



## خواص سرامیک نوری ALON

### چکیده

سرامیک نوری ALON™ یک ماده پنجره با دوام برای اشعه ماوراء بنفش، پنجره مرئی و میانه IR و برنامه های کاربردی در خانه است. خواص مکانیکی، حرارتی و نوری از محصولات ALON تجاری تولید شده توسط شرکت Surmet اندازه گیری شده است و این داده های جدید ارائه خواهد شد. مقایسه با داده هایی که قبلا اندازه گیری شده صورت خواهد گرفت.

ALON با کیفیت نوری و پراکندگی کم و دارای استحکام بالا که نزدیک به دو برابر است قبلا گزارش شده است. میانگین مقادیر قدرت 700 مگاپاسکال در 21 ° C و 631 مگاپاسکال در 500 ° C برای نمونه ALON آماده شده توسط سطح دقیق در پایان با این تکنیک اندازه گیری شده اند. گنبد های نوری جلا داده شده آزمایش شده تحت تست شوک حرارتی شدید جان سالم به در می برند. این سطوح قدرت قابل مقایسه با سطوح قدرت برای تک کریستال یاقوت کبود است. قدرت، هدایت حرارتی، انبساط حرارتی، ضریب شکست، نشر و ضریب جذب ارائه خواهد شد. مکانیسم های ممکن برای افزایش قدرت مورد بحث قرار خواهد گرفت.

**کلید واژه ها: ALON، اکسی نیتريد آلومینیوم، خواص، قدرت، گنبد، زره شفاف**

### 1.0 مقدمه

آلومینیوم oxynitride، ALON یک سرامیک چندبلوری شفاف است که دارای استحکام بالا و سختی است. از طول موج اشعه ماوراء بنفش (UV) تا اواسط طول موج های مادون قرمز مشخص و شفاف (MWIR) است. برنامه های کاربردی گنبد موشکی سرعت بالای IR نیاز به مواد شفاف با دوام دارد که می تواند شوک های حرارتی شدید را به علت حرارت مربوط به آیرودینامیک تحمل نمایند، در سراسر مسیر پرواز شفاف باقی بماند و در برابر آسیب باران و شن و ماسه بسیار مقاوم باقی بماند. برنامه های کاربردی وزن سبک تر زره شفاف نیاز به استقامت و سختی زیاد در لایه های بیرونی در مقابل ورقه ورقه (ورقه ورقه) شدن بالستیک برای خرابی پرتابه با

سرعت بالا دارد. طرح های ورقه ورقه (ورقه ورقه) بالستیک با وزن سبک تر را می توان با استفاده از پانل های ALON نازکتر با استحکام شکست بیشتر به دست آورد.

این تکنولوژی برای ساخت سرامیک شفاف ALON در سال 2002 از شرکت Rayton به شرکت Surmet منتقل شد. تولید ده ها تن از پانل های ALON بزرگ برای ارزیابی عملکرد زره و تولید صدها گنبد، لنز و پنجره اسکنر نقطه فروش (POS) در Surmet در دو سال گذشته به دست آمده است. در پرتوی این تولید اخیر ALON، ارزیابی مجدد خواص مواد حیاتی از قبیل استحکام، هدایت حرارتی، انبساط حرارتی و شفافیت مهم است و نشان می دهد که این ماده به خوبی بهتر از آن چیزی است که در یک فرایند در مقیاس آزمایشگاهی / راهنما تولید می شود.

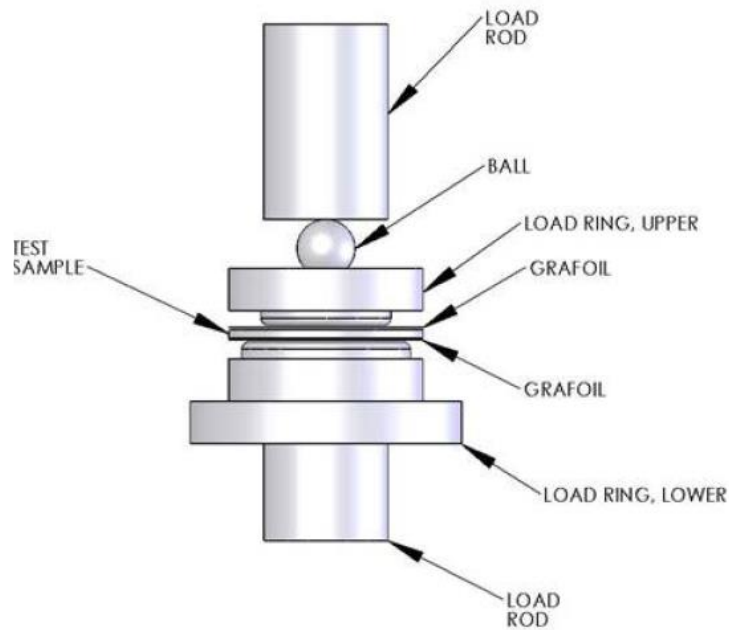
داده ها و نتایج ارائه شده در این مقاله بخشی از نیروی حمایت فاز دوم برنامه هوایی SBIR ساختار بندی شده برای پرداختن به نیاز به یک پایگاه داده خواص به روز و دقیق برای ALON شفاف است که در حال حاضر تولید می شود. نتایج این اندازه گیری آینده برای مدلسازی و پیش بینی عملکرد ALON در گنبد موشکی و برنامه های کاربردی زره شفاف استفاده می شود. مطالعه خواص این مواد همچنین با موفقیت نشان داد که سنگ زنی قطعی و عملیات پرداخت هایی می تواند برای تولید نمونه های تست استحکام بالا و همچنین کم هزینه و با استحکام بالا در گنبدهای موشک های مقاوم در برابر شوک حرارتی مورد استفاده قرار گیرد.

## 2.0 خواص مکانیکی

### خواص مکانیکی بررسی اجمالی:

آزمایش خواص مکانیکی مواد ALON در دانشگاه موسسه تحقیقات دیتون (UDRI) در دیتون، اوهایو انجام شد. مقاومت خمشی دو محوره (در  $21^{\circ}\text{C}$  و  $500^{\circ}\text{C}$ )، مدول یانگ، مدول برشی و نسبت پواسون با استفاده از روش های آزمون استاندارد (1 ASTM C1499-03 و 2 ASTM C1259-01) اندازه گیری شد. مدول وایبول و مقاومت مشخصه با برازش داده های اندازه گیری شده به دو پارامتر توزیع Weibull استاندارد داده شده توسط رابطه 1 (، 3 ASTM C 1239-94a) تعیین شد. شکل 1 نشان دهنده ثابت تست برای تست قدرت خمش دو محوره در دمای اتاق و 500 درجه سانتی گراد معادله 2 برای محاسبه استحکام نمونه و ابعاد ثابت (نگاه کنید به جدول 1) و بار شکستن است. دیسک های Grafoil<sup>TM</sup> با ضخامت 0.005 " بین دیسک

های نمونه و بار و حمایت از حلقه برای کاهش تنش تماسی قرار داده شد که تصور می شود برخی از نمونه ها را تحت بارگذاری حلقه یا حلقه پشتیبان خراب کند.



Schematic From: ASTM C1499-03

شکل 1: چفت و بست های تست خمش دو محوره و شماتیک راه اندازی تست در UDRI برای تست نمونه های ALON استفاده شده. سرعت بارگذاری 0.02 "/ دقیقه برای تمام اندازه گیری استفاده می شود. رطوبت 50٪، دمای 21 ° C و 500 ° C می باشند.

که در آن

Pf احتمال وقوع خرابی

$\sigma_{\theta}$  استحکام مشخصه ویبول

$\sigma$  استحکام اندازه گیری شده

M ماژول ویبول

$$P_f = 1 - e^{-\left(\frac{\sigma}{\sigma_{\theta}}\right)^m} \quad (1)$$

$$\sigma_f = \frac{3F}{2\pi h^2} \left[ (1-\nu) \frac{D_s^2 - D_L^2}{2D^2} + (1+\nu) \ln \frac{D_s}{D_L} \right] \quad (2)$$

که در آن

$\sigma_f$  تنش شکست (MPa یا psi)

F بار شکست (lb از نیوتن)

Ds قطر حلقه حمایتی (اینچ یا متر)

DI قطر حلقه بار (اینچ یا متر)

D قطر نمونه (اینچ یا متر)

H ضخامت نمونه (اینچ یا متر)

V نسبت پویزون

جدول 1: اندازه نمونه و ابعاد چفت و بست های خمیدگی دوماحوری

اندازه نمونه و ابعاد چفت و بست های آزمون				
دوره آزمون	قطر نمونه	ضخامت نمونه	قطر حلقه بار	قطر حمایتی
(Historical ) Raytheon 2002	0.988	0.051	0.4500	0.9000
(Surmet) May 2004	0.994	0.055	0.4166	0.8330
(Surmet) October 2004	1.244	0.055	0.4166	0.8330

### اندازه گیری خواص الاستیک

خواص الاستیک از ALON بر اساس ASTM C1259-01 با استفاده از نمونه های دیسک (1.25" قطر X 0.055" ضخامت) مورد استفاده برای آزمایش خمش دو محوره اندازه گیری شد. ، مقادیر اندازه گیری شده UDRI برای مدول دمای اتاق یانگ، مدول برشی و نسبت پواسون با مقایسه ها با مقادیری که قبلا اندازه گیری شده در جدول 2 داده شده است. این مقادیر اندازه گیری شده در حال حاضر تنها کمی متفاوت از مقادیر تاریخی (4، 5، 6 و 7) است. نمونه های تست در هر سه مجموعه از اندازه گیری ها 100% ALON متراکم

شفاف بودند. این تفاوت ممکن است با توجه به دقت بیشتر از روش رزونانس خمشی مورد استفاده در اندازه گیری های فعلی باشد.

جدول 2: ویژگی های الاستیک دمای اتاق (E,G و v) برای ALON

تاریخی رایتون	تاریخی SORI	UDRI	مقدار
323.8	321.3	321.05	ماژول Young
130.24	124.55	127.35	ماژول Shear
0.24	0.24	0.26	نسبت پویزون

داده های تاریخی اندازه گیری شده (1984 و 1988) در چهار نقطه خمش با استفاده از سنجه های کرنش

#### اندازه گیری های مقاومت به خمش دو محوره

برنامه آزمایش در ابتدا برای مقایسه سه درجه مختلف از ALON و دو دمای آزمایش (RT و 500 درجه سانتی گراد) تنظیم شد. نتایج این اندازه گیری ها (می 2004) نشان دهنده استحکام متوسط قابل مقایسه با مقادیر تاریخی (تاریخی ریتون 2002) (8) بود، با این حال، مدول وایبول بسیار کم بود و برخی از استحکام بسیار بالا اندازه گیری شد. از آنجا که این ماده شفاف است بررسی حضور عیب های محدود کننده قدرت نسبتا آسان است. گام بعدی بررسی دیگر دلایل ممکن برای تنوع گسترده ای در استحکام بود. برخی از نگرانی ها در مورد آسیب ها برای نمونه ها توسط فرایند آسیاب ساینده ثابت وجود داشت که به طور معمول سنگ زنی آزاد ساینده برای پیچیدن مواد قبل از پرداخت نهایی استفاده می شود. چند نگرانی دیگر که شامل یک اینچ قطر نمونه و امکان خسارات عرضه شده در طول لبه گام تراشیدن می شود وجود دارد.

تصمیم بر آن شد که مجموعه بعدی از آزمون ها هر دو سنگ زنی ثابت و آزاد ساینده و همچنین منافع یا عیوب های نشانه گذاری شیمیایی ALON را قبل از تست مکانیکی مقایسه نماید. نشانه گذاری شیمیایی یا ترکیبی از نشانه گذاری شیمیایی توسط یک جلای نوری به منظور کاهش متوسط اندازه نقص و افزایش استحکام شکست

گارنت (YAG، GSGG، و GGG) لیزر دال (9) نشان داده شده است. جدول 3 و جدول 4 مجموعه کاملی از نمونه ها و شرایط تست در این مطالعه را توصیف می کند.

جدول 3: ماتریس آزمون برای اندازه گیری های استحکام خمشی دومحوری ALON

Material Classification	Number of Samples Tested at Each Condition							
	Loose Abrasive Grind		Fixed Abrasive Grind		Mild Etch		Deep Etch	
	21°C	500°C	21°C	500°C	21°C	500°C	21°C	500°C
Surmet CG Grade (May 2004)	0	0	30	0	0	0	0	0
Surmet HP Grade (May 2004)	0	0	30	30	0	0	0	0
Surmet LS Grade (May 2004)	0	0	30	0	0	0	0	0
LS Grade (September 2004)	15	3	14	5	15	0	15	0
Raytheon Historical (2002)	28	31	0	0	0	0	0	0

جدول 4: توصیفات مجموعه نمونه ها

Sample Set	TEMP (°C)	RH	Number of Samples	UDRI TEST ID	Grain Size (µm)	Date Tested
Fixed No Etch RT	21	54%	14	SMG-04-2-46	233±29	9/13/04
Loose No Etch RT	21	48%	15	SMG-04-2-47	252±34	9/13/04
Combined No Etch	21	N/A	29	N/A		
Fixed/Loose No Etch 500	500	AIR	8	SMG-04-2-59	233±29	10/6/04
Fixed Etched RT	21	50%	16	SMG-04-2-48	233±29	9/14/04
Loose Etched RT	21	50%	14	SMG-04-2-49	252±34	9/14/04
CG ALON RT	21	75%	30	SMG-04-1-84		6/14/04
HP ALON RT	21	49%	29	SMG-04-1-58	309±60	5/10/04
LS ALON RT	21	64%	30	SMG-04-1-72	254±43	5/27/04
HP ALON 500C	500	AIR	30	SMG-04-1-43	309±60	4/29/04
2002-RT	21		28	N/A	250	2002
2002-500C	500	AIR	31	N/A	250	2002

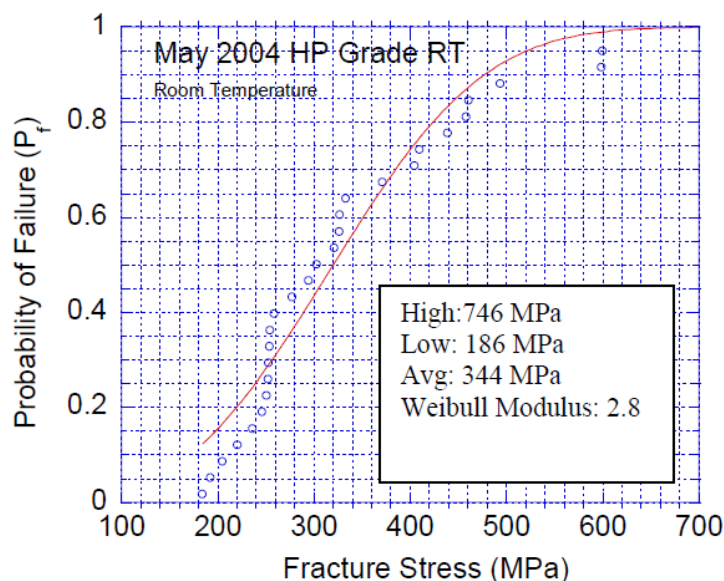
جدول بندی استحکام و اندازه گیری پارامترهای وایبول برای نمونه های آزمایش در جدول 5 نشان داده شده است. تنوع گسترده ای در توان برای مه 2004 مجموعه ای از داده ها دیده می شود. در این داده ها در دمای اتاق مقاومت متوسط برای HP-ALON درجه 344 مگاپاسکال است. قدرت بالا برای این مجموعه 746 مگاپاسکال می باشد، قدرت کم 185 مگاپاسکال و مدول وایبول 2.8 است. توزیع احتمال شکست برای این

نمونه در شکل 2 این توزیع گسترده ای از استحکام را نشان داده شده است. مقایسه ماه مه سال 2004 با داده های تاریخی 2002 نشان می دهد که استحکام به طور متوسط در همان محدوده، 310 مگا پاسکال تا 390 مگاپاسکال هستند، اما مدول وایبول بسیار پایین تر است و هیچ استحکام بسیار بالا و یا پایین وجود دارد. استحکام بالای اندازه گیری شده در دور اول از تست بسیار امیدوار کننده بود چرا که استحکام در این سطح برای سرامیک شفاف ALON گزارش نشد. دلیل استحکام پایین مد نظر بود و بررسی علل احتمالی شروع شد. نمونه کم استحکام (# 119) در شکل 3 نشان داده شده است. نمونه شکسته به حدود 6 قطعه نشان دهنده یک مقدار کم از انرژی کرنش ذخیره شده قبل از شکستگی است. این ناحیه ای بود که در آن شکستگی با بررسی الگوی شکست دیسک سرچشمه گرفته است. بخشی از نمونه که حاوی منشاء شکستگی است برای فاش کردن ساختار دانه و هر گونه نقص سطحی نشانه گذاری شده است. می توان آن را در شکل 3 دید که خش های عمیق در نمونه در نزدیکی مبدا وجود دارد. این خراش ها با استفاده از میکروسکوپ نوری قبل از نشانه گذاری قابل رویت نیست و نشان می دهد که آسیب در این نمونه که به احتمال زیاد در طول عملیات سنگ زنی عرضه شده است وجود دارد. این آسیب در مراحل پردازش پس از آن و در شکست بسیار کمتر از مقاومت متوسط حذف شد.

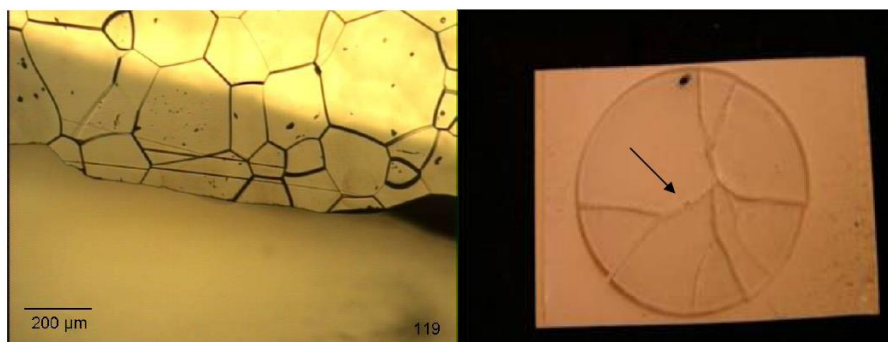
Sample Set	AVG $\sigma$ (MPa)	STDEV (MPa)	Weibull Characteristic Strength $\sigma_0$ (MPa)	Weibull Modulus Biased m	Weibull * Modulus Unbiased $m_u$	R <sup>2</sup>
<b>Surmet September (2004)</b>						
Fixed No Etch RT	700	169	750	8.5	7.7	0.982
Loose No Etch RT	753	179	811.9	5.6	5.1	0.968
<i>Combined No Etch</i>	<i>727</i>	<i>173</i>	<i>777.7</i>	<i>7.0</i>	<i>6.6</i>	<i>0.979</i>
Fixed/Loose No Etch 500°C	622	93	635.5	8.4	6.9	0.91
Fixed Etched RT (light etch)	422	59	451	10.1	9.2	0.951
Loose Etched RT (deep etch)	281	18	287.8	26.3	23.7	0.977
<b>Surmet May (2004)</b>						
CG ALON RT	308	126	325.1	2.9	2.8	0.952
HP ALON RT	344	146	361.6	3.0	2.8	0.953
LS ALON RT	389	135	425.2	3.2	3.1	0.988
HP ALON 500° C	364	123	410.4	3.0	2.8	0.990
<b>Raytheon (2002)</b>						
2002-RT	374.7	85.8	409.2	4.6	4.4	0.995
2002-500C	367.9	47.7	384.4	7.8	7.4	0.964

\* The Unbiased Weibull Modulus is determined using Table 1 in ASTM C1239-94a. An unbiasing factor is used to best estimate the Weibull Modulus for small data sets. The factor approaches 1 as the # samples > 40.

جدول 5: تحلیل وایبول و استحکام برای مجموعه نمونه ALON



شکل 2: توزیع احتمال وقوع خرابی ویبول برای HP-ALON (May 2004) آزمایش شده در دمای اتاق



شکل 3: عکس از دیسک تست شکستگی # 119 (LS-درجه، 2004 گروه) و میکروگراف نوری از نمونه نشانه گذاری در نزدیکی منشاء شکستگی. توان:  $\sigma_f = 197 \text{ MPa}$  و اندازه دانه = 277 میکرومتر. خش ها در نمونه در نزدیکی منشاء شکستگی های نشانه گذاری شده اند.

چندین تغییرات برای نمونه های ساخته شده در دور دوم آزمایش (سپتامبر 2004) صورت گرفت. این تغییرات عبارت بودند از: (1) قطر نمونه از 1 اینچ به 1.25 اینچ برای حذف امکان زودرس شکست لبه افزایش یافت؛ (2) نمونه ها توسط سایش ثابت آزاد و سنگ زنی ساییده آزاد قبل از جلای نهایی آماده شدند و مقدار ماده حذف شده در هر اندازه شن های پی در پی افزایش یافت؛ و (3) مرحله جلای شیمیایی مکانیکی پرداخت نهایی مورد استفاده قرار گرفت.

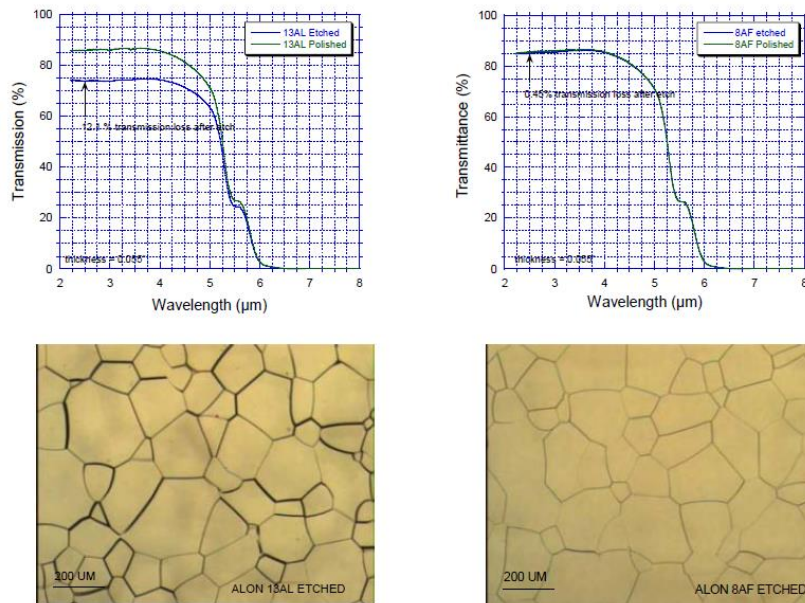


علاوه بر این، دو مجموعه از نمونه های نشانه گذاری شده از گروه نمونه جلا "فوق العاده" آماده شد. نشانه گذاری انجام شد که اثرات آسیب ماشینکاری کاهش یابد. پس از پرداخت، نمونه ها در  $200^{\circ}\text{C}$  اسید فسفریک برای دو مدت زمان مختلف نشانه گذاری شدند. ساختار سطوح جلا داده شده و نشانه گذاری شده و انتقال IR قبل و بعد از نشانه گذاری در شکل 4 نشان داده شده است. نشانه گذاری نوری، انتقال در IR را کاهش می دهد و دهنده نشانه گذاری کمی عمیق تر انتقال را در حدود 10٪ کاهش می دهد.

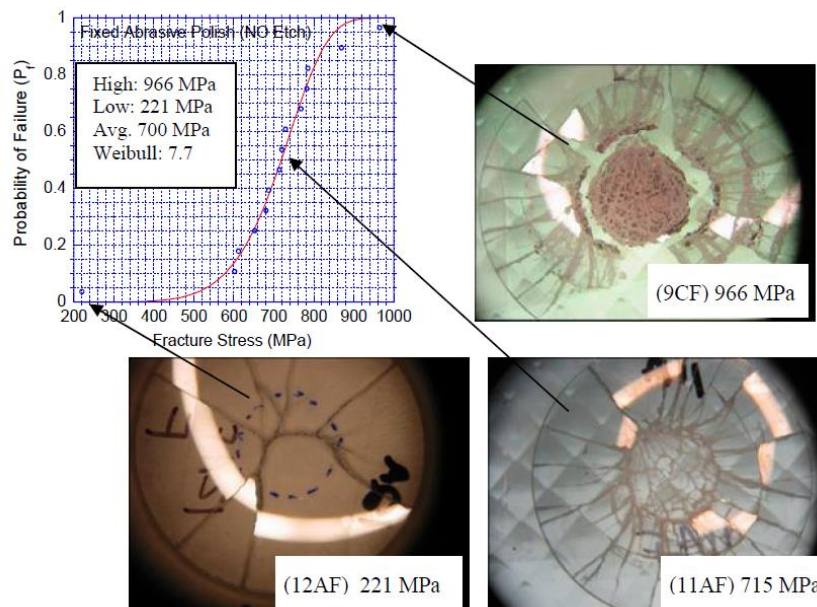
استحکام نمونه های ALON نشانه گذاری شده و جلا داده شده از استحکام نمونه های "فوق العاده" جلاداده شده کمتر بود. استحکام متوسط برای نمونه جلایافته و نشانه گذاری شده "فوق العاده" کاهش می یابد، اما مدول وایبول افزایش یافته است. در مورد نمونه های به آرامی نشانه گذاری شده، قدرت متوسط از 422 مگاپاسکال هنوز هم بالاتر از استحکام متوسط برای تست تاریخی 2002 یا تست مه 2004 بود. مدول وایبول برای این مجموعه نمونه به آرامی نشانه گذاری شده 9.2 است. نمونه های عمیق تر نشانه گذاری شده دارای متوسط 281 مگاپاسکال و مدول وایبول بسیار بالای 23.7 هستند. بنابراین، بر خلاف داده ها از Marion (1987) قدرت ALON توسط نشانه گذاری در اسید فسفریک افزایش نمی یابد. قابلیت اطمینان بالقوه، با این حال، افزایش می یابد. این افزایش قابلیت اطمینان نمی تواند بدون نیاز به پرداخت مجدد به دلیل کاهش انتقال با توجه به افزایش زبری سطح عملی باشد. یک مشاهده جالب این است که هیچ مدرکی دال بر آسیب ماشینکاری نشان داده شده توسط روند نشانه گذاری همانطور که برای ماه مه 2004 نمونه آزمون دیده شده وجود نداشت. (نگاه کنید به شکل 3). بسیاری از نمونه ها از گروه آزمون اوایل سال 2004 نیز نشان دهنده خش های مشخص شده توسط نشانه گذاری اسید سبک بود.

توزیع احتمال وایبول وقوع خرابی و نمونه های نماینده از گروه ساینده ثابت در شکل 5 نشان داده شده است. قدرت و صلابت متوسط این مجموعه ای از نمونه ها 700 مگاپاسکال و مدول وایبول 7.7 است. بالاترین نمونه قدرت در گروه ساینده ثابت دارای قدرت از 966 مگاپاسکال است به تکه های کوچک متعدد شکسته می شود. به نظر می رسد منطقه زیر حلقه بار ساییده می شود که نمونه ای از شکستگی با قدرت بسیار بالا است. تنها یک نمونه با قدرت کم در این گروه با اکثریت نمونه ها دارای استحکام بیش از 600 مگاپاسکال وجود دارد.

رفتار قدرت مشابه برای تست رایگان ALON ساینده در دمای اتاق و ALON ساینده آزاد و ثابت تست شده در دمای 500 °C نشان داده شد. قدرت متوسط در 500 درجه سانتی گراد، 622 مگاپاسکال با یک مدول وایبول از 6.9 نشان داده شد.

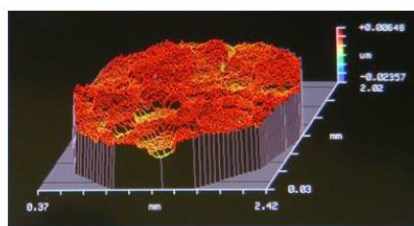


شکل 4. میکروساختار و انتقال IR برای نمونه های آزمون خمش دومحوری ALON (8AF) به طور سبک نشانه گذاری شده و (13AL) به طور عمیق نشانه گذاری شده

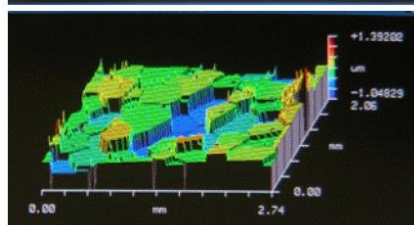


شکل 5. توزیع احتمال وقوع خرابی وایبول برای LS-ALON (سپتامبر) آزمایش شده در دمای اتاق

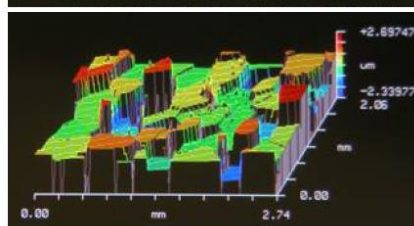
اندازه گیری زبری سطح با استفاده از یک NewView 100 ZYGO پروفیلومتری نوری برای نمونه از دو گروه نشانه گذاری و یک نمونه نشانه گذاری از گروه استحکام بالا اندازه گیری شد. شکل 6 نشان دهنده طبیعت از ویژگی های زبری سطح و سطح زبری تولید شده توسط فرایند نشانه گذاری است. نمونه عمیقاً نشانه گذاری ترین سطح دارای زبری PV 5.0 میکرومتر و RA 0.657 میکرومتر در مقایسه با یک ناهمواری PV 2.44 میکرومتر و رادیوم از 0.215 میکرومتر برای نمونه به آرامی نشانه گذاری شده است. رادیوم "فوق العاده" نمونه جلا A 10 و زبری PV 30 نانومتر است.



ALON Fixed Abrasive Polish  
 PV = 0.030  $\mu\text{m}$   
 Ra = 0.001  $\mu\text{m}$   
 RMS = 17.71  $\text{\AA}$   
 Measured Area = 2.07 mm x 1.99 mm



ALON 8AF Fixed Abrasive Mild Etch  
 PV = 2.44  $\mu\text{m}$   
 Ra = .215  $\mu\text{m}$   
 RMS = .261  $\mu\text{m}$   
 Measured Area = 2.74 mm x 2.06 mm



ALON 13AL Loose Abrasive Deep Etch  
 PV = 5.036  $\mu\text{m}$   
 Ra = 0.657  $\mu\text{m}$   
 RMS = 0.887  $\mu\text{m}$   
 Measured Area = 2.74 mm x 2.06 mm

شکل 6: زبری سطحی نمونه آزمون ALON خمش دو محوره جلاداده شده و نشانه گذاری.

رابطه Griffith داده شده توسط معادله 3 بطور معمول مورد استفاده شده برای توضیح رابطه بین استحکام شکست ( $\sigma_f$ ) و اندازه نقص (CF) از یک ماده است. چقرمگی ( $K_{1c}$ ) از مواد تعیین کننده اینست که چقدر استحکام مواد به اندازه نقص یا ترک حساس است. عامل (Y) به شکل و مکان معایب مواد مرتبط است. (10)، (11، 12، 13) برای سرامیک شکننده و شیشه که در تنش با توجه به معایب سطحی خراب می شوند، عامل Y برابر با حدود 1 است. چقرمگی (ALON) ( $K_{1c}$ ) در محدوده 2.0 تا 2.4 (7، 14) است.

$$\sigma_f = \frac{K_{1c}}{Y\sqrt{c_f}} \quad (3)$$

جدول 6 اندازه نقص پیش بینی شده محاسبه شده با استفاده از معادله 3 و قدرت متوسط اندازه گیری شده با زبری سطح اوج تا دره (PV) و اندازه دانه را مقایسه می کند. هیچ رابطه ای ظاهری بین استحکام شکست و اندازه دانه وجود ندارد. ارتباط قوی بین زبری سطح و قدرت وجود دارد اگر چه عامل مقیاس بندی واضح برای تبدیل PV یا RA برای اندازه نقص وجود ندارد. سطح زبری "فوق العاده" گروه نمونه جلاداده شده کمتر دارای بالاترین قدرت و افزایش طبری ناشی از نشانه گذاری است. بر اساس مدول وایبول بالاتر، نرخ غیر یکنواخت نشانه گذاری از دانه های ALON مجاور ایجاد یک توزیع یکنواخت تر از نقص را بر روی سطح فراهم می کند. عمق بیشتر نشانه گذاری، توزیع معایب زیر سطحی بزرگتر معرفی شده توسط ماشینکاری را هموار می کند و یک توزیع جدید کنترل شده از معایب بزرگتر را ایجاد می کند که قدرت متوسط را کاهش می دهد، اما باعث افزایش مدول وایبول می شود. قدرت بالای "فوق العاده" ALON جلا داده شده و نشانه گذاری نشده دارای سطح پایین از آسیب زیرسطحی است که توسط نشانه گذاری نشان داده نشده است همانطور که این مورد برای نمونه قدرت کم # 119 و دیگر نمونه ها در گروه آزمایش در ماه مه سال 2004 وجود داشت. طبیعت این آسیب زیرسطحی است که نمی تواند توسط نشانه گذاری در معرض قرار گیرد، نیاز به جزئیات بیشتر با استفاده از توپوگرافی TEM و از X-Ray دارد که می تواند جابه جایی، جفت شدن و کرنش ها را در سطوح جلاداده شده نشان دهد.

جدول 6: اندازه پیش بینی شده عیب برای نمونه های آزمون شکستگی ALON در مقایسه با سختی سطحی

Sample Set	Measured Average Strength (MPa)	Weibull Modulus	Calculated Flaw Size ( $\mu\text{m}$ )	Measured PV Surface Roughness ( $\mu\text{m}$ )	Measured Grain Size ( $\mu\text{m}$ )
Polished Fixed Abrasive 9/2004	700 $\pm$ 169	7.7	12	0.030	233 $\pm$ 29
Mild Etch Fixed Abrasive 9/2004	422 $\pm$ 59	9.2	32	2.44	233 $\pm$ 29
Deep Etch Loose Abrasive 9/2004	281 $\pm$ 18	23.7	73	5.04	233 $\pm$ 29
Sample #119 from LS-Group	197( individual)		148	scratched	277 $\pm$ 48
LS-Group May 2004 testing	389 $\pm$ 135	3.1			254 $\pm$ 43

### 3.0 خواص حرارتی

خواص حرارتی از ALON شفاف، در گذشته توسط چندین آزمایشگاه (6، 17) مورد بررسی قرار گرفته است. نیاز برای داده های در دسترس بیشتر و تاریخی اندازه گیری شده برای ALON شفاف در حال حاضر وجود دارد. این خواص مواد در مدل های پیش بینی شده برای عملکرد شوک حرارتی در برنامه گنبد سرعت موشک

بالا استفاده می شود. اندازه گیری های گزارش شده در این مقاله دقیق تر از داده های تاریخی و پوشش یک مقدار درجه حرارت گسترده تر است. نمونه ها با استفاده از ALON LS-درجه (درجه پراکندگی نوری کم) در شرکت Surmet، برلینگتون، MA آماده شد. اندازه گیری خواص حرارتی ALON را در TPRL، شرکت (18) صورت گرفته است.

هدایت حرارتی (K):

روش: لیزر فلش نفوذ (ASTM E1461)، نمونه طلای پوشش داده شده برای به حداقل رساندن اثرات انتقال حرارت تشعشع.

محدوده دما:  $50^{\circ}\text{C}$  تا  $700^{\circ}\text{C}$

دانسیتته: اندازه گیری شده توسط هندسه دقیق و اندازه گیری جرم، ارزش =  $3.666 \text{ گرم / سی سی @ } 23$  گرمای ویژه (CP):

روش: اسکن دیفرانسیل گرماسنج PERKIN المر مدل DSC-2، STM E1269))  
محدوده دما:  $50^{\circ}\text{C}$  تا  $700^{\circ}\text{C}$

ضریب انبساط حرارتی (CTE):

روش: دو dilatometer میله فشار (تتا Dilatronics دوم)

$150^{\circ}\text{C}$  تا  $800^{\circ}\text{C}$

مقایسه های هدایت حرارتی به شرح زیر اشاره شده است:

خلاصه ای از خواص حرارتی اندازه گیری شده است که در جدول 7 آورده شده است و توطئه نسبت به داده های تاریخی در شکل 7 تا 9 نشان داده شده است. شکل 7 نشان می دهد که هدایت حرارتی از ALON اندازه گیری در TPRL کمی بیشتر در محدوده درجه حرارت از  $50^{\circ}\text{C}$  تا  $600^{\circ}\text{C}$  نسبت به گذشته اندازه گیری می شود. مقادیر درجه حرارت بالا ( $T < 600^{\circ}\text{C}$ ) که قبلا گزارش شده است، به احتمال زیاد به علت اثرات تابش از انتقال حرارت از طریق نمونه های شفاف دارای خطا است. در اندازه گیری، اثرات انتقال حرارت تابش باید با استفاده از یک پوشش طلا برای هر دو طرف از نمونه به حداقل برسد. مقدار انبساط حرارتی کمی بالاتر از آنچه قبلا گزارش شده است می باشد و این اندازه گیری های جدید محدوده درجه حرارت را به درجه حرارت از

-150 °C تا 800 °C گسترش می دهد. تعداد بیشتری از نقاط در گرمای خاص در مقابل منحنی دما اندازه گیری شد و محدوده دمای اندازه گیری که شامل نقاط زیر 0 °C تا -50 °C می شود گسترش یافت. شکل شوک حرارتی (500 °C)، R'ALON، برای سه گنبد IR مواد دیگر در شکل 8 مقایسه شده است. می توان در این جدول مقاومت پیش بینی شده در برابر شوک های حرارتی از ALON را برای شرایط شوک حرارتی "ملايم" دید که معادل با یاقوت کبود، یاقوت سرخ، و MgF2 از نظر عملکرد شوک حرارتی محاسبه شده است.

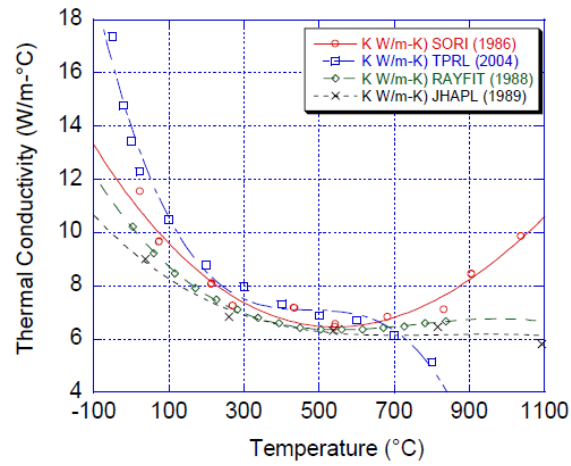
جدول 7: خواص حرارتی ALON شفاف اندازه گیری شده در TRPL (2004)

دمای T °C	CTE متوسط $10^{-6}$ in/in - °C	گرمای ویژه J/g-K	نفوذ حرارتی $cm^2/s$	هدایت گرمایی W/m-K
-150.0	3.067	-	-	-
-100.0	3.591	-	-	-
-50.0	4.070	0.600	0.0789	17.36
-20.0	4.336	0.687	0.0587	14.78
0.0	-	0.733	0.0500	13.44
23.0	-	0.781	0.0430	12.30
100.0	5.230	0.916	0.0312	10.48
200.0	5.783	1.015	0.0236	8.79
300.0	6.196	1.084	0.0201	7.98
400.0	6.507	1.132	0.0176	7.32
500.0	6.758	1.165	0.0161	6.89
600.0	6.986	1.191	0.0154	6.71
700.0	7.211	1.219	0.0137	6.12
800.0	7.432	1.235	0.0113	5.13

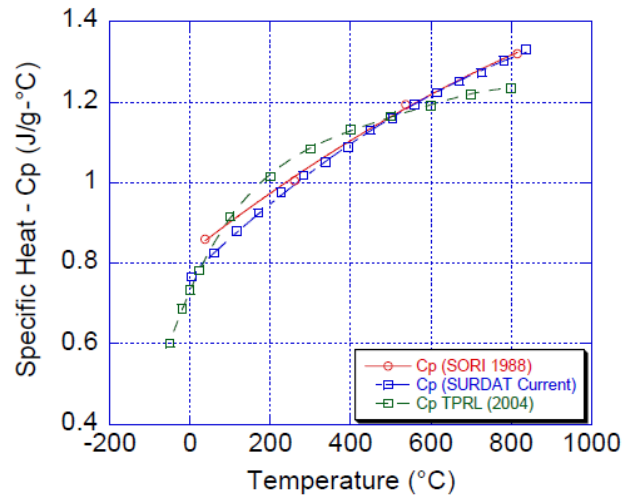
جدول 8. ویژگی های حرارتی و شوک حرارتی. مقایسه مواد گنبد شفاف

	10.4 (ref 28)	114 (ref 32)	5.0 (ref 28)	0.28 (ref 32)	120 (ref 24)	365
MgF <sub>2</sub>						
Sapphire	7.70 (ref. 29)	345 (ref 32)	10.9 (ref. 29)	0.27 (ref 32)	708 c-plane (ref 25) 535 c-plane (ref 30) 375 c-axis 60° (ref 31)	2120 1602 1123
ALON	6.76 (ref 18)	321 (ref 26)	6.9 (ref 18)	0.26 (ref 26)	622 (ref 26)	1464
Spinel	7.77 (ref 27)	193 (ref 32)	7.88 (ref 27)	0.26 (ref 27)	190 (ref 27)	739

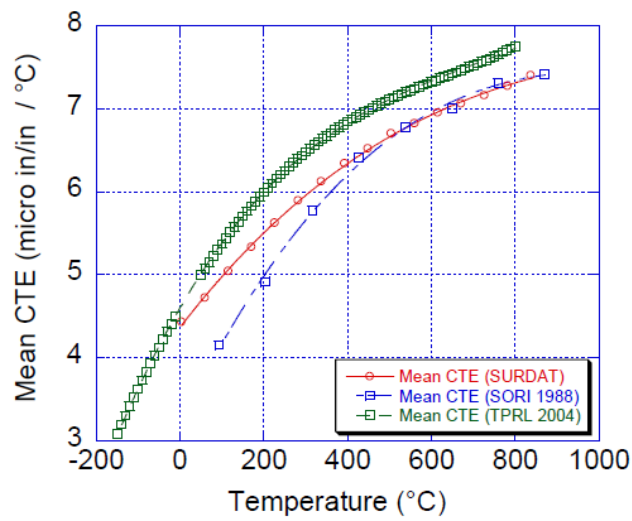
Thermal Shock F.O.M.:  $R' = \sigma_f (1-\nu) \kappa / \alpha E$



شکل 7: هدایت حرارتی یا مقایسه داده های تاریخی-ALON



شکل 8: گرمای ویژه برای مقایسه داده های تاریخی-ALON



شکل 9: ضریب بسط حرارتی برای مقایسه داده های تاریخی-ALON

#### 4.0 عملکرد شوک حرارتی (DOME تست)

گنبد‌های پرداخت شده ممکن است دارای آسیب در سطح و یا حاوی معایب داخلی باشند که با روش‌های طبیعی بازرسی نوری قابل مشاهده یا قابل تشخیص نیست. این آسیب می‌تواند تا حد زیادی قدرت گنبد و قابلیت اطمینان پیش‌بینی شده را که بر اساس تجزیه و تحلیل آماری وایبول آزمایش شده است را کاهش دهد. تست قابلیت اطمینان از قطعات نوری به پایان رسیده مانند گنبد یک عملیات مهم برای غربالگری اجزای ضعیف است. مطلوب است که این روش یک روش غیر مخرب ربای گنبد‌های صفحه‌ای برای چنین نقص باشد و همچنین یک آستانه ارائه شود که اطمینان بخشد که تنها گنبد ساختاری قوی برای سطح موشک استفاده می‌شود. این آزمون باید جزء را ضعیف نماید. چندین روش پیشنهاد شده است که ارائه دهنده استرس القایی غیر غیرمخرب حرارتی یا مکانیکی است: لامپ کوارتز، لیزر حرارت، فشار هیدرولیک و اطفای مایع پیشنهاد شده است و یا به عنوان روش‌های مناسب برای تست اثبات گنبد ارزیابی شده است.

از این روش‌ها، اطفای قطرات مایع، تنش حرارتی مشابهی را با تنش واقعی تولید شده در حین پرواز فراهم می‌کند و به راحتی می‌تواند به عنوان یک غربال 100٪ و یا آزمون اثبات اجرا شود. مدل‌های پیش‌بینی شده برای تعیین سطوح استرس معرفی شده توسط آزمون اطفای قطره مایع توسعه یافته اند اما به سختی قابل بررسی هستند. تغییر فاز غیر خطی و زنده و پویا زمانی که جت آب به گنبد در تجزیه و تحلیل از کانتور حرارتی و میدان تنش حاصل تقریباً غیر ممکن حمله می‌کند اتفاق می‌افتد. این کار تنها با کمک اندازه‌گیری‌های تجربی با استفاده از دوربین‌های مادون قرمز و با دقت زمان نگاشت عناصر فردی صورت می‌گیرد که یک رابطه بین دمای فرو نشانده و استرس اوج گنبد مسلم و قطعی است.

در حالی که این روش نسبتاً دشوار که نیاز به آزمایش گسترده دارد، این آزمون با استفاده از گنبد‌های یاقوت کبود با همان هندسه به عنوان گنبد ALON که اخیراً مورد آزمایش قرار گرفتند تأیید شده است. اولین مفروضات منظور شده برای پارامترهای آزمون گنبد ALON بر اساس اطلاعات یاقوت کبود شد. این فرض بر این است که خواص ALON و یاقوت کبود از مواد به طور مشابه متفاوت است و به طور قابل توجهی تحت تاثیر تنش‌های ناشی از آزمون قرار نمی‌گیرند.



تست ها در سه گنبد ALON جلاداده شده با استفاده از همان سنگ زنی و پرداخت محسط و تکنیک هایی که برای قدرت نمونه آزمون خمش دو محوره بالا مورد استفاده قرار گرفت انجام شد. ( $\sigma_f = 700$  مگاپاسکال  $\pm$  169 مگاپاسکال،  $M = 7.7$ ). تست اطفاف قطره مایع در امکانات آزمون ریتون در TUSCON، AZ انجام شد. با استفاده از روش ها و پارامترهایی که برای گنبد یاقوت کبود از همان هندسه ایجاد شدند. گنبد ALON در یک درجه حرارت یکنواخت از 150 درجه سانتی گراد حرارت داده شد و اسپری آب بر روی سطح مقعر فرو نشستن در دمای اتاق با استفاده از درجه حرارت آب از 25 درجه سانتی گراد صورت گرفت که هر سه گنبد از این این آزمایش جان سالم به در بردند.

تست گنبدهای ALON اضافی در حال حاضر در فرآیند و مدل های پیش بینی تنش های حرارتی تولید شده در طول تست اطفاف با استفاده از خواص حرارتی تازه اندازه گیری شهد درجه حرارت وابسته به ALON تصفیه می شود. این مدل ها در صورت لزوم برای تغییر شرایط فرو نشاندن استفاده خواهد شد به طوری که شرایط تست قابلیت اطمینان قطره مایع برای گنبد ALON بتواند نهایی شود.

## 5.0 خواص نوری

هدف از این تجزیه و تحلیل، تعیین کمیت خواص انتشار ALON و مقایسه این مقادیر با دو مقدار دیگر مواد گنبد MWIR است. این مهم است زیرا یک گنبد در پرواز به طور ایرودینامیک گرم می شود و شروع به نشر تابش برای آشکارساز پشت گنبد می نماید.

چند ویژگی نوری از ویژگی های ALON در MD, Laurel, JHAPL، اندازه گیری و تجزیه و تحلیل شد. (19) داده ها مورد بررسی قرار گرفت و توسط راه حل اپتیک، دیتون، اوهایو به شکل نهایی کاهش یافت. (20) خلاصه ای از داده ها در این مقاله ارائه خواهد شد و شرح کامل تری از روش های اندازه گیری و نتایج را می توان از مرجع 21 به دست آورد.

مواد ALON اندازه گیری شده، ALON درجه LS نوری ساخته شده توسط شرکت Surmet، برلینگتون، MA بود. ALON در رده LS مواد چندبلوری بزرگ دانه دارای پراکنده نوری کم هستند. ALON در رده های LS- و HP اساساً از نظر خلوص و اندازه دانه مشابه هستند. تفاوت اصلی پراکنده نوری در منطقه مرئی طیف است. یاقوت سرخ، ماده چندبلوری درجه نوری تولید شده در شرکت Surmet است. یاقوت کبود توسط

Crystal Systems ساخته شده و مقایسه های صورت گرفته در اینجا بر اساس اندازه گیری های قبلی گسترده قبلی sapphire در JHAPL صورت گرفته است. اندازه گیری انتقال در مقابل درجه حرارت برای به دست آوردن ضریب انقراض صورت گرفته است. پراکندگی (نگاه کنید به جدول شماره 9) در 3.39 میکرومتر برای تعیین سهم پراکنده به ضریب انقراض اندازه گیری شد. با دانستن شاخص انکسار ماده و با استفاده از مقادیر اندازه گیری انتقال، ضریب انقراض کل را می توان با استفاده از معادله 4 محاسبه نمود.

$$\beta_{\text{ext}} = \frac{\ln(2R^2\tau) - \ln\left[\sqrt{(1-R)^4 + 4R^2\tau^2} - (1-R)^2\right]}{L} \quad (4)$$

$$R = \left(\frac{n-1}{n+1}\right)^2 \quad (5) \text{ که در آن}$$

رفلکتانس سطحی تک است

$n$  و شاخص انکسار

$L$  ضخامت نمونه

$T$  ترانسمیٹانس

$$n^2 = 1 + \frac{A\lambda^2}{(\lambda^2 - B)} + \frac{C\lambda^2}{(\lambda^2 - D)} \quad (6)$$

مقادیر شاخص انکسار برای ALON (مرجع 22) با استفاده از معادله 6 Sellmeier محاسبه شد.

$$A = 2.1578, B = 0.010507, C = 3.6683 \text{ and } D = 243.02 \quad \text{که در آن}$$

مقادیر شاخص انکسار برای Spinel و Saphirre (مرجع 23) با استفاده از معادله 7 Sellmeier محاسبه شد.

$$n^2 = A + \frac{B\lambda^2}{(\lambda^2 - C)} + \frac{D\lambda^2}{(\lambda^2 - E)} \quad (7)$$

برای Spinel،  $A = 1.9370478$ ,  $B = 0.95795641$ ,  $C = 0.01832141$ ,  $D = 3.7654327$ , and  $E = 300$ .

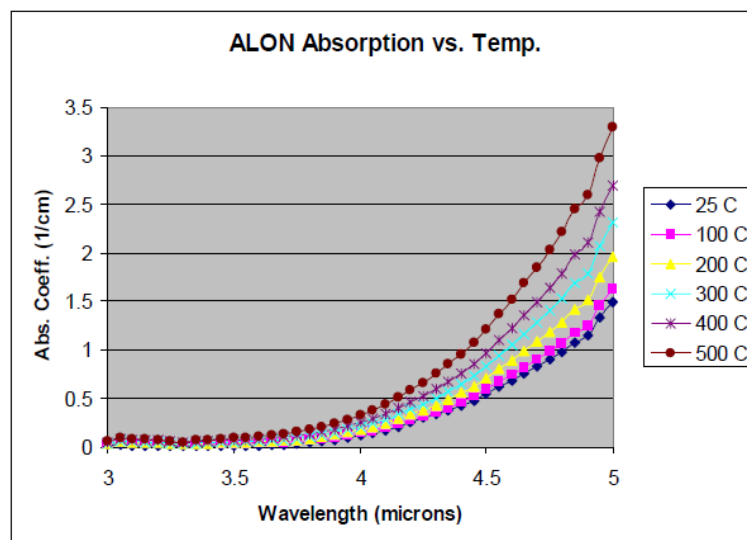
برای Saphire،  $A = 1.6257584$ ,  $B = 1.457221$ ,  $C = .0113346735$ ,  $D = 6.6760415$ , and  $E = 400$ .

سپس ضریب جذب با استفاده از رابطه زیر محاسبه می شود:

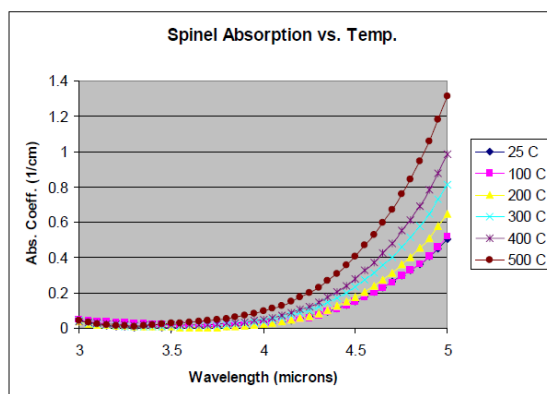
$$\beta_{\text{ext}} = \beta_{\text{scatter}} + \beta_{\text{abs}} \quad (8)$$

جدول 9: پراکندگی مجتمع بیشتر (TIS) و ضریب پراکندگی (B)

نمونه	توصیف نمونه	طول موج	ترانسمیٹانس	TIS	ضریب پراکندگی
11	ALON (1" x 0.050")	3.39	86	0.005	
14	ALON (1" x 0.236")	3.39	88	0.011	0.0127
15	Sapphire (1" x 0.050")	3.39	88	0.005	
16	Sapphire (1" x 0.236")	3.39	87	0.012	0.0148
17	Spinel (1" x 0.080")	3.39	88	0.005	
18	Spinel (1" x 0.236")	3.39	87	0.02	0.0379



شکل 10: ALON: ضریب جذب به ازای طول موج و دما



شکل 11: اسپینل: ضریب جذب در مقابل طول موج و دما.

وابستگی دمای ضریب جذب ALON در محدوده میکرومتر طول موج 3 تا 5 است که در شکل 10 نشان داده شده است. ضریب جذب یاقوت سرخ (شکل 11) و یاقوت کبود نشان دهنده درجه حرارت مشابه و وابستگی به طول موج. مقایسه رفتار نشر محاسبه شده از این سه ماده در جدول 10 آورده شده است. ارزیابی مرتبه برای اولین بار از نشر به سادگی توسط معادله زیر معادله 9 داده شده است. نشر توسط محصول از ضریب جذب و طول مسیر و یا ضخامت نمونه تعیین می شود. جدول 10 مقایسه گروه به طور متوسط نشر ALON، یاقوت سرخ و یاقوت کبود گنبد دارای ضخامت (0.090 L) است.

$$\varepsilon = \beta_{abs} L \quad (9)$$

نشر پایین تر از یاقوت سرخ مواد نوری مناسب ترین است اگر گنبد انتشار است از نگرانی های اولیه می سازد. به طور کلی نشر از ALON است، حدود سه برابر که از یاقوت سرخ و حدود کمی کمتر از 2 برابر است که از یاقوت کبود است. قدرت و صلابت بالاتر از ALON نسبت به یاقوت سرخ و پایین آوردن هزینه های آن در مقایسه به یاقوت سرخ و یاقوت کبود باعث می شود ALON ماده گنبد برای MWIR با سرعت بالا گنبد موشکی جذاب و ماندگار شود.

جدول 10: امیتانس متوسط باند ALON، Spinel و Saphire

Material	25C	100 C	200 C	300 C	400 C	500 C
Spinel	0.024	0.025	0.029	0.037	0.045	0.064
ALON	0.076	0.087	0.104	0.122	0.144	0.179
Sapphire	0.044	0.048	0.058	0.071	0.087	0.107

## 6.0 خلاصه

خواص ترمو فیزیکی و نوری کامل از ALON برای گریدهای مختلف از مواد تولید شده با استفاده از فرآیندهای تولید در مقیاس کامل تست شده است. اطلاعات کامل برای طراحی قطعات نوری بحرانی ترکیب ALON داده شده است، از جمله مدول وایبل و ارزش های مقاومت مشخصه. قطعی سنگ زنی و پرداخت از ALON در مقادیر مقاومت های مشخصه است که از 160٪ بزرگتر از که قبلا در دمای بالا (C500) و بیش از 180٪ برای نمونه ها در دمای اتاق بیشتر شده است. از طریق استفاده اختصاصی از فرآیندهای در پایان Surmet، قابلیت اطمینان ALON از گزارش های قبلی نیز به طور قابل توجهی افزایش یافته است. انتظار می رود این تکنیک های تکمیلی توسعه یافته برای ALON نیز برای بهبود قدرت و افزایش قابلیت اطمینان از دیگر سرامیک چندبلوری سخت و تنها کریستال مواد MWIR های پنجره مانند  $MgAl_2O_4$  یاقوت سرخ و یاقوت کبود مفید باشد.

مشخص شده است مواد ALON با پراکندگی پایین (LS) که دارای بهترین ترکیب از خواص مکانیکی و نوری برای استفاده در محیط های شدید هستند. برای کاربردهای شوک حرارتی، ALON قابل مقایسه با یاقوت کبود است، در حالی که بر  $MgF_2$  و Spinel برتری دارد. با توجه به هزینه پایین تر آن برای مواد خام و ساخت، به جای یاقوت کبود در بسیاری از برنامه های کاربردی به کار گرفته خواهد شد.

## تقدیرنامه ها

نویسندگان این مقاله می خواهند به حمایت از سازمان ها و افراد زیر اذعان نمایند:

( AFRL) Materials and Manufacturing Directorate, Air Force Research )

Laboratory,(WPAFB,) Dayton OH

UDRI) The University of Dayton Research Institute, Dayton, OH)

Steve Goodrich

TPRL) Thermophysical properties Research Institute Inc. West Lafayette, IN)

Jozef Gembarovic

JHAPL) John Hopkins Applied Physics Lab, Laurel, MD)

Dave Blodget, Mike Thomas, and Dave Hahn

#### REFERENCES

1. ASTM C 1499-03, "Standard Test Method for Monotonic Equibiaxial Flexural Strength of Advanced Ceramics at Ambient Temperature", (2003).
2. ASTM C1259-01, "Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio for Advanced Ceramics by Impulse Excitation of Vibration", (2001).
3. ASTM C1239-94a, "Standard Practice for Reporting Uniaxial Strength Data and Estimating Weibull Distribution Parameters for Advanced Ceramics", (1994).
4. M.W. Price, T.E. Hubbert, and J.R. Koenig, "Mechanical and Thermal Properties of Four IR Dome Materials", *Final Report to JHU/APL*, Southern Research Institute, Birmingham, ALA. (1988).
5. M.W. Price, T.E. Hubbert, and J.R. Koenig, "Mechanical and Thermal Properties of Four IR Dome Materials", *Report No. SORI-EAS-87-771-6225, Interim Data Report to Johns Hopkins APL August (1987)*, Southern Research Institute, Birmingham, ALA. (1987).
6. C.L. Resch, "Structural Limits of Sapphire, Zinc Sulfide, ALON, and Yttria IR Domes Based on Altitude and Mach Number", *Doc. No. AM-89-E0077*, Johns Hopkins APL Laurel, MD (1989).
7. RAYTRAN<sup>®</sup> ALON Property Data Sheet, Raytheon Company Research Division, (1984).
8. J.M. Wahl, "Biaxial Flexure Strength Testing of ALON<sup>™</sup> Optical Ceramic", *Memo No. ME02-13*, Raytheon Company, MMEL, Advanced Materials, March (2002).
9. J.E. Marion, "Fracture Mechanisms and Strengthening of Slab Lasers", *SPIE Vol. 736 New Slab and Solid State Laser Technologies and Applications*, pp2-12 (1987).
10. B.R.Lawn, "Fracture and deformation in brittle solids: A perspective on the issue of scale", *J. Mater. Res.* **19** [1], pp 22-29 (2004).
11. R.G. Munro and S.W. Freiman, "Correlation of Fracture Toughness and Strength", *J. Am. Ceram. Soc.* **82** [8], pp 2246-2248, (1999).
12. J.E. Marion, D.M. Gualtieri, and R.C. Morris, "Compressive Epitactic layers on single crystal components for improved mechanical durability and strength", *J. Appl. Phys.* **62** [5] (1987).
13. R.G. Munro, "Evaluated Material Properties for a Sintered  $\alpha$ -Alumina", *J. Am. Ceram. Soc.* **80** [8], pp 1919-1928, (1997).
14. J.J. Swab, G.A. Gilde, P.J. Patel, A. A. Wereszczek, J. W. McCauley, and J. D. Risner, "Fracture Analysis of Transparent Armor Ceramics", *Fractography of Glasses and Ceramics IV, Ceramic Transactions, vol. 122*, edited by J.R. Varner and G.D. Quinn, Westerville, OH, The American Ceramic Society, pp 489-508 (2001).
15. D. Black, R.P. Polvani, L. Braun, B. Hockey, and G. White, "Detection of sub-surface damage in sapphire", *SPIE Vol. 3060 Window and Dome Technologies V*, pp. 102-114 (1997).
16. F. Schmid, C.P. Khattak, S.G. Ivanova, D.M. Felt, and D.C. Harris, "Influence of Polishing on the Biaxial Flexure Strength of Sapphire at 600°C", *Proceedings of the 8th DOD Electromagnetic Windows Symposium April (2000)*.

DRAFT Paper # 5786-10, SPIE Defense and Security Symposium, Orlando, FL (2005)  
To be Published in SPIE Proceedings Vol 5786, Window and Dome Technologies and Materials IX

17. J.R. Koenig, "Thermal Conductivity of Spinel, ALON, and Yttria", *Report No. SORI-EAS-86-695-6081-I-F, Final Report to Raytheon Company (July 1986)*, Southern Research Institute, Birmingham, ALA. (1986).

18. J. Gembarovic, R.E. Taylor, and D.L. Taylor, "Thermophysical Properties of ALON", *Doc. No. TPRL 3199, Report to Surmet Corporation September (2004)*, TPRL, Inc. West Lafayette, IN (2004).

19. D.W. Blodget, D.V. Hahn, and M.E. Thomas, "Optical Characterization of SURMET samples", *Report For Order No. 542131, AD-26162, Surmet Corporation, Burlington MA*, Johns Hopkins APL, Laurel, MD (2004).

20. D. Fisher, "Emissivity Evaluation of ALON™, Spinel and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – Final Report", *Report Prepared for Surmet Corporation*, by Optics Solutions, Dayton, OH Jan 3, 2005.

21. M.E. Thomas, D.W. Blodget, D.V. Hahn, "Optical Characterization of ALON™ and spinel", SPIE Vol. 5786 Window and Dome Technologies IX, (2005).

22. D. Zelmon and D. Rush, "Refractive Index Measurements of ALON™ from 0.4 to 5.0 microns", *Unpublished Measurements Made for Surmet Corporation, Burlington, MA*, at the Materials and Manufacturing Directorate, Air Force Research Laboratory, Wright-Patterson AFB (2004).

23. Handbook of Optics Vol II Devices Measurements and Properties, Michael Bass Editor in chief, McGraw Hill-Inc., Chapter 33, pages 33.64 and 33.61 (1995).

24. J A Savage, "Infrared Optical Materials and their Antireflection Coatings", Adam Hilger Pub., (1985)

25. "Flexural strength of sapphire: Weibull statistical analysis of stressed area", *J. Appl. Phys. Vol. 96*, pg 3172-3179, Sept. (2004)

26. S. Goodrich, "Surmet ALON Equibiaxial Flexure Test", University of Dayton Res. Inst., Doc. No. SMG-04-2-59, (2004).

27. J.R. Koenig, "Thermostructural Evaluation of Four Infrared Seeker Dome Materials", Part 2. Thermal and Mechanical Properties; *Report # NWC TP 6539*, Southern Research Institute (SORI), Birmingham, AL, (1985).

27. J.R. Koenig, "Thermostructural Evaluation of Four Infrared Seeker Dome Materials", Part 2. Thermal and Mechanical Properties; *Report # NWC TP 6539*, Southern Research Institute (SORI), Birmingham, AL, (1985).

28. Saint Gobain Product Data Sheet. Available at [www.ndfc.saint-gobain.com](http://www.ndfc.saint-gobain.com)

29. Mellor Optics Product Data Sheet. Available at [www.melleroptics.com](http://www.melleroptics.com)

30. "High temperature compression and ring-on-ring testing of sapphire" *SPIE Vol. 3705* pg. 17-27, (1999).

31. R.L. Gentilman, E.A. Maguire, H.S. Starrett, T.M. Hartnett, and H.P. Kirchner, "Strength and transmittance of sapphire and strengthened sapphire", *J. Am. Ceram. Soc. 64* [9] C116-117, (1981).

32 D.C. Harris, "Infrared Window and Dome Materials" *SPIE Volume TT10* (1996)