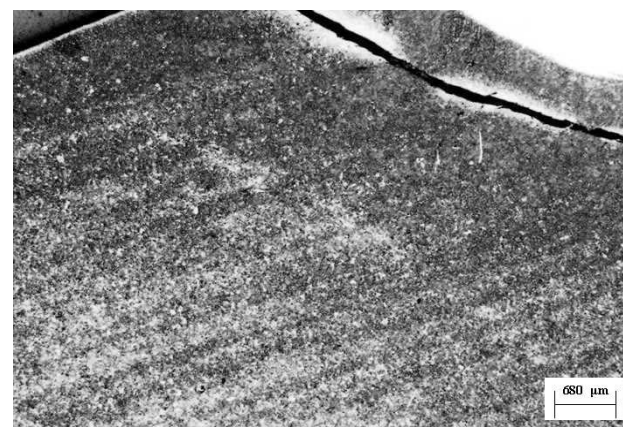
نتایج محاسبات مربوط به کربن معادل فولاد مورد استفاده در این تحقیق، محدوده دمایی پیشگرم مورد نیاز برای جوشکاری این فولاد، انرژی مؤثر ورودی به فلز پایه، زمان سرد شدن از دمای  $800^{\circ}\text{C}$  به  $500^{\circ}\text{C}$  و درصد رقت حجمی پاس اول برای سیکلهای مختلف جوشکاری در جدول 5 خلاصه شده است. در این جدول برای محاسبه درصد کربن معادل از معادلات (1 و 2)، برای محاسبه دمای پیشگرم مورد نیاز برای جلوگیری از بروز ترک در حین جوشکاری از معادله (3)، برای محاسبه



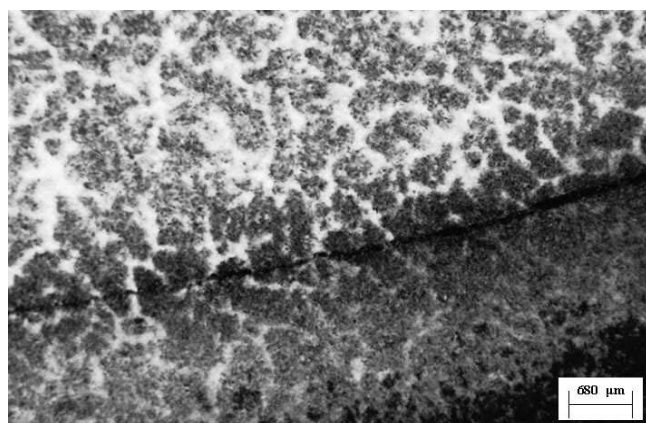
الف) 5H85-25A



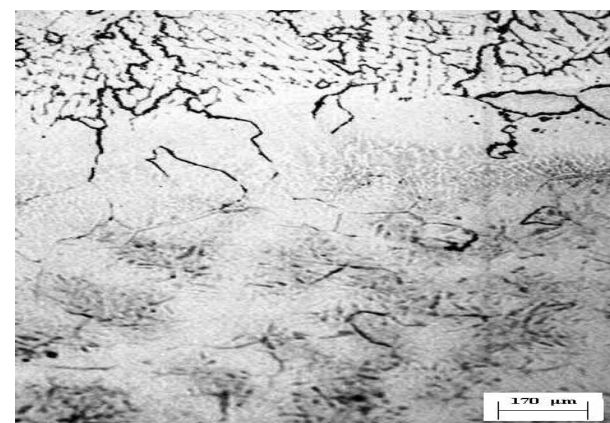
ب) 7H140-225-575A



ب) 6H110-225-575F



ث) 9H140-375-575A



ت) 8H110-375-575F

شکل 3 تصاویر متالوگرافی فصل مشترک و HAZ بلوکهای فولاد 1/2343 که در حالت آبدار در شرایط مختلف سختپوشی شده‌اند. محلول اچ: ویلا

یکی از پارامترهای بسیار مهم در پیش‌بینی سلامت HAZ و ریزساختارهای تشکیل شده در این منطقه، سرعت سرد شدن این منطقه از دمای  $800^{\circ}\text{C}$  به  $500^{\circ}\text{C}$  ( $\Delta t_{8-5}$ ) است [9]. در شکل 4 تغییرات  $\Delta t_{8-5}$  بر حسب انرژی مؤثر ورودی به فلز پایه و دماهای مختلف پیشگرم ترسیم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، افزایش انرژی مؤثر ورودی به فلز پایه باعث کاهش سرعت سرد شدن در محدوده دمایی مذکور گشته و با افزایش دمای متوسط پیشگرم از  $225^{\circ}\text{C}$  به  $375^{\circ}\text{C}$  در انرژی ورودی ثابت نیز سرعت سرد شدن کاهش یافته است. با توجه به شیب این دو نمودار ملاحظه می‌شود که تأثیر دمای پیشگرم در کاهش سرعت سرد شدن، بیشتر از انرژی مؤثر ورودی بوده است. سرعت سرد شدن نمونه سختپوشی شده بدون دمای پیشگرم ( $25^{\circ}\text{C}$ )، به صورت مربع توپر نشان داده شده است.

$$CE = C + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Mn}{6} + \frac{Cu + Ni}{15} \quad (1)$$

$$CCE = CE + 0.00254e \quad (2)$$

$$T_0 = 210CE + 15 - 45 \quad (3)$$

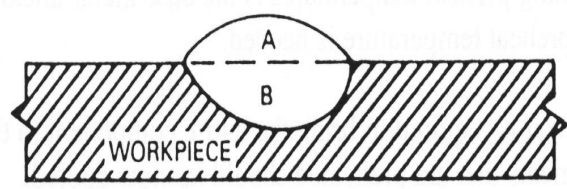
$$E = \eta \frac{VI}{S} \quad (4)$$

$$\Delta t_{8-5} = \frac{q/v}{2\pi\lambda\theta_1} \quad (5)$$

که در آن  $q/v$  انرژی مؤثر ورودی به فلز پایه بر حسب  $\text{J/m}$ ،  $\lambda$  ضریب هدایت گرمایی فلز پایه بر حسب  $\text{Jm}^{-1}\text{s}^{-1}\text{K}^{-1}$  و  $\theta_1$  پارامتر دمایی است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\frac{1}{\theta_1} = \left( \frac{1}{773 - T_0} - \frac{1}{1073 - T_0} \right) \quad (6)$$

در معادله 6،  $T_0$  دمای پیشگرم بر حسب درجه کلونین است.



$$\% \text{ Dilution} = \frac{B}{A+B} \times 100 \quad (7)$$

جدول 5 پارامترهای عمده سیکل سختپوشی بلوکهای آزمایش شده

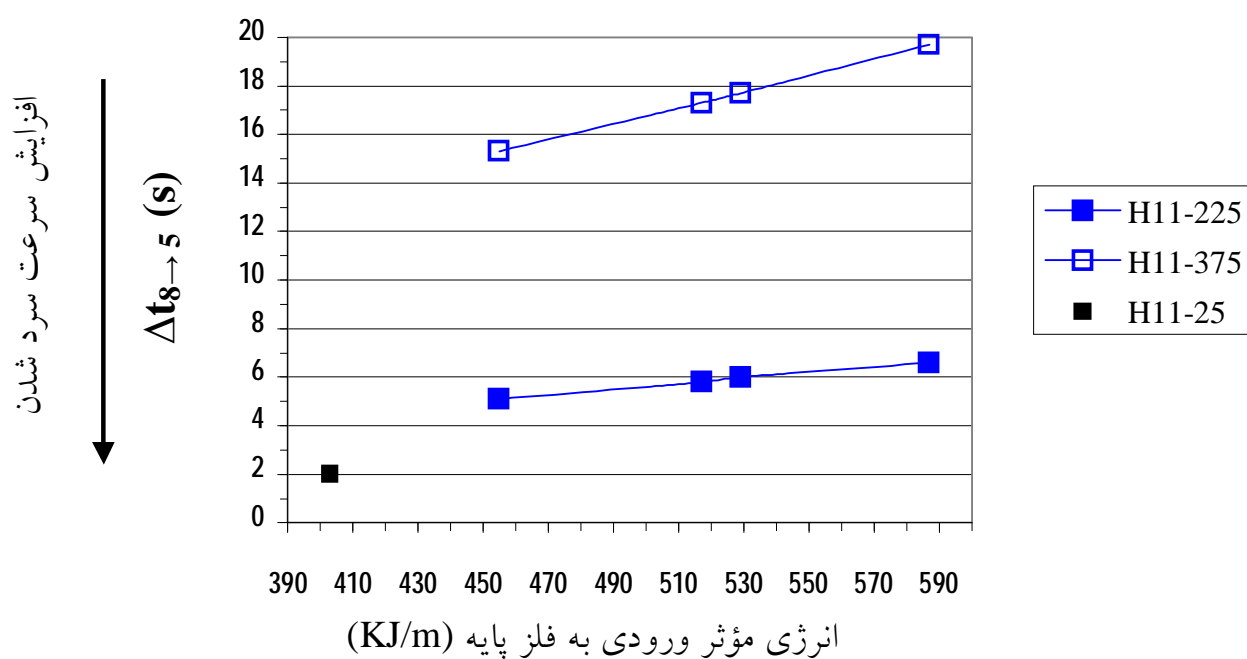
| درصد رقت پاس اول فلز جوش (محاسبه شده) D(%) | زمان سرد شدن از $800^{\circ}\text{C}$ به $500^{\circ}\text{C}$ (محاسبه شده) $(s) \Delta t_{8-5}$ | انرژی مؤثر ورودی به فلز پایه $(\text{KJ/m}) Q$ | دمای پیشگرم اعمال شده $T_0(^{\circ}\text{C})$ | دمای پیشگرم محاسبه شده $T_0(^{\circ}\text{C})$ | کربن معادل CCE(%) | نمونه | ردیف |
|--|--|--|---|--|-------------------|-------|------|
| 11   | 5/1  | 454  | 200-250                                       | 343-403/5                                      | 1/85              | A1    | 1    |
| 32   | 6  | 529  | 200-250                                       | 343-403/5                                      | 1/85              | A2    | 2    |
| 13   | 15/3   | 455  | 350-400                                       | 343-403/5                                      | 1/85              | A3    | 3    |
| 34   | 17/7   | 529  | 350-400                                       | 343-403/5                                      | 1/85              | A4    | 4    |
| 8  | 2  | 403  | -   | 343-403/5                                      | 1/85              | H5    | 5    |
| 30   | 5/8  | 517  | 200-250                                       | 343-403/5                                      | 1/85              | H6    | 6    |
| 53   | 6/6  | 587  | 200-250                                       | 343-403/5                                      | 1/85              | H7    | 7    |
| 32   | 17/3   | 517  | 350-400                                       | 343-403/5                                      | 1/85              | H8    | 8    |



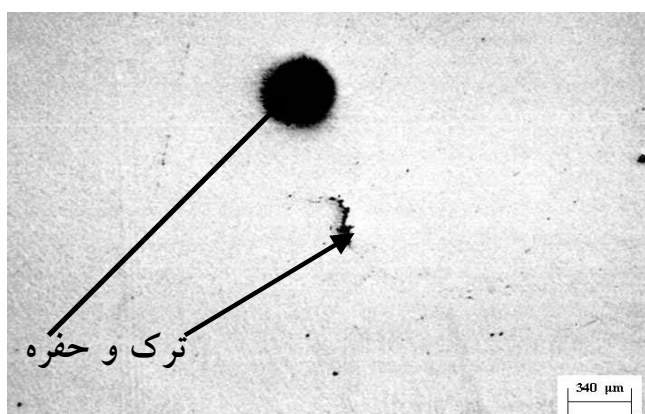
### 3-1- عیوب فلز جوش

سلامت فلز جوش نقش اصلی را در انتخاب فرایند سختپوشی دارد. بررسی فلز جوش نمونه‌های سختپوشی شده در حالت آبدار و نمونه‌های

سختپوشی شده در حالت خام (قبل از عملیات حرارتی) در چهار مورد، نشان‌دهنده حضور ترک در فلز جوش است که این در شکل 5 نشان داده شده است.



شکل 4 تغییرات  $\Delta t_{8-5}$  در HAZ برحسب انرژی مؤثر ورودی به فلز پایه و دمای پیشگرم



2A130-225-545F (ب)



1A100-225-545F (الف)



5H-85-25A (ت)



7H140-225-575A (ب)

شکل 5 ترک فلز جوش نمونه‌های آبدار و نمونه‌های خام قبل از عملیات سختکاری. محلول اچ: ویلا

استلایت 6 است. افزایش انرژی مؤثر ورودی به فلز پایه نیز که در مواردی از آن به عنوان یکی از راههای افزایش دمای فلز پایه برای جلوگیری از بروز ترک در فلز جوش استفاده می شود [4]، در این مورد مؤثر واقع نشده است (شکل پ). با مطالعات دقیقتر به نظر می رسد که ارتباط خاصی بین بروز ترک فلز جوش و دمای پیشگرم و آغاز استحاله مارتنزیتی فولاد ( $M_s$ ) وجود داشته باشد. دمای  $M_s$  این فولاد از سه روش مختلف در جدول 6 ارائه شده است. در حقیقت آغاز استحاله مارتنزیتی در فولادها و تبدیل ریزساختار متراکم fcc به ریزساختار بازتر bcc با افزایش حجم و انبساط همراه است. با مقایسه محدوده دمای پیشگرم  $200-250^\circ\text{C}$  با دمای  $M_s$  فولاد H11 و با توجه به لزوم کنترل دمای بین پاسی در داخل محدوده که دمای پیشگرم [13، 14] به نظر می رسد که دمای این فولاد پس از هر پاس جوشکاری به کمتر از دمای  $M_s$  رسیده و بر اثر بروز انبساط در فلز پایه، باعث افزایش تنشهای پسماند در فلز جوش و بروز ترک در داخل آن شده است. بنابراین لازم است حداقل دمای پیشگرم این فولاد در هنگام سختپوشی به وسیله سوپرآلیاژ استلایت 6، بالاتر از دمای  $M_s$  آن باشد.

بررسی سطوح خارجی فلز جوش پس از عملیات سختکاری در تمامی موارد، نشان دهنده تشکیل شبکه ترک در این مناطق است. در شکل 6 کیفیت سطوح خارجی فلز جوش مربوط به نمونه 3H100-375-575F قبل از عملیات سختکاری و پس از آن با یکدیگر مقایسه شده است. تمامی ترکهای اولیه پس از عملیات سختکاری تا سطح فلز جوش امتداد یافته اند. ترکهای جدید نیز از سطح فلز جوش و از داخل شبکه مذکور جوانه زده اند.

علت اصلی بروز ترک در فلز جوش را می توان اختلاف ضریب انبساط حرارتی سوپرآلیاژ استلایت 6 و فولاد H11 دانست. به طور کلی درصد انقباض ناشی از انجماد استلایتها تا دمای اتاق بدون وجود مهار، در حدود 2% است [6]. ضریب انبساط حرارتی سوپرآلیاژ استلایت 6 در محدوده دمایی  $20^\circ\text{C}$  تا  $600^\circ\text{C}$  در حدود  $14/5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$  و در محدوده دمایی  $20^\circ\text{C}$  تا  $800^\circ\text{C}$  در حدود  $15/05 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$  گزارش شده است [12]. با توجه به مهار فلز جوش به وسیله فلز پایه در طی جوشکاری، انقباض غیرآزادانه سوپرآلیاژ استلایت 6 بر اثر سرد شدن تا دمای اتاق، منجر به بروز تنشهای کششی قابل توجهی در فلز جوش می شود که مقدار آنها به ضریب انبساط حرارتی فلز پایه در محدوده دمایی مذکور، ضخامت فلز پایه، استحکام تسلیم آن و پیچیدگی سطح موردنظر برای سختپوشی بستگی دارد [6]. به بیان دیگر در صورت نازک بودن فلز پایه و کم بودن استحکام تسلیم آن، تنشهای مذکور باعث اعوجاج فلز پایه شده و از شدت آنها به مقدار قابل توجهی کاسته می شود. اما در صورت ضخیم بودن فلز پایه و زیاد بودن استحکام تسلیم آن، تنشهای مذکور، توان ایجاد تغییر شکل پلاستیک و اعوجاج در فلز پایه را نداشته و در نتیجه باعث بروز ترک در فلز جوش می شوند.

جوشکاری این فولاد در دمای اتاق همراه با بروز ترک در فلز جوش است (شکل 5-ت). با وجود پیشگرم کردن این فولاد در محدوده دمایی  $200-250^\circ\text{C}$  مشکل بروز ترک فلز جوش همچنان باقی است (شکلهای 5-الف، ب و پ). در حقیقت در محدوده دمایی  $20^\circ\text{C}$  تا  $650^\circ\text{C}$ ، ضریب انبساط حرارتی این فولاد برابر  $13/3 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$  است [9] که کمتر از ضریب انبساط حرارتی سوپرآلیاژ

جدول 6 دمای  $M_s$  فولاد H11

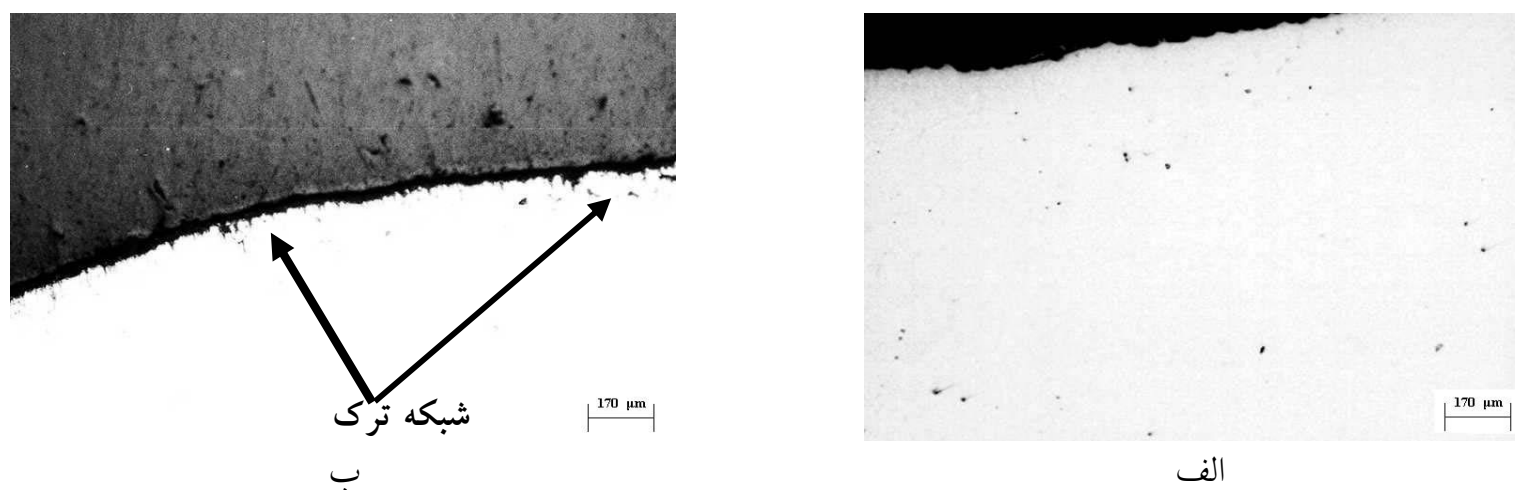
| روش                 |                     |                     |
|---------------------|---------------------|---------------------|
| معادله 2            | نمودار CCT          | نمودار IT           |
| $289^\circ\text{C}$ | $285^\circ\text{C}$ | $270^\circ\text{C}$ |

بین‌دندریتهای از کربن و کروم غنی‌تر شده و به ترکیب یوتکتیک نزدیک می‌شود. در مراحل پایانی انجماد و با نزدیک شدن به خط سولیدوس، محلول جامد یوتکتیک و کاربید یوتکتیک  $(Cr,Co)_7C_3$  به‌طور همزمان منجمد می‌شوند [15]. در شکل 7 تغییرات رقت حجمی لایه اول سختپوشی برحسب انرژی مؤثر ورودی به فلز پایه و دمای پیشگرم ترسیم شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، درصد رقت پاس اول، با افزایش انرژی مؤثر ورودی به فلز پایه افزایش یافته است. دمای پیشگرم نیز بر میزان رقت حاصل از جوشکاری مؤثر بوده و با افزایش آن رقت افزایش یافته است. با افزایش انرژی ورودی و دمای پیشگرم و در نتیجه افزایش رقت پاس اول، بر میزان ترکیبات بین‌دندریتی و در حقیقت جدایش شیمیایی افزوده شده و در نتیجه باعث افت خواص مقاومت به ضربه و خستگی آن می‌شود.

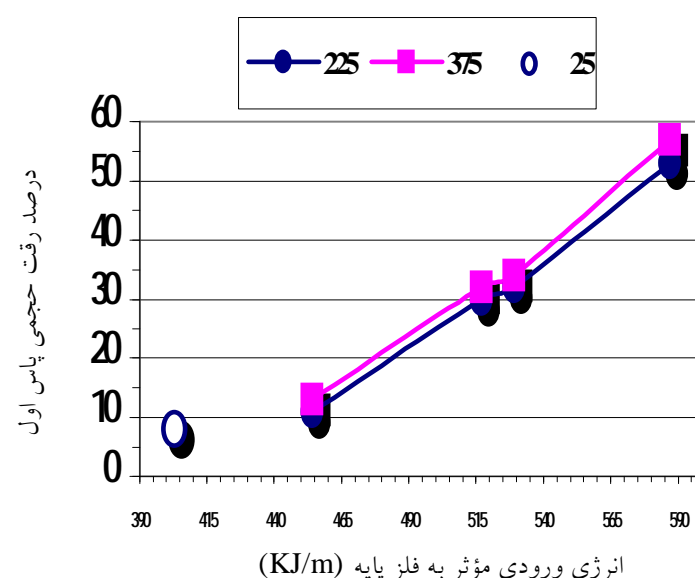
در این موارد نیز با توجه به اختلاف زیاد ضرایب انبساط حرارتی فولاد H11 با سوپرآلیاژ استلایت 6، تنشهای کششی زیادی بر اثر سرد شدن تا دمای اتاق در سطح فلز جوش ایجاد شده و در نهایت منجر به تشکیل شبکه ترک در این منطقه می‌شوند. بنابراین با توجه به نتایج حاصل، جوشکاری این فولاد در حالت خام و سپس سختکاری آن، روش مناسبی برای سختپوشی به‌وسیله استلایت 6 نمی‌باشد.

### 3-2- ریزساختار فلز جوش

استلایت 6 نوعی آلیاژ هیپویوتکتیک است که ریزساختار حاصل از انجماد آن شامل محلول جامد کبالت-کروم-تنگستن با ساختار fcc، محلول جامد یوتکتیک، کاربید یوتکتیک  $(Cr,Co)_7C_3$  و مقادیر بسیار کمی کاربید تنگستن مرکب است [6، 15]. با انجماد محلول جامد کبالت، ترکیب شیمیایی مذاب واقع در فضای



شکل 6 تصویر سطح خارجی فلز جوش: الف) قبل و ب) پس از عملیات حرارتی



شکل 7 تغییرات درصد رقت پاس اول

### 3-3- ریزساختار HAZ

ساختار HAZ نمونه‌های سختپوشی شده در حالت آنیل پیش از عملیات سختکاری فاقد ترک بوده، در حالی که ساختار HAZ نمونه‌های سختپوشی شده در حالت آبدار شکل 3 در نمونه‌های 5H85-25A، 6H110-225-575F و 9H140-375-575A دارای ترک است. دماهای پیشگرم متوسط این نمونه‌ها کمتر از دمای  $M_s$  فولاد است. از سوی دیگر  $\Delta t_{8-5}$  دو نمونه اول به ترتیب برابر 2s و 5/8s است (جدول 5). بنابراین با توجه به سرعت زیاد سرمایش این نمونه‌ها و دمای پیشگرم کم آنها در مقایسه با دمای  $M_s$  فولاد، دمای بین پاسی آنها در طی فرایند سختپوشی، به‌طور مکرر به زیر  $M_s$  فولاد رسیده و در نتیجه بر اثر بروز استحاله مارتنزیتی در HAZ و افزایش حجم این منطقه، تنشهای حاصل از این تغییر حجم، در ترکیب با تنشهای حرارتی و انقباضی جوشکاری، سبب بروز ترک در این منطقه شده‌اند. بنابراین مشاهده می‌شود که در ادامه، با افزایش شدت جریان جوشکاری و دمای پیشگرم به بالای  $M_s$ ،  $\Delta t_{8-5}$  نمونه‌ها به ترتیب تا 6/6s و 17/3s افزایش یافته و مانع از بروز ترک در HAZ شده است. در حقیقت جوشکاری نمونه‌ها در بالای دمای  $M_s$ ، علاوه بر کاهش سرعت سرد شدن، با توجه به تنش‌زدایی آنها بلافاصله پس از اتمام جوشکاری، باعث کاهش تنشهای پسماند ناشی از جوشکاری پیش از بروز استحاله مارتنزیتی در منطقه HAZ شده و خطر بروز ترک را به شدت کاهش می‌دهد. علت بروز ترک در HAZ نمونه 9H140-375-575A با وجود بالا بودن دمای پیشگرم و افزایش  $\Delta t_{8-5}$  آن به بیش از 19/7s، باید ترد شدن ساختار این منطقه بر اثر افزایش اندازه دانه‌ها (اندازه دانه 3 بر طبق استاندارد (ASTM E112) و تشکیل شبکه کاربید بسته در مرزدانه‌های آن باشد. درشت شدن ریزساختار HAZ و رسوب کاربیدهای مرزدانه‌ای بر اثر افزایش شدت جریان جوشکاری و کاهش سرعت سرد شدن رخ داده است.

رسوب کاربیدهای مرزدانه‌ای برای نمونه 8H110-375-575F نیز مشاهده می‌شود که شدت آن در نزدیکی فصل مشترک بیشتر است.  $\Delta t_{8-5}$  برای این نمونه در حدود 17/3s است.

نمونه‌های خام به علت برخورداری از سختی اولیه کمتر در مقایسه با نمونه‌های آبدار، دارای استحکام تسلیم پایین‌تر و ساختار انعطاف‌پذیرتری بوده و در نتیجه تحمل تنشهای انقباضی و شیب دمایی ناشی از عملیات جوشکاری را دارند. به بیان دیگر با بروز تغییر شکل‌های پلاستیک بسیار کوچک در نمونه‌های خام، از شدت تنشهای پسماند حاصل از جوشکاری به مقدار قابل توجهی کاسته شده و مانع از ترک خوردگی فلز پایه و فلز جوش می‌شود [9، 16]. مطالعه تصاویر متالوگرافی نمونه‌های سختپوشی شده در حالت آنیل پس از عملیات سختکاری، بیانگر بروز ترک و ریزترک در HAZ بیشتر نمونه‌ها است. مطالعه تصاویر متالوگرافی شکل 2 نشان‌دهنده تشکیل شبکه‌های کاربید بسته در مرز دانه‌های آستنیت اولیه با افزایش  $\Delta t_{8-5}$  و در نتیجه کاهش سرعت سرد شدن است. در حقیقت با افزایش  $\Delta t_{8-5}$  به 15/3s برای نمونه 3A100-375-575F و در نتیجه افزایش دمای بیشینه HAZ آن، کاربیدهای آلیاژی در مرز دانه‌های آستنیت رسوب کرده‌اند. در ادامه همان‌طور که انتظار داریم با افزایش  $\Delta t_{8-5}$  نمونه 4A130-375-575F به 17/7s، علاوه بر افزایش طول HAZ و درشت‌تر شدن ساختار آن، بر حجم کاربیدهای رسوب‌کننده در مرز دانه‌ها نیز افزوده شده است.

### 3-4- خواص فلز جوش و HAZ

در شکل‌های 8 و 9 پروفیل سختی تمامی بلوکهای آزمایش به‌استثنای بلوک سختپوشی شده بدون عملیات پیشگرم و پسگرم، در دماهای پیشگرم متوسط  $225^\circ\text{C}$  و  $375^\circ\text{C}$  با یکدیگر مقایسه شده است. نیمه راست هر شکل بیانگر پروفیل سختی فلز جوش و نیمه چپ بیانگر پروفیل



به طور کلی نتایج حاصل از بررسی و مقایسه پروفیل سختی HAZ این نمونه‌ها را به صورت زیر می‌توان خلاصه کرد:

1- کمترین وسعت و بیشترین شدت تغییر سختی مربوط به نمونه جوشکاری شده بدون دماهای پیشگرم و پسگرم است. سختی فلز پایه این نمونه‌ها بدون تغییر باقی مانده است.

2- با افزایش شدت جریان جوشکاری در دمای پیشگرم ثابت، وسعت و بیشینه سختی این منطقه افزایش یافته است.  
3- با افزایش دمای پیشگرم در شدت جریان جوشکاری ثابت، وسعت این منطقه افزایش یافته، اما بیشینه دمای آن کاهش یافته است.

4- میزان افت سختی در فلز پایه نمونه‌های خنک شده در هوا در حدود 17 تا 20 درصد است.

5- میزان افت سختی در فلز پایه نمونه‌های خنک شده در کوره در حدود 25 تا 40 درصد است.

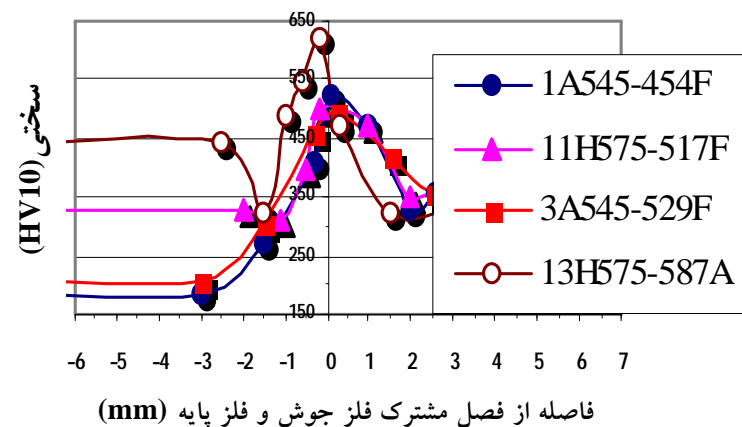
در حقیقت با افزایش  $\Delta t_{8 \rightarrow 5}$  و در نتیجه کاهش سرعت سرد شدن در HAZ، با توجه به انجام استحاله‌های نفوذی تحت تأثیر عملیات تنش‌زدایی، درصد محصولات نفوذی افزایش یافته است. اعداد سختی این منطقه رابطه عکس با درصد آستنیت باقیمانده و درصد محصولات استحاله نفوذی مانند پرلیت و بینیت دارند [16].

#### 4- نتیجه‌گیری

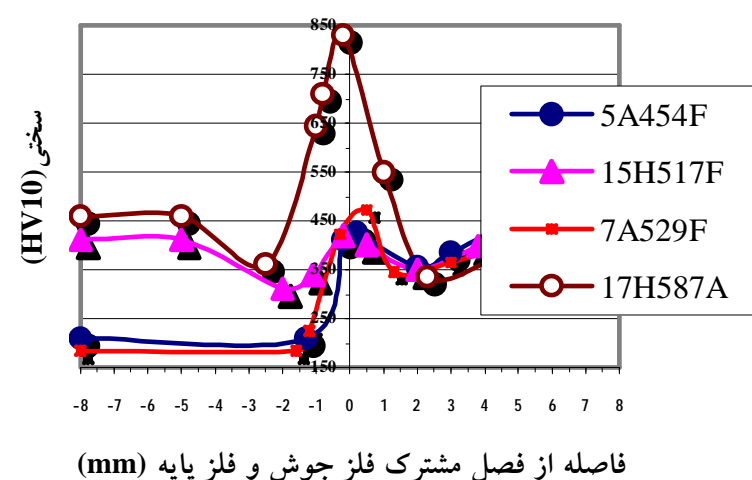
نتایج حاصل از سختپوشی نمونه‌های فولاد H11 به وسیله فرایند TIG و سوپرآلیاژ استلایت 6 در شرایط انتقال حرارت سه‌بعدی را به صورت زیر می‌توان خلاصه کرد:

1- به منظور حصول به فصل مشترک منظم با نفوذ کم، کمینه رقت در پاس اول و جلوگیری از جدایش شیمیایی در فلز جوش و ظرفیت سرد شدن ساختار فلز جوش در نزدیکی فصل مشترک، استفاده از شدت جریان 80 تا 85 آمپر در لایه اول توصیه می‌شود.

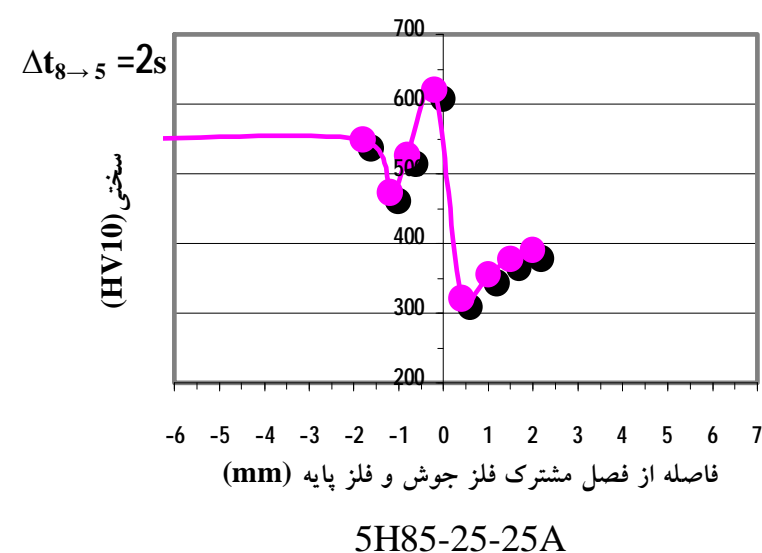
سختی فلز پایه است. پروفیل سختی فلز جوش و HAZ نمونه‌های سختپوشی شده بدون دمای پیشگرم و پسگرم در شکل 10 ترسیم شده است.



شکل 8 پروفیل سختی بلوکهای سختپوشی شده در دمای پیشگرم متوسط  $225^{\circ}\text{C}$



شکل 9 پروفیل سختی بلوکهای سختپوشی شده در دمای پیشگرم متوسط  $375^{\circ}\text{C}$  و دمای پسگرم متوسط  $575^{\circ}\text{C}$



شکل 10 پروفیل سختی نمونه سختپوشی شده بدون عملیات پیشگرم و پسگرم



محترم گروه 1 این صنایع که با همکاری صمیمانه خود امکانات لازم را برای انجام این تحقیق فراهم کردند، تشکر و قدردانی شود.

## 6- منابع

- [1] G. Roberts, G. Krauss, R. Kennedy; "Tool Steels"; 5<sup>th</sup> Ed., ASM International, 1998; pp. 10-12.
- [2] S. A. G. Sagf; "The Stelliteing of Exhaust Valves and Seats"; Metallurgia, April 1939.
- [3] A. Lesnewich; "Influence of Welding on Steel Weldment Soundness"; Welding, Brazing & Soldering, ASM Handbook; Vol. 6; 4<sup>th</sup> Ed; ASM International; 1997; pp. 408-415.
- [4] L. Van Muysend, & K. V. T. I. Mechelen; "Hardfacing with Co-Cr-X Alloys by Arc Welding Processes"; Cobalt; Vol. 55, June, 1972.
- [5] DIN 17350; "Tool Steels"; DIN Handbook 404; Iron & Steel: Quality Standards 4, Mechanical Engineering and Toolmaking, 1st Ed. December, 1992.
- [6] G. Grainger; "Hardfacing with Cobalt-base Alloys"; Deloro Stellite Ltd.; Cobalt; Vol. 3, June 1959; pp. 3-15.
- [7] S. Liu, & J. E. Indacochea, "Weldability of Steels"; Properties and Selection of Ferrous Materials, ASM Handbook; Vol. 1, 10<sup>th</sup> Ed, ASM International; 1997; pp. 603-613.
- [8] G. K. Hicken, "Gas Tungsten Arc Welding"; Welding, Brazing &

2- به منظور اصلاح ریزساختار فلز جوش، انحلال ترکیبات بین‌دندریتی (در صورت وجود) و در نتیجه بهبود خواص خستگی فلز جوش، استفاده از روش چندپاسی و شدت جریان 90 تا 100 آمپر در لایه‌های بعدی توصیه می‌شود. این، همچنین باعث افزایش نرخ رسوب و سرعت جوشکاری شده و در نتیجه علاوه بر کاهش هزینه جوشکاری از افت سختی بیش از حد فلز پایه نیز جلوگیری می‌کند.

3- به منظور حصول بیشینه سختی و مقاومت به سایش (41-42HRC) در سختپوشی با شدت جریان 80 تا 85 آمپر، لازم است عمق لایه سختپوشی بیش از 3mm باشد.

4- به منظور جلوگیری از رسوب کاربیدهای مرزخانه‌ای در HAZ، توصیه می‌شود انرژی مؤثر ورودی به فلز پایه کمتر از 455KJ/m بوده و  $\Delta t_{8 \rightarrow 5}$  سیکل سختپوشی کمتر از 15/3s باشد.

5- به منظور جلوگیری از بروز ترک در HAZ، توصیه می‌شود  $\Delta t_{8 \rightarrow 5}$  سیکل سختپوشی بیشتر از 6s باشد.

6- به منظور جلوگیری از بروز ترکهای انقباضی در فلز جوش و HAZ، توصیه می‌شود دمای پیشگرم و بین‌پاسی در محدوده 310-370°C قرار داشته باشد.

7- توصیه می‌شود تنش‌زدایی این فولاد در محدوده دمایی 425-500°C (زیر دمای آخرین تمپر) به مدت 1 ساعت به‌ازای هر 30mm ضخامت انجام شود.

8- با توجه به اختلاف ضریب انبساط حرارتی سوپرآلیاژ استلایت 6 و فولاد 1/2343، در عمل امکان سختپوشی این فولاد در حال آنیل و سپس سختکاری آن به علل تشکیل شبکه ترک در سطح خارج فلز جوش، بروز ترک پاشنه و بروز ترک HAZ، وجود ندارد.

## 5- تقدیر و تشکر

در پایان لازم است از مدیریت محترم صنایع شهید صیاد شیرازی مجتمع مهماتسازی و متالورژی تهران و مدیریت

- [13] J. R. Davis, Davis & Associates, "Hardfacing, Weld cladding and Dissimilar Metal Joining"; Welding, Brazing & Soldering, ASM Handbook; Vol. 6, 4<sup>th</sup> Ed, ASM International; 1997; pp. 789-829.
- [14] Stellite, "Hardfacing with Stellite Alloys", Cobalt Corporation; 1980.
- [15] F. Malek, "Quality Variability in Cobalt-base Hardfacing Alloys"; Ph. D. Thesis; Cranfield Institute of Technology; 1990.
- [16] G. E. Linnert, "Welding Metallurgy; Carbon & Alloy Steels"; Vol. 2, 3<sup>rd</sup> Ed., American Welding Society; 1967.
- Soldering; ASM Handbook; Vol. 6, 4<sup>th</sup> Ed, ASM International; 1997; pp. 190-194.
- [9] K. Easterling, "Introduction to the Physical Metallurgy of Welding"; 2<sup>nd</sup> Ed., Butterworth-Heinemann Ltd.; 1992.
- [10] N. Bailey et al., "Welding Steels without Hydrogen Cracking"; 2<sup>nd</sup> Ed., Abington Publishing & ASM International; 1973.
- [11] [www.moldsteel.com](http://www.moldsteel.com), "Premium H11"; International Mold Steel Inc.
- [12] M. Riddihough, "The Rol of Cobalt in Industrial Hardfacing"; Cobalt; June 1964.