

خزش و ویژگیهای خزش-گسیختگی سرب خالص و آلیاژ قلع ۷۰٪- سرب ۳۰٪

اسماعیل برزکار^۱، محمدرضا فروزان^۲
E.barzkar@me.iut.ac.ir

پذیرش مقاله: ۸۹/۰۳/۳۰

دریافت مقاله: ۸۹/۰۱/۱۰

چکیده

مواد در دماهای بالاتر از ۴۰٪ دمای مطلق ذوب خود، از خود رفتار خزشی قابل توجهی نشان می‌دهند. سرب، قلع و آلیاژهای آنها، از جمله موادی هستند که در دمای محیط خزش قابل توجهی بروز می‌دهند. از مهمترین موارد استفاده آلیاژهای قلع-سرب، لحیمکاری اتصالات در صنایع الکترونیک و از مهمترین کاربردهای سرب خالص می‌توان به دیواره‌های ایزوله و باتری‌های تر اشاره نمود. دمای اتاق برای سرب نزدیک به ۵۰٪ و برای آلیاژ قلع ۷۰٪-سرب ۳۰٪، در حدود ۶۳٪ دمای مطلق ذوب آنهاست و آسیب خزش در طراحی سازه‌های شامل آنها بسیار اهمیت می‌یابد. در این مقاله آزمایش‌هایی جهت بدست آوردن داده‌های خزش و خزش-گسیختگی این دو ماده انجام شده است. نمودارهای حاصل از آزمایش در قالب روابط کاربردی، جهت استفاده در شبیه سازی کامپیوتری و پیشبینی عمر اتصالات ارائه گردیده است. نمودارهای خزش گسیختگی به فرم رابطه زمان سختی در مرحله اولیه خزش (رابطه کرنش-زمان) و خزش گسیختگی آنها در قالب پارامترهای لارسن-میلر و مونکام-گرانته ارائه شده است. همچنین رابطه نرخ کرنش پایای خزش هر دو ماده به صورت تابع تنش نیز ارائه گردیده است.

کلیدواژه:

خزش گسیختگی - سرب - قلع ۷۰٪ - سرب ۳۰٪ - مدل زمان-سختی - پارامتر لارسن میلر - پارامتر مونکام-گرانته - نرخ کرنش پایا

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان

۲- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان forouzan@cc.iut.ac.ir

۱- مقدمه

از کاربردهای سرب در صنعت می‌توان به استفاده از آن در اتاقهای رادیولوژی و دیواره‌های ایزوله کننده در مقابل تشعشعات رادیواکتیو در نیروگاه‌های هسته‌ای اشاره نمود. امروزه در صنایع الکترونیک و لحیمکاری، به منظور کاهش حجم و بهینه‌سازی اتصالات لحیمکاری^۱ و زرد جوشکاری^۲، خواص مکانیکی مواد لحیم کاری از جمله قلع ۷۰٪- سرب ۳۰٪ چه به منظور اتصالات هادی و چه اتصالات مکانیکی، اهمیت می‌یابد. عمده مصرف قلع در صنعت لحیم کاری می‌باشد. مصرف قلع در این صنعت به دلیل تقاضای زیاد کشورهای ایالات متحده آمریکا، ژاپن و با سهم کمتری در دیگر کشورهای صنعتی به میزان قابل توجهی افزایش یافته است.

۹٪ قلع در پوشش ورقه‌های آهنی با یک لایه نازک قلع کاربرد دارد. این ورقه‌ها در ساخت قوطی های کنسرو استفاده می‌شوند. ۳۹٪ قلع در ساخت ورقه های حلبی کاربرد دارد. ۲۴٪ قلع در لحیمکاری به مصرف می‌رسد. ۱۴٪ قلع در تهیه آلیاژهای مهم برنز (قلع-مس)، مفرغ (قلع-سرب)، آلیاژهای مخصوص، آلیاژ پوششی و برنز فسفر کاربرد دارد.

خزش^۳ تغییر شکل آهسته مواد تحت بار، در اثر دمای بالاتر از ۴۰٪ دمای ذوب فلزات است [۱]. دمای اتاق برای اتصالات لحیمکاری و همچنین سرب خالص، دمایی به ترتیب ۶۳ و ۵۰ درصد دمای مطلق ذوب آنها است. بنابراین در طراحی اتصالات لحیمکاری و همچنین دیواره‌های محافظ تشعشع سربی، تحت اثر وزن، پدیده خزش بایستی لحاظ شود.

تا کنون محققین به دلیل اهمیت خزش در طراحی، به بررسی و استخراج خواص انواع آلیاژهای قلع و سرب پرداخته‌اند. این آلیاژها به دو دسته سرب دار و بدون سرب تقسیم می‌شوند. در دستاورد دالی و همکاران، خواص مکانیکی و خزشی دسته‌ای از آلیاژهای لحیم بر پایه قلع-آنتیموان بررسی و بدست آمده است [۲]. فوجیوارا و اوتسیکا برابر بودن مکانیزم خزش در ساختار ماده در اثر خزش با بار تک محوره و خزش با روش ایجاد فرورفتگی^۴ را بررسی نموده‌اند [۳]. والی و همکاران اثر تغییر دما در خستگی کم چرخه^۵ و آسیب خزش در آلیاژهای جدید لحیمکاری فاقد سرب را مطالعه نمودند [۴]. کانچانوما و همکاران در مقالاتی به بررسی اثر رشد ترک و خزش در مود نخست آن روی آلیاژهای یوتکتیک^۶ سرب-قلع و همچنین به بررسی اثر تاثیر نرخ کرنش روی مکانیزم خستگی کم

چرخه و تاثیر دما روی خواص خستگی کم چرخه آلیاژ یوتکتیک قلع-نقره و همچنین اثر دما روی رفتار خستگی کم چرخه آلیاژ یوتکتیک قلع-سرب پرداخته‌اند [۵]-[۹]. کونا و ویپر مدل ویسکوپلاستیک چرخه‌ای^۷ و آسیب خزش لحیمهای بدون سرب را ارائه نموده‌اند [۱۰]. محمودی و گرانمایه با روش ایجاد فرورفتگی در دسته‌ای از آلیاژهای بدون سرب و فوق یوتکتیک ترکیب آلیاژ لحیمکاری روی-قلع فاقد سرب به مطالعه خزش پرداخته‌اند [۱۱]-[۱۲]. زاما و همکاران در مقاله‌ای به بررسی کرنش پایای خزش قلع در دمای نزدیک به نقطه ذوب آن اقدام نموده‌اند [۱۳]. ژانگ و همکاران در یک مطالعه رفتار خزشی لحیمهای قلع-نقره-مس با دوپینگ اندک سرب را مورد پژوهش قرار داده‌اند [۱۴].

در این مقاله، نتایج آزمون‌هایی که جهت تعیین خواص خزش و خزش گسیختگی دو ماده سرب و قلع ۷۰٪- سرب ۳۰٪ انجام شده است و نمودارهای کرنش خزشی مهندسی بر حسب زمان در رژیم اولیه خزش ارائه شده است. نرخ کرنش پایا، مدل زمان سختی^۸، پارامترهای لارسن-میلر^۹ و مونکام-گران^{۱۰} نیز محاسبه شده است. این داده‌ها به منظور طراحی و تحلیل اجزای محدود بسیار کاربردی و کمیاب می‌باشند.

۲- خزش

خزش، کرنش پلاستیک آهسته مواد در اثر بار و دماست. گرچه خزش در هر دمایی می‌تواند رخ دهد، اما سه رژیم قابل توجه کرنش وابسته به زمان آن، در دمای بالای ۴۰٪ دمای ذوب آنها اهمیت می‌یابد. در دماهای بالا، این کرنش پلاستیک به صورت مداوم ادامه یافته تا سرانجام گلوبی شدن و شکست در ماده رخ دهد. نرخ کرنش با افزایش دما و بار مورد تحمل ماده به شدت افزایش می‌یابد. این رفتار مواد را می‌توان در دمای ثابت به صورت رابطه^(۱) بیان نمود.

$$\epsilon_{cr} = \frac{K \sigma^m t^{n+1}}{n+1} \quad (1)$$

این رابطه مربوط به کرنش خزش در رژیم اولیه می‌باشد. در این رابطه ϵ_{cr} کرنش خزشی، σ تنش، t زمان، و ثابت K و m و n وابسته به نوع ماده بوده و از آزمایش بدست می‌آیند. زمان گسیختگی نمونه در آزمون خزش نیز حساسیت بسیاری به بار و دمای نمونه آزمایش دارد. لارسن و میلر (۱۹۵۳) طی رابطه‌ای، بین

1- Soldering

2- Brazing

3- Creep

4- Indentation creep

5- Low cycle fatigue

6- Eutectic

7- Hyper eutectic

8- Time hardening

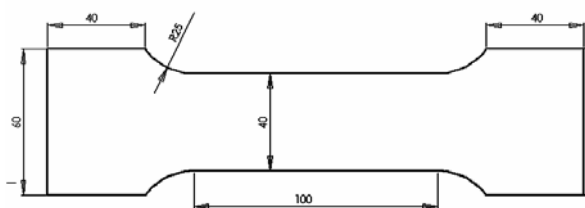
9- Larson-miller parameter

10- Monkam-Grant parameter

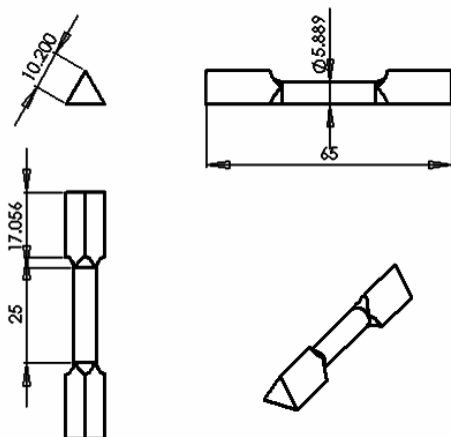
جدول (۱): درصد عناصر موجود در آلیاژهای سرب و قلع مورد استفاده در آزمایشات عملی

	SN	PB	SB	BI
سرب	<1.0	98.66	0.379	0.03
قلع ۷۰٪-سرب ۳۰٪	70±0.6	29.872±0.6	0.02	0.01
	Cu	Ag	Cd	
سرب	0.0167	0.0029	0.0005	
قلع ۷۰٪-سرب ۳۰٪	0.01	0.005	0.001	
	Zn	Ni	Al	
سرب	0.0087	0.001	-	
قلع ۷۰٪-سرب ۳۰٪	0.001	-	0.001	
	As	Fe	other	
سرب	-	0.0005	-	
قلع ۷۰٪-سرب ۳۰٪	0.01	0.02	0.05	

تست خزش و کشش نیز طبق استاندارد ASTM E139 [۱۶] با دستگاه SANTAM STM 150 و در دمای محیط به انجام رسیده است. شکل دستگاه آزمایش در شکل (۳) و نمونه قرار داده شده در فکهای دستگاه آزمایش در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل (۱): نقشه ساخت قطعه سربی طبق استاندارد ASTM E8M ابعاد به میلیمتر



شکل (۲): نقشه ساخت قطعه قلع ۷۰٪-سرب ۳۰٪ طبق ASTM E8M ابعاد به میلیمتر

زمان گسیختگی خزشی، تنش و دمای نمونه مورد مطالعه و حدت بخشیدند. رابطه لارسن-میلر یکی از روابط مناسب جهت برونیابی زمان گسیختگی مواد تحت خزش است. این پارامتر در رابطه (۲) نشان داده شده است.

$$LMP = T (C + \log(T_r)) \quad (2)$$

$$LMP = K_1 + K_2 \log(\sigma)$$

که در آن، LMP ، T و T_r به ترتیب پارامتر لارسن میلر، دما و زمان گسیختگی و C ، K_1 ، K_2 نیز ثوابتی هستند که وابسته به خواص ماده و از آزمون به دست می‌آیند. مهمترین پارامتر بر حسب آنالیزهای تئوری، نرخ کرنش پایا $\dot{\epsilon}_{ss}$ است. وابستگی آن به تنش در دمای ثابت بصورت رابطه (۳) بیان می‌شود:

$$\dot{\epsilon}_{ss} = K_3 \sigma^m \quad (3)$$

که در آن K_3 و m ثوابت وابسته به ماده بوده و از آزمون به دست می‌آیند. از دیگر روابط کاربردی جهت میانجیابی و برونیابی زمان گسیختگی خزش مواد، مشابه پارامتر لارسن-میلر، پارامتر مونکام گرانت می‌باشد. این پارامتر در رابطه (۴) نشان داده شده است.

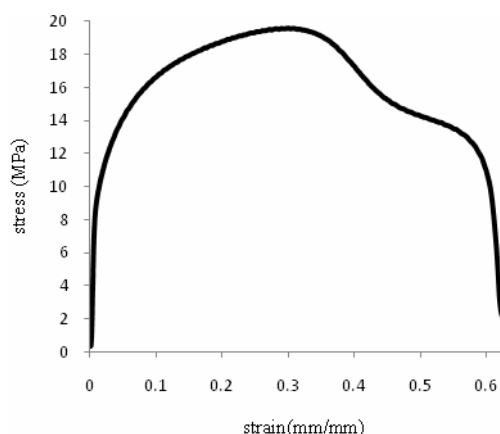
$$T_r \times \dot{\epsilon}_{ss}^M = C_{MG} \quad (4)$$

$$\dot{\epsilon}_{ss} = K \sigma_a^n$$

که در آن σ_a تنش موثر، C_{MG} پارامتر مونکام گرانت و K ، M و n ثابتی وابسته به خواص ماده بوده و از آزمون به دست می‌آیند.

۳- طرح آزمایش

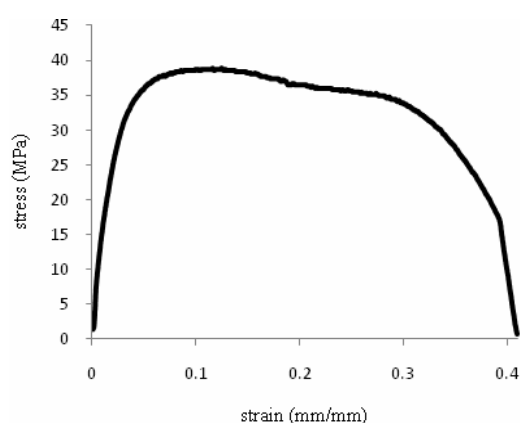
به منظور انجام تست خزش، ابتدا بایستی استحکام تسلیم و نهایی مواد معین شود. قطعه سربی از ورق سرب با ضخامت ۳ میلیمتر و قطعه قلع ۷۰٪-سرب ۳۰٪ از میله لچیمکاری با مقطع مثلثی شکل که در بازار موجود است، تهیه شده است. ورق سرب توسط دستگاه فرز و میله لچیم توسط دستگاه تراش، طبق استاندارد ASTM E8M [۱۵] به ابعاد لازم تراشیده شده‌اند (شکل ۱ و ۲). نتیجه حاصل از آزمون کوانتومتری به منظور تعیین تجزیه شیمیایی مواد یاد شده، در داده شده است.



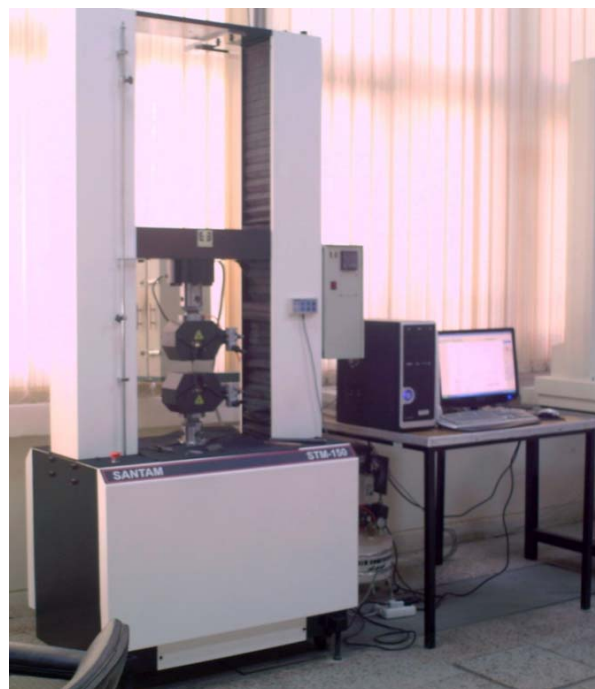
شکل (۵): نتیجه حاصل از تست کشش ساده نمونه سرب خالص

۴- تست خزش

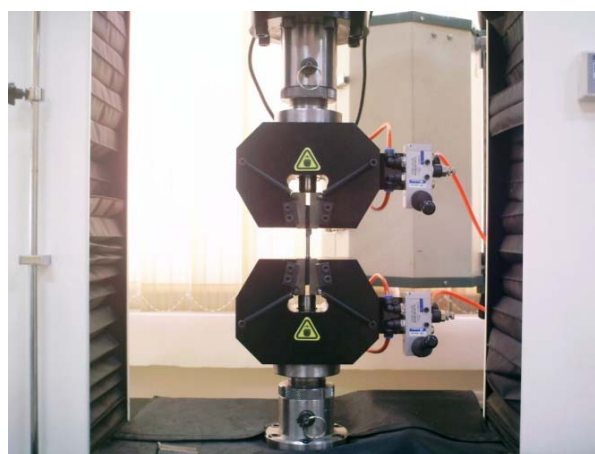
به منظور شتاب دادن آزمونهای خزش می‌بایست تا حد امکان از تنشها و دماهای بالا جهت تسریع داده برداری استفاده نمود. بدین منظور بازه تنش اعمالی در قطعه سربی از $10/2$ تا $14/7$ مگاپاسکال و در نمونه قلع-سرب بازه تنش $24/2$ تا $28/92$ مگاپاسکال انتخاب شد (نزدیک به تنش تسلیم). از هر نمونه ۳ آزمون خزش انجام شد و داده‌های کرنش مهندسی خزش بر حسب زمان مربوط به سرب در شکل (۷) و برای ماده قلع-سرب در شکل (۸) آورده شده است. اگر زمان گسیختگی مواد استخراج شود، جدول (۲) و جدول (۳) حاصل خواهد شد.



شکل (۶): نمودار حاصل از کشش ساده نمونه قلع ۷۰٪ سرب ۳۰٪



شکل (۳): شکل دستگاه آزمایش کشش و خزش



شکل (۴): شکل دستگاه آزمایش و فکهای درگیر با قطعه بسته شده

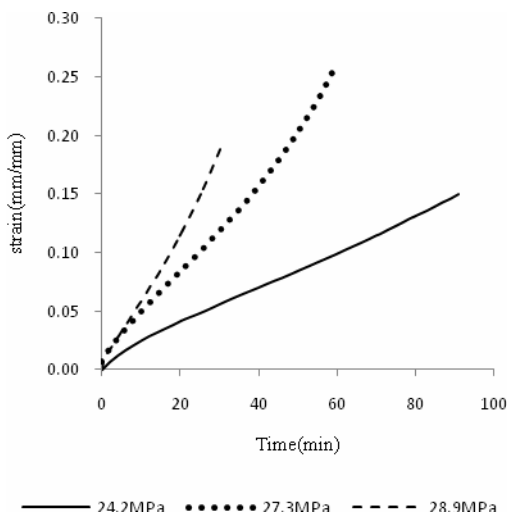
۵- تست کشش ساده

نتیجه حاصل از تست کشش ساده جهت تعیین تنشهای تسلیم و نهایی این مواد برای سرب در شکل (۵) و برای قلع-سرب در شکل (۶) نشان داده شده است. در آزمون خزش سعی بر آن است تا تنش اعمال شده از حد نهایی پایین‌تر باشد ولی اگر در ناحیه پلاستیک بعد از تنش تسلیم بار داده شود در مکانیزم خزش خللی وارد نمی‌آید، گرچه آزمون را با دشواری‌هایی مواجه می‌سازد.

مقدار تغییر شکل مواد نامبرده را بر اثر گذشت زمان در تنشهای مختلف، پیشگویی کرد. کاربرد مهم این رابطه در مدلسازی اجزاء محدود است.

جدول (۴): ضرایب حاصل از برازش منحنی برای معادله (۱)

	K	m	n	R^2
سرب	7×10^{-7}	۳/۲۳۳	-۰/۱۵	۰/۸۱۹۱
قلع-سرب	6×10^{-12}	۶/۲۴	-۰/۲۵	۰/۹۹۹۱



شکل (۸): نمودار منحنی‌های حاصل از کرنش مهندسی خزشی ماده قلع ۷۰٪ سرب ۳۰٪

۶-۳- نتایج تنش-گسیختگی

با توجه به آنکه دمای محیط آزمایش دمای اتاق است (۲۹۸ کلوین) از روی این نتایج می‌توان پارامتر لارسن میلر را تشکیل داده و بر حسب تنش رسم نمود. نتیجه این عمل نمودارهای شکل (۹) و شکل (۱۰) است. بهترین نمودار با شکل لگاریتمی، از داده‌ها گذرانده شده و در نتیجه رابطه لارسن میلر برای ماده سرب در رابطه (۵) و برای ماده قلع سرب در رابطه (۶) داده شده است. مقدار ضریب پراکندگی^۱ مناسب و نزدیک به واحد این پردازش‌ها، مؤید این مطلب است.

$$\begin{cases} LMP = 298 \times (20 + \log(T_r)) \\ LMP = 9209.9 - 831.4 \ln(\sigma) \\ R^2 = 0.9923 \end{cases} \quad (5)$$

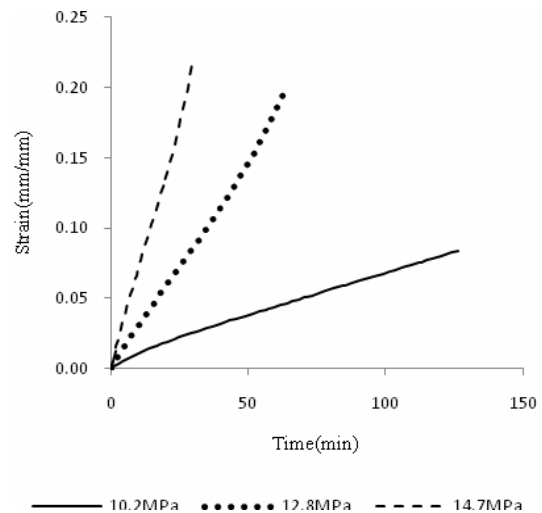
1- Coefficient of restitution

جدول (۲): نتایج تنش گسیختگی ماده قلع ۷۰٪ سرب ۳۰٪

زمان گسیختگی (دقیقه)	تنش (مگاپاسکال)	پارامتر لارسن میلر ($LMP=T(C+\log T_r)$)
۱۷۰	۲۴/۲	۶۵۵۸
۸۳	۲۷/۴	۶۴۶۶
۵۲/۵	۲۸/۹	۶۴۰۷

جدول (۳): نتایج تنش گسیختگی ماده سرب

زمان گسیختگی (دقیقه)	تنش (مگاپاسکال)	پارامتر لارسن میلر ($LMP=T(C+\log T_r)$)
۳۷۰	۱۰/۲	۶۵۵۸
۱۰۰	۱۲/۸	۶۴۹۰
۵۱	۱۴/۷	۶۴۰۳



شکل (۷): نمودار کرنش مهندسی بر حسب زمان در تنش‌های مختلف برای سرب خالص

۶- نتایج و بحث

۶-۱- نتایج کشش ساده

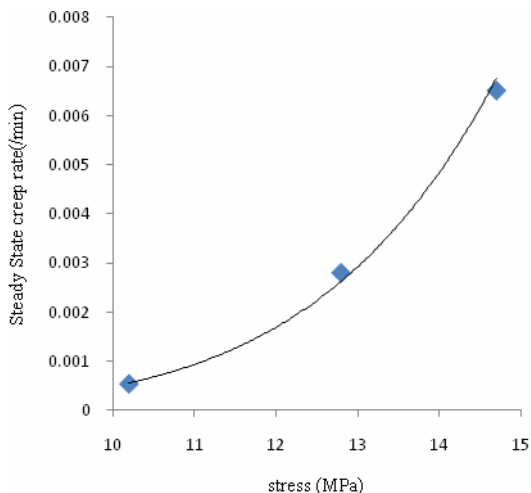
در نتیجه این آزمایشها تنش تسلیم و نهایی برای ماده سرب خالص به ترتیب برابر ۱۰ و ۲۰ مگاپاسکال و برای نمونه قلع ۷۰٪ سرب ۳۰٪ به ترتیب برابر ۳۵ و ۳۸ مگاپاسکال تعیین می‌شود. از این نتایج در طراحی بر اساس تنش تسلیم و نهایی در طراحی اجزاء مکانیکی شامل اینگونه مواد استفاده می‌شود.

۶-۲- نتایج کرنش-زمان

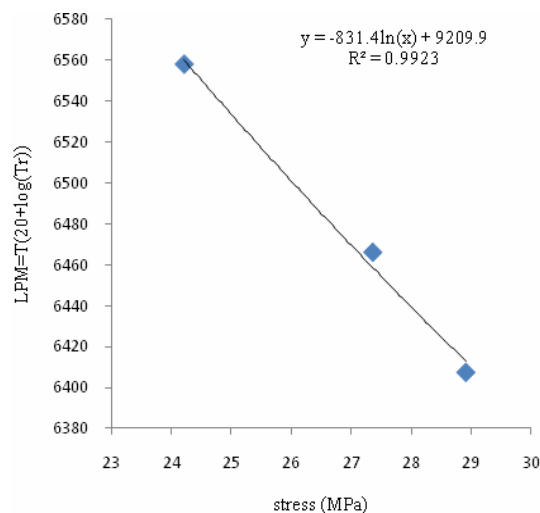
پس از بدست آمدن داده‌های کرنش بر حسب زمان، این داده‌ها پس از آنالیز شدن در قالب رابطه (۱)، ضرایب آن در جدول (۴) داده شده است. این ضرایب نشان دهنده نرمتر بودن ماده سرب در مقابل خزش نسبت به ماده قلع می‌باشد. با استفاده از این نتایج می‌توان

محاسبه عمر گسیختگی و نهایی قطعات ساخته شده از مواد نامبرده نموده و مطالبات خود از طراحی را بر آورده ساخت.

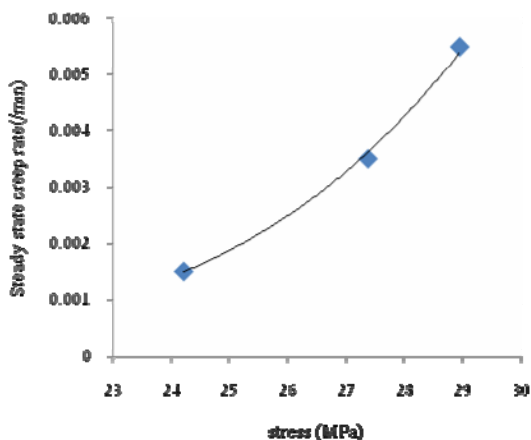
$$\begin{cases} LMP = 298 \times (20 + \log(T_r)) \\ LMP = 8363 - 706.14 \ln(\sigma) \\ R^2 = 0.9981 \end{cases} \quad (۶)$$



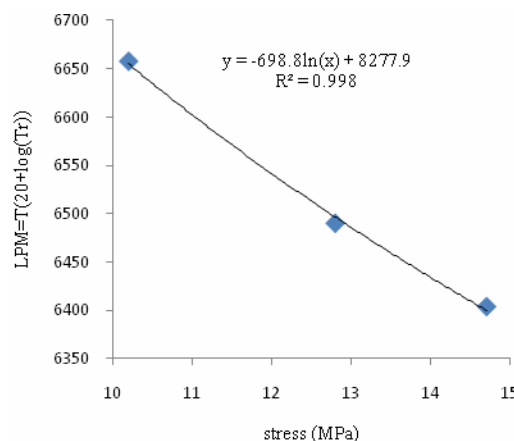
شکل (۱۱): منحنی نرخ کرنش پایا بر حسب تنش ماده سرب



شکل (۹): نمودار پارامتر لارسن میلر بر حسب تنش برای سرب خالص



شکل (۱۲): منحنی نرخ کرنش پایا بر حسب تنش ماده قلع سرب



شکل (۱۰): نمودار پارامتر لارسن میلر بر حسب تنش برای قلع ۷۰٪- سرب ۳۰٪

جدول (۵): نرخ کرنش پایای خزش نمونه سرب

تنش (مگا پاسکال)	نرخ کرنش پایا ($\times 10^{-3}$)
۱۰/۲	۰/۵۴۴
۱۲/۸	۲/۸
۱۴/۷	۶/۵

جدول (۶): نرخ کرنش پایای خزش نمونه قلع ۷۰٪ سرب ۳۰٪

تنش (مگا پاسکال)	نرخ کرنش پایا ($\times 10^{-3}$)
۲۴/۲	۱/۵
۲۷/۴	۳/۵
۲۸/۹	۵/۵

همچنین با توجه به نمودارهای کرنش زمان و استخراج مقدار نرخ کرنش پایا، پارامتر مونکام گرانت نیز به دست آمده است. نرخ کرنش پایای خزش نمونه سرب و قلع-سرب در تنشهای آزمایش به ترتیب در جداول (۴) و (۵) و وابستگی نرخ کرنش پایا به تنش اعمالی، در جدول ۶ محاسبه شده و ضرایب ثابت رابطه مونکام گرانت با برآزش منحنی مناسب برای هر دو، در نمودارهای شکل (۱۱) و شکل (۱۲) ماده نشان داده شده و در جدول (۸) داده شده است. با استفاده از این نتایج و پس پردازشهای حاصل از آزمایش، می توان مبادرت به

S., and Kathleen, M., "Heat resistant materials: ASM international", 1985.

- [2] El-Daly, A. A., Swilem, Y., and Hammad, A. E., "Creep properties of Sn-Sb based lead-free solder alloys", Journal of Alloys and Compounds, Vol. 471, 2009, pp. 98-104.
- [3] Fujiwara, M. and Otsuka, M., "Indentation creep of [beta]-Sn and Sn-Pb eutectic alloy", Materials Science and Engineering A, Vol. 319-321, 2001, pp. 929-933.
- [4] Hegde, P., Whalley, D. C., and Silberschmidt, V. V., "Creep damage study at powercycling of lead-free surface mount device", Computational Materials Science, Vol. 45, 2009, pp. 638-645.
- [5] Kanchanomai, C., Limtrakarn, W., and Mutoh, Y., "Fatigue crack growth behavior in Sn-Pb eutectic solder/copper joint under mode I loading", Mechanics of Materials, Vol. 37, 2005, pp. 1166-1174.
- [6] Kanchanomai, C., Miyashita, Y., and Mutoh, Y., "Strain-rate effects on low cycle fatigue mechanism of eutectic Sn-Pb solder", International Journal of Fatigue, Vol. 24, 2002, pp. 987-993.
- [7] Kanchanomai, C., Miyashita, Y., and Mutoh, Y., "Low cycle fatigue behavior and mechanisms of a eutectic Sn-Pb solder 63Sn/37Pb", International Journal of Fatigue, Vol. 24, 2002, pp. 671-683.
- [8] Kanchanomai, C. and Mutoh, Y., "Effect of temperature on isothermal low cycle fatigue properties of Sn-Ag eutectic solder", Materials Science and Engineering A, Vol. 381, 2004, pp. 113-120.
- [9] Kanchanomai, C. and Mutoh, Y., "Temperature effect on low cycle fatigue behavior of Sn-Pb eutectic solder", Scripta Materialia, Vol. 50, 2004, pp. 83-88.
- [10] Kuna, M. and Wippler, S., "A cyclic viscoplastic and creep damage model for lead free solder alloys", Engineering Fracture Mechanics, Vol. In Press, Corrected Proof.
- [11] Mahmudi, R., Geranmayeh, A. R., Khanbareh, H., and Jahangiri, N., "Indentation creep of lead-free Sn-9Zn and Sn-8Zn-3Bi solder alloys", Materials & Design, Vol. 30, 2009, pp. 574-580.
- [12] Mahmudi, R., Geranmayeh, A. R., Noori, H., and Shahabi, M., "Impression creep of hypoeutectic Sn-Zn lead-free solder alloys", Materials Science and Engineering: A, Vol. 491, 2008, pp. 110-116.
- [13] Zama, W. A., Lang, D. D., and Brotzen, F. R., "Steady-state creep of tin near the melting point", Journal of the Mechanics and Physics of Solids, Vol. 8, 1960, pp. 45-51.
- [14] Zhang, L., Xue, S.-b., Gao, L.-l., Zeng, G., Chen, Y., Yu, S.-l., and Sheng, Z., "Creep behavior of SnAgCu solders with rare earth Ce doping", Transactions of Nonferrous Metals Society of China, Vol. 20, 2010, pp. 412-417.
- [15] "ASTM E8M - 00, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials", ed: ASTM International.
- [16] "ASTM E139-00, Standard Test Methods for Conducting Creep, Creep-Rupture, and Stress-Rupture Tests of Metallic Materials", ed: ASTM International, 2003.

جدول (۷): ضرایب حاصل از برازش منحنی برای نرخ کرنش پایا بر حسب تنش

$\dot{\epsilon}_{ss} = K \sigma_a^n$	K	n	R^2
سرب	$4/437 \times 10^{-11}$	۷/۰۰۲	۰/۹۹۴۶
قلع-سرب	$2/5 \times 10^{-13}$	۷/۰۷۱	۱

جدول (۸): ثوابت رابطه مونکام گرانت (رابطه (۴)) برای دو ماده سرب و قلع ۷۰٪-

سرب ۳۰٪		
	سرب	قلع-سرب
R^2	۰/۹۹۸۹	۰/۸۷۷
m	۰/۹۱۴۲	۰/۸۷۷
C	۰/۷۹۸۷	۰/۵۶۶۲

۷- جمع بندی

با انجام آزمایشات طبق استاندارد بین‌المللی ASTM، داده‌هایی از رفتار مواد سرب و قلع-سرب ۳۰٪ بدست آمد. از این نتایج با استفاده از عبور منحنی مناسب از نمودارهای کرنش زمان، با دقت خوبی، ثوابت روابط زمان سختی در رژیم اولیه، حاصل شد. با استفاده از نمودارهای کرنش-زمان حاصل از آزمایش، در هر ماده نرخ کرنش پایا بر حسب تنش رسم گردید. روابط مونکام گرانت با استفاده از اطلاعات تنش-گسیختگی و نرخ کرنش پایا در هر ماده استخراج گردید. رابطه پر کاربرد دیگر، پارامتر لارسن میلر، برای هر دو ماده از داده‌های زمان گسیختگی و تنش گسیختگی برای هر دو ماده استخراج گردید. روابط آنها بصورت جدول و روابطی ارائه گردید. ثوابت روابط بدست آمده، نقش مهمی در پیش‌بینی تغییر شکل خزشی مواد و زمان گسیختگی آنها در اثر مکانیزم خزش دارد. نتایج حاصل به شکل خزش تابع زمان را برای مواد نامبرده، می‌توان مستقیماً در نرم‌افزارهای تجاری اجزا محدود، نظیر ANSYS و ABAQUS استفاده نمود.

۸- تقدیر و تشکر

نویسندگان از زحمات همکاران محترم در کارگاه‌های پژوهشی دانشکده مهندسی مکانیک که ابزار تهیه قطعات را در اختیار قرار دادند و آزمایشگاه مکانیکی مواد و کوانتومتری دانشکده مهندسی مواد دانشگاه صنعتی اصفهان که زحمت انجام آزمونهای متعدد و طولانی کشش، خزش و آنالیز عناصر را تقبل نمودند صمیمانه تشکر و قدردانی می‌نمایند.

۹- مراجع

- [1] John, R. N., Joseph, R. D., Sunniva, K. R., Deborah, A. D., Heather, J. F., Diane, M. J., William, H. C., Robert, I.