

ناپایداری پلاستیک در تغییر شکل دو محوری متعادل ورقها

دکتر رضا محمودی

استادیار گروه مهندسی متالورژی - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

چکیده

ناپایداری پلاستیک که منجر به تمرکز کرنش و شکست ورقهای تحت تنش می‌گردد در حالت تنش کششی دو محوری روی ورق آلومینیم تجارتي مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است. کرنش در نقطه ناپایداری به صورت تجربی اندازه‌گیری شده و با نتایج حاصل از تئوریهای مختلف ناپایداری مقایسه گردیده است. دلایل اختلاف تئوری و تجربه با توجه به خواص مکانیکی آلیاژ مورد استفاده مورد تجزیه و تحلیل واقع گردیده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که در تمامی حالات، معیارهای ناپایداری پایان تغییر شکل مفید نبوده و همواره مقداری کرنش بعد از کرنش ناپایداری قابل حصول است. این کرنش مفید حتی در مورد شرایطی از آلیاژ که در کشش تک محوری شکل‌پذیری اندکی داشته‌اند قابل ملاحظه بوده است.

۱- مقدمه

تغییر شکل غیریکنواخت در ورقها با تمرکز کرنش و لذا ناپایداری پلاستیک همراه می‌باشد. در این شرایط بلافاصله پس از شروع تسلیم ادامه تغییر شکل با کاهش نیرو همراه است و این بدان علت است که افزایش تنش به خاطر کاهش سطح مقطع بیش از افزایش توانایی تحمل بار توسط ماده در اثر کار سختی می‌شود. در شرایط ناپایداری دو نوع گردنی شدن^۱ در تغییر شکل ورقها تشخیص داده شده است که عبارتند از: گردنی شدن تدریجی یا نفوذی^۲ و گردنی شدن موضعی^۳. برای تغییر شکل تک محوری^۴ رابطه ریاضی شرایط ناپایداری پلاستیک که منجر به گردنی شدن نفوذی می‌گردد بر حسب تنش حقیقی σ و کرنش حقیقی ϵ بدین صورت بیان می‌شود:

$$d\sigma/d\epsilon = \sigma \quad (1)$$

همانگونه که از شکل (۱) پیداست در گردنی شدن نفوذی یک باریکه عمود بر جهت تنش نرمال حداکثر تشکیل می‌شود در حالیکه در گردنی شدن موضعی ناحیه‌ای که با جهت تنش اصلی حداکثر زاویه غیر صفر می‌سازد بوجود می‌آید. در اغلب کاربردهای عملی حالت تنش تک محوری نبوده و بلکه شرایط دو محوری^۵ با نسبت تنش $x = \sigma_2/\sigma_1$ وجود دارد که در آن σ_2 تنش اصلی میانی و σ_1 تنش اصلی حداکثر است. برای چنین حالاتی شرایط ناپایداری باری توسط رابطه زیر بیان می‌گردد:

$$d\sigma/d\epsilon = \sigma/z \quad (2)$$

برای یک ماده آیزوتروپیک پارامتر z تابع نسبت تنش

در بار حداکثر $\varepsilon_{II} = 2n$ خواهد شد. در این حالت گردنی شدن موضعی را نمی‌توان بر اساس دو معیار فوق‌الذکر پیش‌بینی نمود زیرا در چنین حالتی جهتی که آهنگ کرنش صفر داشته باشد وجود ندارد و در این شرایط $d\varepsilon_2, d\varepsilon_1$ هر دو مثبت هستند. با این حال ورقها در حالت کشش دو محوری متعادل ($\sigma_1 = \sigma_2 > 0, \sigma_3 = 0$) به علت وجود ناخالصی‌ها و معایبی که وجودشان در ماده غیرقابل اجتناب است خواهند شکست و این شکست یا پارگی پس از وقوع گردنی شدن موضعی رخ می‌دهد [۴]. بدین جهت استفاده از معیاری برای ناپایداری پلاستیک که بتواند پدیده گردنی شدن و پارگی ناشی از آن را در حالت کشش دو بعدی توضیح داده و آن را پیش‌بینی نماید کاملاً ضروری است.

یکی از معیارهایی که بدین منظور به دفعات استفاده شده است، معیار فشار حداکثر در آزمایش بالچ هیدرولیک^۲ است. توزیع تنش و کرنش در یک دیافراگم فلزی مدور در حال تغییر شکل توسط هیل پیش‌بینی شده است [۵]. او رابطه زیر را برای تنش و کرنش در فشار ناپایداری بدست آورد:

$$(1/\sigma_p)(d\sigma_p/d\varepsilon_p) = (11/8) - (1/2\varepsilon_p) \quad (۷)$$

که اندیس ۱ جهت ضخامت را نشان می‌دهد. اگر رابطه اصلی تغییر شکل $\sigma = K\varepsilon^n$ باشد، کرنش ضخامتی در قطب نمونه در حال تغییر شکل در نقطه ناپایداری در تست بالچ هیدرولیکی که همان کرنش ناپایداری پلاستیک فشاری است عبارت خواهد بود از:

X بوده و تنش مؤثر (σ) و کرنش مؤثر (ε) از روابط زیر بدست می‌آید:

$$\sigma = (1-X+X^2)^{1/2} \sigma_1 \quad (۳)$$

$$\varepsilon = [2(1-X+X^2)^{1/2}/(2-X)] \varepsilon_1 \quad (۴)$$

سوئیفت^۱ [۱] مقدار پارامتر Z را در شروع گردنی شدن نفوذی با استفاده از روابط لوی میسس^۲ بدین صورت محاسبه نموده است:

$$Z_p = 4(1-X+X^2)^{(3/2)} / \{(1+X)(4-7X+4X^2)\} \quad (۵)$$

در صورتیکه پارامتر فوق برای حالت گردنی شدن موضعی توسط هیل^۳ [۲] به صورت رابطه زیر پیشنهاد شده است:

$$Z_p = 2(1-X+X^2)^{1/2} / (1-X) \quad (۶)$$

بوجود آمدن سیلان ناپایدار که خود تابع نسبت تنشی X می‌باشد بر حسب تغییرات آهنگ کار سختی ($d\sigma/d\varepsilon$) برای یک ماده ایزوتروپ در تغییر شکل دو محوری ($\sigma_3 = 0$) بر اساس معیارهای سوئیفت و هیل در شکل (۲) نشان داده شده است [۳]. در کشش تک محوری ($X = 0$)، کرنشی که گردنی شدن موضعی در آن بوجود می‌آید (ε_p) معمولاً بزرگتر از کرنش گردنی شدن نفوذی (ε_h) است. اگر تغییر شکل ماده توسط رابطه $\sigma = k\varepsilon^n$ داده شود برای حالت تنشی کشش تک محوری $\varepsilon_h = n$ ، $\varepsilon_p = 2n$ خواهد شد.

در حالت کشش دو محوری متعادل ($X = 1$)، $Z_p = 2$ بوده و اگر معیار ناپایداری باری اعمال شود، کرنش حدی

می‌گذرد و برابر 15.3mm می‌باشد و d فاصله بین ارتفاع قطعه اندازه‌گیری تا قطب می‌باشد که در شکل (۳) نشان داده شده است. فشار روغن (P) وسط یک ترانسدیوسر فشار (فشارسنج) مستقیماً خوانده شده و با توجه به پارامترهای فوق تنش در صفحه ورق در قطب نمونه از رابطه $\sigma = PR/2t$ و کرنش در قطب از رابطه $\epsilon_t = \ln(t_0/t)$ بدست آمد. بعضی از آزمایشها در فشار ماگزیم متوقف شده و نمونه از دستگاه خارج گردید تا بتوان ارتفاع و توزیع کرنش را قبل از پارگی و شکست نهایی توسط یک ریزسنج با نوک کرومی اندازه‌گیری کرد.

۳- نتایج

نتایج آزمایش کشش تک محوری برای آلیاژ در سه حالت آنیل در جدول (۱) داده شده است. همانگونه که مشخص است آلیاژ C با قابلیت انعطاف بسیار کم 0.06 $\epsilon_u =$ و استحکام بسیار زیاد 121.5 MPa $\sigma_{0.2\%}$ از دو آلیاژ دیگر متمایز است. جدول (۲) نتایج حاصل از آزمایش بالج هیدرولیکی را نشان می‌دهد. چنانکه ملاحظه می‌شود در ناپایداری فشاری (P_{max}) که همان اولین افت فشار قابل تشخیص است کرنش ضخامتی در قطب (ϵ_{pi}) برای هر سه آلیاژ بسیار نزدیک به همدیگر بوده ولی کرنش شکست یا کرنش گردنی شدن موضعی که با ϵ_{LN} نشان داده شده و ارتفاع بالج در فشار ماگزیم (H_{pi}) و ارتفاع نهائی پس از شکست (H_f) برای آلیاژهای A, B, C اختلاف قابل ملاحظه‌ای نشان می‌دهند.

توزیع کرنش در فشار ماگزیم (ناپایداری فشاری) و پس از شکست برای سه آلیاژ A, B, C در شکل (۴) رسم شده است. همانگونه که ملاحظه می‌شود اختلاف بین

$$\epsilon_{pi} = \epsilon_t = (4/11)(2n+1) \quad (۸)$$

و ننگ^۱ و شامامی^۲ [۶] دقت و محدودیت معیار فشار ناپایداری هیل را آزمایش کرده و تغییراتی در آن ایجاد نموده‌اند و مقایسه تئوری و نتایج آزمایش را در حد قابل قبول دانسته‌اند.

در یک کار تحقیقاتی دیگر که توسط کلیم‌اله^۳ و رانتا اسکولا^۴ [۷] روی ورقهای برنج فولاد و مس انجام شده نشان داده شده است که کرنش در فشار ناپایداری (ϵ_{pi}) که بطور تجربی اندازه‌گیری شده بطور قابل ملاحظه‌ای بزرگتر از نتایج حاصل از تئوری هیل می‌باشد و عملاً کرنشهای بزرگتری نسبت به آنچه تئوری پیش‌بینی می‌نماید قابل حصول می‌باشد.

۲- روش انجام آزمایش

آلیاژ مورد استفاده آلومینیم تجارتمی بوده که پس از ریخته‌گری به ضخامت 8 mm نورد گرم شده و سپس تا ضخامت 1mm نورد سرد گردید. برای ایجاد یک دامنه از خواص مکانیکی سه نوع عملیات حرارتی آنیل در دماهای 250°C ، 330°C ، 400°C به مدت سه ساعت انجام شد. آزمایش کشش تک محوری (UAT) با سرعت 10mm/min روی نمونه کششی استاندارد در جهت نورد به عمل آمد. آزمایش کشش دو محوری متعادل (EBT) روی نمونه‌هایی به قطر 120mm انجام شد. ضخامت نمونه در قطب (t) با یک پروب اولتراسونیک با دقت 1×10^{-3} mm اندازه‌گیری شد. یک سیستم کره‌سنج^۵ برای اندازه‌گیری شعاع انحناء (R) که توسط رابطه زیر داده می‌شود به کار رفت:

$$R = (r^2 + d^2)/2d \quad (۹)$$

در رابطه فوق r فاصله از محور عمودی که از قطب

را توسط رابطه زیر بیان نمود:

$$\varepsilon_{pic} = (4/11)(2n+1)$$

برای اجتناب از هرگونه خطا و نظر به اینکه توان کار سختی در کشش تک محوری و دو محوری قدری تفاوت دارند برای محاسبه ε_{pic} از توان کار سختی در کشش دو محوری (π_p) استفاده شده است. مقادیر اندازه‌گیری شده و محاسبه شده کرنش ناپایداری روی شکل‌های (C) و b و (5a) علامت‌گذاری شده و در جدول (۲) آورده شده‌اند. نتایج نشان می‌دهند که برای آلیاژهای A و B کرنشهای ناپایداری باری ε_{II} که به روش گرافیکی از تلاقی منحنی‌ها بدست آمده‌اند به مقادیر اندازه‌گیری شده ($\varepsilon_{II} = 2n$) بسیار نزدیک‌اند. این نزدیکی مبین آن است که معادله رفتاری $\sigma = k\varepsilon^n$ برای دو حالتی که آلیاژ در دمای نسبتاً بالا (33°C و 40°C) آنیل شده است بسیار مناسب بوده است. کاربرد معادله رفتاری نامناسب در بسیاری از موارد مانع یک پیش‌بینی دقیق برای کرنش ناپایداری پلاستیک شده است [۷].

برای آلیاژ C که دمای آنیل پایین‌تری داشته است شکل بسیار مسطح و تخت منحنی تنش - کرنش که باعث افت شدید آهنگ کار سختی در مراحل اولیه تغییر شکل شده است ممکن است باعث عدم دقت موجود در پیش‌بینی کرنش ناپایداری باری اندازه‌گیری شده ($\varepsilon_{II} = 0.084$) و کرنش تئوریک ($\varepsilon_{II} = 2n = 0.12$) شده باشد. مقادیر اندازه‌گیری شده کرنش ناپایداری فشاری (ε_{pic}) برای تمامی حالات کمتر از مقادیر تجربی بودند.

رفتار مشابه‌ای برای فولاد و مس و برنج گزارش شده [۶،۷] و چنین استنباط شده که معیار هیل در اغلب موارد

توزیع کرنش در ناپایداری فشاری کمتر از اختلاف بین کرنش‌ها پس از شکست می‌باشد. منحنی‌های تنش کرنش و آهنگ کار سختی برای هر سه حالت مورد مطالعه در شکل (۵) بطور جداگانه و در شکل (۶) روی یک نمودار نشان داده شده است. بوضوح دیده می‌شود که منحنی‌های تنش - کرنش آلیاژ C بسیار تخت بوده و لذا دارای آهنگ کار سختی بسیار کمی است. نکته جالب توجه اینکه این آلیاژ علیرغم قابلیت انعطاف بسیار کم در کشش تک محوری دارای ترکیب بسیار مناسبی از شکل‌پذیری و استحکام در کشش دو محوری می‌باشد.

۴- بحث

وابستگی آهنگ کار سختی ($d\sigma/d\varepsilon$) به کرنش از فیت کردن داده‌های تجربی به معادله هولمان^۱ یعنی $k\varepsilon^n = \sigma$ برای سه آلیاژ A, B, C بدست آمده و در شکل (۵) نشان داده شده است. همانگونه که قبلاً ذکر شده برای حالت تنش دو محوری متعادل شرط عمومی ناپایداری بر اساس بارماگزیمم توسط رابطه زیر داده می‌شود:

$$d\sigma/d\varepsilon = \sigma/2$$

بنابراین کرنش در محل تلاقی منحنی‌های $d\sigma/d\varepsilon$ و $\sigma/2$ همان کرنش ناپایداری باری است که با ε_{II} نشان داده شده است. با اعمال این شرایط ناپایداری در رابطه $\sigma = k\varepsilon^n$ کرنش حدی در ناپایداری چنین خواهد بود:

$$\varepsilon_{II} = 2n$$

معیار دیگر ناپایداری بر اساس فشار ماگزیمم است که این فشار را می‌توان در آزمایش هیدرولیک اندازه‌گرفت. همانگونه که گفته شد، هیل کرنش ناپایداری در این حالت

کرنش ناپایداری باری یعنی $\epsilon_{LI} = 0.084$ می‌باشد در حالیکه برای آلیاژ B مقدار کم $\Delta\epsilon = 0.556$ به خاطر بروز شیارهای سطحی در مراحل نهایی تغییر شکل که باعث محدود شدن کرنش شکست شده است می‌باشد.

۵- نتیجه‌گیری

الف) در تمامی حالات مورد بحث مقدار قابل توجهی تغییر شکل مفید بعد از وقوع ناپایداری فشاری وجود دارد، لذا این معیار نمی‌تواند معیار مناسبی برای بررسی شکل‌پذیری ورقهای آلومینیوم تجارتي در تغییر شکل دو محوری متعادل باشد.

ب) عوامل مؤثر بر شکل‌پذیری در حالت تنش دو بعدی متعادل را می‌توان توان کار سختی (n) و آهنگ کار سختی ($d\sigma/d\epsilon$) دانست.

ج) برای حالت تغییر شکل دو بعدی یا دو محوری که کاربردهای صنعتی فراوان در شکل دادن ورقها دارد آلومینیوم تجارتي را می‌توان به گونه‌ای عملیات حرارتي نمود که در عین داشتن استحکام بالا از شکل‌پذیری خوبی هم برخوردار باشد. این در حالی است که شکل‌پذیری آلیاژ در کشش تک محوری که با n_{II} و e_{II} بیان می‌گردد بسیار ضعیف می‌باشد و لذا نتایج تست کشش ساده نایستی برای کاربردهای تغییر شکل دو محوری به کار برده شود.

کرنش ناپایداری فشاری را کمتر از مقدار واقعی پیش‌بینی می‌نماید. علاوه بر این دلیل که مربوط به تئوری هیل است دلایل دیگری را برای اختلاف بین ϵ_{pic} و ϵ_{pi} می‌توان نام برد. یکی از این دلایل، عدم دقت در تعریف نقطه شروع ناپایداری فشاری است. این مطلب برای آلیاژهایی که مقدار تغییر شکل بیشتری در فشار ماگزیمم ثابت دارند، شدت بیشتری دارد. چنین به نظر می‌رسد که اگر کرنش ناپایداری فشاری در نقطه‌ای که فشار در آن برای اولین بار به مقدار حداکثر می‌رسد، باشد مقادیر کرنش ناپایداری اندازه‌گیری شده و محاسبه شده ϵ_{pi} ، ϵ_{pic} به مراتب به هم نزدیکتر خواهند شد. همین مطلب در مورد توزیع کرنش در فشار ماگزیمم و پس از پارگی صادق است و انتظار می‌رود که فاصله بین کرنش در فشار ماگزیمم و کرنش نهایی افزایش یابد. این واقعیت که اختلاف بین کرنش اندازه‌گیری شده و محاسبه شده برای آلیاژ C که n_B کمتری داشته و میزان تغییر شکل در فشار ثابت بیشتری دارد (شکل منحنی تنش کرنش آن تخت‌تر است) بیشتر از دو آلیاژ دیگر است مبین همین مسئله است.

در جدول (۲) کمیت $\Delta\epsilon = \epsilon_{LN} - \epsilon_{LI}$ تعریف شده که ظاهراً مستقل از پارامترهای تابع فشار است و لذا بایستی نقش تغییر شکل بعد از فشار ماگزیمم را در کل شکل به خوبی نشان دهد. ولی از آنجا که اثرات کار سختی حتی بعد از ناپایداری باری (F_{max}) هم از بین نمی‌رود $\Delta\epsilon$ هم شامل اثرات کار سختی و هم اثرات آهنگ کار سختی است و لذا نمی‌تواند مشکل تشخیص دقیق نقطه فشار ماگزیمم را حل نماید. قابل ذکر است که در مورد آلیاژ C مقدار بسیار زیاد $\Delta\epsilon = 0.716$ عمدتاً به خاطر پایین بودن

جدول (۱): مشخصات مکانیکی سه آلیاژ A,B,C در کشش تک محوری

آلیاژ	دمای آویل °C	n_u	K(MPa)	$\sigma_{0.2\%}$ (Mpa)
A	400	0.24	197.5	44.5
B	330	0.20	220	63.5
C	250	0.06	176.5	121.5

جدول (۲): نتایج حاصل از آزمایش کشش دو محوری متعادل (آزمایش بالچ هیدرولیک).

آلیاژ	n_b	ϵ_{LI}	ϵ_{pi}	ϵ_{pic}	ϵ_{LN}	$\Delta\epsilon$	H_{pi} (mm)	H_f (mm)
A	0.20	0.400	0.572	0.510	1.04	0.640	37.5	45.5
B	0.16	0.334	0.568	0.480	0.890	0.556	35.5	39.0
C	0.06	0.084	0.560	0.408	0.800	0.716	32	35

n_b : توان کارسختی در کشش دو محوری

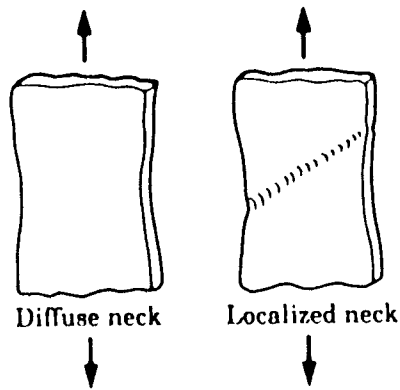
ϵ_{LI} : کرنش اندازه گیری شده در ناپایداری باری

ϵ_{pi} : کرنش اندازه گیری شده در ناپایداری فشاری

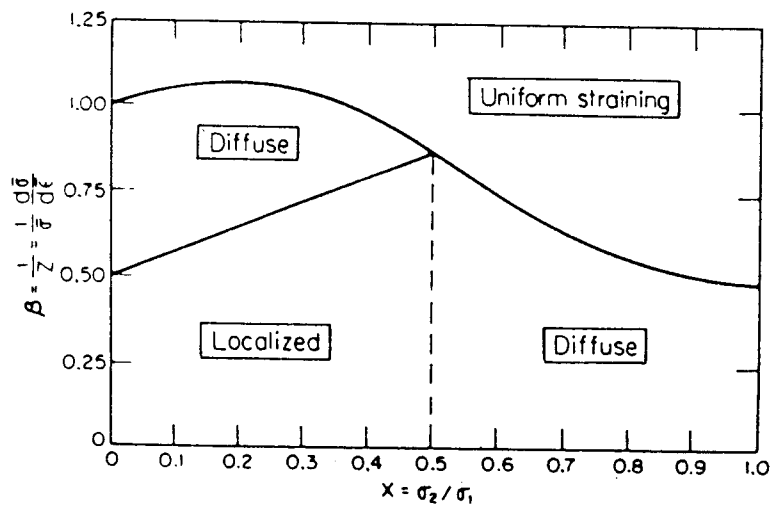
ϵ_{pic} : کرنش محاسبه شده در ناپایداری فشاری

ϵ_{LN} : کرنش در گردنی شدن موضعی

$\Delta\epsilon$: تغییرات کرنش نیمه پایدار

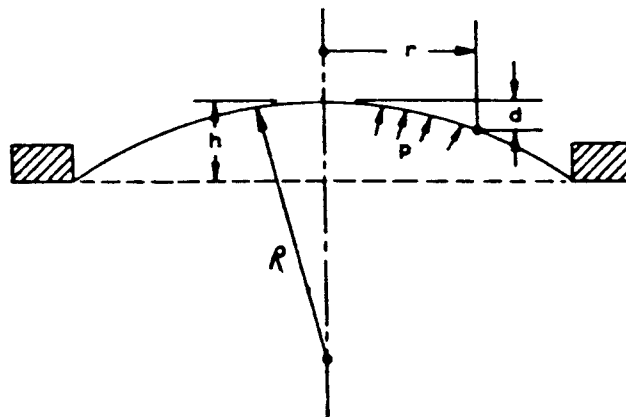


شکل ۱: گردنی شدن نفوذی و موضعی در یک نمونه ورق تخت تنش کششی.

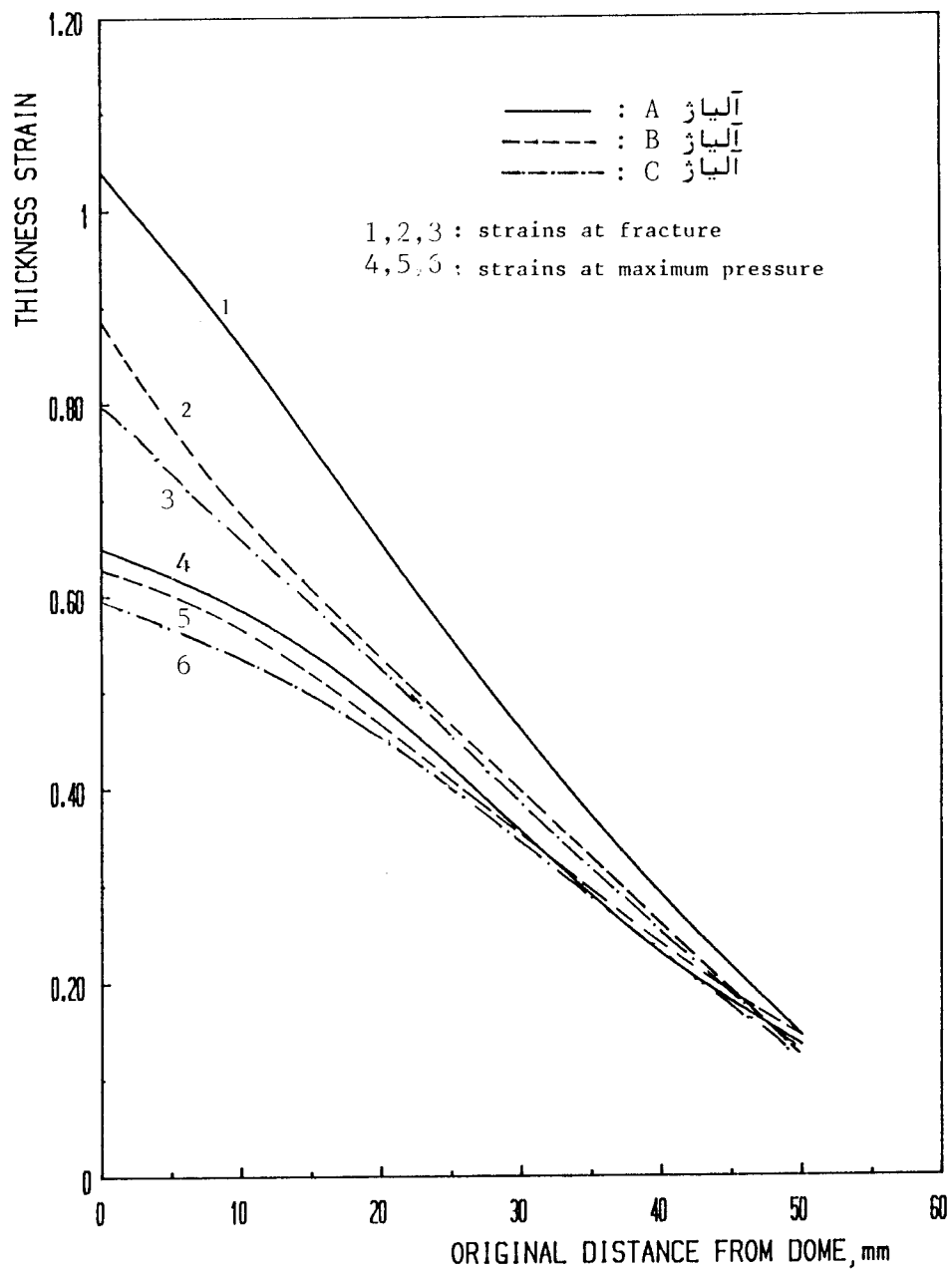


شکل ۲: خلاصه شرایط لازم برای گردنی شدن نفوذی و موضعی برای یک ماده آیزوتروپیک تحت

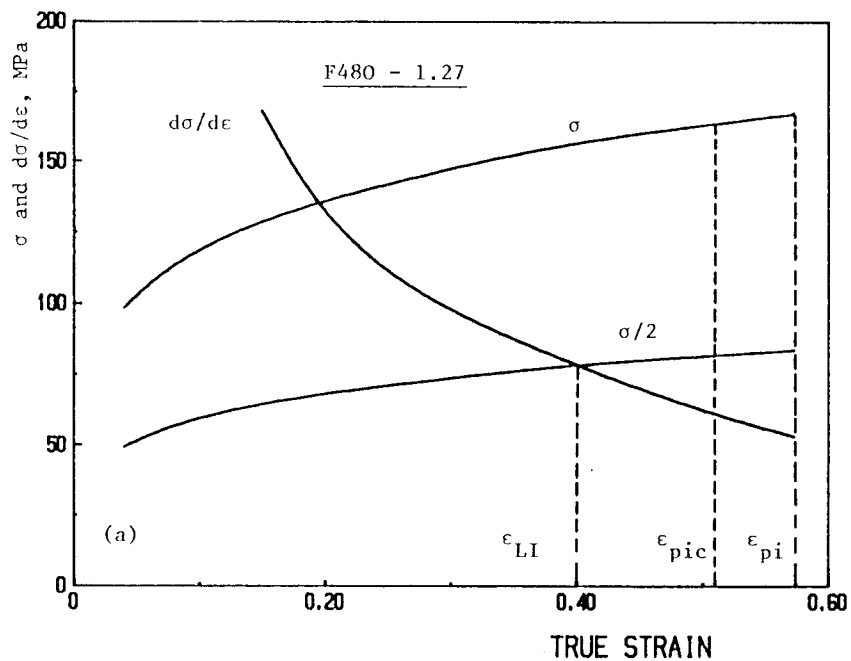
بارگذاری دوبعدی [مرجع ۳]



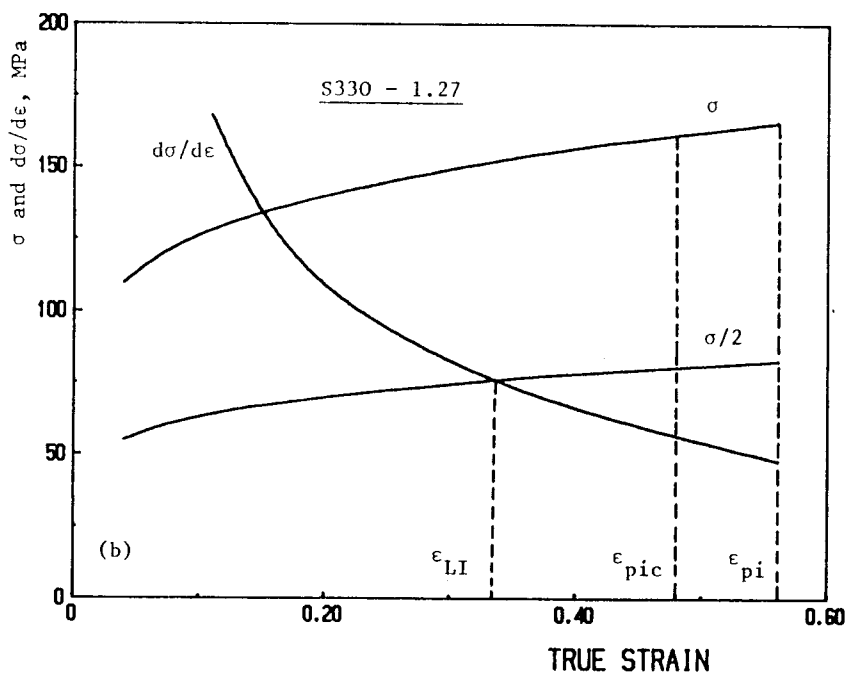
شکل ۳: نمایش شماتیک تغییر شکل یک دیافراگم در حال تغییر شکل در آزمایش بالچ هیدرولیک



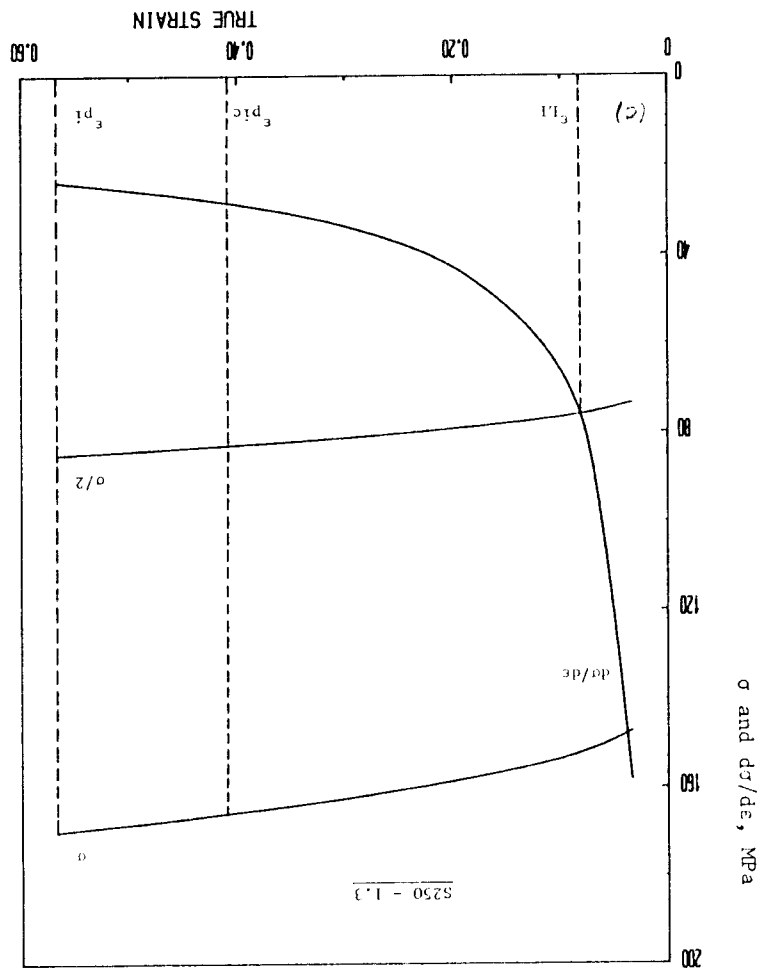
شکل ۴: توزیع کرنش در آزمایش بالج هیدرولیک



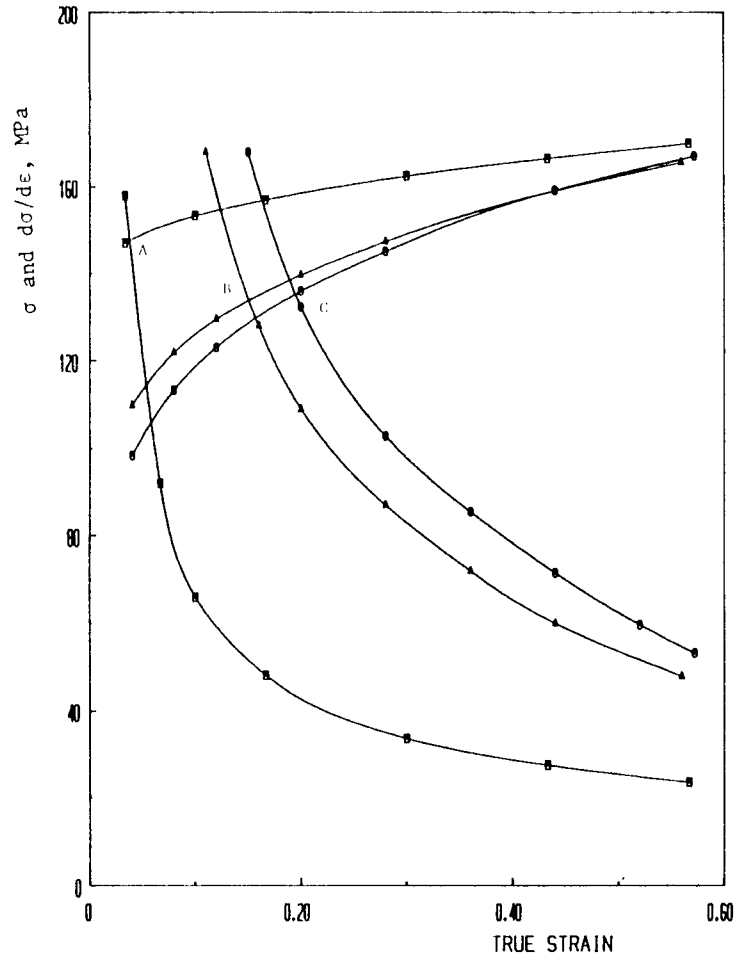
شکل ۵-ا: منحنی تنش کرنش و آهنگ کار سختی در تغییر شکل دو بعدی متعادل برای آلیاژ (A)



شکل ۵-ب: منحنی تنش کرنش و آهنگ کار سختی در تغییر شکل دو بعدی متعادل برای آلیاژ (B)



شکل ۵-۲: منحنی تنش کرنش و آهنگ کار سختی در تغییر شکل دو بعدی متعادل برای آلیاژ (C)



شکل ۶: ارتباط آهنگ کار سختی در بارگذاری دو محوری متعادل با کرنش برای آلیاژهای A,B,C.

فهرست منابع

- 1- H.W. Swift, J. Mech. Phys. Solid, 1, 1,(1952).
 - 2- R. Hill, J. Mech. Phys. Solid, 1, 19, (1952).
 - 3- S. P. Keeler and W. A. Backofen, Trans . of the ASM, 58, 25, (1963).
 - 4- D.V. Wilson and O. Ascelrad, Proc. 10th IDDRG Biennial Congress, 155,Warwick, 1978.
 - 5- R. Hill, Phil. Mag. , 44, 1133, (1980).
 - 6- N. M. Wang and M. R. Shammamy, J. Mech. Phys. Solids, 17, 43, (1969).
 - 7- H. J. Kleemola and Ranta-Eskola, Scand. J. Metall., 5, 124, (1976).
-