

شبیه سازی شکل دهی انفجاری ورق از جنس آلیاژ آلومینیوم

مهدی ظهور^۱، مسعود کریمی^۲

چکیده

در سالهای اخیر ورق‌های آلیاژ آلومینیوم در صنعت خودروسازی کاربرد ویژه‌ای پیدا کرده‌اند. شکل‌دهی این مواد با روش‌های استاتیکی مانند هیدروفورمینگ و پرس بسیار مشکل است چرا که این ورق‌ها محدوده پلاستیک پیش از پارگی کمتری نسبت به ورق‌های فولادی معمول دارند. در این پژوهش شکل‌دهی آزاد آلیاژ آلومینیوم به عنوان مطالعه پایه‌ای بررسی شده است که با استفاده از موج شوک حاصل از انفجار در زیر آب و ماده منفجره SEP و تغییر پارامتر ضخامت ورق انجام می‌شود. جهت معتبرسازی تحلیل عددی نرم افزار LS DYNA یکی از این ضخامت‌ها با نتایج بدست آمده در مقالات معتبر مقایسه شده که همخوانی مناسبی دارد و می‌توان از آن جهت اعتبار بخشی به آنالیز انجام شده و نتایج حاصل کمک گرفت.

کلمات کلیدی: شکل‌دهی انفجاری- ورق آلیاژ آلومینیوم- سرعت تغییر شکل- شکل‌دهی با قالب

۱- مقدمه

میلی متر و آلومینیوم آنیل شده $AV039$ می‌باشد. قطر حجم آب روی ورق 130 میلی متر و ارتفاع آن 50 میلی متر است و مخزن مقوایی می‌تواند به عنوان ظرف این حجم آب در نظر گرفته شود. ماده منفجره قوی SEP با قطر 22 و طول 20 میلی متر در نظر گرفته شده است که چگالی آن $1/31 \text{Kg/M}^3$ و فشار انفجار آن $15/9 \text{GPa}$ است. قطر دهانه قالب 100 و شعاع آن 15 میلی متر و فاصله ماده منفجره از ورق 30 میلی متر است. به عنوان شرایط مرزی بدنه قالب صلب در نظر گرفته می‌شود. پس از انفجار با توجه به وجود ورق گیر، ورق در راستای Z مشخص شده در شکل تغییر شکل می‌دهد.

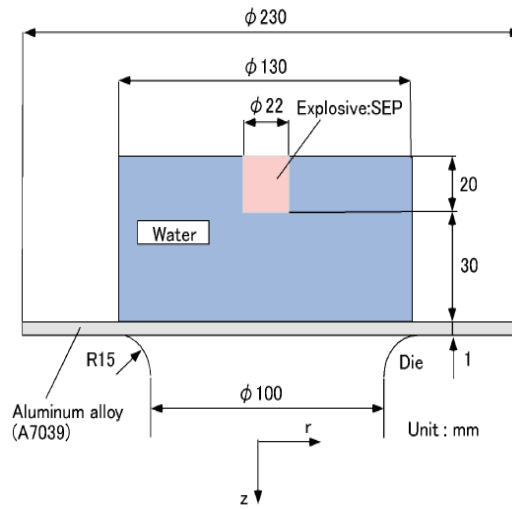
استفاده از ورق‌های آلیاژ آلومینیوم در صنعت اتومبیل سازی امروز رو به گسترش است. در مقایسه با آلیاژهای معمول فولاد، آلیاژ آلومینیوم در شکل‌دهی محدودیت دارد. با استفاده از روش شکل دهی انفجاری می‌توان در جهت رفع محدودیت‌های آلیاژ آلومینیوم تلاش کرد. از این رو در این پژوهش شبیه سازی عددی در مورد فرایند تغییر شکل ورق آلومینیوم با استفاده از انفجار در زیر آب انجام می‌شود.

۲- روش شبیه سازی

شکل (۱) مدل شبیه سازی شکل دهی انفجاری این مقاله را نشان می‌دهد. ورق آلومینیوم دایره‌ای به قطر 230 و ضخامت 1

۱- استادیار دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، ساخت و تولید

۲- محقق ارشد دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، ساخت و تولید



شکل (۱): مدل شبیه‌سازی

۲-۲- معادلات مدل‌سازی

محاسبه فشار آب با معادله حالت مای - گرونایزن حل شده است [۱]:

$$P = \frac{\rho_0 c_0^2 \eta}{(1 - s\eta)^2} \left[1 - \frac{\Gamma_0 \eta}{2} \right] + \Gamma_0 \rho_0 E \quad (1)$$

که در آن ρ_0 چگالی اولیه است. E انرژی درونی، Γ_0 پارامتر گرونایزن، $\eta = 1 - \frac{\rho_0}{\rho}$ و S ثوابت ماده می‌باشند. برای ماده واسطه در این مقاله که آب است، مقادیر این ثوابت در جدول (۱) آمده‌اند.

جدول (۲): پارامترهای معادله حالت مای - گرونایزن

ماده	ρ_0 (kg/m^3)	C_0 (m/s)	S	Γ_0
آب	۱۰۰۰	۱۴۹۰	۱/۷۹	۱/۶۵

فشار در ماده منفجره با استفاده از JWL (جونز - ویلکینز - ویلیام) محاسبه می‌شود [۲]. معادله حالت بیان این معادله به صورت زیر است:

$$P = A \left[1 - \frac{\omega}{VR_1} \right] \exp(-R_1 V) + B \left[1 - \frac{\omega}{VR_2} \right] \exp(-R_2 V) + \frac{\omega E}{V} \quad (2)$$

که در آن A ، B ، R_1 ، R_2 ، C و ω پارامترهای JWL هستند. V نسبت حجم گازهای حاصل به حجم اولیه ماده منفجره پیش از انفجار است. برای ماده منفجره SEP این ثوابت در جدول (۲) آمده‌اند.

۲-۱- نحوه مدل‌سازی در نرم افزار LS Dyna

۲-۱-۱- مشخصات مواد و قطعات بکار رفته

جدول (۱): مشخصات مواد به کار رفته در مدل‌سازی

EOS	Prop	Mat	
No	Section Shell	Johnson cook	ورق
Gruneise n	Section solid ALE	Null	آب
No	Section Shell	Rigid	نگه دارنده ورق
No	Section Shell	Rigid	قالب
JWL	Section solid ALE	High explosive	مواد منفجره

۲-۱-۲- نوع مش بندی

۲-۱-۲-۱- آب و ماده انفجاری به صورت SOLID node و ELFORM 11 مدل شده‌اند.

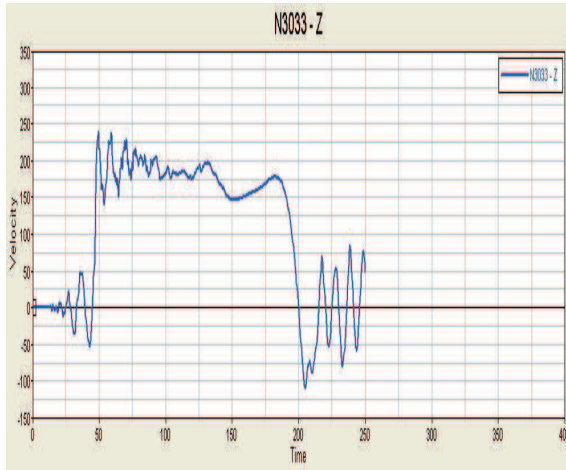
۲-۱-۲-۲- ورق و سنبه و نگه دارنده ورق به صورت Shell node با ELFORM 1 مدل شده‌اند.

۲-۱-۲-۳- از آنجائیکه SOLID ALE با ELFORM 11 به EOS نیاز دارد بدین منظور از EOS_Gruneisen استفاده شده است.

۲-۱-۲-۴- قطعات قالب و ورق از نوع لاگرانژی و آب و ماده انفجاری به صورت اویلری مدل شده‌اند.

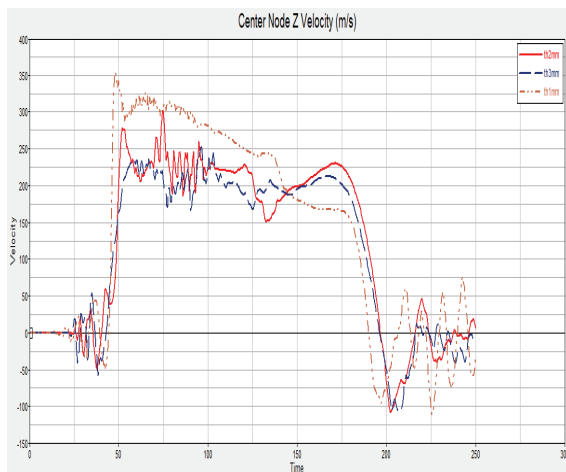
۳- آنالیز و تحلیل

آنالیز انجام شده برای شعاع لبه قالب ۳۰ میلیمتر و ضخامت ۱ میلیمتر از نظر سرعت تغییر شکل مرکز ورق در جهت Z در شکل زیر دیده می‌شود که همخوانی مناسبی با پژوهشهای انجام شده دارد [۵].



شکل (۲): سرعت تغییر شکل مرکز ورق با شعاع لبه قالب ۳۰ میلیمتر و ضخامت ۱ میلیمتر

اکنون با توجه به اعتبار روش تحلیل، به بررسی آنالیز عددی ضخامتهای ۱،۲ و ۳ میلیمتر ورق از نظر سرعت المان مرکزی ورق در جهت Z، جابجایی آن و تنش اعمال شده به آن در طی فرایند انفجار می‌پردازیم.



شکل (۳): مقایسه سرعت حرکت مرکز ورق با شعاع لبه قالب ۳۰ میلیمتر و ضخامتهای ۱،۲ و ۳ میلیمتر

جدول (۲): پارامترهای JWL برای SEP

ω	R_2	R_1	B(GPa)	A(GPa)
۰/۲۸	۱/۱۰	۴/۳۰	۲/۳۱	۳۶۵

برای محاسبه ماده منفجره اولیه جهت سوختن حجم C-J [۳] به کار رفته است.

هنگامی که حجم ماده منفجره اولیه در محاسبه با حجم مواد حاصل از انفجار در حالت چاپمن-جوگت (C-J) برابر شود، فرض بر تجزیه کامل ماده منفجره به محصولات گازی قرار می‌گیرد. اگر حجم اولیه ماده منفجره و V_{CJ} حجم محصولات انفجار در حالت C-J باشد، نرخ واکنش ماده منفجره به صورت زیر بیان می‌شود:

$$W = 1 - \frac{V_0 - V}{V_0 - V_{CJ}} \quad (۳)$$

$$P = (1 - W)P_g \quad (۴)$$

که در آن W نسبت ماده منفجره واکنش نداده است. لذا قبل از واکنش $W=1$ و بعد از واکنش $W=0$ و P_g فشار محصولات انفجار است.

فرض می‌شود فشار P برابر با فشاری است که از واکنش قسمتی از ماده منفجره که طی انفجار می‌سوزد حاصل شود. فشار، حجم و انرژی ماده منفجره واکنش داده با معادله حالت JWL که در بالا در مورد آن بحث شد با هم مرتبط می‌شوند. معادله اساسی مربوط به ورق آلومینیوم در زیر بیان می‌شود که به معادله جانسون-کوک موسوم است:

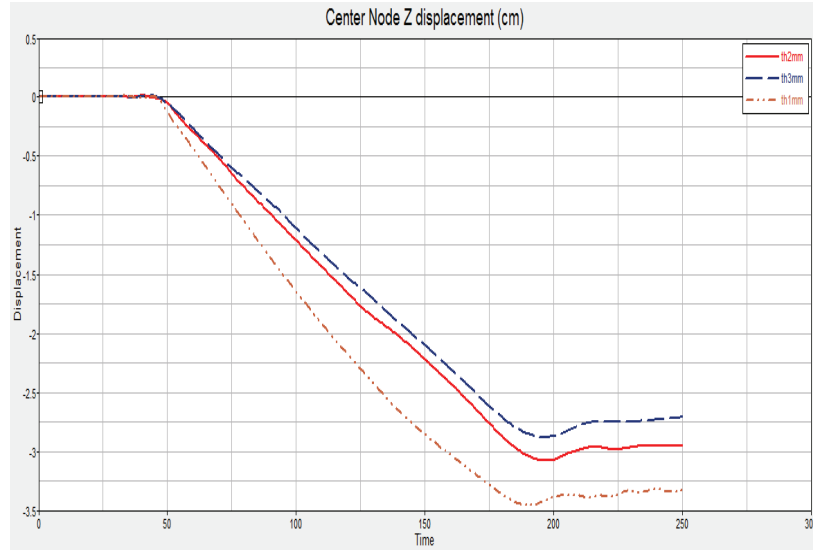
$$\sigma_y = (A + B\epsilon^n)(1 + C \ln \dot{\epsilon}) \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right] \quad (۵)$$

که در آن σ_y نقش معادل، ϵ کرنش معادل و $\dot{\epsilon}$ نرخ کرنش معادل است. A، B، C، m و n ثوابت ماده‌اند که برای آلومینیوم $AV0.39$ در جدول (۳) آمده‌اند [۴].

جدول (۳): ثوابت ماده معادله جانسون-کوک برای $AV0.39$

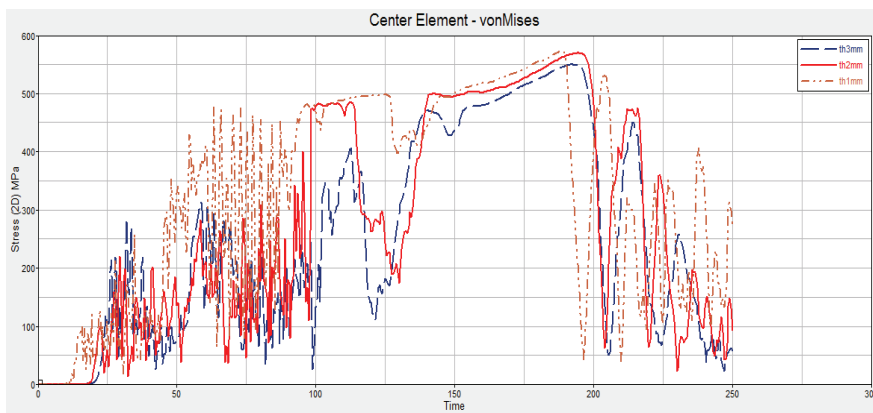
m	n	C	B(MPa)	A(MPa)
۱/۰۰	۰/۴۱	۰/۰۱	۳۳	۳۳۷

چنانچه مشاهده می شود در محدوده زمان ۵۰ میلی ثانیه سرعت حرکت ورق ۱ میلیمتری بسیار بیشتر از سایر ضخامتها است و برعکس آنها که تا زمان حدود ۱۷۰ میکروثانیه به صورت یکسان باقی می ماند، تا این زمان به صورت تقریباً خطی کاهش می یابد.



شکل (۴): مقایسه جابجایی ورق با شعاع لبه قالب ۳۰ میلیمتر و ضخامت‌های ۱، ۲ و ۳ میلیمتر

در این مورد نیز ورق ۱ میلیمتری اختلاف تغییر شکل نسبتاً بیشتری با سایر ضخامتها دارد.



شکل (۵): مقایسه تنش‌های اعمال شده به المان مرکزی ورق با شعاع لبه قالب ۳۰ میلیمتر و ضخامت‌های ۱، ۲ و ۳ میلیمتر

شوک اولیه ناشی از انفجار در برخورد با ورق عامل اصلی تغییر شکل بوده و موجهای ثانویه ناشی از انبساط، انقباض و برخورد حبابهای گازی ایجاد شده در طی انفجار نقشی در عملیات شکل دهی نداشته‌اند.

با توجه به رویکرد کنونی صنایع به استفاده از ورقهای آلایژ آلومینیوم تحقیق بیشتر در این زمینه در جهت پیشرفت صنایع کشور ضروری به نظر می رسد.

چنانچه مشاهده می شود بین زمانهای ۵۰ و ۱۰۰ میلی ثانیه تنش اعمال شده به ورق ۱ میلیمتری بسیار بیشتر از سایر ضخامتها است.

۴- نتیجه گیری

با توجه به اینکه برای هر سه ضخامت فرایند شکل دهی در حدود ۲۵۰ ثانیه به اتمام رسیده است می توان گفت فقط موج

مراجع

- 1- McQueen G., Marsh S. P., Taylor J. W., Fritz J. N., and Carter W. J., "The Equation of Solids from Shock Wave Studies", High-Velocity-Impact Phenomena, 2006.
- 2- Lee E., Finger M., and Collins W., "JWL Equation of State Coefficient for High Explosives", Lawrence Livermore National Laboratory report UCID-16189, 2004.
- 3- Mader C., Numerical Modeling of Detonations, University of California Press, 2008.
- 4- Meyers M. A., "Dynamic Behavior of Materials", Wiley-Interscience, pp. 327-328, 1994.
- 5- Iyama H., Takahashi K., Hinata T., and Itoh S., "Numerical Simulation of Aluminum Alloy Using Underwater Shock Wave", 8th International LS-DYNA Users Conference, 2004.

