نشریه بین‌المللی علوم مهندسی، شماره ۴، جلد۱۷، پاییز ۱۳۸۵، صفحه ۱۶۰- ۱۴۹
دانشگاه علم و صنعت ایران

مطالعه تحلیلی و تجربی فرایند جوش‌کاری و شکل‌دهی انفجاری صفحات غیر هم‌جنس

حسین بیسادی، غلامحسین لیاقت، ابوالفضل درویزه و حسن مسلمی نائینی

چکیده: فرآیند جوش‌کاری و شکل‌دهی انفجاری دو صفحه نامتجانس که جوش‌کاری در حالت جامد به همراه تغییر شکل پلاستیکی هم‌زمان می‌باشد مورد بررسی تحلیلی و تجربی قرار گرفته است. مدل تحلیلی ارائه شده با توجه به اصل بقای انرژی و رعایت شرایط تکیه‌گاهی و لحاظ نمودن مقادیر بحرانی ضربه و تغییر شکل تدوین شده است. صفحه‌های نامتجانس با روشی شبیه تحلیل تیرهای مرکب به صفحه متجانس تبدیل و سپس با جایگزین کردن نیروی معادل استاتیکی به‌جای بارهای دینامیکی حاصل از انفجار، ماکزیمم تغییر شکل ورق و احتمال گسیختگی با توجه به خواص مکانیکی صفحه‌ها پیش‌بینی می‌شود. با طراحی و انجام آزمایش‌های لازم عوامل تعیین‌کننده‌ای نظیر سرعت که برای محاسبه ضربه ضروری می‌باشد معین و جوش‌پذیری صفحات نامتجانس با توجه به پنجره جوش‌کاری تحقیق و میزان تغییر شکل تجربی با مقدار تحلیلی مقایسه گردیده و تشابه نسبتاً خوبی مشاهده شده است.

واژه‌های کلیدی: جوش‌کاری، شکل‌دهی، مواد منفجره، صفحه های غیر هم‌جنس.

۱. مقدمه

استفاده از انرژی اضافی که معمولاً در جوش‌کاری انفجاری بعد از اتمام عملیات باقی می‌ماند وکم کردن مراحل ساخت مصنوعاتی که نیاز به هر دو کار شکل‌دهی و جوش‌کاری دارند، انگیزه ارائه کار حاضر بوده است که با ملاحظه سوابق و تجربیاتی نظیر کنترل تجربی و تحلیلی چروکیدگی [۱]، شبیه‌سازی تغییر شکل لوله‌ها در عملیات جوش‌کاری انفجاری با نرخ بالا [2]، معرفی فرایند برش‌کاری و سوراخ‌کاری انفجاری [۳]، تحلیل بارگذاری دینامیکی [۴] شکل گرفته است.

در قرن اخیر تلاش‌های بسیار زیادی در زمینهٔ جوش‌کاری به‌عمل آمده است. روش‌های تازه‌ای ارائه شده است که با استفاده از آن‌ها، قطعات بدون آنکه نیاز به ذوب داشته باشند در اکثر موارد حتی با کیفیت خیلی بالاتر از جوش‌کاری ذوبی، به یکدیگر متصل می‌شوند. این روش‌ها به جوش‌کاری در فاز جامد موسوم هستنند، که از آن جمله می‌توان، جوش‌کاری سرد (Cold Welding)، جوش‌کاری اصطکاکی (Friction Welding)، جوش‌کاری آلتراسونیک (Ultrasonic Welding)، جوش‌کاری نفوذی (Diffusion Welding) و جوش‌کاری انفجاری (Explosive Welding) را نام برد.

در این روش‌ها به‌خاطر اینکه قطعات ذوب نمی‌شوند، تغییرات متالورژیکی کم‌تری در آن‌ها به‌وجود می‌آید. از مزیت مهم روش جوش‌کاری انفجاری اینست که جوش‌کاری فلزات غیر هم‌جنس مانند تیتانیم به فولاد، آلومینیوم به مس و... که به‌وسیلهٔ روش‌های دیگر مشکل و گاهی غیر ممکن است را با این روش به سهولت می‌توان انجام داد.

درک جوش‌کاری انفجاری به مسائل مرتبط بسیاری از جمله مواد منفجره، تأثیر مواد منفجره بر سطح فلزی که با آن‌ها در تماسند، رفتار فلزات در سرعت بالا تحت اثر ضربه و ... بستگی دارد. پوشش‌دهی انفجاری یکی از فرآیندهای اصلی در صنعت پوشش-دهی فلزات است.

تولید صفحات مرکب برای استفاده در مخازن تحت فشار، مخازن شیمیایی و نیز صفحه لوله‌ها (tube plates) در مبدل‌های حرارتی و انجام می‌گیرد. این موارد کاربرد زیادی در صنایع دارند از آنجا که

نسخه اصلی مقاله در تاریخ ۱۳۸۳/۱۱/۱۹ واصل، و پس از بازنگری‌های لازم، در تاریخ ۱۳۸۴/۲/۱۷ به تصویب نهایی رسیده است.

دکتر حسین بیسادی، استادیار دانشکده مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، Bisadi@iust.ac.ir
دکتر غلامحسین لیاقت، استاد دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس تهران
دکتر ابوالفضل درویزه، استاد دانشکده مکانیک، دانشگاه گیلان
دکتر حسن مسلمی نائینی، دانشیار دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس تهران

Archive of SID
www.SID.ir

به‌عنوان مثال استفاده از فولاد یا تیتانیم به تنهایی در مخازن از لحاظ مقاومت و خواص مکانیکی و هزینه مقرون به‌صرفه نمی‌باشد، لذا پوششی از تیتانیم بر روی صفحات فولادی به‌وسیلهٔ جوش‌کاری انفجاری قرار داده می‌شود که در ساخت مخازن کاربرد بسیار فراوانی دارد [5,6,7].

شکل‌دهی با استفاده از نیروهای دینامیکی در مقایسه با نیروهای استاتیکی مزایای قابل توجهی دارد. صرفه اقتصادی، امکان انجام عملیاتی که دستگاه‌های متداول قادر به انجام آن نیستند (انحنائی با قطر دوازده متر توسط مهندسین روسی)، ساخت نمونه یا محصولات با تعداد کم و... از جمله این مزایا هستند. می‌توان ویژگی‌های فرآیند شکل‌دهی انفجاری را به قرار زیر دسته‌بندی نمود:

۱- نرخ کرنش بالا
۲- بارگذاری آنی
۳- تغییر شکل پلاستیکی بزرگ

تحلیل دقیق فرآیند مستلزم در نظرگیری توام هر سه مقوله فوق می‌باشد و این امری بسیار دشوار می‌باشد.

محققین تغییر شکل سریع غشاءهای الاستیک-ویسکو پلاستیک نازک و کاملا انعطاف‌پذیر را مورد ملاحظه قرار داده‌اند. اغلب محققان، بالاخص آن‌هایی که مساله را از دیدگاه نظری مورد مطالعه قرار می‌دهند توجه خود را معطوف به غشاءهای مدور ساخته‌اند. شکل‌دهی آزاد ورق‌ها عملیات پیچیده‌ای است. شکل نهایی ورق به متغیرهای متعددی بستگی دارد:

ارتفاع هیدرواستاتیک (فاصله سطح آب تا ماده منفجره در انفجارهای زیر آب)، فاصله استقرار خرج، نوع و مقدار ماده منفجره، انعکاس موج شوک از دیواره‌های مخزن شکل‌دهی، شکل ماده منفجره، نوع محیط واسط و .... [۸ و ۹]. فقط یک کار تجربی در خصوص هم‌زمانی عملیات جوش‌کاری و شکل‌دهی با دیدگاه میکروسکپی موجود می‌باشد [10]. انجام این کار با ارائه تحلیل مکانیکی تحقیق جدیدی می‌باشد که هدف این مقاله است.

۲. روش تحلیل

روش تقریبی ارائه شده برای پیش‌بینی تغییر شکل و گسیختگی صفحات نامتجانس کار سخت، تحت اثر بارهای دینامیکی حاصل از انفجار با دو فرض زیر شکل می‌گیرد.

الف: رفتار صفحه‌ها در رابطه با تنش، کرنش تابع قانون توانی می‌باشد.

ب: تغییر شکل صفحه در امتداد قائم از تابع شکلی مشخصی تبعییت می‌نماید.

۲-۱. سفتی خمشی صفحه دو لایه غیر هم‌جنس

صفحه‌های دو جنسی کاربری فراوانی در صنایع مختلف دارند که برای ساده شدن تحلیل‌های مهندسی به روش زیر تبدیل به یک جنس همگن شده و مانند مصالح مهندسی دیگر مورد استفاده قرار می‌گیرد. ابتدا نظیر تیرهای مرکب با استفاده از تغییر سطح مقطع با نسبت سفتی خمشی دو صفحه، سطح معادل محاسبه شکل۱ و صفحه همگن یک جنس شده حاصل می‌شود سپس تحلیل‌ها و روابط مربوطه ارائه می‌گردد.

صلبیت خمشی[1] (سفتی خمشی) ورق از رابطه: $D=\frac{EH^3}{12(1-\nu^2)}$

به‌دست می‌آید [۱۱]. این مقدار به اندازه $\frac{1}{1-\nu^2}$ یعنی حدود ده درصد از سفتی خمشی تیر بیش‌تر است. H ضخامت صفحه می‌باشد.

ν نسبت یا ضریب پوآسون، برای تفکیک دو صفحه از زیرنویس ۱ و ۲ استفاده شده،

D' نسبت سفتی خمشی صفحه پایه به صفحه پرنده:

$$D'=\frac{E_2H_2^3(1-\nu_1^2)}{E_1H_1^3(1-\nu_2^2)}$$

I_e ممان اینرسی سطح معادل:

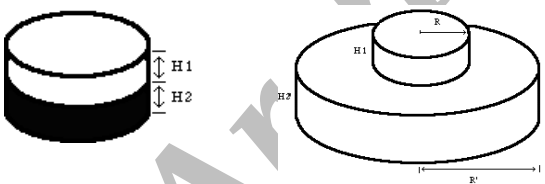
$$I_e=\frac{1}{12}D'H_2^3+D'H_2(\overline{Z}-\frac{H_2}{2})^2+\frac{1}{12}H_1^3+H_1(\frac{H_1}{2}+H_2-\overline{Z})^2$$

$\overline{Z}$ فاصله تار خنثی از دورترین تار در قسمت کششی.

D_e سفتی خمشی معادل:

$$D_e=\frac{E_1I_e}{(1-\nu^2)} \qquad (۱)$$

R' شعاع صفحه معادل صفحه اصلی تبدیل شده و R شعاع اولیه دو صفحه: $R'=D'R$



شکل۱. صفحه دایره‌ای دو جنسی و معادل یک جنسی آن

روابط گشتاورها و نیروها برای واحد طول صفحه نوشته می‌شوند و ارتباط آن با روابط تنش به شکل ذیل خواهند بود. H ضخامت کل و برابر جمع ضخامت‌های دو جنس مختلف می‌باشد.

$$\sigma_x=\frac{12M_xZ}{H^3},\quad \sigma_y=\frac{12M_yZ}{H^3},\quad \tau_{xy}=\frac{12M_{xy}Z}{H^3} \qquad (۲)$$

Z مقدار متغیری است که فاصله هر تار را از تار خنثی نشان می‌دهد.

σ_x ، σ_y ، τ_{xy} تنش برشی و تنش‌های نرمال در مختصات کارتزین.

[1] Flexural Rigidity

Archive of SID

www.SID.ir

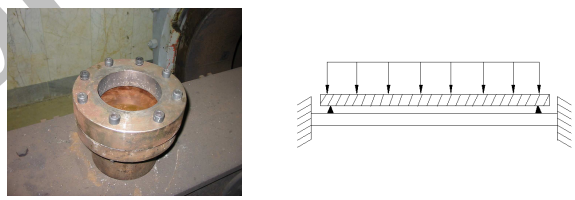
M_x ، M_y ، M_{xy} گشتاورهای خمشی و پیچشی در واحد طول در مختصات کارتزین.

همان‌طورکه ملاحظه می‌شود، تنش‌ها به ضخامت ورق‌ها بستگی دارند که به‌منظور رعایت آن‌ها و عدم تأثیر در محل سطح خنثی تغییر در بعد دیگر انجام شده است. واضح است که در این حالت مبنا وسط ضخامت ورق نبوده بلکه مرکز شکل معادل به‌وجود آمده مبنای اندازه‌گیری خواهد بود و فاصله z که در امتداد ضخامت صفحه می‌باشد از آن‌جا تعیین می‌شود.

۲-۲. تحلیل شبه استاتیکی صفحه دایره‌ای با تکیه‌گاه گیردار

در توجیه و بررسی اتصال و شکل‌پذیری صفحه‌های نامتجانس از تشابه موجود فی‌مابین صفحه‌ها و تیرها استفاده شده و با روشی شبیه تحلیل تیرهای مرکب، صفحه نامتجانس تبدیل به یک صفحه معادل متجانس و با تبدیل بار ضربه‌ای به یک بار استاتیکی در مرکز صفحه روابط لازم ضمن به‌کارگیری روش انرژی استخراج گردیده است.

با استفاده از قالب، پشت بند قالب، پیچ‌ها و روبند قالب، تکیه‌گاه گیردار طراحی و به‌کار گرفته شده است (شکل ۲).



شکل ۲. تکیه‌گاه گیردار

اگر جرم صفحه اول (پرنده) m_1 و جرم صفحه دوم(مبنا) m_2 باشد، جرم صفحه مرکب

$$m = m_1 + m_2 \qquad (۳)$$

با توجه به اصل بقای اندازه حرکت داریم [12,13,14]:

$$v_0 = \frac{I}{m} \qquad (۴)$$

$$E_k = \frac{1}{2} m v_0^2 = \frac{I^2}{2m} \qquad (۵)$$

v_0 سرعت اولیه ضربه، m جرم صفحه، E_k انرژی جنبشی حاصل از ضربه I به صفحه.

فرض اول: پروفیل جابجائی در امتداد قائم صفحه دایره‌ای در اثر ضربه ورودی تا حد گسیختگی اولیه (گسیختگی کششی) با استفاده از رابطه ذیل به‌دست آید [14]:

$$w = w_0[1-(\frac{r}{R})^2] \qquad (۶)$$

w جابجائی (جابجائی در امتداد قائم نقاط مختلف ورق وقتی صفحه افقی می‌باشد)، w_0 جابجائی مرکز صفحه.

r مختصه شعاعی متغیر نقاط مختلف صفحه، R شعاع صفحه.

همان‌طور که در شکل۱ نشان داده شده است می‌بایست مقدار بیشتری از جنس صفحه ضعیف‌تر به‌جای فلز قوی‌تر به‌کار رود تا همان نتیجه حاصل شود.

با استفاده ازمعادله (۶) انحناء شعاعی و مماسی (محیطی) دو قسمت ورق همگن شده جداگانه محاسبه می‌شود.

$$\begin{cases} (\kappa_r)_1 = -\frac{\partial^2 w}{\partial r^2} = \frac{2w_0}{R^2} \ , \ (\kappa_r)_2 = -\frac{\partial^2 w}{\partial w^2} = \frac{2w_0}{R'^2} = \frac{2w_0}{(D'R)^2} \\ (\kappa_\theta)_1 = -\frac{1}{r}\frac{\partial w}{\partial r} = \frac{2w_0}{R^2} \ , \ (\kappa_\theta)_2 = \frac{2w_0}{R'^2} = \frac{2w_0}{(D'R)^2} \end{cases}$$

$$\varepsilon_r = \varepsilon_m + \varepsilon_{rb} = \frac{1}{2}(\frac{\partial w}{\partial r})^2 + z\kappa_r$$

$$\varepsilon_\theta = \varepsilon_{\theta b} = z\kappa_\theta \qquad (۷)$$

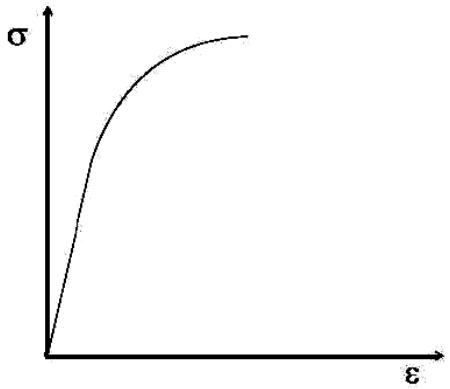
$$\varepsilon_m = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial w}{\partial r}\right)^2 = \frac{2w_0^2}{R^4} r^2$$

κ_r, κ_θ انحناء صفحه در جهت‌های مماسی (محیطی) و شعاعی و زیرنویس‌های ۱ و ۲ مشخص‌کننده صفحه پرنده و مبنا می‌باشند.

وقتی‌که جابجائی در صفحه قابل صرف‌نظر کردن می‌باشد $\varepsilon_{\theta b}, \varepsilon_{rb}, \varepsilon_m$ به‌ترتیب کرنش غشائی شعاعی-کرنش خمشی شعاعی و کرنش خمشی محیطی می‌باشند. z مختصه عرضی (در امتداد قائم) می‌باشد.

فرض دوم: برای منظور کردن کرنش سختی (کارسختی) صفحه، رابطه تنش-کرنش مطابق شکل ۳ تابع قانون توانی زیر می‌باشد:

$$\sigma = \sigma_u(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_u})^n = \sigma_\circ \varepsilon^n \qquad (۸)$$



شکل ۳. نمودار تنش-کرنش

$\sigma_\circ = \frac{\sigma_\upsilon}{\varepsilon_u^n}$ یک ثابت است و ε_u, σ_u تنش و کرنش نهایی کششی می‌باشند.

Archive of SID

www.SID.ir

با استفاده از دو فرض فوق گشتاورهای خمشی شعاعی (M_r) و محیطی (M_θ) در واحد طول به‌روش ذیل محاسبه می‌شود [۱۱]، [14].

$$M_r = \int \sigma_0 (zk_r)^n z dz \qquad (۹)$$

$$M_r = D' \int_0^{\bar{z}} \sigma_0 (zk_r)^n z dz + D' \int_0^{H_2-\bar{z}} \sigma_0 (zk_r)^n z dz + \int_{H_2-\bar{z}}^{H_1+H_2-\bar{z}} \sigma_r (zk_r)^n z dz$$

$$M_r = \frac{2^n \sigma_0 w_0^n}{(n+2)R^{2n}} \left[\frac{(\bar{z})^{n+2}}{D'^{2n-1}} + \frac{(H_2-\bar{z})^{n+2}}{(D')^{2n-1}} + (H_1)^{n+2} \right] = M_\theta$$

مقدار گشتاور خمشی محیطی نیز شبیه عملیات فوق می‌باشد.

و مشابه آن نیروی غشائی شعاعی در واحد طول (N_r) برابر است با:

$$N_r = \int_0^H \sigma_0 (\varepsilon_m)^n dz \quad , \quad H = H_1 + H_2$$

$$N_r = 2^n \sigma_\circ (\frac{w_\circ}{R})^{2n} (\frac{r}{R})^{2n} \left[\frac{H_2}{(D')^{4n-1}} + H_1 \right] \qquad (۱۰)$$

تنش برشی عرضی در تکیه گاه برابر مقدار:

$$\tau = \tau_u (\frac{\gamma}{\gamma_c})^n \qquad (۱۱)$$

و یا نیروی برشی معادل آن:

$$F_S = F_U (\frac{\Delta}{\Delta_C})^n \qquad (۱۲)$$

$F_u (F_u = 2\pi\sigma_U R \frac{H}{\sqrt{3}})$ نیروی برشی بحرانی، τ_u تنش برش بحرانی و F_S نیروی برشی عرضی می‌باشند.

Δ لغزش برشی و Δ_C لغزش برشی بحرانی می‌باشند [14].

هنگامی‌که در تکیه‌گاه شکست برشی به‌وجود می‌آید، اگر از معیار تسلیم فون میسز استفاده شود مقدار لغزش برشی برابر با:

$$\Delta_C = \frac{\sqrt{3}}{8} \gamma_C H \quad , \Delta = \frac{\sqrt{3}}{8} \gamma H \qquad (۱۳)$$

که در آن γ_c, γ کرنش برشی و کرنش برشی بحرانی در لغزش برشی داخلی می‌باشند.

تحلیل کار سختی صفحه گیردار که تحت اثر بار ناگهانی با توزیع یکنواخت می‌باشد نیز با همین روش قابل انجام است [13,14].

با استفاده از اصل بقای انرژی، تغییر شکل حاصل از عوامل دینامیکی، معادل تغییر شکل نیروی استاتیکی می‌گردد.

$$F_e \delta w_t = F_s \delta \Delta + 2\pi\delta [\int_\circ^R (M_r K_r + M_\theta k_\theta + N_r \varepsilon_m) r dr] \qquad (۱۴)$$

در حالی‌که $F_e = \frac{\delta E_k}{\delta w_t}$ نیروی استاتیکی معادل بوده و $w_t = \Delta + w_0$ جابجائی عرضی کل که شامل لغزش برشی در تکیه‌گاه نیز می‌باشد. بنابراین مسئله صفحه دایره‌ای گیردار تحت اثر بار ناگهانی (ضربه‌ای) تبدیل می‌شود به صفحه‌ای معادل با یک نیروی استاتیکی در مرکز آن، با جاگذاری در معادله آخر و مرتب کردن آن داریم:

$$F_e \delta w_0 = \frac{2^{n+2}(n+1)\pi q_0}{(n+2)R^{2n}} \left[\frac{(\bar{z})^{n+2} + (H_2-\bar{z})^{n+2}}{(D')^{2n-1}} + (H_1)^{n+2} \right] w_0^{n+1} \delta w \qquad (۱۵)$$

$$+ \frac{2^{n+1}(2n+1)\pi q_0}{(n+2)R^{2n}} \left[\frac{H_2}{(D')^{2n-1}} + H_1 \right] w_0^{2n+2} \delta w$$

$$F_e = \frac{2^{n+2}(n+1)\pi\sigma_\circ}{(n+2)R^{2n}} \left[\frac{(\bar{z})^{n+2} + (H_2-\bar{z})^{n+2}}{(D')^{2n-1}} + (H_1)^{n+2} \right] (w_0)^n \qquad (۱۶)$$

$$+ \frac{2^{n+2}(n+1)\pi\sigma_0}{(n+2)R^{2n}} \left[\frac{H_2}{(D')^{2n-1}} + H_1 \right] (w_0)^{2n+1}$$

تنها نیروی برشی همان نیروی معادل استاتیکی F_e می‌باشد، لذا:

$$F_e = F_S = F_U (\frac{\Delta}{\Delta_C})^n$$

پس از استفاده از $w_t = w_\circ + \Delta$ و ترکیب با رابطه زیر، خواهیم داشت:

$$\Delta = (\frac{F_e}{F_u})^{1/n} \Delta_c \qquad (۱۷)$$

$$w_t = w_\circ + (\frac{F_e}{F_u})^{1/n} \Delta_c$$

$$F_e w_0 = \frac{I^2}{2m} - (n+1)E_s, \sigma_0 = \frac{\sigma_u}{\varepsilon_u^n}$$

$$\frac{2^{n+2}(n+1)\pi\sigma_u}{(n+2)R^{2n}\varepsilon_u^n} \times \left[\frac{(\bar{z})^{n+2} + (H_2-\bar{z})^{n+2}}{(D')^{2n-1}} + (H_1)^{n+2} \right] (w_0)^{n+1} + \qquad (۱۸)$$

$$\frac{2^{n+2}(n+1)\pi\sigma_u}{(n+2)\varepsilon_u^n R^{2n}} \left[\frac{H_2}{(D')^{2n-1}} + H_1 \right] (w_0)^{2(n+1)} =$$

$$\frac{I^2}{2(\rho_1 H_1 + \rho_2 H_2)\pi R^2} - (n+1)E_s$$

w_0 که به‌وسیله روابط بالا به‌دست می‌آید جابجائی نیروی معادل استاتیکی صفحه دایره‌ای شکل کار سخت شده تحت اثر بار ضربه‌ای (ناگهانی) گسترده یکنواخت می‌باشد

$$w_t = w_P = w_0 + \Delta \qquad (۱۹)$$

w_P جابجائی عرضی مجاز حداکثر که شامل Δ در تکیه‌گاه‌ها نیز می‌گردد.

انرژی تلف شده در تغییر شکل برشی تکیه گاه:

$$E_s = E_{CS} (\frac{F_e}{F_u})^{\frac{n+1}{n}} \qquad (۲۰)$$

E_{CS} مقدار بحرانی E_S می‌باشد که باعث شکست صفحه می‌گردد.

$$E_{CS} = F_u \frac{\Delta_c}{n+1} \qquad (۲۱)$$

Archive of SID

www.SID.ir

ε_{of} را می‌توان کرنش گسیختگی مؤثر جنس صفحه با تأثیر برش عرضی منظور نمود [13,14].

$$\varepsilon_{of} = 2\times(\frac{w_{of}}{R})^2 \qquad (۲۲)$$

w_{of} جابجائی عرضی بحرانی هنگام گسیختگی صفحه که با استفاده از ε_f کرنش گسیختگی یک محوری محاسبه خواهد شد.

۳-۲. کرنش گسیختگی مؤثر

برای صفحه گیردار دایره‌ای تحت اثر بار گسترده ضربه‌ای، فرض معقول زیر پذیرفته است [15,14]:

$$\varepsilon_z = -(\varepsilon_r + \varepsilon_\theta),\ \gamma_{rz} \neq 0,\ \gamma_{z\theta} = \gamma_{\theta r} = 0$$

مقدار کرنش مؤثر برابر با:

$$\varepsilon_e^2 = \frac{2}{9}\left[(\varepsilon_r-\varepsilon_\theta)^2+(\varepsilon_\theta-\varepsilon_z)^2+(\varepsilon_z-\varepsilon_r)^2+\frac{3}{2}(\gamma_{rz}^2+\gamma_{z\theta}^2+\gamma_{\theta r}^2)\right]$$

پس از جاگذاری مقادیر فوق:

$$\varepsilon_e^2 = \frac{4}{3}\left[\varepsilon_r^2+\varepsilon_\theta^2+\varepsilon_r\varepsilon_\theta\right]+\frac{\gamma_{rz}^2}{3}$$

$$\varepsilon_e^2 = 16\left[\frac{w_0^4}{3R^8}(r)^8+\frac{w_0^3}{R^6}(r)^4+\frac{w_0^2(\bar{Z})^2}{R^4}\right]+\frac{\gamma^2}{3}$$

چون

$$(\frac{\gamma}{\gamma_c})^n = \frac{\tau}{\tau_u} = \frac{F_s}{F_u}, F_s = F_e, F_u = 2\pi\sigma_u RH\times\frac{1}{\sqrt{3}}$$

$$\gamma = \gamma_c\times\left(\frac{F_e}{F_u}\right)^{\frac{1}{n}}$$

$$\varepsilon_e^2 = 16\left[\frac{w_0^4}{3R^8}(r)^8+\frac{w_0^3}{R^6}(r)^4+\frac{w_0^2(\bar{Z})^2}{R^4}\right]+\frac{\gamma_C^2}{3}\left[\frac{\sqrt{3}F_e}{2\pi\sigma_u RH}\right]^{\frac{2}{n}}$$

لازم به ذکر است که اگر به‌جای $\bar{Z}$ مقدار $(H-\bar{Z})$ را قرار دهیم کرنش مؤثر در ناحیه فشاری به‌دست می‌آید.

اگر کرنش مؤثر برابر کرنش گسیختگی یک محوری جنس صفحه شود، صفحه گسیخته شده و در این صورت مقدار $w_0 = w_{of}$ خواهد شد.

$$\varepsilon_f^2 = 16\left[\frac{w_{of}^4}{3R^8}(r)^8+\frac{w_{of}^3}{R^6}(r)^4+\frac{w_{of}^2(\bar{Z})^2}{R^4}\right]+\frac{\gamma_C^2}{3}\left[\frac{\sqrt{3}F_e}{2\pi\sigma_u RH}\right]^{\frac{2}{n}} \qquad (۲۳)$$

قبلاً مقدار F_e محاسبه شده، لذا با توجه به اینکه σ_u تنش نهائی جنس با استحکام کمتر می‌باشد مقدار w_{of} به‌عنوان معیاری برای گسیختگی صفحه به‌دست خواهد آمد.

۴-۲. تحلیل شبه استاتیکی صفحه دایره‌ای با تکیه‌گاه آزاد

به‌منظور ارضاء شرایط مرزی صفحه روی تکیه‌گاه آزاد شکل ۴ تغییر شکل صفحه را تابع معادله ذیل فرض می‌کنیم و مشابه روش فوق عملیات را انجام می‌دهیم [16].

$$w = \frac{w_0}{2}\left[2-\frac{r}{R}-\left(\frac{r}{R}\right)^2\right] \qquad (۲۴)$$

$$\left(\frac{\partial w}{\partial r}\right)^2 = \frac{w_0^2}{4R^2}\left(1+\frac{2r}{R}\right)^2$$

$$\frac{\partial^2 w}{\partial r^2} = -\frac{w_0}{R^2}$$ و

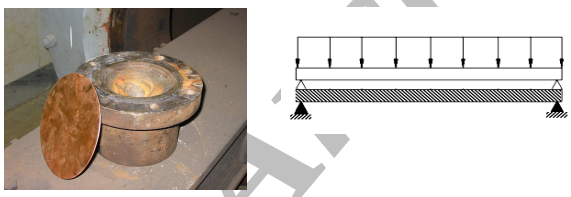
$$\begin{cases} k_r = -\dfrac{\partial^2 w}{\partial r^2} = \dfrac{w_0}{R^2} \\ k_\theta = -\dfrac{1}{r}\dfrac{\partial w}{\partial r} = \dfrac{1}{r}\left[\dfrac{w_0}{2R}\left(1+\dfrac{2r}{R}\right)\right] \end{cases}$$

$$\begin{cases} \varepsilon_r = \varepsilon_{rb} = +zk_r = \dfrac{w_0^2}{8R^2}\left(1+\dfrac{2r}{R}\right)^2+\dfrac{w_0}{R^2}z \\ \varepsilon_\theta = \varepsilon_{\theta b} = zk_\theta = \dfrac{z}{r}\left[\dfrac{w_0}{2R}\left(1+\dfrac{2r}{R}\right)\right] \end{cases}$$

$$M_r = \int\sigma_0(zk_r)^n zdz \qquad (۲۵)$$

$$M_r = D'\int_0^{\bar{z}}\sigma_0(zk_r)^n zdz + D'\int_0^{H_2-\bar{z}}\sigma_0(zk_r)^n zdz + \int_{H_2-\bar{z}}^{H_1+H_2-\bar{z}}\sigma_0(zk_r)^n zdz$$

$$M_r = \frac{\sigma_0 w_0^n}{(n+2)R^{2n}}\left[\frac{(\bar{z})^{n+2}}{(D')^{2n-1}}+\frac{(H_2-\bar{z})^{n+2}}{(D')^{2n-1}}+(H_1)^{n+2}\right]$$



شکل ۴. تکیه‌گاه آزاد

مقدار گشتاور خمشی محیطی نیز شبیه عملیات فوق به‌دست می‌آید.

$$M_\theta = \int\sigma_\theta zdz$$

Archive of SID

www.SID.ir

$$M_\theta = D'\int_0^{\bar{z}} \sigma_0 (zk_\theta)^n z dz + D'\int_0^{H_2-\bar{z}} \sigma_0 (zk_\theta)^n z dz + \int_{H_2-\bar{z}}^{H_1+H_2-\bar{z}} \sigma_0 (zk_\theta)^n z dz \quad (۲۶)$$

$$M_\theta = \frac{\sigma_0 w_0^n D'}{2(n+2)r^{2n}}\left(1+\frac{2r}{D'R}n\right)\left[(\bar{z})^{n+2}+(H_2-\bar{z})^{n+2}+(H_1)^{n+2}\right]$$

و مشابه آن نیروی غشائی شعاعی در واحد طول (N_r) محاسبه می‌گردد.

$$N_r = \int_0^H \sigma_0 (\varepsilon_m)^n dz \quad , \quad H = H_1 + H_2$$

$$N_r = D'\int_0^{H_2} \sigma_0 \left[\frac{1}{8}\left(\frac{w_0}{D'R}\right)^2\left(1+\frac{2r}{D'R}\right)^2\right]^n dz + \int_{H_2-\bar{z}}^{H_1+H_2-\bar{z}} \sigma_0 \left[\frac{w_0^2}{8R^4}\left(1+\frac{2r}{R}\right)^2\right]^n dz$$

$$N_r = \frac{\sigma_0 w_0^{2n}}{2^{3n}R^{2n}}\left(1+\frac{2r}{R}\right)^{2n}\left[\frac{H_2}{(D')^{2n-1}}+H_1\right] \quad (۲۷)$$

بنابراین مشابه حالت قبلی مسئله صفحه دایره‌ای با تکیه‌گاه آزاد تحت اثر بار ناگهانی (ضربه‌ای) تبدیل می‌شود به صفحه‌ای معادل با یک نیروی استاتیکی در مرکز آن، با جاگذاری در معادله آخر و مرتب کردن آن:

$$F_e = \frac{\pi(n+1)\sigma_0}{(n+2)R^{2n}}\left[\frac{(\bar{Z})^{n+2}}{(D')^{2n-1}}+\frac{(H_2-\bar{Z})^{n+2}}{(D')^{2n-1}}+(H_1)^{n+2}\right]\times \left[1+\frac{D'}{2(1-2n)}+\frac{(1+n)}{2(1-n)}+\frac{(2n)}{D'(3-2n)}\right]w_0^n + \frac{(n+1)\pi\sigma_0}{3\times 2^{3n+2}R^{2n}}\left\{\left[3+2^{n+1}(n+1)\left[\frac{H_2}{(D')^{2n-1}}+H_1\right]\right\}(w_0)^{2n+1}$$

$$F_e w_0 = \frac{I^2}{2m} - (n+1)E_s, \sigma_0 = \frac{\sigma_u}{\varepsilon_u^n}$$

$$\frac{(n+1)\pi\sigma_u}{(n+2)R^{2n}\varepsilon_u^n}\left[\frac{(\bar{z})^{n+2}+(H_2-\bar{z})^{n+2}}{(D')^{2n-1}}+(H_1)^{n+2}\right]\times \left[1+\frac{D'}{2(1-2n)}+\frac{(1+n)}{2(1-n)}+\frac{(2n)}{D'(3-2n)}\right](w_0)^{n+1} + \frac{(n+1)\pi\sigma_u}{3\times 2^{3n+2}\varepsilon_u^n R^{2n}}\left\{\left[3+2^{n+1}(n+1)\right]\left[\frac{H_2}{(D')^{2n-1}}+H_1\right]\right\}(w_0)^{2(n+1)} = \frac{I^2}{2(\rho_1 H_1+\rho_2 H_2)\pi R^2} - (n+1) \quad (۲۸)$$

۳. آزمایش‌های عملی

آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق دو هدف را مورد توجه داشته است. اولی تعیین محدودهٔ جوش‌های قابل قبول برای جنس‌های متفاوت و دومی به‌دست آوردن سرعت صفحه پرنده که با استفاده از آن تعیین میزان ضربه امکان‌پذیر گردد.

۳-۱. تجهیزات مورد استفاده

الف) دستگاه موجود در آزمایشگاه مکانیک انفجار دانشگاه تربیت مدرس که همراه با ملحقات قادر است انفجار تا حدود نیم کیلو TNT را تحمل نموده و انواع آزمایش‌های انفجاری (شکل‌دهی، جوش‌کاری، سوراخ‌کاری، حکاکی و...) در آن قابل انجام است شکل ۵.

ب) وسایل اندازه‌گیری و برش نظیر خط‌کش فلزی، کولیس، قیچی آهن‌بر، سنگ برش و قیچی معمولی.

ج) اسیلوسکوپ آنالوگ/دیجیتال Hamey با مشخصات Hm 15.7 , 150 MHZ

د) وسایل الکتریکی شامل هویه، ولت متر، سیم چین و...

شکل۵. دستگاه شکل‌دهی و جوش‌کاری انفجاری

۳-۲. آزمایش‌های انجام شده

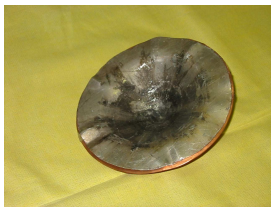
با توجه به تسهیلات فراهم شده حدود پنجاه آزمایش با استفاده از سه نوع مواد منفجره دینامیت، TNT، C_4 و به‌کارگیری صفحه‌های ارزان و فراوان فولاد، آلومینیوم و مس انجام شده، در این آزمایش‌ها دو نوع تکیه‌گاه مورد توجه بوده است:

الف) تکیه‌گاه ساده

در این حالت صفحه پایه بدون هیچ‌گونه مهاری روی قالب و پشت‌بند قالب قرار گرفته و صفحه پرنده به‌همراه سپر حفاظتی مقوائی که مواد منفجره رویش توزیع شده با استفاده از یونولیت برای ایجاد فاصله لازم قرار گرفته و پس از انفجار صفحه مرکبی نظیر شکل (۶-آ) که از اتصال آلومینیوم به مس، بدون هیچ عمل تکمیلی حاصل می‌گردد.

Archive of SID

www.SID.ir

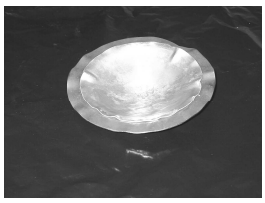


شکل ۶-آ. اتصال آلومینیوم به مس در تکیه گاه آزاد

ب) تکیه‌گاه با لبه گیردار

دور تا دور لبه صفحه پایه بین دو قطعه روبند و پشت‌بند قالب قرار گرفته و با هشت عدد پیچ و مهره محکم شده سپس صفحه پرنده که قطر کوچک‌تری از صفحه پایه دارد به‌همراه سپر حفاظتی و مواد منفجره با فاصله ایجاد شده توسط یونولیت روی آن قرار گرفته و پس از انفجار دو صفحه به‌هم متصل و به شکل قالب زیرشان در می‌آیند، شکل (۶-ب) صفحه مرکب آلومینیومی فولادی بدون هیچ عملیات اضافی تکمیلی نظیر برش‌کاری را نشان می‌دهد.

صفحه پرنده در هر دو تکیه گاه آزاد و گیر دار بدون هیچ قیدی روی یونولیت و بصورت آزاد روی صفحه مبنا قرار می‌گیرد.



شکل ۶-ب. اتصال آلومینیوم به فولاد با سه چروک درتکیه-گاه گیردار

پ) آزمایش تعیین سرعت

برای اندازه‌گیری سرعت صفحه پرنده به‌منظور تعیین میزان ضربه در برخورد دو صفحه از روش پین‌گذاری استفاده و با توجه به اینکه طول پین‌ها معلوم بوده و زمان تماس صفحه با آن‌ها نیز توسط اسیلوسکپ اندازه‌گیری می‌گردد سرعت صفحه محاسبه می‌شود. شکل (۶-پ) طریقه قرار گرفتن اجزاء شامل چاشنی، مواد منفجره، صفحه پرنده، پین‌ها، صفحه پلاستیکی و ارتباط با اسیلوسکپ را نشان می‌دهد.

شکل ۶-پ. طریقه قرار گرفتن اجزاء در آزمایش تعیین سرعت

مراحل انجام آزمایش به شرح ذیل می‌باشد:

آماده‌سازی نمونه‌ها

اتصال صفحات غیر هم‌جنس و شکل‌دهی هم‌زمان

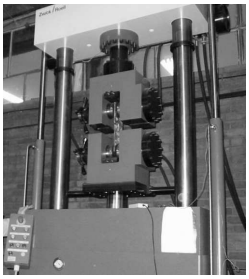
آزمایش تعیین سرعت و محاسبه ضربه

آزمایش جوش‌کاری و شکل‌دهی با قالب و بدون قالب

آزمایش تعیین خواص مکانیکی فلزات

۳-۳. آزمایش تعیین خواص مکانیکی صفحه‌ها

تحلیل صفحه‌های متصل شده و شکل گرفته در اثر ضربه نیاز به تعیین خواص هر کدام از فلزات مورد استفاده قبل از آزمایش خواهد داشت به‌همین منظور با استفاده از دستگاه Amsler مدل H A 500 شکل ۷ واقع در آزمایشگاه خستگی دانشگاه علم و صنعت ایران، آزمایش‌های مربوطه انجام و مشخصات فلزات ثبت شد.



شکل ۷. دستگاه تعیین خواص مکانیکی اجسام

۴-۳. نتایج آزمایش‌ها

آزمایش‌های انجام شده در سه گروه با قالب (گیردار و آزاد) بدون قالب (جوش‌کاری و شکل‌دهی با چروک بیشتر انجام می‌شود) و تعیین سرعت برنامه‌ریزی و انجام گردیده است که حاصل تعدادی از آزمایش‌های عملی انجام شده در دو جدول شماره ۱ و ۲ تدوین شده است.

توضیح:

۱- صفحه محافظ یا سپر حفاظتی برای کلیه آزمایش‌ها مقوای کارتنی به‌کار گرفته شده.

۲- محل نصب چاشنی در تمام آزمایش‌ها وسط صفحه محافظ بوده است.

۳-ورق‌های استفاده شده برای منظور جوش‌کاری و شکل‌دهی همه گرد بوده‌اند. صفحات مبنا در هر دو تکیه‌گاه گیردار و ساده دارای قطر ۲۱ سانتیمتر و ضخامت متغییر از ۱ تا ۳ سانتی‌متر بوده و صفحه پرنده درتکیه‌گاه آزاد همان ۲۱ و در گیردار به‌دلیل استفاده از روبند قالب برابر ۱۲ تا ۶ سانتی‌متر بوده است.

۴- دانسیته دینامیت برابر ۱/۴۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب با تغییر ۰/۵۰ و سرعت انفجار حداقل ۳۰۰۰ متر بر ثانیه و TNT که به‌صورت پودر مورد استفاده قرار گرفته است، دانسیته یک گرم بر سانتیمتر مکعب و سرعت انفجار ۴۸۰۰ متر بر ثانیه می‌باشد.

Archive of SID

www.SID.ir

جدول۱. تدوین آزمایش جوش‌کاری و شکل‌دهی انفجاری

ردیف	نوع آزمایش	جنس ورق‌ها و مشخصات هندسی		نوع ماده منفجره	مقدار ماده منفجره	جرم صفحه پرنده	فاصله قرار mm	ضربه N-S	نتیجه و ملاحضات
		(۱)	(۲)		گرم	گرم			
۱	گیردار	مس	فولاد	دینامیت	۴۵	۱۱۲	۱	۴	به‌علت کمبود دینامیت شکل‌دهی انجام شد
۲	گیردار	مس	فولاد	دینامیت	۹۰	۱۱۲	۱	۱۴	اتصال انجام، صفحه پرنده کمی چروک شد
۳	آزاد	فولاد	آلومینیوم	دینامیت	۶۰	۳۵	۱	۱۲	اتصال مناسب انجا م شد
۴	آزاد	فولاد	آلومینیوم	دینامیت	۱۳۵	۵۹	۲	۲۱	نا موفق
۵	آزاد	فولاد	آلومینیوم	دینامیت	۱۳۵	۵۹	۲	۲۱	صفحه‌ها در مرکز گسیخته شد، ورق محافظ مقوائی در جای نصب چاشنی سوراخ بود
۶	آزاد	فولاد	آلومینیوم	TNT	۸	۵۴	۱/۵	۹	فقط شکل‌دهی انجام و اتصالی بوجود نیامد
۷	آزاد	فولاد	آلومینیوم	TNT	۱۷	۵۴	۲	۱۸	اتصال به شکل موفق انجام شد
۸	گیردار	فولاد	آلومینیوم	TNT	۱۴	۳۰	۱	۱۰	قالب ۹۰و پرنده همراه پایه به شعاع۳جدا شد

جدول۲. آزمایش تعیین سرعت صفحه پرنده

ردیف	نوع پین	جنس صفحه جرم صفحه برحسب گرم	ارتفاع پین‌ها برحسب میلیمتر					جرم مواد برحسب گرم	فاصله افقی پین‌ها برحسب میلیمتر				سرعت برحسب متربر ثانیه	ملاحظات
			۱	۲	۳	۴	۵		۱تا۲	۲تا۳	۳تا۴	۴تا۵		
۱	سوزن ته گرد	آلومینیوم - ۳۷	۲۱	۱۸	۱۵	۱۲	۹	۵۵دینامیت	۴۱	۱۲	۹	۹	۶۰۰	غیرقا بل قبول
۲	سوزن ته گرد	فولادی- ۱۵۲	۱۵	۱۲	۹	۶	۳	۷۰دینامیت	۴۱	۱۲	۹	۹	-	نتیجه غیرقا بل قبول
۳	آلومینیومی بلند	فولادی- ۱۵۲	۱۸	۱۳	۷	۳	-	۷۰دینامیت	۴۱	۴۱	۴۱	-	۱۶۰	روش بهینه شده
۴	آلومینیومی بلند	آلومینیوم - ۹۱	۱۹	۱۱	۸،۵	۴،۵	-	۶۰ TNT	۵۰	۵۰	۵۰	-	-	نا موفق
۵	آلومینیومی بلند	آلومینیوم - ۹۱	۱۵	۱۱	۷،۵	۲،۵	۱،۵	۶۰ TNT	۴۰	۴۰	۴۰	۴	۴۰۰	مواد درسطح۱۲۰×۸۰
۶	آلومینیومی بلند	آلومینیوم - ۴۵	۱۷	۱۵	۲،۵	-	-	۵۰ TNT	۵۰	۳۵	-	-	۳۴۵تا۲۰۰	حداقل 125μs خطا در اندازه گیری
۷	آلومینیومی بلند روی نقاط متقارن نسبت به مرکز دایره درامتداد یک قطر	فولادی- ۱۵۲ برای تعیین تغییر شکل صفحه	۱۸	۱۶	۱۶	۱،۸	۱،۸	۲۱۰ دینامیت	**۱تا۲ ۴۰** راست شماره ۱	**۱تا۳ ۴۰** چپ شماره۱	۲تا۴ ۳۰	۳تا۵ ۳	۲۸۶	تغییر شکل متقارن، انتهای حرکت پله ایجاد شده،کمی تفاوت درزمان برخورد
۸	آلومینیومی بلند روی نقاط متقارن نسبت به مرکز دایره درامتداد یک قطر	آلومینیوم - ۵۴ صفحه پایه فولاد به جرم ۱۵۲گرم	۴۵	۳۲	۳۲	۱۲	۱۲	۷۵ دینامیت	**۱تا۲ ۴۰** راست شماره ۱	**۱تا۳ ۴۰** چپ شماره۱	۲تا۴ ۳۰	۳تا۵ ۳	۱۶۸ برای تغییر شکل صفحه مرکب	ابتدا دو صفحه بدون قالب بهم متصل شده سپس تغییرشکل داده

Archive of SID

www.SID.ir

۴. مقایسه نتایج تحلیلی و تجربی

مواردی نظیر جابجائی نقاط مختلف صفحه، سرعت صفحه پرنده و کرنش‌ها را می‌توان در دو حالت تحلیلی و تجربی مقایسه نمود. سرعت صفحه پرنده با روش قسمت ۲-۳ اندازه‌گیری شده و در نتیجه سرعت موردنیاز صفحه پرنده برای جوش‌کاری و اتصال مناسب دو فلز نرم مثل آلومینیوم و مس در محدوده‌ی فی‌مابین ۲۸۰-۳۹۰ و اگر یکی از آن‌ها سخت باشد محدوده افزایش یافته و از ۳۱۰-۴۶۰ متر بر ثانیه خواهد بود. اگر خواص مکانیکی ثبت شده را در رابطه

$$V_{P\min} = (\frac{\sigma_u}{\rho})^{\frac{1}{2}}$$

که حد اقل سرعت را ارائه می‌کند قرار دهیم، نتیجه انطباق خوبی با مقادیر تجربی دارد،

V_{pmin}: حداقل سرعت مجاز، σ_u استحکام کششی نهایی و ρ: جرم مخصوص می‌باشد.

لازم به ذکر است که این رابطه برای هر دو جنس محاسبه می‌گردد و سرعت بزرگ‌تر انتخاب و از روی آن با استفاده از رابطه هو گونیوت حداقل فشار برای فلزات غیر هم‌جنس از رابطه:

$$P = P_f = P_b = \frac{\rho_f V_P V_{sf}}{1+(\rho_f V_{sf})(\rho_b V_{sb})}$$

محاسبه می‌گردد (اندازه‌گیری عملی فشار با وسایلی نظیر پیزومترها امکان‌پذیر می‌باشد). که

V_{sf}: سرعت صوت در صفحه پرنده

ρ_f: چگالی صفحه پرنده ρ_f

V_{sf}: مقاومت صوتی

V_P: سرعت صفحه پرنده

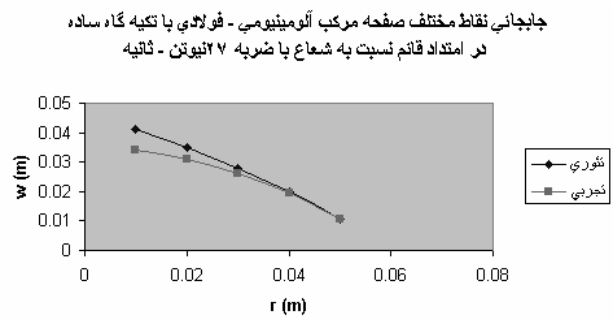
V_{sb}: سرعت صوت در صفحه مبنا

می‌باشد.

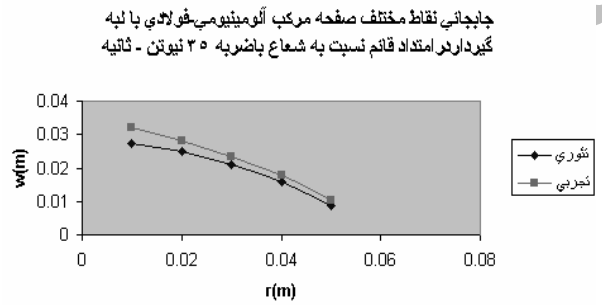
نکته قابل‌توجه در این قسمت عدم تفکیک انرژی جوش‌کاری و شکل‌دهی می‌باشد، اگر با در نظر داشتن مطالب فوق و تعیین سرعت از جنبه عملی بررسی نمائیم، تنها انرژی جنبشی موجود حاصل حرکت صفحه پرنده در اثر تأثیر موج انفجار می‌باشد، در این صورت محاسبه ارتفاع نقطه وسط ورق با استفاده از فرمول ارائه شده هماهنگی قابل‌قبولی با نتیجه عملی دارد. شکل‌های (۸-آ و ب) مقایسه فی‌مابین نتیجه حاصل از فرمول و تجربه را نشان می‌دهد، ابتدا مقدار w_0 از رابطه‌های (۱۸) و (۲۸) محاسبه و سپس با استفاده از رابطه‌های (۶) و (۲۴) منحنی تئوری رسم و با تجربی مقایسه شده است.

در شکل۹ کرنش محیطی صفحه مرکب فولادی آلومینیومی با استفاده از مدل تحلیلی ارائه و با حاصل تجربی مقایسه شده که در ناحیه وسط ورق به جهت اینکه شعاع کوچک می‌شود و در معادله تئوری در مخرج کسر می‌باشد مقدار را بزرگ می‌دهد و خطا مشخص می‌گردد و در مابقی نقاط تطبیق قابل‌قبولی دارد، منحنی عملی از شعاع چهل به بعد به‌علت به‌وجود آمدن تنش فشاری در آن ناحیه چروک را نشان می‌دهد در حالی‌که مدل تئوری چروک را به‌دلیل نوع رابط مرتبط به کرنش پیش‌بینی نمی‌نماید.

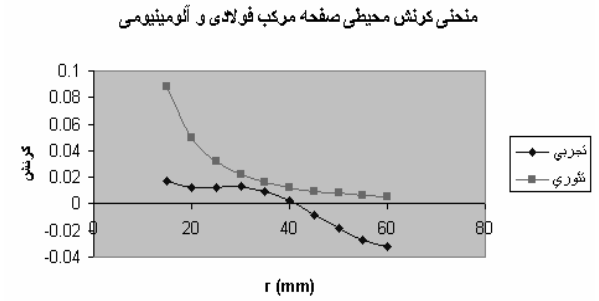
در شکل۱۰ کرنش در امتداد ضخامت برای صفحه مرکب فولادی آلومینیومی با استفاده از مدل تحلیلی ارائه و با حاصل تجربی مقایسه شده که در ناحیه وسط ورق به دلیل کم بودن مقدار شعاع خطا زیاد و در مابقی نقاط شعاعی مقادیر قابل پذیرشی ارائه گردیده است.



شکل ۸- الف. جابجائی نقاط مختلف صفحه نسبت به شعاع با تکیه‌گاه ساده



شکل ۸- ب. جابجائی نقاط مختلف صفحه نسبت به شعاع با تکیه‌گاه گیردار



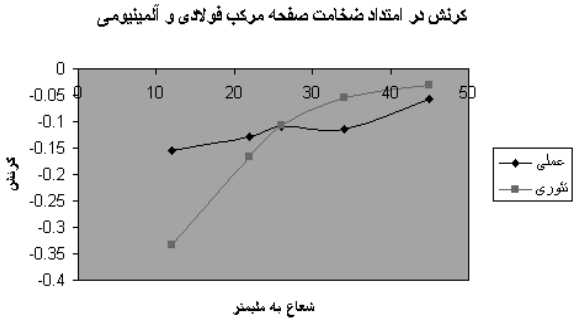
شکل ۹. مقایسه کرنش‌های محیطی تجربی و تحلیلی

Archive of SID

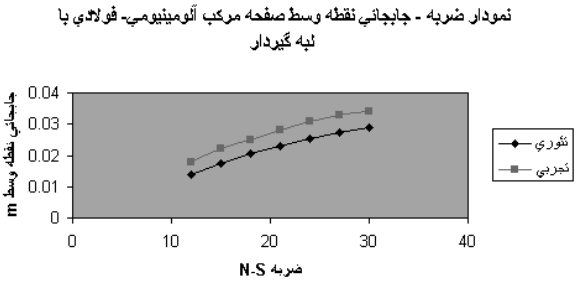
www.SID.ir

۵. بحث پیرامون نتایج

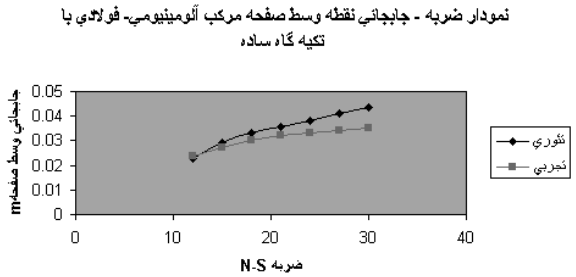
ورق مورد استفاده از صفحه‌های نازک و با جنس‌های متفاوت می‌باشند، برای تعیین حد گسیختگی از سه نوع قالب مخروطی با زوایای ۱۲۰، ۹۰ و ۶۰ درجه استفاده شده است، قالب‌های ۹۰ و ۶۰ درجه به‌منظور امکان ایجاد کرنش بیش‌تر پیش‌بینی شده ولی عملاً ورق‌های نازک با ضخامت حدود یک میلی‌متر روی قالب‌های ۹۰ و ۶۰ درجه قبل از این‌که جوش مناسب قابل‌قبولی داشته باشند در اثر تغییر شکل زیاد در امتداد قائم گسیخته می‌گردند ولی نتایج به‌دست آمده با قالب ۱۲۰ درجه هماهنگی قابل‌قبولی با نتایج تحلیلی دارد، مقایسه‌ای به‌صورت شکل شماره (۸- الف) برای ضربه مشخص ۲۷ نیوتن ثانیه در تکیه‌گاه گیردار و (۸- ب) با ضربه ۳۵ برای تکیه‌گاه ساده ارائه گردیده است.



شکل ۱۰. مقایسه کرنش‌های عملی و تحلیلی در امتداد ضخامت



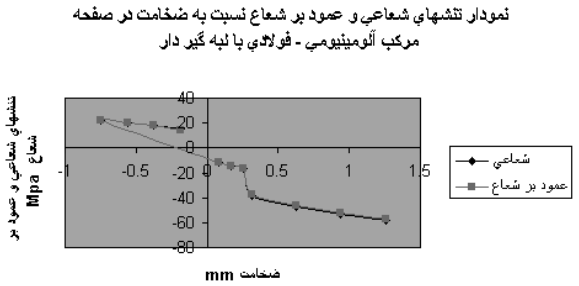
شکل ۱۱- آ. جابجائی نقطه وسط صفحه مرکب آلومینیومی فولادی نسبت به ضربه با لبه گیردار



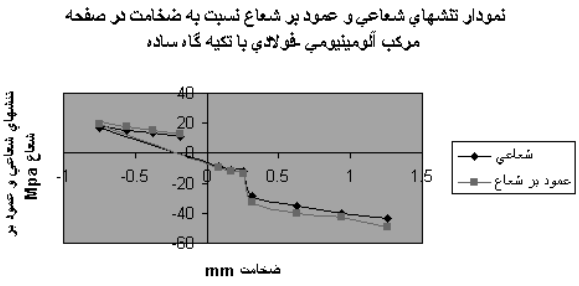
شکل ۱۱- ب. جابجائی نقطه وسط صفحه مرکب آلومینیومی فولادی نسبت به ضربه با تکیه‌گاه آزاد

در شکل (۱۱-آ و ب) نیز جابجائی نقطه وسط ورق برای هر دو تکیه‌گاه گیردار و ساده در چند نوبت محاسبه و با مقدار تجربی مقایسه شده است. ملاحظه می‌گردد درصد خطا برای هر دو حالت قابل‌قبول می‌باشد؛ البته با توجه به تابع شکلی در نظر گرفته شده برای هر حالت نتیجه برای تکیه‌گاه آزاد بیشتر از مقدار واقعی و تکیه‌گاه گیردار کمتر از آن می‌باشد.

در شکل (۱۲- آ و ب) با استفاده از روش ارائه شده و نتایج حاصل نمودارهای تنش‌های شعاعی و عمود بر امتداد شعاع برای ورق با لبه گیردار و تکیه‌گاه ساده مقایسه شده، در حالت گیردار مقادیر آن‌ها مساوی و در تکیه‌گاه ساده چون از دو جمله‌ای نیوتن برای محاسبه استفاده شده و تا دو جمله اول تقریب زده شده جواب مختصری تفاوت دارد.



شکل ۱۲-آ. تنش‌های شعاعی و عمود بر شعاع در صفحه با لبه گیردار نسبت به ضخامت



شکل۱۲-ب. تنش‌های شعاعی و عمود بر شعاع در صفحه با تکیه‌گاه ساده نسبت به ضخامت

۶. نتیجه‌گیری

مدل تحلیلی ارائه شده در این مقاله منجر به روابط ضربه و جابجائی در امتداد قائم برای تکیه‌گاه‌های گیردار و ساده شد که مقدار ضربه را به جابجائی نقطه وسط ورق در امتداد قائم مرتبط می‌سازد. با در نظر گرفتن خواص مکانیکی و عوامل هندسی ورق می‌توان حالت بحرانی یعنی گسیختگی صفحه را پیش‌بینی نمود.

ابتدا پارامترهای اصلی نظیر سرعت و فشار مشخص شده و سپس روابطه ضربه و جابجائی در امتداد قائم برای تکیه‌گاه‌های گیردار و ساده معین گردیده که مقدار ضربه را به جابجائی نقطه وسط ورق

www.SID.ir

در امتداد قائم مرتبط می‌سازد. برای تکیه‌گاه ساده اندازه جابجایی در امتداد قائم که با روش ارائه شده پیش‌بینی می‌گردد مقداری از اندازه تجربی بیشتر و برای گیردار مقداری کمتر از تجربی می‌باشد. به‌جز عملیات مربوط به اتصال آلومینیوم و فولاد مابقی عملیات شکل‌دهی و جوش‌کاری روی جنس‌های مس با آلومینیوم و مس با فولاد با انرژی در حد انرژی لازم برای جوش‌کاری انجام می‌شود. در بررسی انجام شده مشخص گردیده که تحلیل خمشی بدون اثر تنش برشی برای صفحه‌های نازک جواب قابل‌قبولی خواهد داد. تحلیل ارائه شده به تعداد صفحه‌ها بستگی ندارد و لذا امکان استفاده از آن برای بیشتر از دو صفحه و نیز هندسه غیر دایره‌ای وجود دارد.

مراجع

[۱] لیاقت غ. و جواب‌ور د.، *"اثر ورق گیر در کنترل چروکیدگی مخروط و بررسی تحلیلی وتجربی آن در شکل‌دهی انفجاری"*، نشریه علمی- پژوهشی امیر کبیر، شماره ۵۲، پاییز ۱۳۸۱.

[2] A. F. Darvizeh, G. H. Liaghat, M. D. Nouri " TWO DIMENSIONAL FE SIMULATION OF HIGH RAYE DEFORMATION OF TUBE IN EXPLOSIVE WELDING PROCESS" IUST. INT.J.NO.1,V.15,2004.

[۳] لیاقت غ. و جواب‌ور د.، *"بررسی تئوریک و معرفی فرآیند برش‌کاری و سوراخ‌کاری انفجاری"*، ششمین کنفرانس سالانه مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۵۱۵-۱۵۲۲، اردیبهشت ۱۳۷۷.

[۴] بیسادی ح.، لیاقت غ.، مسلمی نائینی ح.، *"تحلیل بارگذاری دینامیکی صفحات بانرخ کرنش بالا"*، دهمین کنفرانس سالانه مهندسی مکانیک، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، ۱۷- ۲۵، ۱۳۸۱.

[5] Blazynski T.Z., *Explosive Welding, Forming and Compaction*, Applied Science, London, 1983.

[6] Crossland B., *Explosive Welding Of Metals and its Application*, Clarendon Press, Oxford, 1982.

[7] American Society of Welding, *Welding Handbook*, V.2.

[۸] لیاقت غ.، جواب‌ور د.، *"ارائه مدل تغییر شکل پایدار ورق جهت تحلیل شکل‌دهی انفجار مخروط"*، هفتمین کنفرانس مهندسی مکانیک، دانشگاه سیستان و بلوچستان، فروردین ۱۳۷۸.

[۹] لیاقت غ.، درویزه ا. و دامغانی م.، *"بررسی مدل سینماتیکی سطوح استوانه ای در فرایند جوش‌کاری استوانه‌ها"*، دهمین کنفرانس سالانه مهندسی مکانیک، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، ۷۹۳- ۸۰۱،۱۳۸۱.

[10] Raghukandan, *"An Experimental Investigation on the Effect of h/D Ratio on Dynamic Form-Cladding of Domes"*, Journal of Materials processing technology 63, 1994, pp. 55-59.

[۱۱] رحیمی شعرباف غ.، *تنش در ورق‌ها و پوسته‌ها*، نشر دانشگاه تربیت مدرس ۱۳۷۵.

[12] Wen H. M., Reddy T. Y. and Reid S. R., *"Deformation and failure of clamped beams under low speed impact loading"*, Int. J. Impact Eng., 1995, 16(3), pp. 435-454.

[13] Wen H. M., Reddy T. Y., *"A note on the clamped circular plates under impulsive loading,"* Mech. Struct, & Mach., 1995, 23(3), pp. 331-342.

[14] Wen H. M., *"Deformation and tearing of clamed work-hardening beams subjected to impulsive loading"*, Int. J. Impact Eng., 1996, 18(4), pp. 425-433.

[15] Wen H. M., *"Deformation and tearing of clamped circular work-hardening plates under impulsive loading"*, Int. J. of Pressure Vessels and Piping, 75, 1998, pp. 67-73.

[16] Teeling-Smith R. G., Nurick G. N., *"The deformation and tearing of thin circular plate subjected to impulsive loading"*, Int. J. Impact Eng., 1991, 11, pp. 77-91.

پیوست

فهرست علائم

D صلبیت خمشی

D_e سفتی خمشی معادل

D' نسبت سفتی خمشی صفحه پایه به صفحه پرنده

Ek انرژی جنبشی

ES انرژی تلف شده در تغییر شکل برشی تکیه گاه، E_{CS} مقدار بحرانی ES

F_e نیروی استاتیکی معادل

F_S نیروی برشی عرضی

F_u نیروی برشی بحرانی

H ضخامت صفحه

I ضربه

I_e ممان اینرسی سطح معادل

m جرم صفحه مرکب

m_1 جرم صفحه اول (پرنده)، m_2 جرم صفحه دوم(مبنا)

M_{xy}, M_y, M_x گشتاورهای خمشی و پیچشی در واحد طول در مختصات کارتزین

M_θ, m r گشتاورهای خمشی شعاعی و محیطی در واحد طول

Nr نیروی غشائی شعاعی در واحد طول

Archive of SID

www.SID.ir

r مختصه شعاعی متغییر نقاط مختلف صفحه، R شعاع صفحه

R شعاع اولیه دو صفحه

R' شعاع صفحه معادل صفحه اصلی تبدیل شده

v0 سرعت اولیه ضربه

Vpmin حداقل سرعت مجاز صفحه پرنده

w جابجائی در امتداد قائم نقاط مختلف ورق وقتی صفحه افقی می‌باشد.

w_0 جابجائی مرکز صفحه

w_t جابجائی عرضی کل که شامل لغزش برشی در تکیه‌گاه نیز می‌باشد.

Z متغیری است که فاصله هر تار را از تار خنثی در امتداد ضخامت نشان می‌دهد.

$\overline{Z}$ فاصله تار خنثی از دورترین تار در قسمت کششی

γ_c, γ کرنش برشی و کرنش برشی بحرانی

$\varepsilon_{\theta b}, \varepsilon_{rb}, \varepsilon_m$ به‌ترتیب کرنش غشائی شعاعی-کرنش خمشی شعاعی و کرنش خمشی محیطی

ε_u, σ_u تنش نهایی کششی و کرنش کششی یکنواخت

τ_u تنش برش بحرانی

σ_x ، σ_y ، τ_{xy} تنش برشی و تنش‌های نرمال در مختصات کارتزین

κ_r, κ_θ انحناء صفحه در جهت‌های مماسی(محیطی) و شعاعی، اندیس‌های ۱ و ۲ برای صفحه پرنده و مبنا

ρ جرم مخصوص

ν نسبت یا ضریب پوآسون، برای تفکیک دو صفحه از زیرنویس ۱ و ۲ استفاده شده است.

Δ لغزش برشی و Δ_C لغزش برشی بحرانی

Archive of SID

www.SID.ir