

## ساختار و تغییرات سختی در اتصالات جوش داده شده برای فولادهای Hardox

در این مقاله، ساختار و تغییرات در سختی Hardox 400 جوش داده شده و فولادهای Hardox 500 ارائه شده است. نشان داده شده است که ساختارها با مقاومت کمتر در برابر سایش به عنوان یک نتیجه از جوش دادن مواد در حالت " تحویل داده شده " (به عنوان مثال با ساختار مارتنزیت آبکاری شده) در مناطق تحت تاثیر حرارت ایجاد می شوند. عرض آنها به اندازه 90 میلی متر است و این باعث سایش غیریکنواخت و سریع در برنامه های کاربردی پیش بینی شده می شود. بر اساس تست های میکروسکوپی و سنجش سختی، یک روش پرداخت اتصال حرارتی شامل سخت شدن و آبکاری در دمای پایین (خودآبکاری) در مناطق تحت تاثیر حرارت پیشنهاد شده است. این منجر به تولید مجدد ساختار سطح، شبیه به ساختار مواد اولیه می شود. در شرایط آزمایشگاهی، یک عملیات حرارتی متفاوت از عمل معمول ( بازپخت تنش آزاد شده و نرمالسازی) به ناسازگاری های جوش (ترک) منجر نمی شود.

**کلید واژه ها:** آلیاژهای مقاوم در برابر سایش، فولادهای مارتنزیتی، اتصالات جوش داده شده ، تغییرات سختی، ساختارها

### 1. مقدمه

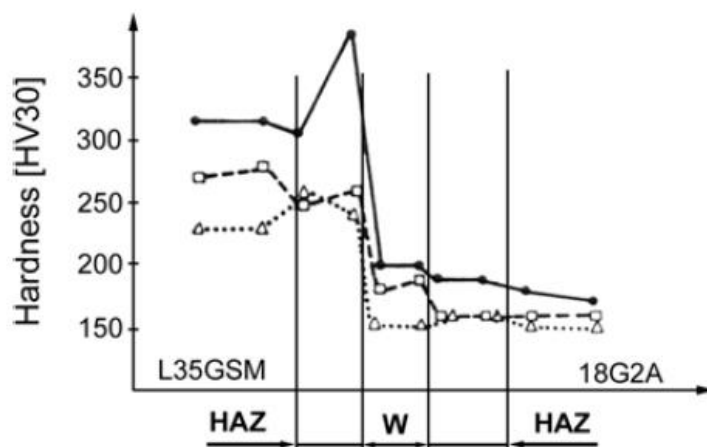
بر اساس نتایج جمع آوری شده آزمون Hardox 400 و فولادهای Hardox 500 در [1] ، یک پیشنهاد برای استفاده از این مواد در ساخت و ساز ماشین آلات معدن کاری سطحی تدوین شده است. نتایج آزمون [ 2-4 ]، جوش پذیری خوب مواد و ویژگی های مقاومت بسیار بالا را در اتصالات به دست آمده تایید می کند. به عنوان یک نتیجه از فرآیندهای حرارتی در مدت جوشکاری، به ساختار تحویل داده شده در مناطق تحت تاثیر حرارت آسیب می

رسد (مارتنزیت آبکاری شده). این مورد، تغییر قابل توجهی را در چنین منطقه سختی و نیز افت موضعی را در مقاومت در برابر سایش معرفی می کند. پدیده ای مشابه در اجزای ساختاری برشی از ورق های فلز با استفاده از روش های جوشکاری مشاهده شده است.

چنین پدیده ای زمانی بیشتر اهمیت دارد که هدف، استفاده از صفحات فولادی Hardox برای قطعات قهوه ای بیل مکانیکی ذغال سنگ باشد که در شرایط بار دینامیکی، در معرض سایش قرار می گیرند (ناودانها، قیف، میراکننده و عناصر ساختار حرکت شبیه چمچه زنی). اهمیت آن به دلیل بالاتر است که آنها معمولاً توسط جوشکاری به ساختار اصلی تثبیت می شوند. ساختار نامطلوب و سختی اتصال ظاهر شده در فولاد کم کربن و کم-آلیاژ می تواند با پرداخت گرمایی چنین اتصالاتی (شکل 1) معکوس شود. مسائل مربوط به فولاد سخت، فولاد مارتنزیتی و همچنین آلیاژهای آلومینیوم فرونشانده شده کهنه، نیاز به اقداماتی غیرمعمول دارد.

در آثار [ 7, 8 ] آنها در رابطه با فولادهای مقاوم، با عبارات زیر ارائه می شوند:

- در منطقه متاثر از حرارت، مشکل لایه نرم ظاهر می شود که قدرت کل ساختار را تعیین می کند
- در منطقه متاثر از حرارت در اتصالات فولادی که قبل از جوشکاری سخت و آبکاری می شوند، تغییراتی به نظر می رسد که منجر به ایجاد مناطق معتدل با سختی کاهش یافته و استحکام کششی می شود.



شکل 1. توزیع سختی در اتصالات جوش داده شده فولاد ریخته گری شده L35GSM با فولاد G2A18: ● - به صورت تحویل داده شده □ - پس از سرد شدن آهسته برای رهایی از تنش، Δ - پس از نرمالسازی، W - منطقه مشترک، HAZ - منطقه متأثر از حرارت [5, 6]

با این حال، نویسندگان آثار [7, 8] و [9-11] بیان نموده اند که با توجه به ترکیب شیمیایی مناسب مواد و انتخاب مناسب شرایط و پارامترهای جوشکاری، به دست آوردن ساختارها و خواص مواد مشابه با یک پایه در منطقه متأثر از حرارت، بدون تلاش اضافی ممکن است. در مورد جوشکاری با انرژی خط محدود، لایه "نرم" بسیار باریک است و این اتصال نمایشگر هیچ کاهش واضح و روشن در خواص مکانیکی نیست. این مورد به عنوان فعالیت "تقویت کننده" مناطق ساختاری همسایه، به عنوان یک نتیجه ایجاد تنش سه محوری در منطقه تفسیر می شود.

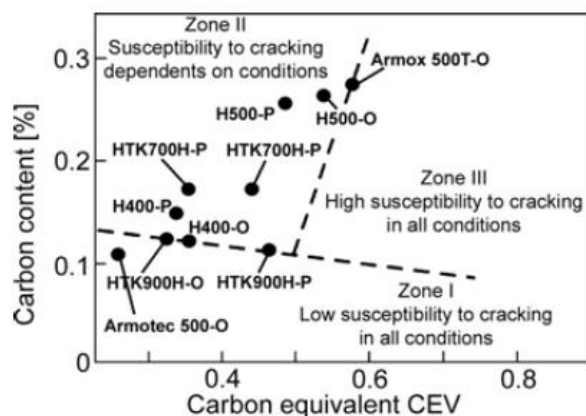
جدول 1. ترکیب شیمیایی Hardox 400، Hardox 500، HTK 700H و فولادهای HTK 900H

Material	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	B
	Maximum values [%]								
Hardox 400	0.320	0.700	1.600	0.025	0.010	0.300	0.250	0.250	0.004
Hardox 500	0.300	0.700	1.600	0.025	0.010	1.000	0.250	0.250	0.004
HTK 700H	0.180	0.450	1.400	0.025	0.010	0.500	0.300	0.030	0.002
HTK 900H	0.180	0.450	1.500	0.025	0.010	1.000	0.300	0.040	0.003
AR 400	0.240	0.700	1.700	0.025	0.010	1.000	0.700	0.500	0.004

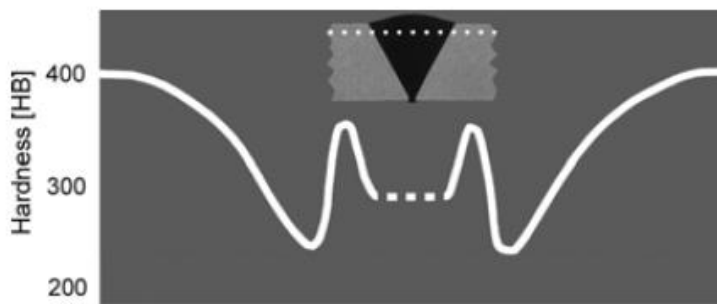
جدول 2. ویژگی های ساختاری فولادهای بررسی شده

ماده	ساختار
Hardox 400	ماترنزیتیک
Hardox 500	ماترنزیتیک
HTK 700H	ماترنزیتیک - بینیتیک
HTK 900H	ماترنزیتیک
AR 400	ماترنزیتیک

فولادهای Hardox و نیز فولادهای HTK (جدول 1 و 2) به خوبی مواد با قابلیت جوش کم و یا بسته به شرایط، حساس به شکاف (حساسیت) (شکل 2) هستند. در حالت تحویل داده شده، آنها دارای ساختار مارتنزیت آبکاری هستند. با توجه به داده های تولید کننده برای موادی که سختی آنها تغییر می کند، در شکل 3 ارائه شده است. همانطور که از نمودار می آید، کاهش سختی در منطقه متأثر از حرارت می تواند به اندازه 65٪ در ارتباط با مواد در حالت تحویل داده شده، بالا باشد. گسترش چنین منطقه ای با کاهش سختی به واسطه تولیدکننده فولاد مشخص نمی شود. با این حال، این مشکل خود به خود در قالب توصیه برای مناطقی که باید برای سخت شدن خالی شود، شناخته می شود.



شکل 2. حساسیت به ترک برای اتصالات جوش داده شده در Hardox 400 و Hardox 500، و همچنین H 700 و فولاد HTK 900H، برای ورق های با ضخامت 8 میلی متر به عنوان تابعی از مقدار کربن و کربن معادل: P - با توجه به داده های تولید کننده، W - با توجه به تجزیه و تحلیل شیمیایی خود [3، 12]



شکل 3. نمودار تغییرات سختی در اتصالات جوش داده شده از فولاد Hardox 400 [13]

با این حال، این روش مشکل را حل نمی کند، همانطور که روند سخت شدن لایه باید باعث حوزة های جدیدی از تغییرات نامطلوب ساختاری باشد که به سمت لبه های جوش پد منتقل می شود. اهداف زیر در مورد مطالعات اخیر در زمینه اطلاعات ارائه شده ظهور می یابند:

- شناسایی ساختار در اتصالات جوش داده شده Hardox 400 و فولادهای Hardox 500 در حالت تحویل داده شده و تعیین ساختار و فرمت تغییرات سختی ناشی از جوشکاری،
- عرضه چنین تحولات ساختاری در اتصالات به واسطه عملیات حرارتی برای از بین بردن این تغییرات تا حداکثر درجه.

## 2. نتایج مطالعه

### 2.1. شرایط جوشکاری

اتصالات در فولادهای Hardox با استفاده از تکنولوژی های جوشکاری قوس الکتریکی غوطه ور ( SAW )، با توجه به مواد جوشکاری و پارامترهای توصیه شده توسط تولید کننده انجام شده است. همانند مواد جوشکاری، Multimet IMT9  $\phi$  3 میلی متر ( محتوای کربن 0.09% ) سیم پرکننده و شار - Lincoln Electric FX 780 25 استفاده شده است. نمونه ها از ورق های فولادی Hardox با ابعاد  $500 \times 300$  ( ضخامت 8 میلی متر) با جوش دو طرفه با پارامترهای زیر برای نفوذ مواد صحیح ساخته شده اند:

- جریان حداقل برای اولین لایه اتصال  $I_1 = 300 \text{ A}$ ,
- جریان حداقل برای دومین لایه اتصال  $I_2 = 500 \text{ A}$ ,
- ولتاژ قوس الکتریکی برای هر دو لایه اتصال  $U = 30 \text{ V}$ ,
- ثابت سرعت جوشکاری  $v = 0.35 \text{ m/min}$ ,
- حداکثر انرژی خطی:  $2.57 \text{ kJ/mm}$ .

جدول 3، ترکیب شیمیایی واقعی فولاد جوش داده شده ارائه می شود. مقایسه آنها با داده های تولیدکننده برای محتوای کمتر آلیاژ افزودنی های آلیاژ نشان داده شده است. این، توجیهی برای محل مطلوب تر نقاط تعیین کننده حساسیت فولاد جوش داده شده به ترک است ( شکل 2).

جدول 3. ترکیبات شیمیایی واقعی فولاد جوش داده شده Hardox و سیم پرکننده

Material	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	B
Hardox 400	0.120	1.050	0.34	0.006	0.001	0.240	0.040	0.017	0.002
Hardox 500	0.260	0.750	0.200	0.005	0.005	0.700	0.05	-	0.001
IMT9 Wire	0.090	0.140	1.000	-	-	-	-	-	-

جدول 4. پارامترهای و الگوی پرداخت حرارتی برای فولادهای Hardox 500 و Hardox 400

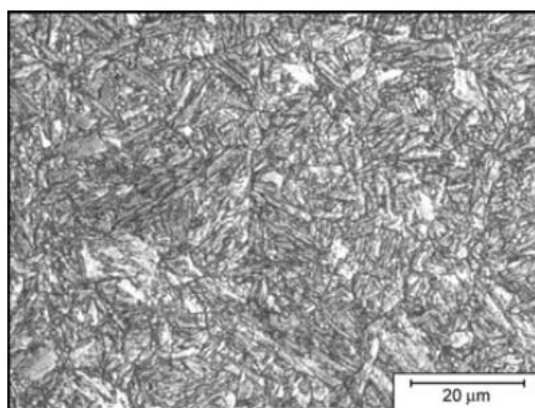
	نشان نمونه		الگوی پرداخت حرارتی	پارامترهای پرداخت حرارتی
	Hardox 400	Hardox 500		
1	I-1	II-1	به صورت تحویل داده شده	-
2	I-4 I-6 I-7	II-4 II-6 II-7	سخت شدن	930 درجه/20 دقیقه/خنک کنندگی در آب
3			سخت. / آب/ دما	دمای 200 درجه/ 2 ساعت/ خنک کنندگی هوا
4			سخت. / آب/ دما	دمای 300 درجه/ 2 ساعت/ خنک کنندگی هوا

جدول 4، روش و پارامترهای عملیات حرارتی اعمال شده برای اتصالات تست شده را نشان می دهد. آنها در حالت تحویل داده شده (pos. 1) پس از جوشکاری (pos. 2) و یا پس از سخت شدن و آبکاری (pos. 2 و 3) و سخت شدن انجام می شوند. محدودیت درجه حرارت آبکاری تا 300 درجه از آزمون های سختی و ساختار برای Hardox 400 و فولادهای Hardox 500 در درجه حرارت آبکاری 200 ° C تا 700 ° C حاصل می شود. تا دمای آبکاری

300 °C، فولادها، متوسط سختی را حفظ می کنند: 363 HV10 – Hardox 400 و 428 HV10 Hardox 500. از درجه حرارت آبدکاری 400 °C، سختی آنها سریع افت می کند که آنها را از استفاده در شرایط سایش مستثنی می کند.

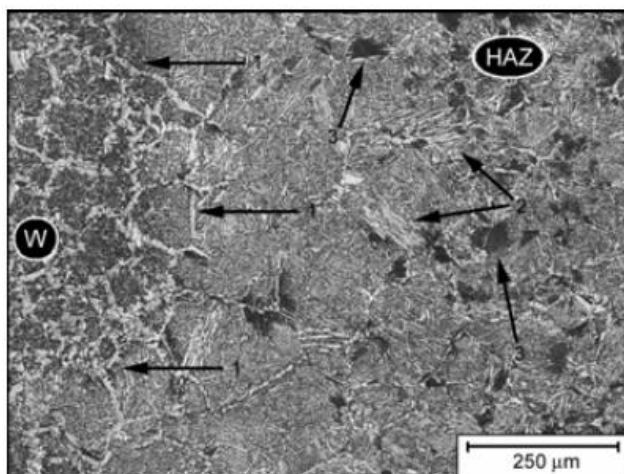
## 2.2. ساختار اتصال و تغییرات سختی در حالت تحویل داده شده

شکل 4، ساختار نمونه ای از فولاد Hardox 500 به صورت تحویل داده است. جوشهای اتصالی، تغییرات ظاهری و تنوع در ساختار (شکل 5) را معرفی کرده است. نمودارهای اندازه گیری سختی (شکل 6 و 7)، گسترش مناطق سختی کاهش یافته را اثبات می کند. در مورد فولاد Hardox 400، این منطقه 70 میلی متر عرض دارد و برای Hardox 500 به اندازه 90 میلی متر می رود.



شکل 4. ساختار فولادهای Hardox 500 "به صورت تحویل داده شده". مارتنیت آبدکاری شده بدون مراتب دانه

ای روشنی از آستنیت قبلی. Mi1Fe چ، [2] LM



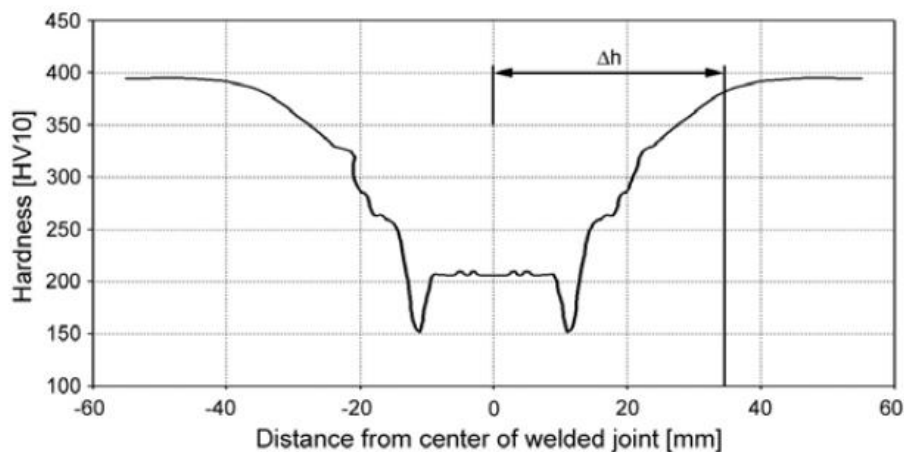
شکل 5. ساختار اتصال جوش فولادهای Hardox 500 در منطقه همجوشی: W - مواد جوش، HAZ - منطقه حرارت موثر. فلش های (1) طرح کلی ضعیف منطقه همجوشی را نشان می دهد. در منطقه موثر بر گرما در ساختار جهت گیری پس از مارتنزیتی با مناطق بینیت (2) و تروستیت (3) به وضوح قابل مشاهده است. ساختار Widmanstätten نوعی برای خنک کنندگی بیش از حد به طور قابل توجهی به صورت محلی مشاهده شده

است. Mi1Fe اچ، [LM 2]

همچنین، محتوای کربن در مواد اتصال به وضوح بالاتر از آن چیزی است که می تواند از جدول 3 نتیجه شود. این مورد خود را با مقدار بالای پرلیت پراکنده ریز در مواد اتصال (شکل 5، W منطقه) نشان می دهد. عدم ناسازگاری های جوش نیز نتیجه مشاهدات ماکرو و میکروسکوپی از اتصالات تست شده است.

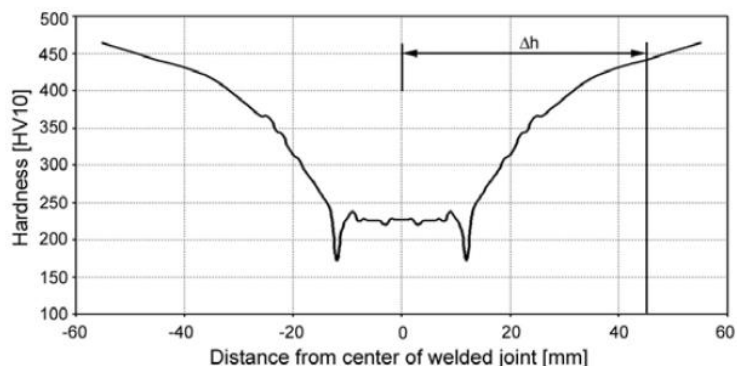
نتایج آزمون استحکام اتصال جوش داده شده در حالت تحویل داده شده، یک قدرت اتصال متوسط فولاد Hardox 400 را برابر با 615 مگاپاسکال، و برای Hardox 500 برابر با 634 مگاپاسکال نشان می دهد. اینها مقادیر بسیار بالا هستند و از نقطه نظر عملکرد حدود 60٪ برای Hardox 400 و در حدود 50٪ برای فولادهای Hardox 500 را تشکیل می دهند.





شکل 6. تغییرات سختی در اتصالات جوش داده شده در فولاد Hardox 400 در حالت تحویل داده شده:  $\Delta h \approx$

35 میلی متر، سختی جوش  $\approx$  HV10 210



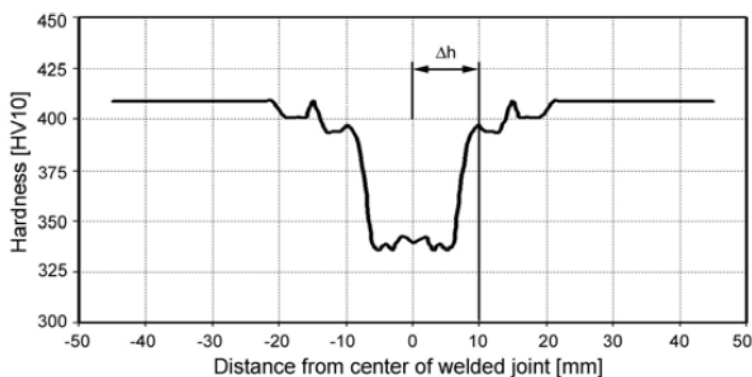
شکل 7. تغییرات سختی در اتصالات جوش داده شده در فولادهای Hardox 500 در حالت تحویل داده شده:  $\Delta h$

$\approx$  45 میلی متر، سختی جوش  $\approx$  HV10 230

### 2.3. ساختارها و تغییرات سختی در اتصالات پس از عملیات حرارتی

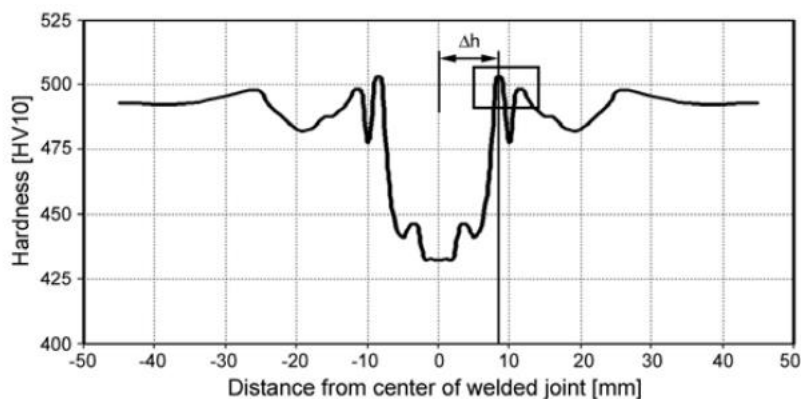
مروری بر تغییرات سختی و ساختارهای اتصالات پس از پرداخت گرمایی در شکل 8-16 ارائه شده است. مطالعات ماکرو و میکروسکوپی نشان داده نشده است که شکست های اتصالات به صورت ترک به عنوان یک نتیجه از عملیات حرارتی ظاهر شده اند. همه مناطق اتصال (مشخص شده در شکل 5) به لحاظ ساختاری با تغییر نسبت به ساختار مواد اولیه در حالت تحویل داده شده تبدیل شده اند. اطلاعات در مورد فرمت مناطق سختی کاهش یافته، در جدول

5 آمده است. مقادیر حداقل اندازه گیری سختی در حالت تحویل داده شده به عنوان مرز آن منطقه در نظر گرفته شده است.



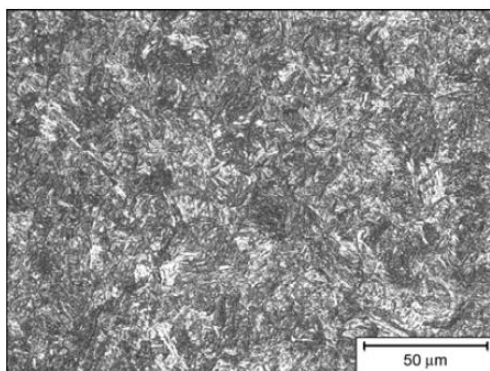
شکل 8. تغییرات سختی در اتصالات جوش داده شده از فولاد Hardox 400 پس از سخت شدن. حداکثر سختی

در  $HAZ \approx 410 HV10$ . حداقل سختی مواد جوش  $\approx 340 HV10$



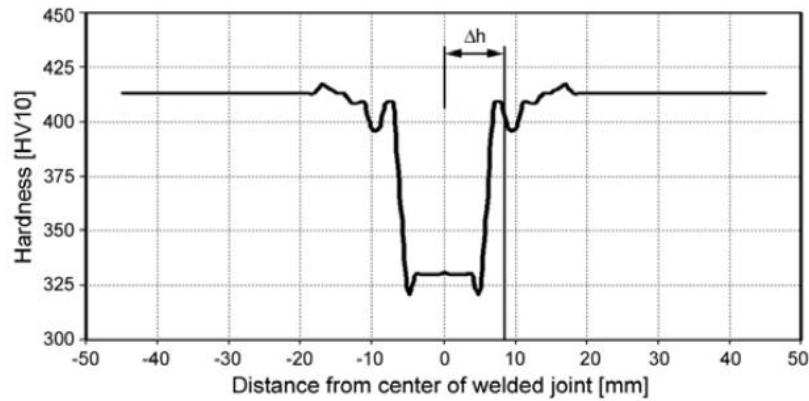
شکل 9. تغییرات سختی در اتصالات جوش داده شده از فولادهای Hardox 500 پس از سخت شدن. حداکثر

سختی در  $HAZ \approx 503 HV10$ . حداقل سختی مواد جوش  $\approx 430 HV10$



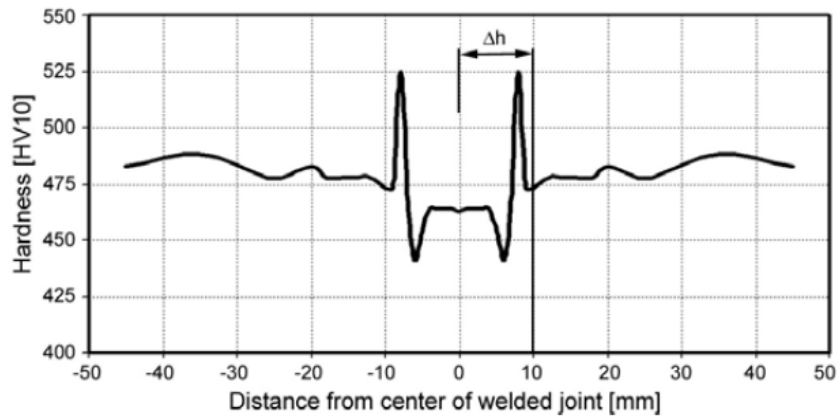
شکل 10 . ساختار اتصال جوش از فولادهای Hardox 500 پس از سخت شدن از منطقه مشخص شده با قاب در

شکل 9 . ساختار مارتنزیتی از حداکثر سختی  $\approx 503 \text{ HV10}$  . Mi1Fe 503 ، چ ، LM



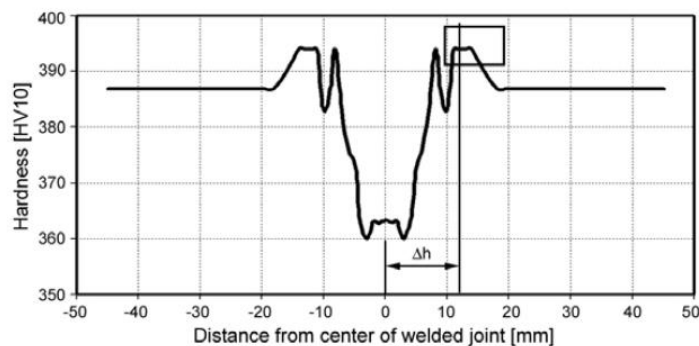
شکل 11 . تغییرات سختی در اتصالات جوش داده شده از فولاد Hardox 400 پس از سخت شدن و در دمای

200 درجه سانتی گراد . حداکثر سختی در  $\text{HAZ} \approx 416 \text{ HV10}$



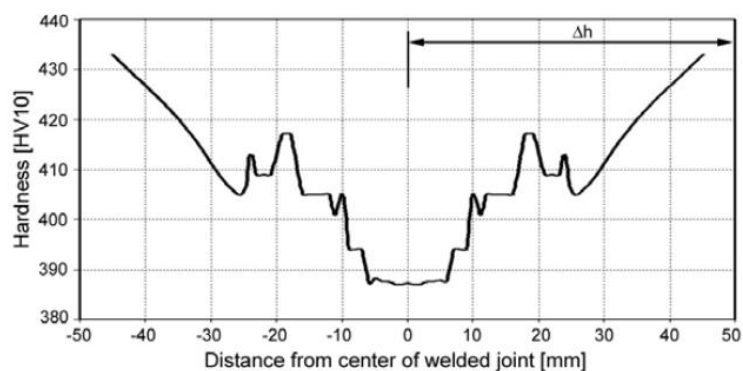
شکل 12 . تغییرات سختی در اتصالات جوش داده شده از فولادهای Hardox 500 پس از سخت شدن و در

دمای 200 درجه سانتی گراد . حداکثر سختی در  $\text{HAZ} \approx 523 \text{ HV10}$



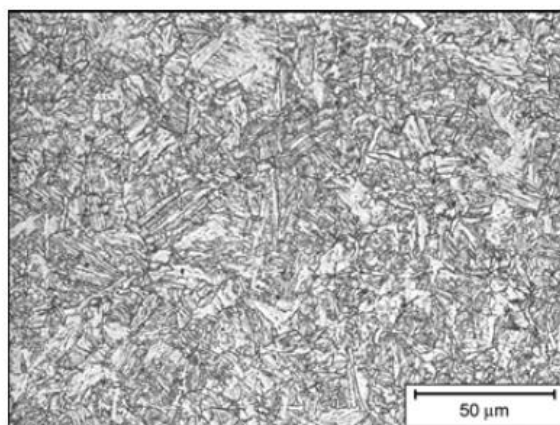
شکل 13 . تغییرات سختی در اتصالات جوش داده شده از فولاد Hardox 400 پس از سخت شدن و در دمای

300 درجه سانتی گراد . حداکثر سختی در  $HAZ \approx 393 HV10$



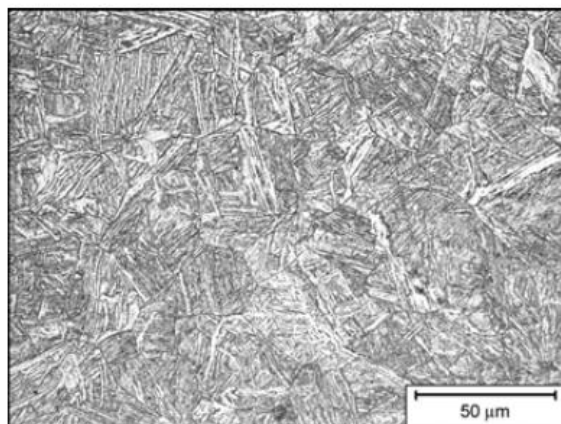
شکل 14 . تغییرات سختی در اتصالات جوش داده شده از فولادهای Hardox 500 پس از سخت شدن و در

دمای 300 درجه سانتی گراد . حداکثر سختی در  $HAZ \approx 417 HV10$



شکل 15 . ساختار مواد در مفصل جوش داده شده از فولاد Hardox 400 پس از سخت شدن و در دمای 300

درجه سانتی گراد . ساختار نوع  $Mi1Fe$  . Sorbitic . LM ،



شکل 16. ریزساختار منطقه حرارت موثر در اتصال جوش از فولاد Hardox 400 پس از سخت شدن و در دمای 300 درجه سانتی گراد. ریزساختار از منطقه با قاب در شکل 13 مشخص شده اند. Mi1Fe ، LM

### 3. خلاصه

نتایج اندازه گیری در تغییرات سختی در جدول شماره 5 آمده است. مشاهدات زیر از داده ها حاصل می شوند:

(a) عرض منطقه با سختی پایین تر در HAZ در رابطه با عرض منطقه در حالت تحویل داده شده به طور قابل توجهی به عنوان نتیجه تمام الگوهای پردازش حرارتی محدود شده اند. علاوه بر مورد سخت شدن و آبکاری فولادهای Hardox 500 در دمای 300 °C، مناطق با سختی کاهش یافته، 3 تا 6 بار کمتر شده است.

(b) به عنوان یک نتیجه از عملیات حرارتی، سختی مواد جوش به طور قابل توجهی افزایش یافته است. در موارد شدید آنها تا 70٪ برای Hardox 400 ، و 90٪ برای فولادهای Hardox 500 تغییر می کنند. این نشان می دهد که این مناطق نیز باید مقاومت در برابر سایش بیشتر را در رابطه با حالت تحویل داده شده ارائه دهند.

(c) در مورد جوشکاری فولادهای Hardox 500 سخت و آبکاری شده در دمای 300 °C، عرض منطقه با سختی پایین تر مشابه با حالت تحویل داده شده است. با این حال، تفاوت اساسی، به منزله صاف شدن تغییرات سختی بین مواد بومی و HAZ و سختی مواد جوش است. پس از عملیات حرارتی،  $\Delta HV_{10} \approx 290$ . این نشان دهنده افزایش احتمالی مقاومت در برابر سایش در منطقه تغییر ساختار اتصال جوش داده شده است.

جدول 5. مقایسه نتایج اندازه گیری سختی

Pos.	Welded joint state	Material	$\Delta h$	HV <sub>W</sub>	HV <sub>MAX</sub>	HV <sub>FZ</sub>
			[mm]	HV10	HV10	HV10
1	As delivered	Hardox 400	35	210	375	250
		Hardox 500	45	230	440	280
2	Hardened	Hardox 400	10	340	410	395
		Hardox 500	8	430	503	503
3	Hardened and tempered at 200 °C	Hardox 400	8	330	416	410
		Hardox 500	10	440	523	523
4	Hardened and tempered at 300 °C	Hardox 400	12	363	393	393
		Hardox 500	60	385	□500	417

$\Delta h$  – width of lowered hardness zone, HV<sub>W</sub> – weld material hardness,  
HV<sub>MAX</sub> – maximum hardness in HAZ, HV<sub>FZ</sub> – maximum hardness in fusion zone

آزمایشات میکروسکوپی، تغییرات در ساختار مناطق خاص را برای اتصالات جوش داده شده در رابطه با ساختارهای

آنها در حالت تحویل داده شده تایید می کند. این مواد نشان دهنده تحولات ساختاری گنجانده شده است:

(a) تغییر در ساختار مواد جوش با هاله فریت در مرز دانه ای ( شکل 5، منطقه W ) را به یک ساختار با مارتنزیت آبکاری شده کم کربن (شکل 15).

(b) بدست آوردن ساختار مارتنزیت آبکاری شده در کل منطقه متاثر از حرارت (شکل 16). این ساختار بسیار شبیه به فولادهای Hardox 500 در حالت تحویل داده شده است (شکل 4) . علاوه بر این، به عنوان یک نتیجه از عملیات حرارتی، تغییرات ساختاری در منطقه همجوشی حذف می شود.

در فولاد Hardox 400 جوش داده شده، تغییرات ساختاری در شرایط مختلف پرداخت حرارتی، انحراف از ساختار اتصالات فولادهای Hardox 500 را نشان می دهد: آنها شامل:

(a) ساختار Sorbitic می شوند و نه مارتنزیتی از مواد جوش.

(b) منطقه باریک از دانه های فریت ریز ( از سمت فولاد Hardox 400) در منطقه همجوشی.

(c) ساختار مارتنزیت با فرآیند آبکاری پیشرفته در منطقه تحت تاثیر حرارت نسبت به مورد فولادهای Hardox 500 (شکل 16).

از داده های موجود در جدول 3، حاصل اینست که تفاوت در چگالی کربن بین فولاد Hardox 400 و مقادیر سیم پرکننده به میزان 0.03 % و بین فولادهای Hardox 500 و سیم به میزان 0.17 % است. در طول جوشکاری، شار

انتشار کربن از فولاد Hardox برای جوش ایجاد شده آغاز می شود. به این ترتیب، مواد جوش از نظر عنصر بهبوددهنده سختی غنی می شوند. در مورد ورق های جوشکاری فولادهای Hardox 500، این منجر به ساختارهای نوع مارتنزیتی نیز در مواد جوش می شود. با این حال، کاهش محتوای کربن در منطقه همجوشی (از سمت فولاد Hardox 500) به قدری شدید است که تولید دوباره را در طول عملیات حرارتی ساختار شبیه به مواد اولیه به صورت تحویل داده شده میسر نمی سازد. در فولاد Hardox 400 اشباع مواد جوش با کربن می تواند پایین تر به عنوان یک نتیجه از محتوای کمتر فولاد در آن کاهش یابد. بنابراین، سختی مواد جوش برای بدست آوردن ساختار مارتنزیتی کافی نیست. یک نظریه را نیز می توان در مورد حضور یک نوار باریک از فریت تعادلی (از سمت Hardox 400) در منطقه همجوشی تدوین نمود. از آن منطقه، مقدار زیادی از کربن که از مواد جوش گذشته است، دارای سختی کاهش یافته بود. اثر این پدیده، فقدان مارتنزیت کم کربن در آن منطقه است. مفروضات فوق را می توان با نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل طیفی از ترکیب شیمیایی مواد جوش تایید کرد. آنها نشان داده اند :

- محتوای کربن متوسط، تا چند صدم درصد بالاتر از 0.09،
  - محتوای کربن بالاتر در اتصال ارتباط دهنده ورقه‌های فولادهای Hardox 500 نسبت به Hardox 400 .
- نتایج آزمایشگاهی نشان می دهد که در مورد فولاد با ساختار مارتنزیتی، اصلاح سختی اتصالات و ساختار، با استفاده از سخت شدن و آبکاری، ممکن می شود. این مربوط به انواع فولادهای Hardox 400، Hardox 500 و بدون شک فولاد HTK 900H است. این مورد آخر در حالت تحویل داده شده دارای ساختار و سختی شبیه به Hardox 400 است. پیشنهادات برای استفاده از چنین عملیات حرارتی برای اتصال جوش باید مورد بحث قرار گیرد و باعث برخی از مشکلات فنی می شود. معمولاً ( شکل 1)، آزادسازی یا نرمالسازی فرآیندهای بازپخت عادی برای اتصالات جوش داده شده استفاده می شوند. پیشنهاد شده است که در طول استفاده از آخرین لایه از جوش، یک فوران جت آب به دنبال یک الکتروود باعث سخت شدن منطقه متاثر از حرارت می شود (راه حل های مشابه با سخت شدن سطح). این فرآیند خنک کنندگی در چنین نقطه ای برای میسر نمودن آبکاری با حرارت انباشته شده و متراکم در مواد خاتمه می یابد. آزمایشات جوشکاری و عملیات حرارتی چاقوهای چمچه زنی در نیمه دوم سال 2008 انجام

شده است. تایید این پیشنهاد در مدت این آزمایش عملیاتی دنبال شد. قبل از چنین آزمونی، مطالعات متالوگرافی اتصالات جوش داده شده ساخته شده در اجزای ساختاری اشکال و اندازه های مربوط به چاقوی چمچه زنی انجام می شود.

فولادهای Hardox ، و معادل های لهستانی آن - فولاد HTK ، می تواند کاربردهایی به مراتب گسترده تر قبل از ساخت ماشین آلات عمومی برای استخراج معادن زغال سنگ قهوه ای داشته باشد. این را به سادگی می توان از خواص بسیار بالای مکانیکی و ساختار یکنواخت در ضخامت ورق (حتی بیش از 100 میلی متر) دید. ویژگی دوم بسیار ویژه است، زیرا در مقابل لایه های خالی غیر همگن مخالف، پیش بینی دقیق دوام ( یکی بالاتر از جوش پد ) را برای صفحات مختلف پوششی میسر می سازد. همانطور که در این مقاله نشان داده شده است [1] ، استفاده از فولاد Hardox در شرایط واقعی عبارت است از سایش یکنواخت و بدون ترک و تغییر ضخامت موضعی. به همین دلیل است که آنها تا زمانی می توانند استفاده شوند که سایش کامل پیدا کنند. تنها مناطق با سایش شدید در پوشش فولادی، اتصالات ( جوش پشته ) با ساختار اصلی هستند. وقوع خرابی چاقو و پوشش چمچه زنی باید حذف شود که از نظر اقتصادی یک حوزه کاربرد در حال ظهور برای این مواد است [1] .

توجیه و الهام از آثار در بهبود ساختار و خواص اتصالات جوش داده شده در فولاد Hardox و HTK را نیز می توان در میان مواد مدرن برای صنعت برق یافت. فولادهای مارتنزیتی، نوع 9-12٪ (که شامل بور)، نیز مورد نظر هستند. برای اولین بار از زمان توسعه آنها (فولاد TAF از ژاپن، در اواسط دهه هفتاد در قرن 20م، تلاش های برای استفاده از آن برای لوله های فراگرم کننده با خواص الاستیک کم و جوش پذیری ناکافی مهار شد. این اتفاق با وجود مقاومت عالی آن در برابر خزش افتاد. در سال های بعد نیز توسعه فولاد P91 و P92 و اعمال آنها برای هدر بخار هدر فراگرم کننده نیاز شد (به عنوان مثال در Power BOT Opole). به عنوان یک اثر، وزن کاهش یافته لوله کشی تا حدود 30 درصد و سرمایه گذاری های قابل توجه و راه اندازی صرفه جویی [14] به دست آمد. بعید نیست که روشی مشابه برای تکنولوژی پردازش حرارتی اتصال جوش داده شده برای فولاد Hardox و HTK باید برای برنامه های کاربردی پیش بینی شده در نظر گرفته شود.



## References

- [1] Cegiel L., Konat L., Pawlowski T., Pękalski G.: *Hardox Steels – New generations of construction materials for surface mining machinery*, Brown Coal, Bogatynia, No. 3, 56, pp. 24–29.
- [2] Konat L., Pękalski G., Oskwarek M.: *Macro and microstructural properties of welded joints of Hardox 400 and Hardox 500 steels*, XIX Scientific Conference „Development Problems of Working Machines”, Technical Magazine, Zakopane, January 2006.
- [3] Oskwarek M.: *Structural features and susceptibility to cracking of welded joints of Hardox 400 and Hardox 500 steels*, Conference Proceedings, IV Scientific Conference of Students, Wrocław University of Technology Publishing House, Wrocław 2006.
- [4] Buglacki H., Smajdor M.: *Mechanical properties of abrasion – resistant Hardox 400*, Advances in Material Science, Vol. 4, No. 2, 2003.
- [5] Haimann R., Krajczyk A., Pękalska L., Pękalski G.: *Analysis of strength changes and development of technology for optimal annealing of welded parts (caterpillar girders, caterpillar plates, a.s.o.)*, IMMT Report, series SPR 6, Wrocław University of Technology, 1986.
- [6] Haimann R., Krajczyk A., Pękalska L., Pękalski G.: *Influence of relief annealing on the structure and properties of cast steel joints with 18G2A and 12G2ANb steels*, Welding Technology Overview, 1990.
- [7] Tasak E.: *Metallurgy and structural metallurgy of welded joints*, Script AGH Kraków, 1985.
- [8] *Engineer Handbook – Welding Technology*, T1, WNT, Warszawa 2003.
- [9] Brooks J.A., Garrison Jr. W.M.: *Weld Microstructure Development and Properties of Precipitation-Strengthened Martensitic Stainless Steels*, Welding Journal, Aug. 1999.
- [10] Li D., Lu B., Zheng X.: *Fatigue Crack Initiation and Propagation in Butt Joint Welds of an Ultrahigh-Strength Steel*, Welding Journal, February 1993.
- [11] Akselsen O.M., Rorvik G., Onsoien M.I., Grong O.: *Assessment and Predictions of HAZ Tensile Properties of High-Strength Steels*, Welding Journal, September 1989.
  
- [12] Łętkowska B.: *Material studies of HTK – 700H, HTK – 900H and AR400 steels and potential of their application in surface mining machinery construction*, Master Diploma Thesis, Work Tutor G. Pękalski, PhD, 2007.
- [13] *Welding. Hardox, Weldox*, Information Materials of the SSAB-Oxelösund Steel Mill.
- [14] Hernas A.: *Creep-resistance of steels and alloys*, Silesian University of Technology Publishing House, Gliwice, 2000.