

طراحی مخزنهای تحت فشار با استفاده از معیار چقرمگی شکست و ساخت آنها

دکتر جمشید آقازاده

استادیار گروه مهندسی متالورژی دانشکده فنی

مجید میرزائی

گروه مهندسی متالورژی دانشکده فنی

چکیده:

در این پروژه با استفاده از معیار چقرمگی شکست K_{Ic} مخزنهایی طراحی و ساخته شده‌اند. پارامتر چقرمگی شکست برای ماده به کار رفته (یک فولاد HSLA) با استفاده از روشهای تخمینی محاسبه شده و طراحی برای بحرانیترین شرایط قرار گرفتن ترک انجام شده است. پس از ساخت مخزنها، تعدادی از آنها تحت آزمایشهای استاتیکی و دینامیکی قرار گرفته‌اند. نتایج آزمایشها نشان داده که معیار به کار رفته در طراحی با نتایج آزمایش مطابقت دارد. از طرفی نتایج به کار بردن روشهای تخمینی برای محاسبه K_{Ic} با استفاده از انرژی شکست در آزمایش ضربه، هماهنگی خوبی با نتایج حاصل از اندازه‌گیری لبه شکست نشان می‌دهد.

مقدمه

بر اثر تنشهای تناوبی (خستگی) و جنس قطعه (تعیین کننده چقرمگی شکست K_{Ic}). در شرایطی که سرعت بار زنش زیاد باشد استفاده از چقرمگی شکست در شرایط بار زنش با سرعت زیاد K_{Ic} دقیق تر است.

با توجه به اینکه اندازه‌گیری چقرمگی شکست در شرایط دینامیکی (K_{Ic}) پیچیده است و انجام آن در بیشتر آزمایشگاههای خواص مکانیکی عملی نیست. استفاده از روابطی که از طریق آنها بتوان با توجه به مقدار K_{Ic} و در نظر گرفتن سرعت کرنش، K_{Ic} را ارزیابی کرد متداول است. به نظر می‌رسد با توجه به روابط موجود بین K_{Ic} و تغییرات چکش‌خواری در شرایط کرنش صفحه‌ای می‌توان میزان K_{Ic} را با تقریب خوبی محاسبه کرد. (۱ و ۲)

با توجه به مشکلات محاسبه K_{Ic} از نقطه نظر محدودیت ابعادی نمونه‌ها و پراکندگی نتایج، تلاشهایی به منظور ارتباط نتایج آزمایشهای ضربه و کشش برای محاسبه چقرمگی شکست (K_{Ic}) انجام شده است. (۳ و ۴) رولف و نوک (۵) برای تعدادی از فولادهای پر قدرت با تنش تسلیم در محدوده $۱۷۰۰ - ۷۶۰ \text{ Mpa}$ رابطه تجربی زیر را برای محاسبه K_{Ic} با توجه به میزان انرژی جذب در آزمایش ضربه (CVN) پیشنهاد کرده‌اند:

به طور کلی هنگام استفاده از مفاهیم مکانیک شکست در طراحی مخزنهای تحت فشار بدون در نظر گرفتن کماتش باید عوامل زیر را در مد نظر داشت:

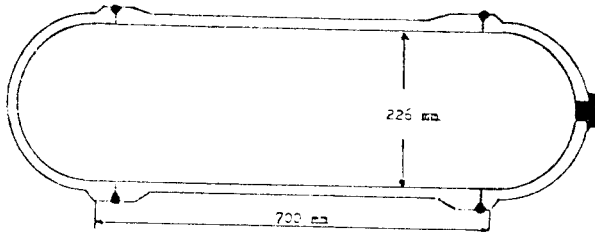
شکست نرم (Ductile Fracture) هنگامی است که رفتار ماده در مقابل شرایط حاکم تنشی از نوع سیلان عمومی (General yielding) باشد در این حالت، از کار افتادگی (Failure)، ناشی از ناپایداری در تغییر فرم پلاستیک (Plastic deformation instability) است.

شکست ترد (Brittle Fracture) هنگامی است که تغییر فرم پلاستیک نوک ترک به قدری کم باشد که رشد ترک بدون تغییر فرم پلاستیک انجام گیرد و انرژی جذب شده هنگام شکست حداقل باشد.

وقتی شرایط سیلان عمومی حاکم باشد معیار طراحی، بیشتر براساس ویژگیهایی نظیر تنش تسلیم σ_{ys} حد نهائی تنش کششی σ_{ult} است. اما اغلب در کاربرد قطعات مهندسی ممکن است شرایط حادی بروز کند که امکان شکست ناگهانی و ترد قطعه بیشتر باشد. در این شرایط معیار طراحی می‌تواند براساس پارامتر چقرمگی شکست K_{Ic} بنا نهاده شود. در این شرایط عوامل مؤثر در طراحی عبارت‌اند از تنش وارده، بزرگترین ترک موجود در جسم با توجه به وضعیت هندسی آن و احتمال رشد ترک

روشهای آزمایشی و نتایج

شکل ۱، طرحواره ترکیب کلی اجزا و ابعاد مخزنهای طراحی شده را نشان می‌دهد (۹).



شکل ۱: طرحواره کلی اجزاء و ابعاد مخزنهای ساخته شده

چنانکه دیده می‌شود، این مخزن تشکیل شده است از یک قسمت استوانه‌ای که با تراشکاری یک لوله جدار ضخیم فولادی تهیه شده و به وسیله دو نیمکره مسدود شده است.

نیم کره‌ها به دو انتهای استوانه جوش خورده‌اند و محل جوش به علت ضعف ناشی از منطقه متأثر از گرما ضخیم‌تر در نظر گرفته شده است.

پس از انجام آزمایشهای مختلف برای شناسایی جنس و خواص لوله فولادی مورد نظر، مینیمم ضخامت ممکن در قسمتهای مختلف مخزن محاسبه شده و مخزنهای ساخته شده تحت آزمایش تحمل فشار داخلی قرار گرفته‌اند.

ترکیب شیمیایی و ریز ساختار

ترکیب شیمیایی فولاد مورد بررسی در جدول ۱ مشخص شده است. هم چنانکه دیده می‌شود این فولاد مقادیر بسیار کمی گوگرد و فسفر دارد و جزو کلاس فولادهای کم آلیاژ پر مقاومت است.

$$\frac{K_{IC}^2}{E} = 0.22 \text{ (CVN)}^{1/5} \quad (1)$$

سیلور و گرتن (۶) نشان داده‌اند که رابطه زیر برای تعیین K_{IC} چند آلیاژ با تنش تسلیم بین $480 \text{ Mpa} - 410$ صادق است:

$$K_{IC} = 14/6 \text{ (CVN)}^{1/5} \quad (2)$$

با رسم (۷) روابط دیگری برای محاسبه K_{ID} به طور تجربی ارائه کرده است.

روابط بالا به طور کلی در مورد نوع ماده آزمایش شونده، تیزی شکاف نمونه آزمایشی و سرعت کرنش ثابت نیستند و نتایج به دست آمده تقریبی خواهد بود. دامنه تقریب بستگی به شدت اثر عاملهای فوق دارد.

رابرتز و نیوتون (۸) میزان دقت ۱۵ نوع از روابط بالا را بررسی کرده و نشان داده‌اند که هیچ یک از روابط مذکور خود به تنهایی نمی‌تواند در هر شرایط آزمایشی برای همه مواد مهندسی صادق باشد. از طرفی با توجه به پراکندگی نتایج آزمایشهای K_{IC} و CVN می‌توان انتظار پراکندگی نتایج را در روابط بین K_{IC} و CVN داشت.

با توجه به این روابط می‌توان انتظار داشت که نتایج به دست آمده از نمونه‌های دارای شکاف تیز و کند و همچنین نمونه‌های آزمایش شده در شرایط بار زنش استاتیکی و دینامیکی را با یکدیگر مقایسه کرد. البته برای مواد با تنش تسلیم بیشتر از 825 Mpa با توجه به اینکه اثر سرعت کرنش بسیار محدود است می‌توان نتایج آزمایشهای در شرایط بار زنش استاتیکی و دینامیکی را با تقریب خوبی با یکدیگر مقایسه کرد، ولی در شرایط کلی چنین مقایسه‌ای باعث بروز خطا در محاسبات خواهد شد. البته می‌توان این مشکل را با استفاده از روابط مابین K_{ID} و CVN با بهره‌گیری از ضریب تغییر دما با تقریب خوبی حل کرد (۴).

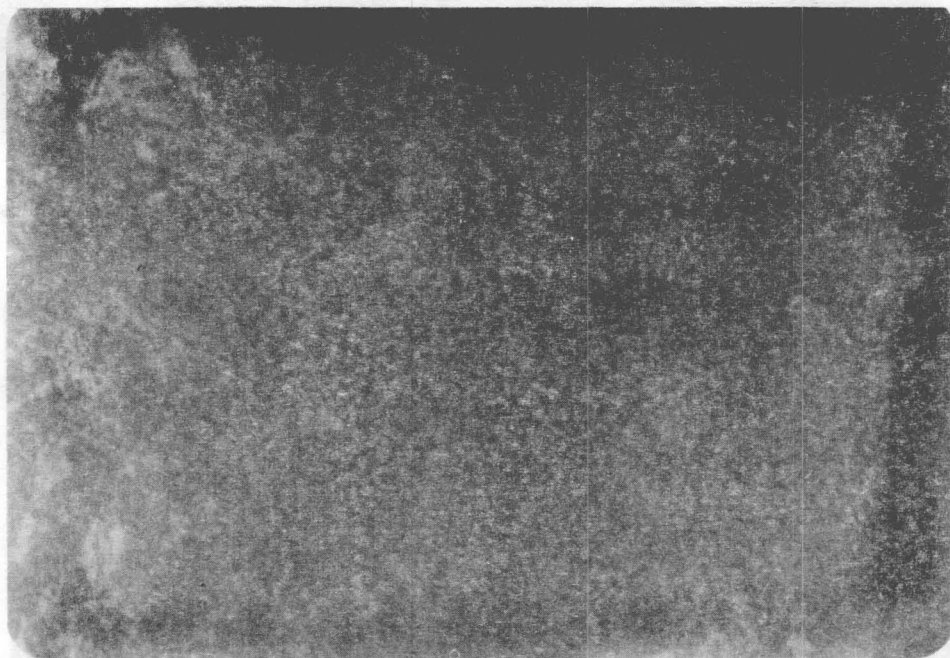
گوگرد	فسفر	منگنز	سیلیسیم	کربن
۰/۰۰۷	۰/۰۲	۱/۳۷	۰/۳۲	۰/۲۷

جدول ۱ ترکیب شیمیایی فولاد مورد بررسی

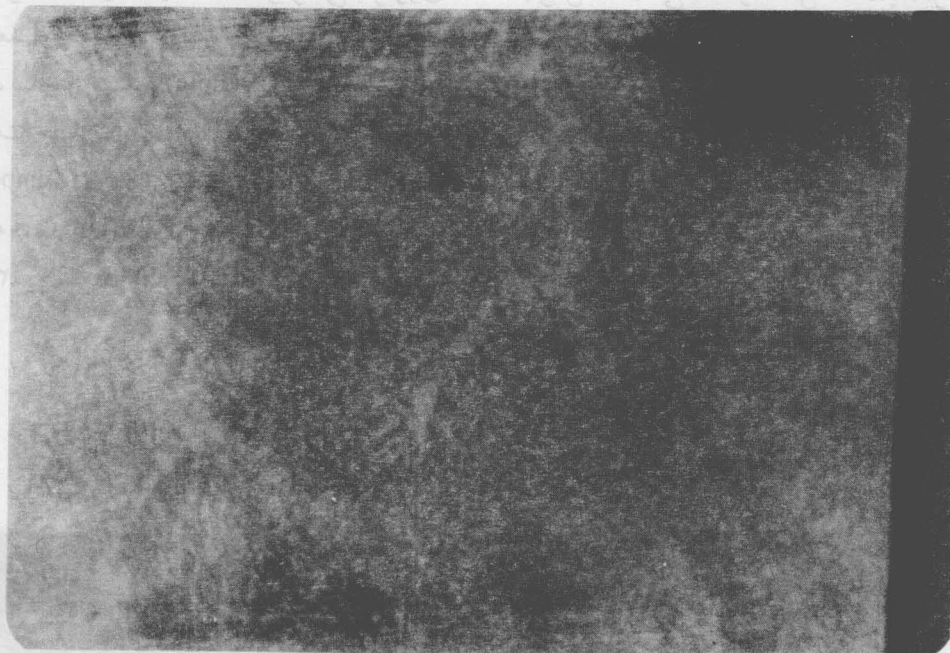
جوش نشان می‌دهد و شکل ۴، نمایانگر دانه‌های درشت شده ناشی از پدیده گرم شدن پیش از حد در منطقه متأثر از گرمای ناشی از جوشکاری است.

شکل ۵، یک ساختار فریت - پرلیت (ferrite - pearlite) ناشی از عملیات حرارتی بازپخت کامل (full annealing) را نشان می‌دهد.

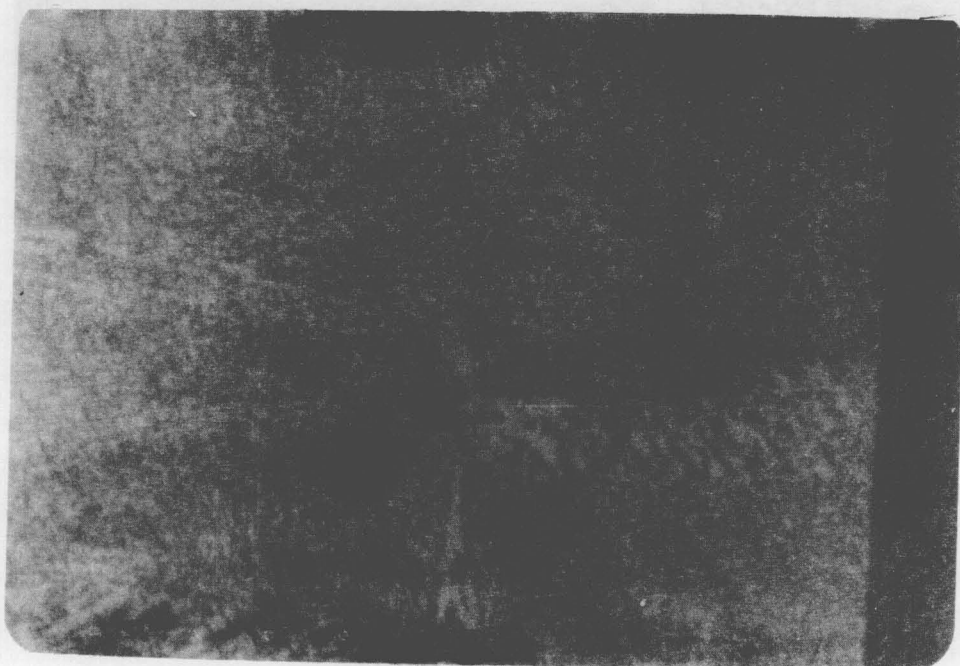
برای تعیین ریز ساختار عملیات متالوگرافی بر روی نمونه‌ها قبل و بعد از جوشکاری انجام شده است. شکل ۲ نشان دهنده یک ساختار بینیتی (Bainite) ریز دانه ناشی از سیکل عملیات حرارتی سریع سرد کردن در آب و بازگشت (Tempering) در دمای نسبتاً پائین است. (این تصویر مربوط به نمونه‌های قبل از جوشکاری است). شکل ۳، یک ساختار درشت دانه را در گرده



شکل ۲) مقطع متالوگرافی نمونه $\times 600$



شکل ۳ مقطع متالوگرافی گرده جوش (فریت پرواتکتوئید در مرز دانه‌های قدیمی استنیت به وضوح مشهود است. $\times 600$)



شکل ۴ مقطع متالوگرافی منطقه متأثر از گرمای جوش (ساختمان Widmanstatten ناشی از بزرگ شدن بیش از حد دانه‌های استنیت در اثر حرارت حاصل از جوش). $\times 600$



شکل ۵ - مقطع متالوگرافی نمونه بازیخت شده $\times 1000$

نمونه‌های کشش و ضربه در جهت پیرامونی مخزنها تهیه شده‌اند. ابعاد نمونه‌های کششی مطابق استاندارد E8 - 69 ASTM و نمونه‌های ضربه مطابق استاندارد BS 131 P₂ ساخته شده است. ضریب کار سختی n با استفاده از رابطه هولومان $(10) \sigma = k\epsilon^n$ محاسبه شده است. هر آزمایش کشش یک بار و هر آزمایش ضربه ۳ بار تکرار شده و میانگین نتایج در نظر گرفته شده است.

ویژگیهای مکانیکی و بررسیهای غیر مخرب این آزمایشها شامل آزمایش کشش تک محوری و آزمایش ضربه است و نتایج حاصل از آنها در جدولهای ۲ و ۳ آمده است. آزمایشها بر روی نمونه‌های موجود و همچنین نمونه‌هایی که عملیات حرارتی دیده و جوشکاری شده‌اند انجام گرفته است. نمونه‌ها عبارت‌اند از: الف - نمونه‌های موجود (ب) نمونه‌های جوشکاری شده (بدون سیم جوش)، (ج) نمونه جوشکاری شده (با سیم جوش) و (د) نمونه بازیخت شده.

تنش سیلان	حدنهایی کشش	ضریب کار سختی	کرنش حقیقی شکست	کاهش سطح مقطع	سرعت کرنش نوع نمونه
sy.Mpa	su, Mpa	n	ef	%R	mm/min
۶۱۵	۷۲۴	۰/۰۹	۰/۶۱	۴۵/۶	۲ الف
۷۰۹	۷۲۶	۰/۰۶۵	۰/۵۹	۴۴/۷	۱۰۰ الف
۵۳۸	۷۰۳	۰/۰۴۵	۰/۵۱	۳۸/۵	۲ ب
۴۸۹	۶۰۰	۰/۰۳۵	۰/۳۷	۳۱	۲ ج
۵۳۱	۵۴۴	۰/۱۲	۰/۷۴	۵۳	۲ د

جدول ۲ نتایج آزمایش کشش بر روی نمونه‌های مختلف

دما، °C	۱۰۰	۰	-۲۰	-۵۰
انرژی جذب شده، Joule	۵۲	۴۹	۳۷	۲۸

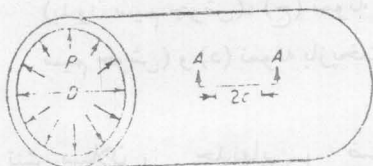
جدول ۳ نتایج آزمایش ضربه بر روی نمونه‌های موجود

پس از آزمایش عملی، در نمونه‌های موجود هیچ گونه نقص و ترک مشاهده نشده است. لاجرم نظر به محدودیت اطلاعات به دست آمده، در محاسباتی که در پی خواهد آمد، طول ترکهای احتمالی ۱/۵ میلی متر منظور شده و جهت‌گیری آنها عمود بر جهت بزرگترین مؤلفه تنش و پارامتر شکل آنها کمترین مقدار ممکن در نظر گرفته شده است.

تحلیل تنش و ارزیابی چقرمگی شکست (KIC) شکل ۶. یک مخزن نمونه را دارای ترک به طول ۲C نشان می‌دهد.

به منظور تعیین اندازه و مشخصات ترکها و نقایص موجود در نمونه‌ها آزمایشهای غیر مخرب انجام گرفته است. بدین منظور از دستگاه جریان گردابی برای بررسی ترکهای سطحی و از دستگاه فراصوتی برای مطالعه ترکهای عمقی استفاده شده.

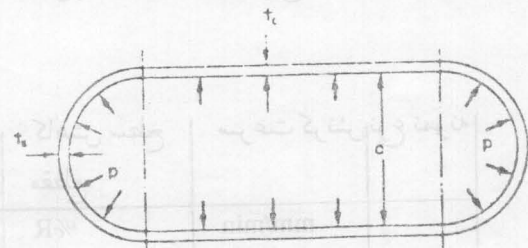
متأسفانه دستگاههای به کار رفته توانایی ارائه اطلاعات لازم در مورد شکل و جهت‌گیری ترکها را نداشتند و تنها قادر به تشخیص وجود و ابعاد نقایص بودند، لذا در توان تفکیک نیز محدودیت وجود داشته است. بدین معنی که این دستگاهها تنها قادر به تشخیص ترکهای بزرگتر از ۱/۵ میلی متر بودند.



$$\sigma = \frac{PD}{2t_c}$$

$$K_I^2 = \frac{P^2 D^3}{C} = \frac{P^2 D^3}{C} M_K$$

Sec. A-A



شکل ۶ - یک مخزن نمونه دارای ترک به طول ۲C.

گرانش محیطی: $PD / 4t_c E (2 - \nu) = 1/E (SH_C - \nu SL_S)$
 ب - نیمکره‌های دوسر

تنش محیطی $SH_S = PD / 4t_s$ (۴)
 گرانش محیطی $PD / 4t_s E (1 - \nu) = 1/E (SH_S - SL_S)$

در روابط بالا E، ضریب الاستیک و ν ، عدد پواسون است.

تنشها و کرنشهای به وجود آمده در اثر اعمال فشار داخلی در قسمت استوانه‌ای و همچنین نیمکره‌های با قطر D و ضخامت t در دوسر از روابط زیر قابل محاسبه‌اند:
 الف - قسمت استوانه‌ای:

(۳) تنش محیطی: $SH_C = PD / 2t_c$
 تنش طولی: $SL_C = PD / 4t_c$

$$K_{IC} = 82/4 \text{ Mpa } \sqrt{\text{m}}$$

از طرفی سیلورزوکورتون رابطه زیر را پیشنهاد کرده‌اند:

$$K_{IC} = 14/6 (\text{CVN})^{0.5} \quad (8)$$

که در این صورت مقدار چقرمگی شکست برابر $77/3 \text{ mpa } \sqrt{\text{m}}$ خواهد بود.

همچنین رابطه دیگری برای رده مشابهی از فولاد مورد نظر توسط بار سوم (۷) ارائه شده است که در آن:

$$K_{IC}^2/E = 655 \text{ CVN} \quad (9)$$

از رابطه فوق، مقدار چقرمگی شکست برابر است

$$K_{IC} = 76/1 \text{ MPa } \sqrt{\text{m}}$$

دیده می‌شود که نتایج به دست آمده از روابط مختلف تطابق بسیار خوبی با یکدیگر نشان می‌دهند. بدین ترتیب میانگین آنها را، $K_{IC} = 76/7 \text{ MPa } \sqrt{\text{m}}$ در محاسبات به کار می‌بریم. نظر به اینکه نتایج به دست آمده از آزمایش ضربه نمونه‌های جوشکاری شده پراکندگی زیادی از خود نشان می‌دادند برای تعیین K_{IC} از رابطه (۶) استفاده شده است که در این صورت مقدار چقرمگی شکست برابر $43/9 \text{ mpa } \sqrt{\text{m}}$ می‌شود و با در نظر گرفتن ۴۰٪ ضریب اطمینان خواهیم داشت: $K_{IC} = 26/3 \text{ mpa } \sqrt{\text{m}}$

تعیین ضخامت حداقل مخزنها و ساخت آنها

برای تعیین ضخامت در قسمتهای مختلف مخزن، نخست محاسبات از قسمت استوانه‌ای و با تعیین کمترین ضخامتی که بتواند ضمن تحمل فشار داخلی P از ایجاد تغییر فرم پلاستیک جلوگیری کند انجام می‌گیرد. از آنجا که نحوه بار زنش (سرعت، زمان اعمال بار، تناوب بار و غیره) عامل بسیار مهمی در تعیین روش محاسباتی است در این مرحله، محاسبات براساس یک بار زنش آرام با پریود کوتاه انجام شده است. در این حالت فشار داخلی مورد نظر با توجه به کاربرد آن ۱۹ Mpa است. با استفاده از معیار سیلان فون میز و با توجه به شرایط خاص تنش دویعدی حاکم که در آن مقدار تنش

از آنجایی که برای یک طراحی ایمن، همواره باید دشوارترین حالتی را که در عمل پیش می‌آید در نظر گرفت موقعیت ترکهای موجود را مطابق شکل و عمود بر جهت تنش اصلی S_1 در نظر می‌گیریم. برای این نوع بار زنش و این نوع هندسه ترک، رابطه شدت تنش به صورت زیر است: (۱۰)

$$K_{IC}^2 = \frac{1/21 \pi s^2 a}{Q} M_K \quad (5)$$

در این رابطه:

a = عمق ترک به اینچ

s = تنش اعمال شده

M_K = ضریب بزرگنمایی برای ترکهای عمقی که تابع

$\frac{a}{\sqrt{C}}$ است.

Q = پارامتر شکل ترک که تابع $\frac{a}{\sqrt{C}}$ است

برای تعیین مقدار چقرمگی شکست K_{IC} نمونه‌ها، از روابط تخمینی استفاده شده است. بر اساس نتایج آزمایش کشش، (۱۱) هان و روز نفیلد نشان داده‌اند که

$$K_{IC} = n \sqrt{2ESy_{ef}/\pi^3} \quad (6)$$

در این رابطه

n = ضریب کار سختی

E (psi) = مدول الاستیک

S_y (Ksi) = تنش سیلان

c_f = کرنش حقیقی در نقطه شکست

مقدار چقرمگی شکست با استفاده از رابطه بالا برابر است با $K_{IC} = 102/2 \text{ MPa } \sqrt{\text{m}}$ از آنجایی که نتایج به دست آمده از این رابطه، $\pm 30\%$ با مقادیر به دست آمده از روشهای استاندارد اختلاف دارد، برای اطمینان هر چه بیشتر، کمترین مقدار ممکن را در نظر می‌گیریم

$$(K_{IC} = 71 \text{ Mpa } \sqrt{\text{m}})$$

با استفاده از نتایج آزمایش ضربه، رولف و نواک (۵) نشان داده‌اند که

$$\frac{K_{IC}^2}{E} = 0.22 (\text{CVN})^{1/5} \quad (7)$$

مقدار چقرمگی شکست با استفاده از این رابطه برابر است

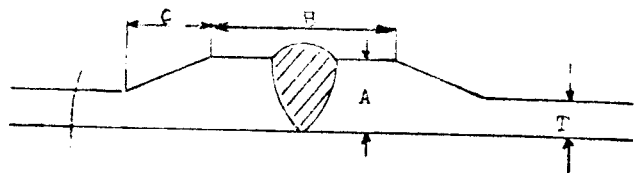
نتایج نشان می‌دهد که تنش سیلان مورد نیاز ۶۵۶ MPa است، حال آنکه تنش سیلان فولاد به کار رفته ۶۱۵ MPa اندازه‌گیری شده است.

یادآور می‌شود که تنش سیلان ۶۱۵ MPa در آزمایش کشش تک محوری و با سرعت کرنشی بسیار پایین به دست آمده و با افزایش سرعت کرنش چنانکه در جدول ۲ دیده می‌شود تنش سیلان تا مقدار ۶۹۷ MPa افزایش می‌یابد.

لذا چنانچه بار زنش به صورت لحظه‌ای و در یک پریرود کوتاه انجام گیرد می‌توان از این خاصیت یعنی ازدیاد تنش سیلان در اثر افزایش سرعت کرنش در جهت کاهش ضخامت استفاده کرد. باید دانست که در بار زنشهای دینامیک بهتر است که چقرمگی شکست دینامیک K_{ID} را در محاسبات به کار بریم که هنگام تحلیل نتایج بدان خواهیم پرداخت.

ضخامت نواحی اتصال باید به علت افت خواص مکانیکی در اثر جوشکاری نسبت به بدنه اصلی با توجه به شکل ۷ ضخیم‌تر انتخاب شوند.

T, inch	A	B	C
تا ۰/۰۹	۱/۶T	۶T	۲T
از ۰/۰۹ تا ۰/۱۸	۱/۴T	۵T	۲T
از ۰/۱۸ تا ۰/۳۷	۱/۲T	۴T	۲T



شکل ۷- نحوه افزایش ضخامت در منطقه جوش. بر طبق این معیار باید ضخامت محل اتصال را برابر

محیطی دو برابر تنش طولی است. می‌توان ماکزیمم تنش مجاز را برای پرهیز از سیلان پلاستیک محاسبه کرد:

$$(S_1 - S_x)^2 + (S_y - S_x)^2 + (S_z - S_x)^2 = 2S_y^2 \quad (10)$$

در این رابطه:

$$\begin{aligned} S_1 &= 2S_y & S_z &= 0 \\ 3S_y^2 &= S_y^2 & S_y &= 615 \text{ MPa} \\ S_y &= 355 \text{ MPa} & S_z &= 710 \text{ MPa} \end{aligned}$$

با مشخص شدن تنشها، ضخامت از رابطه (۳) قابل محاسبه است. در این صورت $t = 3/0.2 \text{ mm}$ خواهد بود. دیده می‌شود که اگر ضخامت جدار $3/0.2$ میلیمتر در نظر گرفته شود، تنش محیطی معادل ۷۱۰ MPa خواهد بود. با استفاده از رابطه (۵) برای این شکل خاص و این نحوه بار زنش، سطح تنش مجاز برای پرهیز از شکست برابر است با:

$$S^2 = \frac{K_{IC}^2 Q}{1/21 \pi a MK} \quad (11)$$

در این رابطه:

$$\begin{aligned} K_{IC} &= 76/7 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}} & a &= 0/015 \text{ m} \\ \text{و به کمک روش حدس و خطا می‌توان نشان داد} \\ Q &= 1/0.8 \text{ و } MK = 1/1 \end{aligned}$$

بنابراین: $S_1 = 960/5 \text{ MPa}$

دیده می‌شود که با ضخامت جداره $3/0.2$ میلیمتر ضمن پرهیز از تغییر فرم پلاستیک، خطر بروز شکست ترد نیز وجود نخواهد داشت. نتایج محاسبات نشان می‌دهد که با کاهش بیشتر ضخامت تا $2/83$ میلیمتر، سطح تنش محیطی به سطح تنش مجاز شکست (۷۵۸ MPa) می‌رسد.

$$S_1 = PD / 2t = 758 \text{ MPa}$$

در این حالت برای پرهیز از تغییر فرم پلاستیک، به تنش سیلان بیشتری نیاز است.

$$3S_y^2 = S^2_y \quad S_y = 656 \text{ MPa} \quad S_z = 379 \text{ MPa}$$

اتصال، قسمت استوانه‌ای و نیمکره‌های دو سر مطابق شکل ۱ تا ابعاد نهایی تراشیده شده‌اند و با ایجاد یک شیب ملایم بین دو ناحیه مینیم و ماکزیمم ضخامت از ایجاد تمرکز تنش تا حد امکان جلوگیری شده است.

برای برقراری سازگاری در کرنشها، بین کرنشهای قسمت استوانه‌ای و نیمکره‌ها باید رابطه زیر برقرار باشد:

$$PD / 4t_s E(1-\nu) = \text{کرنش محیطی نیمکره} = PD / 4t_c E(2-\nu) = \text{کرنش محیطی استوانه}$$

T ۱/۴ در نظر گرفت، در حالی که ضخامت T ۱/۴ موجب می‌شود تا تنش محیطی به وجود آمده برابر با ۵۰۸ MPa باشد.

$$S_I = PD/2t = 508 \text{ MPa}$$

از طرفی با توجه به K_{IC} مینیمم در ناحیه جوش که $26/3 \text{ MPa} \sqrt{\text{mm}}$ است، سطح تنش مجاز شکست در ناحیه جوش برابر با ۳۰۸ Mpa خواهد بود.

لذا ضخامت ناحیه جوش با توجه به مقدار K_{IC} این ناحیه معادل ۶/۹۷ mm یا T ۲/۳ در نظر گرفته شده است. پس از محاسبه ضخامت پوسته و همچنین محل‌های

برای فولادها $\nu = 0.3$ می‌باشد در نتیجه:

$$t_s = \text{ضخامت پوسته نیمکره و } t_c = 2/4 t_s = \text{ضخامت پوسته استوانه}$$

فشار داخلی در مخزنهای ساخته شده به دست آمده است. می‌توان نتیجه گرفت که طراحی براساس مکانیک شکست، روشی مطمئن در جهت ساخت اجزاء و سازه‌هاست و صرفه جویی در مواد، هزینه تمام شده و سهولت کاربرد را به همراه خواهد داشت.

با وجود مزایای بالا، استفاده از این روش مستلزم شناخت دقیق خواص مکانیکی به ویژه چقرمگی شکست و همچنین عیوب و نقایص ساختاری ماده به کار رفته است. این شناخت، تنها از طریق دسترسی به تجهیزات و امکانات ویژه میسر است. روشهایی که برای تخمین K_{IC} به کار رفته است به شدت، متأثر از عوامل مختلف مانند روش بار زنش، سرعت کرنش، ابعاد نمونه‌ها، حساسیت دستگاههای آزمایشی، خطاهای اندازه‌گیری و غیره است و نتایج حاصل تا حدی، پراکندگی چشمگیری دارد. (۸) لذا، استفاده از این گونه روشها به عنوان یک راه حل مقطعی به مواردی که انتظار بروز خطرات جدی جانی و مالی نمی‌رود محدود شده است و حتماً باید با انجام آزمایشهای متعدد تأیید کننده همراه شود.

نداشتن امکانات و تجهیزات لازم موجب شد تا در تخمین مقدار K_{IC} همواره حد پایین طیف اعداد به دست

دیده می‌شود که این سازگاری مستلزم کاهش ضخامت جداره نیمکره‌ها تا مقدار ۲/۵ mm در محل اتصال است. روند ساخت این مخزنها شامل ایجاد پخ مناسب در لبه‌های اتصال و جوشکاری به روش TIG (Tungsten Inert Gas) است.

برای پرهیز از ترکهای احتمالی، عملیات پیش گرمادهی تا ۲۰۰°C و پس گرمادهی به مدت ۱۰ دقیقه در دمای ۳۰۰°C - ۲۵۰ بر روی محل‌های اتصال انجام گرفته است.

سپس مخزنهای ساخته شده تحت آزمایش فشار داخلی قرار گرفته‌اند و بار زنش طبق رژیم مورد نظر از لحاظ سرعت و زمان اعمال بار انجام شده است. عدم وقوع شکست در محدوده فشارهای مجاز، درستی محاسبات را تأیید کرده و اندازه‌گیری ابعاد مخزنها پس از تحمل فشارهای خیلی بیشتر از حد مجاز که منجر به پارگی مخزنها (شکست نرم) می‌شود تأیید حاکمیت شرایط سیلان عمومی پلاستیک بوده است.

بحث

با توجه به نتایجی که از آزمایشهای عملی ایجاد

در محاسبات انجام شده از K_{IC} یا چقرمگی شکست در کرنش صفحه‌ای استفاده شده است.

بر طبق رابطه زیر حد شرایط کرنش صفحه‌ای با توجه به خواص فولاد به کار رفته مشخص می‌شود. (۱۲)

$$B = 2/5 (K_{IC}/S_y)^2 \quad (12)$$

$$B = 2/5 \left(\frac{64}{615}\right)^2 = 0.02m = 20mm$$

دیده می‌شود که با توجه به ضخامت‌هایی که قبلاً محاسبه شده است. شرایط حاکم، تنش صفحه‌ای است. لذا باید در محاسبات به جای K_{IC} از K_C استفاده کرد.

با توجه به عدم امکانات از نوعی که قبلاً نیز متذکر شدیم تعیین K_C از روش‌های معمول امکان پذیر نبوده است. در عین حال Irwin (۱۳) رابطه تجربی زیر را برای تخمین مقدار K_C از روی K_{IC} با توجه به ضخامت و تنش سیلان ماده بیان کرده است.

$$K_C^2 = K_{IC}^2 (1 + 1/4 B^2 I_C)$$

$$B I_C = l/t (K_{IC}/S_y)^2$$

در هر صورت مقدار K_C بیش از K_{IC} و این امر کاهش هر چه بیشتر ضخامت را ضمن پرهیز از خطر شکست ناگهانی امکان پذیر می‌کند. از سوی دیگر عاملی که در عمل کاهش ضخامت را محدود می‌کند پایین بودن سطح تنش سیلان جسم است. انجام کار سرد مکانیکی و یا سیکل مناسبی از عملیات حرارتی ضمن افزایش مقاومت و تنش سیلان موجب کاهش چقرمگی شکست می‌شود. لذا می‌توان با انجام مقدار معینی کار سرد و یا عملیات حرارتی مناسب بر روی قطعه از افزایش مقاومت ماده در جهت کاهش هر چه بیشتر ضخامت استفاده کرد. مشروط بر اینکه کاهش چقرمگی شکست در اثر کار سرد و یا عملیات حرارتی در حد دلخواه نگاه داشته شود. نتایج تحقیقات دیگری (۱۴) بر روی دو فولاد $M 300$ و 4340 نشان می‌دهد که روش‌های تخمینی برای محاسبه K_{IC} با نتایج حاصل از اندازه‌گیری لبه شکست برای محاسبه K_{IC} تطابق نسبتاً خوبی دارد.

با توجه به روش‌های تخمینی ذکر شده مقدار K_{IC} برای این دو فولاد به ترتیب برابر $98/5 Mpa m^{1/2}$ و 106

آمده در محاسبات به کار رود. از سوی دیگر کمبود اطلاعات لازم در مورد اندازه، شکل و جهت‌گیری ترکها و نقایص موجود موجب شد تا بزرگترین اندازه و زیانبارترین شکل و جهت‌گیری در محاسبات منظور شود. چه بسا با رفع این گونه محدودیتها و با در دست داشتن اطلاعات کافی، کاهش هر چه بیشتر ضخامت امکان پذیر بوده است.

محاسبات انجام شده برای اجرای این طرح براساس یک مرحله بار زنش (مخزنهای یک بار مصرف) انجام گرفته است. چنانچه تکرار بار زنش به صورت پر و خالی شدن مخزن مد نظر باشد می‌توان با مشخص کردن سیکل بار زنش و پیش بینی میزان رشد ترک در هر مرحله بار زنش و با استفاده از روابط خستگی، تعداد دفعات مجاز بار زنش را تعیین کرد. و یا چنانچه تعداد دفعات استفاده مشخص باشد حد فشار مجاز با کمک این گونه روابط قابل محاسبه خواهد بود. بالاخره همان گونه که در مقدمه نیز اشاره شد بسته به شرایط کارکرد قطعه می‌توان دو عامل از سه عامل چقرمگی شکست، اندازه ترک و سطح تنش را ثابت نگاه داشته و میزان مجاز عامل سوم را تعیین کرد.

چنانچه پیشتر هم اشاره شد در بار زنشهای دینامیکی و به ازای سرعت کرنشهای مختلف، ماده رفتارهای متفاوتی از خود نشان می‌دهد. در این گونه موارد باید در محاسبات از چقرمگی شکست دینامیک K_{ID} استفاده کرد. اندازه‌گیری K_{ID} بسیار مشکل‌تر از K_{IC} است و مستلزم استفاده از تجهیزات ویژه‌ای است. همان گونه که پیشتر دیدیم چقرمگی شکست با نتایج حاصل از آزمایش ضربه مرتبط است. معمولاً انرژی شکست مواد، بالاتر از یک محدوده مشخص حرارتی در حالت دینامیکی نسبت به بار زنش آرام از خود افزایش نشان می‌دهد. نتیجه اینکه به ازای محدوده خاصی از دما و سرعت کرنش، چقرمگی شکست دینامیک K_{ID} بیشتر از چقرمگی شکست در حالت بار زنش آرام K_{IC} است (۴) به نظر می‌رسد که برای دقت بیشتر مناسب باشد فشار داخلی P به تنش محیطی در رابطه K_{IC} افزوده شود ولی با توجه به اینکه در محاسبات انجام شده روش احتیاط اختیار شده است، تاثیری در نتایج نخواهد داشت.

محاسبه شده‌اند. شکل‌های ۸ و ۹، نشان‌دهنده لبه سطح شکست از دو نمونه آلیاژ ۴۳۴۰ و ۳۰۰M است. از آنجایی که به طور تقریب می‌توان نوشت:

$$D = r_y = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{K_{IC}}{s_y} \right)^2 \quad (14)$$



شکل ۸- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح شکست آلیاژ ۴۳۴۰ نشان‌دهنده لبه برش



شکل ۹- تصویر میکروسکوپ الکترونی رویشی از سطح شکست آلیاژ ۳۰۰M نشان دهنده لبه برش

۴- نتیجه گیری

متالورژی دانشکده فنی که در انجام مراحل گوناگون این پروژه نقش بسزایی داشته‌اند سپاسگزاری می‌شود. همچنین از آقای مهندس محمد علی عسگری برای در اختیار گذاشتن نتایج تحقیقاتشان تشکر و قدردانی می‌شود.

- طراحی مخزنهای تحت فشار به کمک چقرمگی شکست هنگامی که دستیابی به حداقل وزن مخزن در نظر باشد و به ویژه وقتی فشار، ناگهانی اعمال شود یک روش طراحی بهینه است.

- دقت در نتایج به دست آمده در طراحی منوط به دقت در محاسبه K_{IC} است.

- روشهای تخمینی محاسبه K_{IC} با تقریب مناسب را می‌توان هنگامی که امکان اندازه‌گیری دقیق و مستقیم، عملی نباشد با توجه به نوع ماده و سرعت بار زنش، به کاربرد.

نتایج استفاده از روشهای تخمینی برای محاسبه K_{IC} به کمک انرژی شکست در آزمایش ضربه، هماهنگی خوبی با نتایج حاصل از اندازه‌گیری لبه شکست نشان می‌دهد.

سپاسگزاری

بدین وسیله از مراکز وابسته به وزارت دفاع و جهاد سازندگی و مسئولان آزمایشگاههای گروه مهندسی

فهرست منابع :

- 1 - J.M. Barsom and S.t. Rolfe , Eng . Fract . Mech, 2 (4), 1971 p 341
- 2 - J.M. Barsom and J.V. Pellegrino , Eng . Fract, Mech, 5(2), 1973, P 209
- 3 - E.A. Lange and F.J. Loss, ASTM STP 466 , 1970, p 241.
- 4 - J.M. Barsom and S.T. Rolf, ASTM STP 466 , 1970, p 281
- 5 - S.T. Rolfe and S.R. Novak ASTM STP 463 , 1970, P 124
- 6 - R.H. Sailors and H.T. Corten ASTM STP 514, Part II, 1972 P 164
- 7 - J.M. Barsom , Eng .Fract Mech. 7, 1975, P 605
- 8 - R.Roberts and C. Newton, Bulletin 265, Welding Research council , Feb 1981
- 9 - M. Mirzaie , MS dissertation , 1986, Department of Metalluragy Faculty of Engineering , Tehran University.
- 10 - Deformation and fracture mechanics of Engineering Materials, R.W. Herbzberg, John Wiley & sons 1983 p 281 ,P 18
- 11 - G.T. Hahn and A.R. Rosen field ASTM STP 432, 1968, P.5
- 12 - AS Ref , 10 , P 300
- 13 - G.R. Irwin , NRL Repons 6598. Nov 21 , 1967
- 14 - M. Assgari MS dissertation 1991 , Department of Metallurgy, Faculty of Engineering Tehran University.

