



Ferdowsi University
of Mashhad

Journal of Metallurgical and Materials Engineering


<https://jmme.um.ac.ir>



Iron & Steel
Society of Iran

Investigation of Rolling Direction and Groove Geometry on the Impact Behavior of Aluminum Alloy AA6061 and AA7020

Research Article

Farzad Soleymani¹ 

DOI: [10.22067/jmme.2024.84343.1124](https://doi.org/10.22067/jmme.2024.84343.1124)

1. Introduction

In high-strength aluminum alloys, in addition to the maximum tensile strength, the resistance of the alloy to fracture should also be considered. The Sharpie impact test can be a reliable test to determine brittle fracture, to perform the test on cold-rolled aluminum sheet AA6061 and AA7020 with a specific rolling direction to the dimensions of 10x10 mm. ×55.

2- Test method

To perform hardness deposition, AA7020 samples were placed in an oven at 475°C for 2 hours. Besides, AA6061 samples were placed in an oven at 530°C for 2 hours, and then quenched in cold water. Artificial parts were placed at a temperature of 150°C for 12 hours.

3- Results and discussion

In the majority of AA7020 alloy samples, brittle failure is dominant and type I loading is more important. In AA6061 alloy, the failure of most samples is a mixture of soft and brittle fracture, which indicates loading as a mixture of types III/ II/ I. As shown in Tables 1-6, in most of the samples, with the increase of groove angle, the amount of energy absorbed in the direction of failure has decreased. According to Tables 6 and 5, in some of the samples that have secondary cracks, the average depth of the cracks has decreased with the increase of the groove angle. The order of increase of absorbed energy towards failure is X-Y-Z-D. But the value of fracture toughness in the state (S-T) has a minimum value. In this case, failure occurs easily between the rolled layers. By changing the direction of the samples in the form of X-Y-Z-D, the fracture section in the X direction is smooth (flat) and changes very little in the Y direction, and a kind of slowness is observed at the end of the sample (in front of the groove). In samples with Z direction, the fracture angle is diagonal, and in

some of these samples, a crack has appeared, and in samples with D direction, the fracture section is diagonal, and in some, the fracture angle is high, and there are secondary cracks in most of the samples. In most of the samples, the value of cutting-edge breakage is the lowest in the D direction, followed by the Z direction and then in the X direction, and the highest value of the cutting edges is seen in the Y direction. The percentage value of lateral correlation is the highest value in the majority of samples in the D direction. In samples with Z direction, a crack appeared on one side of the sample during failure, and the average crack depth is 2 mm, but in D grade samples, cracks appeared on both sides of the sample, and the average crack depth is 4 mm. Also, in this case, the amount of crack depth has decreased with increasing temperature, and with increasing groove angle, the amount of crack depth has also decreased.

4- Conclusion

In all the tested angles and temperatures, the absorbed energy of the D degree has the highest value. It can also be said that the lowest amount of absorbed energy is in the samples of degree X, and also that the amount of impact energy has increased in the order of degrees D-Z-Y-X. Increasing the angle of the groove causes the type of failure to change as type I. Also, the effect of direction is not very important at low temperatures because they do not show very big differences. In most of the tested temperatures, with increasing groove angle, the amount of absorbed energy decreases, and increasing the groove angle causes a decrease in the fracture toughness. Also, in most of the tested groove angles, with increasing temperature, the amount of absorbed energy decreases.

*Manuscript received: September 9, 2023, Revised. November 26, 2023, Accepted, January 24, 2024.

¹ Assistant Professor, Faculty Member of Payam Noor University. **Email:** f.soleymani52@pnu.ac.ir

Table 3- The results of the percentage of soft fracture and lateral expansion in the form of cutting edges of 7020 AA alloy in different directions, temperature and groove angle.

groove angle		Test temperature				Lateral extension lesson				Fracture energy (J)			
		X(C)	Y(A)	(E) Z	D(B)	X(C)	Y(A)	(E) Z	D(B)	X (C)	Y(A)	(E) Z	D(B)
30	-60	46.45	61.5	28	30	5	7	7	10	21	30	40	73
	0	44.75	64	28	20	7	5	9	7	22	26	41	77
	25	40.5	60.25	32	30	5	7	10	14	23	27	42	66
	100	48.85	49.62	30	32	6	7	20	10	24	28	43	61
45	-60	48.8	63.02	32	26	6	7	8	11	29	35	39	73
	0	49.6	68.15	36	24	6	9	8	12	30	38	41	76
	25	52	64.25	32	26	7	6	7	13	33	41	42	68
	100	50.5	56.5	42.25	28	5	8	7	11	35	43	43	56
60	-60	48.85	64.47	28	26	5	6	9	9	28	30	39	74
	0	47.2	47.5	34	26	5	8	8	10	29	33	40	75
	25	43.12	61.57	24	28	4	7	8	14	31	40	42	70
	100	45.6	44	42.25	28	5	9	7	12	33	45	45	62
90	-60	34.45	65	38	28	5	9	9	13	26	29	38	62
	0	45.55	52	36	26	7	7	8	11	29	34	39	65
	25	42.4	50.7	32	36	5	8	7	12	30	37	44	55
	100	51.2	59.5	41.35	30	8	8	9	10	34	39	47	51

Table 4- The results of percentage of soft fracture and lateral expansion in the form of cutting edges of AA6061 alloy in different directions, temperature and groove angle.

groove angle		Test temperature			Lateral extension lesson			Fracture energy (J)		
		X (C)	Y (A)	Z (E)	X(C)	Y(A)	(E) Z	X (C)	Y (A)	Z (E)
30	-60	66.5	67.62	76.25	18	20	20	45	47	50
	0	64	69.37	65	19	18	14	47	48	52
	25	70	69.37	58.75	19	18	5	51	52	53
	100	71.12	38.72	81.25	19	16	14	52	53	55
45	-60	69.37	70.75	75.6	16	17	13	39	40	41
	0	65	61.75	91.25	17	18	8	43	44	45
	25	71.5	59	68.65	20	18	10	47	49	49
	100	60.62	53.25	81.25	16	16	10	50	50	51
60	-60	74.5	90.5	61.75	15	17	4	38	39	40
	0	76.25	68.5	72.25	11	13	22	40	41	42
	25	74.5	73.75	67.62	20	19	18	41	43	44
	100	72.5	66.75	72	12	22	14	44	45	46
90	-60	58.37	61.75	56.5	13	19	10	36	37	40
	0	73.75	76.25	32	18	20	20	38	39	43
	25	91.25	78.12	51.87	23	11	14	39	40	44
	100	47.5	38	73.75	19	16	16	40	45	47

Table 5- Average fracture type, crack depth in millimeters and cracked directions of 7020 AA alloy in different directions, temperature and groove angle(R = smooth, M = diagonal, × = no crack, √ = crack)

groove angle		Test temperature			Lateral extension lesson		Fracture energy (J)			
		X(C)	Y(A)	(E) Z	D(B)	X(C)	Y(A)	(E) Z	D(B)	
30	-60	×	×	Both sides 1.5	Both sides3	R	R	M	M	
	0	×	×	Both sides3	Both sides6	R	R	M	M	
	25	×	×	One sides	Both sides5	R	R	M	M	
	100	×	×	One sides	One sides	R	R	M	M	
45	-60	×	×	One sides 2	Both sides4	R	R	M	M	
	0	×	×	One sides1.5	Both sides3	R	R	M	M	
	25	×	×	×	Both sides3.5	R	R	M	M	
	100	×	×	One sides	One sides	R	R	M	M	
60	-60	×	×	One sides1.5	Both sides4.5	R	R	M	M	
	0	×	×	One sides	Both sides4.5	R	R	M	M	
	25	×	×	Both sides2	Both sides3	R	R	M	M	
	100	×	×	One sides	Both sides1.5	R	R	M	M	
90	-60	×	×	×	Both sides3.5	R	R	M	M	
	0	×	×	One sides	Both sides4.5	R	R	M	M	
	25	×	×	One sides1.5	Both sides2.5	R	R	M	M	
	100	×	×	One sides 1	One sides	R	R	M	M	

Table 6- Average type of fracture, depth of crack in millimeters of cracked directions of 6061 AA alloy in different directions, temperature and groove angle

groove angle	Test temperature	Lateral extension lesson			Fracture energy (J)		
		X(C)	Y(A)	(E) Z	X(C)	Y(A)	(E) Z
30	-60	×	×	√	R	M	M
	0	×	×	√	R	R	M
	25	×	×	√	R	M	M
	100	×	×	√	R	M	M
45	-60	×	×	√	R	R	M
	0	×	×	√	R	R	M
	25	×	√	√	R	R	M
	100	×	√	×	R	R	M
60	-60	×	√	√	R	M	R
	0	×	×	√	M	M	M
	25	×	√	√	M	R	M
	100	×	×	√	M	R	M
90	-60	×	×	√	R	R	M
	0	×	√	√	M	R	M
	25	×	×	√	M	R	M
	100	×	×	√	R	R	M



بررسی جهت نورد و هندسه شیار روی رفتار ضربه‌ای آلیاژ آلومینیم AA6061 و AA7020*

مقاله پژوهشی

فرزاد سلیمانی^(۱)

DOI: 10.22067/jmme.2024.84343.1124

چکیده رفتار ضربه‌ای آلیاژ آلومینیم AA6061 و AA7020 نورد سرد شده توسط آزمایش ضربه شارپی بررسی شد. چهار جهت طولی نورد و عرضی طولی و عرضی کوتاه (در دو وضعیت قرار گیری شیار) مورد بررسی قرار گرفتند. زوایای شیار مورد آزمایش ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه بوده و دماهای آزمایش ۶۰°C، ۰°C و ۲۵°C انتخاب شدند. از هر نمونه جهت اطمینان و دامنه پراکندگی تهیه گردید. همچنین جهت استحکام بخشی آلیاژهای آلومینیم فوق از عملیات حرارتی رسوب سختی T65 استفاده شد. نتایج نشان داد که با افزایش دما مقدار انرژی ضربه افزایش می‌یابد و با افزایش زاویه شیار مقدار انرژی ضربه کاهش می‌یابد و نوع شکست از حالت برشی به تخت و مخلوطی از هر دو تغییر می‌کند. در جهت طولی نورد کمترین مقدار انرژی ضربه را داشته و در جهت عرضی کوتاه بیشترین مقدار انرژی ضربه را دارد.

واژه‌های کلیدی انرژی ضربه، جهت شیار، شکست برشی، آلیاژ آلومینیم.

Effect of Rolling Direction and Groove Geometry on Impact Behaviour of AA6061 and AA 7020 Aluminum Alloys

Farzad soleymani

Abstract Impact behavior of cold rolled AA6061 and AA 7020 aluminum alloys were investigated by Charpy impact test. Four longitudinal and long transverse and short transverse (in two groove positions) were studied. The groove angles were 30, 45, 60 and 90 degrees and temperatures tests were dry ice, zero degrees, ambient and boiling water temperatures. Two samples of each variable were taken to ensure the distribution range. Also for strengthening of aluminum alloys T65 precipitation hardening heat treatment was used. The results showed that increasing temperature increased the amount of impact energy and impact energy value decreased with increasing groove angle and failure mode altered from shear to flat and a mixture of both. Samples had the minimum amount of impact energy in the rolling longitudinal direction and the maximum amount of impact energy in the short transverse direction.

Keywords Impact energy, Groove direction, Shear failure, Aluminum alloy.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۲/۶/۱۸ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۲/۱۱/۴ می‌باشد.

(۱) نویسنده مسئول، عضو هیئت علمی دانشگاه پیام نور.

مقدمه

حدود ۸۵ درصد آلومینیم مصرفی، محصولات کار شده از قبیل صفحات نورد سرد شده می‌باشند که از شمش‌های ریختگی به عنوان ماده اولیه استفاده می‌شود و با فرایندهای بعدی به محصول نهایی تبدیل می‌شود و طی این فرایندها ریزساختار نیز تغییر می‌کند [1]. در آلیاژهای پراستحکام آلومینیم فقط حداکثر استحکام کششی را نباید در نظر گرفت و به مقاومت آلیاژ در مقابل شکست نیز باید توجه شود. همچنین باید اثر جهت نورد روی خواص مکانیکی یا همان ان ایزوتروپی را مورد توجه قرار داد. تغییر شکل ورق‌های آلومینیم در دمای محیط منجر به استحکام‌بخشی از طریق ایجاد بافت‌ها می‌گردد. بافت‌های حاصل از کار سرد باعث جهت‌دار شدن خواص مکانیکی می‌شود و باعث افزایش نسبی استحکام تسلیم و استحکام کششی در امتداد تغییر شکل می‌گردد. جهت نورد معمولاً در صفحات و محصولات ورق خیلی مهم نیست اما با افزایش ضخامت ورق، اهمیت آن افزایش می‌یابد و در محصولات ضخیم، جهت نه تنها خواص مکانیکی را تحت تاثیر قرار می‌دهد بلکه خواص دیگری مانند مقاومت به ترک‌دار شدن از قسمت عرضی را نیز تغییر می‌دهد. جهت‌دار بودن خواص و ریزساختار بر روی طراحی و شرایط تغییر شکل قطعه کار تاثیر می‌گذارد [2]. جهت مرجح حاصل از تغییر شکل پلاستیک (در فرآیند نورد) به شدت به سیستم دوقلو و لغزش بستگی دارد ولی به زاویه قالب، قطر غلتک، سرعت غلتک و کاهش ضخامت در هر مرحله بستگی ندارد [3]. تبلور مجدد یک فلز کار سرد شده، جهت مرجحی تولید می‌کند که از آرایش موجود تغییر شکل محکم تر است و با آن فرق دارد [3]. رشته‌ای شدن مکانیکی تاثیر کمی بر شکل دادن دارد ولی رشته‌ای شدن بلوری یا جهت مرجح ممکن است اثر زیادی داشته باشد. از جهت دار شدن مواد (بافت) برای افزایش مقاومت به تسلیم استفاده می‌شود و همچنین کیفیت در کشش عمیق در اثر بافت صحیح افزایش می‌یابد. در ورق‌های ترانس از جنس آهن و سیلیسیم، افت انرژی با آرایش دانه در جهت آسان مغناطیسی شدن به حداقل می‌رسد. در خم‌کاری وقتی خم موازی جهت نورد است خم شدن خیلی مشکل تر از وقتی است که خم برجهت نورد عمود است. تغییر شکل و ویژگی‌های شکست یک ماده معین به ماهیت پیوند الکترونی، ساختار بلوری و میزان نظم ماده بستگی دارد. هرچه الکترون‌های ظرفیت ثابت‌تر باشند ماده تردتر است. در مواد با پیوند فلزی، کمترین محدودیت برای حرکت

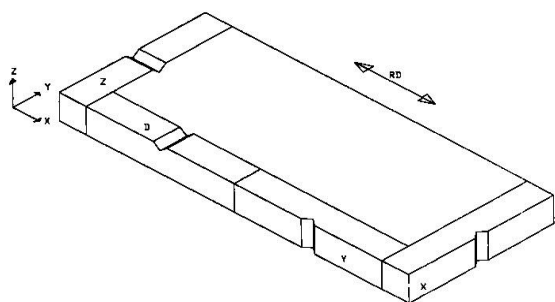
الکترون‌های ظرفیت است و الکترون‌های ظرفیت بطور مساوی در بین تمام اتم‌ها مشترک است و بیشترین آمادگی را برای تغییر شکل دارند [3]. معمولاً استحکام کششی در جهت طولی نسبت به جهت عرضی بیشتر است، برای آلیاژهای غیر قابل عملیات حرارتی، خواص مکانیکی را در جهت طولی و آلیاژهای قابل عملیات حرارتی، در جهت عرضی طویل در نظر می‌گیرند [2].

آلیاژهای آلومینیم AA6061 به‌عنوان آلیاژهای ساختمانی با استحکام متوسط دارای خواص جوش پذیری و مقاومت در مقابل ترک خوردگی تنش هستند. در این آلیاژها منیزیم و سیلیسیم به مقدار متعادل افزوده می‌شود تا تشکیل آلیاژهای شبه دوتایی $\text{Al-Mg}_2\text{Si}$ ($\text{Mg/Si}=1.731$) دهد و یا با سیلیسیم بیشتر از مقدار لازم تشکیل Mg_2Si می‌دهد. این گروه از آلیاژها به پیرشدن حساسیت بیشتری داشته و در یک فرایند جداگانه آنها را تحت عملیات حرارتی انحلال و کوئنچ قرار می‌دهند. مس برای بهبود خواص مکانیکی و کروم برای کاهش تاثیر منفی احتمالی مس بر مقاومت به خوردگی افزوده می‌شود. این آلیاژها به‌عنوان ماده ساختمانی عمومی، موارد مصرف زیادی دارند [1].

آلیاژهای آلومینیم گروه 7xxx بالاترین توانایی را برای پیرسخت شدن دارند و قابلیت جوش پذیری خوبی دارند از این آلیاژهای برای تسلیحات نظامی و سازه‌های هواپیما استفاده می‌شود همچنین برای کارهایی که نیاز به چقرمگی شکست زیاد همراه با کاهش وزن مخصوص دارند بکار می‌روند [1]. برای تعیین تمایل ماده به رفتار ترد از انواع مختلف آزمایش ضربه استفاده می‌شود و تفاوت‌هایی را بین مواد مشخص می‌کند که در آزمایش کشش قابل مشاهده نیست و با استفاده از آزمایش ضربه شارپی با شیار V شکل می‌توان آزمایش مطمئنی برای شکست ترد انجام داد و از نتایج آن می‌توان مقدار انرژی جذب شده برای شکست را برحسب ژول بدست آورد [4,5].

از بررسی سطح شکست مقدار ترد یا نرم بودن و یا مخلوطی از هر دو را می‌توان به‌صورت درصد تخمین زد. آزمایش ضربه شارپی به‌طور وسیعی بر روی آلیاژهای آهنی صورت گرفته است اما برای آلیاژهای سبک بطور گسترده کار نشده است. خواص مکانیکی آلیاژهای آلومینیم با توجه به تغییر دما رفتار متفاوتی از خود نشان می‌دهند از آزمایش ضربه در دماهای مختلف می‌توان به محدوده دمای انتقالی آلیاژهایی که دارای دمای انتقالی هستند پی‌برد، همچنین می‌توان مقدار نرمی

توجه به جهات نورد مورد نیاز تهیه گردید (شکل ۱). جهت طولی نورد در امتداد محور x و جهت عرضی طویل در امتداد محور y و جهت عرضی کوتاه در امتداد محور z یا همان ضخامت نمونه است که شیار در راستای امتداد محور x است و حالت چهارم جهت عرضی کوتاه با این تفاوت که شیار در راستای محور y ها است و با علامت D مشخص گردیده است.



شکل ۱ نمایش جهات تهیه نمونه با توجه به جهت شیار و جهت نورد

برای انجام آزمایش ضربه از استاندارد ASTM E23 استفاده گردیده است [8]. دماهای آزمایش یخ خشک (-60°C)، صفر درجه، دمای محیط و آب جوش انتخاب شدند. قبل از شروع آزمایش ابتدا یک بار آزمایش ضربه را بدون قرار دادن نمونه جهت بدست آوردن انرژی صرف شده جهت اصطکاک هوا و یاتاقان‌های دستگاه انجام داده سپس آزمایش ضربه را برای هر یک از نمونه‌ها انجام داده و مقدار انرژی ضربه را با توجه به شرایط دستگاه و انرژی اولیه و نهائی آن محاسبه گردید. در نهایت مقطع شکست نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفتند.

نمونه را با توجه به درصد انبساط جانبی نمونه طی شکست بدست آورد [4,5]. پارامتر مهم دیگری که از آزمایش ضربه می‌توان بدست آورد ارتباط آن با چقرمگی شکست است که با توجه به مشکل بودن آزمایش چقرمگی شکست می‌توان از آزمایش ضربه شاریپی استفاده نمود [6,7].

روش انجام آزمایش

برای انجام آزمایش از ورق آلومینیم نورد سرد شده AA6061 و AA7020 با جهت نورد مشخص و ضخامت 10mm استفاده شد. قبل از شروع آزمایش آنالیز آن مشخص گردید (جدول ۱) و با نمونه استاندارد تطبیق داده شد (جدول ۲)؛ سپس نمونه‌ها با توجه به جهات نورد مشخص مورد نیاز به ابعاد $55 \times 10 \times 10\text{mm}$ برش و ماشین‌کاری شدند. قبل از ایجاد شیار روی نمونه‌ها کلیه نمونه‌ها تحت سیکل عملیات حرارتی رسوب سختی قرار گرفتند برای انجام رسوب سختی ابتدا برای عملیات انحلال نمونه‌های AA7020 در دمای 475°C به مدت ۲ ساعت در کوره قرار گرفتند نمونه‌های AA6061 در دمای 530°C به مدت ۲ ساعت در کوره قرار گرفتند و سپس در آب سرد کوئنچ شدند و برای عملیات پیرسازی به صورت مصنوعی قطعات در دمای 150°C به مدت ۱۲ ساعت قرار گرفتند. هدف از سیکل عملیات حرارتی فوق به دست آوردن حداکثر سختی نبوده است زیرا برای بررسی شکست نیاز به سختی همراه با انعطاف پذیری است. سختی نمونه‌های عملیات حرارتی شده با روش برنیل با ساچمه به قطر 5mm و نیروی اعمالی 125 کیلوگرم اندازه‌گیری شد، سپس شیارهایی به عمق 2mm و شعاع انتهائی 0.25mm با زوایای 30° ، 45° و 60° درجه با

جدول ۱ ترکیب شیمیائی آلیاژ آلومینیم AA6061 و AA7020 مورد آزمایش (براساس درصد وزنی)

آلیاژ	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Cr	Ni	Al
AA7020	0.20	0.23	0.16	0.086	1.065	4.58	0.04	0.21	0.017	باقیمانده
AA6061	0.57	0.16	0.017	0.029	0.426	0.01	0.007	0.001	0.001	باقیمانده

جدول ۲ خواص مکانیکی استاندارد آلیاژ آلومینیم AA6061 و AA7020

آلیاژ	UTS N/mm^2	YS N/mm^2	El %	E N/mm^2	Tm $^{\circ}\text{C}$	$\rho\text{ g/cm}^3$	BHN
7020-T6	370	290	15	71500	615	280	117
6061-T6	230	180	14	61900	600	270	117

نتایج و بحث

مقدار سختی حاصل آلیاژهای آلومینیم برای آلیاژ AA7020 برابر 109 HB و برای آلیاژ AA6061 برابر 65HB بدست آمده است. برای هر یک از نمونه‌ها انرژی ضربه محاسبه و مقدار انرژی اصطکاک از آنها کم شده و نتایج آن در جداول (۳) و (۴) ارائه شده است.

در جهت X (طول نورد) مقدار انرژی ضربه حداقل است. در آزمایش ضربه شاریبی نیرو در امتداد جهت شیار اعمال می‌شود. در این حالت نیرو در جهت طولی دانه‌های کشیده شده طی نورد سرد اعمال می‌شود و شیار نیز در همان جهت می‌خواهد به رشد خود ادامه دهد (شکل ۲). به همین دلیل با کمترین مقدار انرژی نسبت به حالت‌های دیگر شکست صورت می‌گیرد. در این مرحله جوانه‌زنی و رشد ترک در امتداد مرزهای طولی انجام می‌شود و موانع بازدارنده از ادامه شکست کم است.

همان‌طور که در نتایج سطح شکست مشخص گردید در

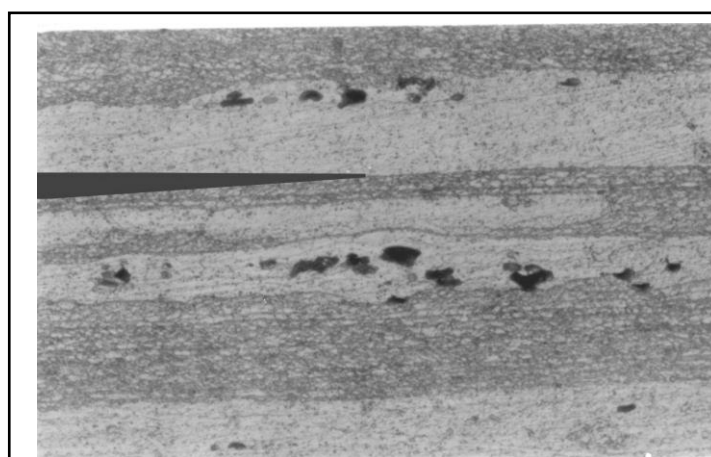
این حالت نمونه‌ها به صورت صاف می‌شکنند (جدول ۳ و ۴). در شکست مسطح شرایط کرنش صفحه‌ای حاکم است و مقدار انرژی کمتری جهت شکست صرف می‌شود. در این جهت در هنگام شکست روی نمونه‌ها ترک‌های ثانویه بوجود نمی‌آید (جداول ۶ و ۵). مقدار درصد انبساط جانبی نیز در این جهت مقدار کمی است (جداول ۳ و ۴) و در این حالت مقدار شکست نرم به صورت برشی در لبه‌های نمونه نیز نسبت به دیگر جهات کمتر است (جداول ۶ و ۵). حال اگر همین نمونه را با آزمایش چقرمگی شکست مقایسه نماییم، مشابه حالت T-L یا حالت I برای آزمایش چقرمگی شکست K_{IC} می‌شود. در این صورت نیروی اعمالی در جهت عمود بر وجوه شیار است (جهت Y) ولی شیار می‌خواهد در جهت X یا همان جهت طولی (مرزدانه) نورد به رشد خود ادامه دهد، در نتیجه مقدار انرژی صرف شده چقرمگی شکست برای این حالت دارای مقدار متوسطی نسبت به دیگر جهات است [9-12].

جدول ۳ نتایج درصد شکست نرم و درصد انبساط جانبی به صورت لبه‌های برشی نمونه‌های آزمایش ضربه آلیاژ آلومینیم AA 7020 در جهات و دما و زاویه شیار مختلف

زاویه شیار (°)	دمای آزمایش (°C)	درصد شکست نرم				درصد انبساط جانبی				انرژی شکست (J)			
		X(C)	Y(A)	(E) Z	D(B)	X(C)	Y(A)	(E) Z	D(B)	X (C)	Y(A)	(E) Z	D(B)
30	-60	46.45	61.5	28	30	5	7	7	10	21	30	40	73
	0	44.75	64	28	20	7	5	9	7	22	26	41	77
	25	40.5	60.25	32	30	5	7	10	14	23	27	42	66
	100	48.85	49.62	30	32	6	7	20	10	24	28	43	61
45	-60	48.8	63.02	32	26	6	7	8	11	29	35	39	73
	0	49.6	68.15	36	24	6	9	8	12	30	38	41	76
	25	52	64.25	32	26	7	6	7	13	33	41	42	68
	100	50.5	56.5	42.25	28	5	8	7	11	35	43	43	56
60	-60	48.85	64.47	28	26	5	6	9	9	28	30	39	74
	0	47.2	47.5	34	26	5	8	8	10	29	33	40	75
	25	43.12	61.57	24	28	4	7	8	14	31	40	42	70
	100	45.6	44	42.25	28	5	9	7	12	33	45	45	62
90	-60	34.45	65	38	28	5	9	9	13	26	29	38	62
	0	45.55	52	36	26	7	7	8	11	29	34	39	65
	25	42.4	50.7	32	36	5	8	7	12	30	37	44	55
	100	51.2	59.5	41.35	30	8	8	9	10	34	39	47	51

جدول ۴ نتایج درصد شکست نرم و درصد انبساط جانبی به صورت لبه‌های برشی نمونه‌های آزمایش ضربه آلیاژ آلومینیم AA6061 در جهات و دما و زاویه شیار مختلف

زاویه شیار (°)	دمای آزمایش (°C)	درصد شکست نرم			درصد انبساط جانبی			انرژی شکست (J)		
		X (C)	Y (A)	Z (E)	X(C)	Y(A)	(E) Z	X (C)	Y (A)	Z (E)
30	-60	66.5	67.62	76.25	18	20	20	45	47	50
	0	64	69.37	65	19	18	14	47	48	52
	25	70	69.37	58.75	19	18	5	51	52	53
	100	71.12	38.72	81.25	19	16	14	52	53	55
45	-60	69.37	70.75	75.6	16	17	13	39	40	41
	0	65	61.75	91.25	17	18	8	43	44	45
	25	71.5	59	68.65	20	18	10	47	49	49
	100	60.62	53.25	81.25	16	16	10	50	50	51
60	-60	74.5	90.5	61.75	15	17	4	38	39	40
	0	76.25	68.5	72.25	11	13	22	40	41	42
	25	74.5	73.75	67.62	20	19	18	41	43	44
	100	72.5	66.75	72	12	22	14	44	45	46
90	-60	58.37	61.75	56.5	13	19	10	36	37	40
	0	73.75	76.25	32	18	20	20	38	39	43
	25	91.25	78.12	51.87	23	11	14	39	40	44
	100	47.5	38	73.75	19	16	16	40	45	47



شکل ۲ ساختار متالوگرافی شده نمونه شکسته و ترک‌دار در امتداد محور طولی نورد

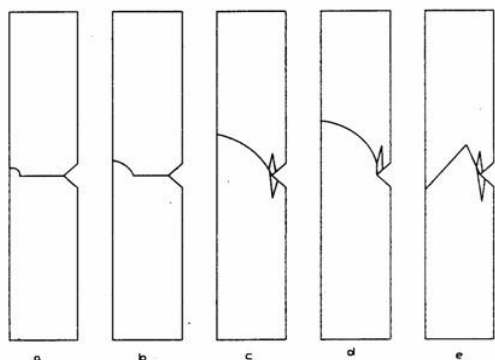
جدول ۵ میانگین نوع شکست، عمق ترک برحسب میلی‌متر و جهات ترک‌دار نمونه‌های آزمایش ضربه آلیاژ آلومینیم AA ۷۰۲۰ در جهات و دما و زاویه شیار مختلف (ص = صاف، م = مورب، × = ترک ندارد، √ = ترک دارد)

زاویه شیار (°)	دمای آزمایش (°C)	ترک دارشدن				نوع شکست			
		X(C)	Y(A)	(E) Z	D(B)	X(C)	Y(A)	(E) Z	D(B)
30	-60	×	×	دوطرف 1.5	دوطرف 3	ص	ص	م	م زیاد
	0	×	×	دوطرف 3	دوطرف 6	ص	ص	م	م
	25	×	×	یک طرف 2	دوطرف 5	ص	ص	م	م زیاد
	100	×	×	یک طرف 1	یک طرف 3	ص	ص	م	م زیاد
45	-60	×	×	یک طرف 2	دوطرف 4	ص	ص	م	م زیاد
	0	×	×	یک طرف 1.5	دوطرف 3	ص	ص	م	م
	25	×	×	×	دوطرف 3.5	ص	ص	م	م زیاد
	100	×	×	یک طرف 1	یک طرف 3	ص	ص	م	م
60	-60	×	×	یک طرف 1.5	دوطرف 4.5	ص	ص	م	م زیاد
	0	×	×	یک طرف 2	دوطرف 4.5	ص	ص	م	م زیاد
	25	×	×	دوطرف 2	دوطرف 3	ص	ص	م	م زیاد
	100	×	×	یک طرف 1	دوطرف 1.5	ص	ص	م	م زیاد
90	-60	×	×	×	دوطرف 3.5	ص	م کم	م	م زیاد
	0	×	×	یک طرف 2	دوطرف 4.5	ص	ص	م	م زیاد
	25	×	×	یک طرف 1.5	دوطرف 2.5	ص	ص	م	م زیاد
	100	×	×	یک طرف 1	یک طرف 1.5	ص	ص	م	م زیاد

جدول ۶ میانگین نوع شکست، عمق ترک برحسب ملیمتر و جهات ترک دارنمونه‌های آزمایش ضربه آلیاژ آلومینیم AA ۶۰۶۱ در جهات و دما و زاویه شیار مختلف

زاویه شیار (°)	دمای آزمایش (°C)	ترک دارشدن			نوع شکست		
		X(C)	Y(A)	(E) Z	X(C)	Y(A)	(E) Z
30	-60	×	×	√	ص	م کمی	م
	0	×	×	√	ص	ص	م
	25	×	×	√	ص	م	م کم
	100	×	×	√	ص	م کمی	م کمی
45	-60	×	×	√	ص	ص	م
	0	×	×	√	ص	ص	م
	25	×	√	√	ص	ص	م
	100	×	√	×	ص	ص	م
60	-60	×	√	√	ص	م	ص
	0	×	×	√	م	م	م
	25	×	√	√	م	ص	م
	100	×	×	√	م	ص	م
90	-60	×	×	√	ص	ص	م
	0	×	√	√	م	ص	م
	25	×	×	√	م	ص	م
	100	×	×	√	ص	ص	م

شیار در امتداد محور Y و دانه های عرضی است. در این حالت بیشترین مقدار انرژی جذب شده را بدست آورده است. نمونه های درجهت (Z) شیار در امتداد جهت طولی نورد است و در نمونه های (D) عمود بر جهت طولی نورد است. شکست در این شرایط ابتدا تمایل دارد که در امتداد رسوبات و دانه های کشیده شده درجهت نورد شروع شود ولی جهت نیرو عمود بر آن است و به همین خاطر در ابتدا روی نمونه ها ترک های ثانویه در امتداد رسوبات بوجود می آید و در ادامه مسیر شکست به صورت مورب رشد می کند و باعث می شود که انرژی زیادی جهت شکست صرف شود. شماتیک مسیر شکست نمونه ها در شکل (۳) آمده است. در شکست به صورت مورب احتمالاً برای ایجاد شکست چقرمه تر شرایط تنش صفحه ای ارجحیت دارد. شکست نمونه ها در این شرایط دارای کمترین مقدار شکست نرم به صورت برشی در لبه های نمونه است و مقدار درصد انبساط جانبی در این حالت بیشتر از حالت های قبل است.



شکل ۳ شماتیک مسیر شکست با توجه به جهت نورد. (a) درجهت X، (b) درجهت Y، (c) درجهت Z و D، (d) درجهت Z و (e) درجهت D

ترتیب افزایش انرژی جذب شده جهت شکست به صورت $X - Y - Z - D$ است. اما مقدار چقرمگی شکست در این حالت (S-T) که در امتداد ضخامت نمونه یا همان محور Z باشد دارای حداقل مقدار است. در این حالت شیار در بین ضخامت نمونه است و نیرو در امتداد محور Z و عمود بر وجوه شیار است، شکست به راحتی در بین لایه های نورد شده صورت می گیرد. برای آزمایش چقرمگی شکست در حالت S-T نیز مانند آزمایش ضربه در امتداد محور Z شیار می تواند به دو صورت قرار گیرد، یکی در امتداد دانه های طولی و دیگری در جهت عرض دانه ها (Y).

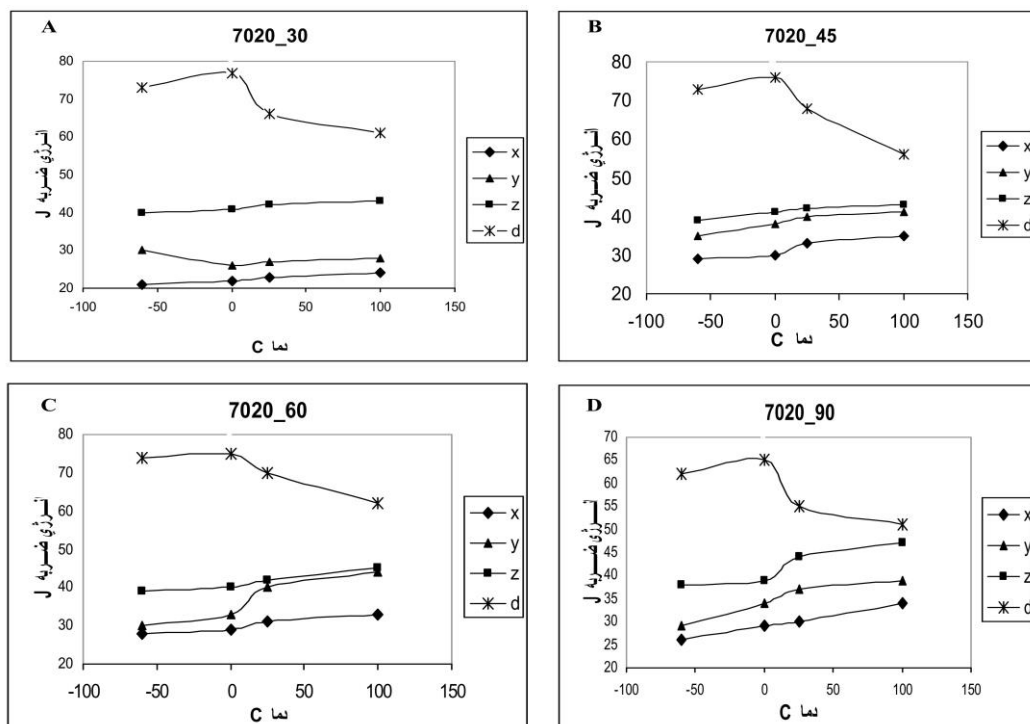
آزمایش ضربه درجهت محور Y یا همان محور عرضی مقدار انرژی بیشتری را نسبت به حالت X جذب کرده است. در نمونه های با جهت محور Y شیار در جهت عمود بر دانه های طولی (جهت نورد) است و جهت اعمال نیرو نیز در همان جهت (Y) است. در چنین حالتی شیار می خواهد در امتداد خود (محور Y) یعنی عمود بر مرزهای طولی دانه رشد کند و باید از مرزهای بیشتری عبور کند و نیاز به انرژی بیشتری دارد. در نتیجه دیده می شود که مقدار انرژی جذب شده در این حالت (جهت محور Y) بیشتر از حالت قبل (جهت محور X) است.

سطح شکست این نمونه ها همان گونه که در شکل (۴) به صورت شماتیک رسم شده است، مقداری از مسیر مستقیم شکست منحرف می شود و یک برجستگی در انتهای مسیر شکست بوجود می آید. به عبارتی چنین می توان گفت که در سطوح شکست به صورت مخلوط مقادیر انرژی جهت شکست در حد متوسط است. در این جهت مورد آزمایش در طی شکست ترک های ثانویه مشاهده نشده است و مقدار شکست نرم به صورت برشی در لبه های نمونه زیاد است. حال اگر چنین نمونه ای با آزمایش چقرمگی شکست مقایسه شود، تحت این شرایط دیده می شود که نیروی اعمالی در جهت محور X (طولی نورد) است ولی شیار می خواهد در جهت عرضی به رشد خود ادامه دهد پس در نهایت ماکزیمم مقدار انرژی چقرمگی شکست را دارد [13-18].

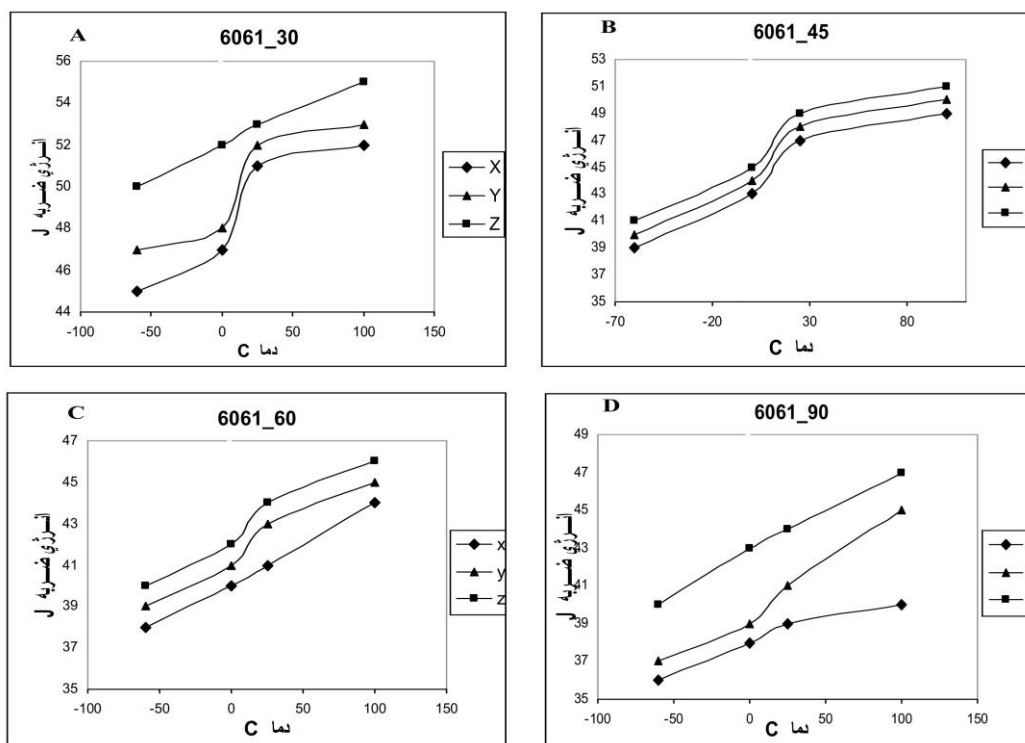
حالت سوم آزمایش ضربه در امتداد محور Z یا همان جهت عرضی کوتاه (S-T) که ضخامت نمونه باشد انجام گرفته است. در این حالت شیار در امتداد لایه های فشرده نورد سرد شده است و جهت اعمال نیرو نیز در امتداد جهت شیار است. مقدار انرژی جذب شده برای شکست بیشتر از دو حالت قبل است (جهت X و جهت Y). اما در این حالت شیار به دو صورت می تواند قرار گیرد، یکی در جهت طولی نورد، که نام آن را Z گذاشته و در نمونه دیگر شیار در امتداد محور Y قرار گرفته است که نام آن D قرار داده شده است. در نمونه Z شکست در جهت ضخامت نمونه یا همان لایه های فشرده صورت می گیرد ولی امتداد شیار و شکست در امتداد مرزهای طولی نورد شده از بین لایه های نورد شده است. مقدار انرژی صرف شده در این حالت بیشتر از نمونه های قبل است (X و Y). اما در نمونه D علاوه بر اینکه شکست در امتداد جهت ضخامت نمونه است،

منحنی‌های انرژی ضربه براساس دما و جهت نورد با زاویه شیار مشخص شکل‌های (۴) و (۵) رسم گردیده است. همچنین در شکل (۶) تصویر سه بعدی ساختار میکروسکوپی آلیاژ آلومینیم AA7020 با توجه به جهت نورد، برای مشخص شدن دانه‌های طولی و رسوبات کشیده شده ارائه شده است. با افزایش استحکام تسلیم، چقرمگی شکست کاهش می‌یابد و یا می‌توان گفت با افزایش استحکام تردی بیشتر می‌شود و شکست در انرژی‌های پایین تر صورت می‌گیرد. در آلیاژ آلومینیم AA6061 با توجه به پایین بودن استحکام و بالا بودن نرمی مقدار انرژی جذب شده جهت شکست زیاد است و همچنین با افزایش استحکام و کاهش نرمی در آلیاژ AA7020 مقدار انرژی جذب شده جهت شکست کاهش یافته است. همچنین می‌توان گفت آلیاژهای با استحکام پایین و نرمی زیاد برای آزمایش ضربه مناسب نیستند در طی آزمایش ضربه تغییر شکل پلاستیک زیادی از خود نشان می‌دهند. در آلیاژ آلومینیم AA6061 در طی شکست ترک‌های ثانویه خیلی کمی بوجود آمده است اما در آلیاژ AA7020 ترک‌های زیادتر و عمیق تری مشاهده شده است. همچنین درصد انبساط جانبی آلیاژ AA6061 بیشتر از (حدود دو برابر) آلیاژ AA7020 است.

با افزایش دما استحکام تسلیم کاهش می‌یابد و همچنین مقدار درصد افزایش طول زیاد می‌شود. با کاهش استحکام و افزایش درصد ازدیاد طول در دماهای بالا، مقدار انرژی جذب شده برای شکست افزایش می‌یابد. همانطور که مشخص است از تردی قطعه کاسته می‌شود و شکست به صورت نرم صورت می‌گیرد و انرژی زیادی جهت شکست صرف می‌شود. در دماهای خیلی پایین مقدار درصد ازدیاد طول تغییر نمی‌کند و همچنین تغییر زیادی در انرژی جذب شده جهت شکست صورت نمی‌گیرد. آلیاژهای آلومینیم دمای انتقالی مشخصی ندارند و با کاهش دما، در دماهای پایین رفتار انتقالی آنها به مقدار کمی تغییر می‌کند. با افزایش استحکام در آلیاژهای آلومینیم، با تغییر دما رفتار انتقالی از خود نشان می‌دهند. در اغلب نمونه‌های آزمایش با افزایش دما مقدار انرژی ضربه افزایش یافته است. در آزمایش ضربه آلیاژهای AA7020 در جهت D و در دمای 100°C مقداری کاهش انرژی ضربه مشاهده می‌شود، در صورتیکه در حالت معمول با افزایش دما مقدار انرژی ضربه افزایش می‌یابد. البته ترک‌های ثانویه بوجود آمده در حین شکست در جهت D دارای بیشترین مقدار بوده و در امتداد رسوبات طولی هستند. برای بهتر مشخص شدن تاثیر دما،

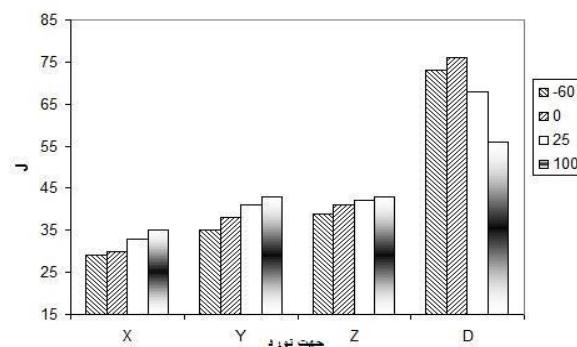


شکل ۴ (الف) رسم منحنی‌های انرژی ضربه براساس دما آلیاژهای آلومینیم AA7020 با توجه به جهات نورد زاویه شیار. (a) زاویه شیار ۳۰ درجه و (b) زاویه شیار ۴۵ درجه و (c) زاویه شیار ۶۰ درجه، (d) زاویه شیار ۹۰ درجه

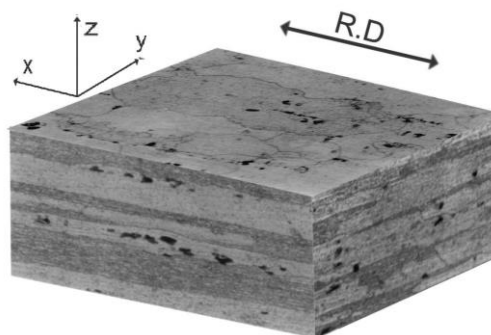


شکل ۴ (ب) رسم منحنی‌های انرژی ضربه براساس دما آلیاژهای آلومینیم AA6061 با توجه به جهات نورد و زاویه شیار. (a) زاویه شیار ۳۰ درجه و (b) زاویه شیار ۴۵ درجه و (c) زاویه شیار ۶۰ درجه و (d) زاویه شیار ۹۰ درجه

اغلب سطوح شکست در نمونه‌های AA6061 به صورت تخت است و تعداد کمی به صورت مورب شکسته شدند، البته زاویه شکست در آنها کمتر از آلیاژ AA7020 است. در آلیاژهای AA6061 درصد شکست نرم به صورت برشی در لبه‌های نمونه بیشتر از آلیاژ AA7020 است. نقش ذرات بسیار ریز در رابطه با چقرمگی پیچیده است، زیرا هم تاثیر مثبت دارد و هم تاثیر منفی. وقتی ذرات باعث تاخیر تبلور مجدد و رشد دانه می‌شوند مفید هستند. رسوبات حاصل از پیرسازی آلیاژهای آلومینیم نیز حداقل دو نوع تاثیر بر روی چقرمگی دارند (ذرات تغییر شکل را کاهش و چقرمگی را افزایش می‌دهند). ذرات باعث ایجاد لغزش موضعی در خلال تغییر شکل پلاستیک مخصوصا در شرایط کرنش صفحه ای می‌شود که منجر به ایجاد لایه‌های لغزشی در جلو ترک در حال پیشروی می‌گردد. کرنش متمرکز شده و باعث ترک سریع در محل ترکیبات بین فلزی در جلوی ترک در حال رشد می‌گردد و باعث افت چقرمگی در بالاترین مقادیر استحکام می‌شود. در شرایط کم پیرسخت شده چقرمگی مقدار حداکثر خود را دارد. با ادامه پیرکردن تمایل بیشتری به شکست در مرز دانه وجود دارد. با تغییر (افزایش) زاویه شیار



شکل ۵ تاثیر جهت نمونه و دمای آزمایش روی انرژی ضربه آلیاژ آلومینیم AA7020 با زاویه شیار ۴۵ درجه



شکل ۶ ساختار متالوگرافی با توجه به جهت نورد

نتیجه گیری

۱. در تمام زوایا و دماهای مورد آزمایش مقدار انرژی جذب شده در جهت D بیشترین مقدار را دارد. همچنین می‌توان گفت کمترین مقدار انرژی جذب شده در نمونه‌های در جهت X است و دیگر اینکه مقادیر انرژی ضربه به ترتیب در جهات D-Z-Y-X افزایش یافته است.
۲. افزایش زاویه شیار باعث تغییر نوع شکست به صورت نوع I می‌شود.
۳. اثر جهت در دماهای پایین خیلی مهم نیست زیرا تفاوت‌های خیلی بزرگ از خود نشان نمی‌دهند ولی در دماهای اتاق و بالاتر تغییرات عمده‌ای را با توجه به تغییر جهت از خود نشان می‌دهند.
۴. در بیشتر دماهای مورد آزمایش با افزایش زاویه شیار مقدار انرژی جذب شده کاهش می‌یابد و افزایش زاویه شیار باعث کاهش چقرمگی شکست می‌شود.
۵. در بیشتر زوایای شیار مورد آزمایش با افزایش دما مقدار انرژی جذب شده افزایش می‌یابد.

لغت نامه

(Impact energy)

groove direction	انرژی ضربه
Shear failure	جهت شیار
Aluminum alloy	شکست برشی
ingot	آلیاژ آلومینیم
microstructure	شمش
Casting	ریزساختار
Toughness	ریخته گری
defeat	چقرمگی
temperature	شکست
failure soft	دما
crack	شکست نرم
Tensile strength	ترکی
aging	استحکام کششی
surface	پیرسازی
rolling	سطح نورد

مسیر شکست تغییر می‌کند و یا به عبارتی نوع بارگذاری تغییر می‌کند و در نتیجه باعث تغییر نوع شکست می‌شود. در اکثر نمونه‌های آلیاژ AA7020 شکست ترد غالب است و بارگذاری نوع I از اهمیت بیشتری برخوردار است و در آلیاژ AA6061 شکست اکثر نمونه‌ها به صورت مخلوط نرم و ترد است و بیانگر بارگذاری به صورت مخلوطی از انواع I /II /III است. همان‌گونه که در جدول‌های (۳) و (۴) آمده است در اغلب نمونه‌ها با افزایش زاویه شیار مقدار انرژی جذب شده جهت شکست کاهش یافته است. با توجه به جدول‌های (۶) و (۵) در تعدادی از نمونه‌هایی که روی آنها ترک ثانویه بوجود آمده، با افزایش زاویه شیار مقدار متوسط عمق ترک‌ها کاهش یافته است. از رسم منحنی‌های تاثیر هم‌زمان زاویه شیار و دمای آزمایش روی انرژی ضربه در تصاویر (۲) و (۳) و (۵) برای آلیاژهای AA7020 و AA6061، مشخص گردید که در زوایای شیار پایین و دماهای بالای آزمایش مقادیر انرژی جذب شده جهت شکست زیاد است.

با تغییر جهت نمونه‌ها به صورت X-Y-Z-D، مقطع شکست در جهت X به صورت صاف (تخت) است و در جهت Y مقدار خیلی کمی تغییر می‌کند و یک نوع کندگی در انتهای نمونه (مقابل شیار) مشاهده می‌شود. در نمونه‌های با جهت Z زاویه شکست به صورت مورب است و در بعضی از این نمونه‌ها ترک بوجود آمده است و در نمونه‌های با جهت D مقطع شکست به صورت مورب و در بعضی زاویه شکست زیاد است همچنین در اغلب نمونه‌ها ترک ثانویه وجود دارد. در اکثر نمونه‌ها مقدار شکست لبه‌های برشی در جهت D کمترین مقدار را دارد و بعد از آن در جهت Z و بعد از آن در جهت X است و بیشترین مقدار لبه‌های برشی در جهت Y دیده شده است. مقدار درصد انقباض جانبی در اکثر نمونه‌های در جهت D بیشترین مقدار است. در نمونه‌های با جهت Z در هنگام شکست در یک طرف نمونه ترک بوجود آمده است و میانگین عمق ترک mm ۲ است، اما در نمونه‌های در جهت D ترک در دو طرف نمونه بوجود آمده است و میانگین عمق ترک mm ۴ است. همچنین در این حالت مقدار عمق ترک با افزایش دما کاهش یافته است و با افزایش زاویه شیار نیز مقدار عمق ترک کاهش می‌یابد (شکل ۲).

مراجع

- [1] D. Dumont, A. Deschamps, Y. Brechet, "On the relationship between microstructure, strength and toughness in AA7050 aluminum alloy," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 356, no. 1-2, pp. 326-336, 2003.
- [2] A. Lipski, S. Mroziński, "The effects of temperature on the strength properties of aluminium alloy 2024-T3," *acta mechanica et automatica*, vol. 6, no. 3, pp. 62-66, 2012.
- [3] W. A. N. G. Bo, X. H. Chen, F. S. Pan, J. J. Mao, F. A. N. G. Yong, "Effects of cold rolling and heat treatment on microstructure and mechanical properties of AA 5052 aluminum alloy," *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, vol. 25, no. 8, pp. 2481-2489, 2015.
- [4] M. Tajally, E. Emadoddin, "Mechanical and anisotropic behaviors of 7075 aluminum alloy sheets," *Materials & Design*, vol. 32, no. 3, pp. 1594-1599, 2011.
- [5] C. Mondal, A. K. Singh, A. K. Mukhopadhyay, K. Chattopadhyay, "Effects of different modes of hot cross-rolling in 7010 aluminum alloy: Part II. Mechanical properties anisotropy," *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. 44, pp. 2764-2777, 2013.
- [6] J. Champlin, J. Zarkrajsek, T.S. Srivatsan, P.C. Lam, M. Manoharan, "Influence of notch severity on the impact fracture behavior of aluminum alloy 7055," *Materials and Design*, vol. 20, pp. 331-341, 1999.
- [7] O. Engler, M. Crumbach, S. Li, "Alloy-dependent rolling texture simulation of aluminium alloys with a grain-interaction model," *Acta materialia*, vol. 53, no. 8, pp. 2241-2257, 2005.
- [8] ASTM Standard E23-96, "Standard test methods for notched bar impact testing of metallic materials," ASTM, Philadelphia, PA, USA, 1998.
- [9] R. Vignjevic, N. K. Bourne, J. C. F. Millett, T. De Vuyst, "Effects of orientation on the strength of the aluminum alloy 7010-T6 during shock loading: Experiment and simulation," *Journal of applied physics*, vol. 92, no. 8, pp. 4342-4348, 2002.
- [10] J. Kraner, P. Fajfar, H. Palkowski, G. Kugler, M. Godec, I. Paulin, "Microstructure and texture evolution with relation to mechanical properties of compared symmetrically and asymmetrically cold rolled aluminum alloy," *Metals*, vol. 10, no. 2, pp. 156, 2020.
- [11] K. O. Pedersen, T. Børvik, O. S. Hopperstad, "Fracture mechanisms of aluminium alloy AA7075-T651 under various loading conditions," *Materials & Design*, Vol. 32, no.1, pp. 97-107, 2011.
- [12] M. Tajally, Z. Huda, H. H. Masjuki, "A comparative analysis of tensile and impact-toughness behavior of cold-worked and annealed 7075 aluminum alloy," *International journal of impact engineering*, vol. 37, no. 4, pp. 425-432, 2010.
- [13] F. Goli, R. Jamaati, "Effect of strain path during cold rolling on the microstructure, texture, and mechanical properties of AA2024 aluminum alloy," *Materials Research Express*, vol. 6, no. 6, pp. 066514, 2019.
- [14] L. Zhang, Y. Wang, X. Yang, K. Li, S. Ni, Y. Du, M. Song, "Texture, microstructure and mechanical properties of 6111 aluminum alloy subject to rolling deformation," *Materials Research*, vol. 20, pp. 1360-1368, 2017.
- [15] S. K. Panigrahi, R. Jayaganthan, "Effect of rolling temperature on microstructure and mechanical properties of 6063 Al alloy," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 492, no.1-2, pp. 300-305, 2008.

- [16] C. K. Moy, M. Weiss, J. Xia, G. Sha, S. P. Ringer, G. Ranzi, "Influence of heat treatment on the microstructure, texture and formability of 2024 aluminium alloy," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 552, pp. 48-60, 2012.
- [17] W. M. Lee, M. A. Zikry, "Microstructural characterization of a high-strength aluminum alloy subjected to high strain-rate impact," *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. 42, pp. 1215-1221, 2011.