

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه سمنان

دانشکده مواد و صنایع

گروه مهندسی مواد

پایان نامه

جهت اخذ درجه‌ی کارشناسی ارشد مهندسی مواد - گرایش شناسایی و انتخاب مواد

بررسی اثر نانو ذرات اکسیدی بر خواص مغناطیسی و

الکتریکی نوار آمورف $Fe_{78}Si_{13}B_9$

دانشجو:

مرتضی نظری خرم‌آبادی

استاد راهنما:

دکتر علی حبیب‌اله زاده

استاد مشاور:

دکتر فتح‌اله قدس

بهمن ۱۳۸۹

فهرست مطالب

صفحه

عنوان

.....ج.....	فهرست اشکال
.....و.....	فهرست جداول
.....ا.....	چکیده فارسی
.....	فصل ۱: مقدمه
.....۳.....	<u>۱-۱ مقدمه</u>
.....	فصل ۲: مروری بر منابع
.....۷.....	۱-۲ ضوابط شکل‌گیری شیشه‌ی فلزی
.....۷.....	۲-۲ قابلیت شیشه‌ای شدن
.....۱۱.....	۳-۲ بررسی‌های تئوری
.....۱۳.....	۴-۲ شاخص γ
.....۱۷.....	۵-۲ ساختارهای شیشه‌های فلزی توده‌ای (BMG)
.....۱۸.....	۶-۲ تبلور شیشه‌های فلزی توده‌ای
.....۲۰.....	۷-۲ روش‌های تولید شیشه‌های فلزی
.....۲۰.....	۱-۷-۲ مذاب ریسی
.....۲۳.....	۲-۷-۲ تبرید آرام
.....۲۳.....	۳-۷-۲ کوئنچ ملایم
.....۲۳.....	۴-۷-۲ کوئنچ فشاری
.....۲۳.....	۵-۷-۲ چگالش از فاز گازی (شیشه‌کاری لیزر)
.....۲۴.....	۸-۲ خواص مکانیکی
.....۲۸.....	۹-۲ خواص خوردگی
.....۲۹.....	۱-۹-۲ تأثیرات ترکیب
.....۳۰.....	۱۰-۲ خواص الکتریکی
.....۳۴.....	۱۱-۲ کاربردهای شیشه‌های فلزی
.....۳۵.....	۱-۱۱-۲ صنایع الکترونیکی
.....۳۵.....	۱-۱-۱۱-۲ هسته‌ی ترانسفورماتور توزیع
.....۳۷.....	۱-۱-۱-۱۱-۲ مشخصات فنی
.....۳۷.....	۲-۱-۱-۱۱-۲ تکنولوژی و فرآیند تولید هسته‌های آمورف

.....۳۷.....	۳-۱-۱-۱۱-۲ مزایا و معایب هسته‌های آمورف
.....۳۹.....	۴-۱-۱-۱۱-۲ تجارب کسب شده در این زمینه در دنیا و برنامه‌های پیش‌رو
.....۴۰.....	۲-۱۱-۲ تجهیزات ورزشی
.....۴۱.....	۳-۱۱-۲ تجهیزات درمانی
.....۴۲.....	۴-۱۱-۲ تجهیزات فضایی (طوفان های خورشیدی)
.....۴۲.....	۵-۱۱-۲ تجهیزات نظامی- دفاعی

فصل ۳: مواد و روش آزمایش

.....۴۴.....	<u>۱-۳ مواد اولیه</u>
.....۴۸.....	<u>۲-۳ روش آزمایشات</u>
.....۴۸.....	<u>۱-۲-۳ بررسی های اشعه‌ی X</u>
.....۴۸.....	<u>۲-۲-۳ آنالیز تفاضلی حرارتی (DTA)</u>
.....۴۹.....	<u>۳-۲-۳ بررسی های خواص مغناطیسی</u>
.....۵۱.....	<u>۱-۳-۲-۳ نمودار هیستریزس مغناطیسی</u>
.....۵۲.....	<u>۴-۲-۳ بررسی های خواص الکتریکی</u>

فصل ۴: نتایج و بحث

.....۵۵.....	<u>۱-۴ فلز شیشه‌ای $Fe_{70}C_{10}Mo_{14}B_6$</u>
.....۵۷.....	<u>۲-۴ فلز شیشه‌ای FeSiB</u>
.....۶۰.....	<u>۳-۴ فلز شیشه‌ای FeSiB حاوی نانو پودر آلومینا</u>
.....۶۸.....	<u>۴-۴ فلز شیشه‌ای FeSiB حاوی ۰/۲ درصد وزنی نانو پودر منیزیا و یا سیلیس</u>

فصل ۵: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

.....۷۸.....	<u>۱-۵ نتیجه‌گیری کلی</u>
.....۷۹.....	<u>۲-۵ پیشنهادات</u>
.....۸۱.....	<u>مراجع</u>
.....۸۴.....	<u>پیوست ۱</u>
.....۸۹.....	<u>پیوست ۲</u>
.....۹۰.....	<u>چکیده انگلیسی</u>

فهرست اشکال

عنوان	صفحه
شکل ۱-۱: مقایسه‌ی آهنگ سرد کردن بحرانی در برابر T_{Tg} (دمای نسبی استحاله‌ی شیشه‌ای شدن) برای آلیاژهای شیشه-ای	۵
شکل ۱-۲: منحنی شماتیکی TTT برای نمایش T_x, T_g, T_L, R_c و موقعیت میانگین منحنی TTT	۱۱
شکل ۲-۲: منحنی‌های شماتیکی TTT که تأثیرات دمای تبلور (T_x) برای مایعی با T_g و T_L های مشابه بر روی سرعت تبرید بحرانی	۱۳
شکل ۳-۲: تصویر سیستم شیشه‌ی فلزی توده‌ای as-cast, Vitalloy	۱۴
شکل ۴-۲: گرانروی به‌عنوان تابعی از دما برای مایع تحت تبرید Vit4	۱۶
شکل ۵-۲: مقایسه گرانروی مایعات شکل‌گیری شیشه مختلف	۱۶
شکل ۶-۲: مواضع مختلف اتمی سه گروه از شیشه‌های فلزی توده‌ای	۱۸
شکل ۷-۲: مشتق پروفیل دما-زمان در برابر دما که در جریان گرمایش Vit1 آمورف (خط توپر) و کریستالی (خط چین) بدست آمده است	۱۹
شکل ۸-۲: مذاب ریزی شیشه‌ی فلزی. نوار جامد فلز آمورف با سرعتی بیش از 1 Km/min از روی دیسک جدا می‌شود	۲۱
شکل ۹-۲: دو مسیر عمومی تبرید برای چگالش به حالت جامد. مسیر ۱، مسیر برای حالت بلورین؛ مسیر ۲، مسیر کوئنچ سریع به حالت جامد آمورف	۲۲
شکل ۱۰-۲: چهار روش برای شکل‌گیری جامدات آمورف: الف) تبرید آرام، ب) کوئنچ ملایم، ج) کوئنچ فشاری و د) چگالش از فاز گازی	۲۴
شکل ۱۱-۲: مقایسه آلیاژهای شیشه‌ای با برخی از آلیاژهای بلورین	۲۴
شکل ۱۲-۲: خواص مکانیکی فلزات شیشه‌ای، تغییرات (a) استحکام کششی (b) سختی ویکرز، نسبت به مدول ینگ .	۲۶
شکل ۱۳-۲: سطح شکست نمونه‌ی کششی آلیاژ آمورف، قطرات ریز ذوب‌شدگی‌های موضعی را نشان می‌دهد	۲۷
شکل ۱۴-۲: تصاویر درجا از انشعابات نوک ترک در یک نمونه‌ی کششی تک‌لبه‌ی شکاف‌دار در جریان بررسی چقرمگی شکست	۲۸

- شکل ۲-۱۵: مقایسه‌ی حلقه‌ی پسماند مغناطیسی فلزات شیشه‌ای توده‌ای پایه آهن حلقه‌ای شکل ریختگی و نوارهای مشابه تولید شده از طریق ذوب ریسی ۳۴
- شکل ۲-۱۶: کامپیوتر فوق کوچک تولید شده با تکنولوژی فلز مایع توسط OQO ۳۶
- شکل ۲-۱۷: زانوی تولید شده از مواد آمورف توسط شرکت DePuy ۴۱
- شکل ۲-۱۸: تصویر سمت چپ فضاپیمای جنسیس و سمت راست کلکتور بکار رفته در فضاپیما ۴۲
- شکل ۳-۱: الف) کوره‌ی القایی و ب) قالب مسی آبگرد مورد استفاده برای ذوب و بارریزی ۴۵
- شکل ۳-۲: دستگاه VSM ۵۰
- شکل ۳-۳: شماتیک سیستم VSM (۱- نمونه، ۲- ارتعاشگر، ۳- سیم پیچ، ۴- پروب) ۵۰
- شکل ۳-۴: شماتیک نمودار VSM ۵۱
- شکل ۳-۵: شماتیک آزمون چهار نقطه ۵۲
- شکل ۳-۶: شماتیکی از نمودارهای جریان-مقاومت دو نوع رسانا، الف) رسانای اهمی و ب) رسانای غیراهمی ۵۳
- شکل ۴-۱: الگوی پراش اشعه X نوار آمورف $Fe_{70}C_{10}Mo_{14}B_6$ (درصد اتمی) (as-received) ۵۵
- شکل ۴-۲: الگوی پراش اشعه X جسم ریخته شده از $Fe_{70}C_{10}Mo_{14}B_6$ (درصد اتمی) در قالب مسی آبگرد ۵۵
- شکل ۴-۳: نمودار DTA نوار آمورف $Fe_{70}C_{10}Mo_{14}B_6$ (درصد اتمی) (as-received)، دمای مربوط به تبلور با پیکان مشخص شده است ۵۶
- شکل ۴-۴: منحنی هیستریزس آلیاژ $Fe_{70}C_{10}Mo_{14}B_6$ (درصد اتمی) (as-received) ۵۷
- شکل ۴-۵: الگوی پراش اشعه X نوار آمورف $Fe_{78}Si_{13}B_9$ (درصد اتمی) (as-received) ۵۷
- شکل ۴-۶: نمودار هیستریزس نوار آمورف $Fe_{78}Si_{13}B_9$ (درصد اتمی) (as-received) ۵۸
- شکل ۴-۷: نمودار جریان بر حسب ولتاژ نوار آمورف $Fe_{78}Si_{13}B_9$ (درصد اتمی) (as-received) ۵۹
- شکل ۴-۸: نمودار مقاومت بر حسب جریان نوار آمورف $Fe_{78}Si_{13}B_9$ (درصد اتمی) (as-received) ۵۹
- شکل ۴-۹: الگوی پراش اشعه X مربوط به نوارهای آمورف $Fe_{78}Si_{13}B_9$ (درصد اتمی) درصدهای وزنی مختلف نانوپودر Al_2O_3 ۶۰
- شکل ۴-۱۰: نمودار هیستریزس نوار آمورف $Fe_{78}Si_{13}B_9$ (درصد اتمی) بدون نانو پودر تا ۱ درصد وزنی نانوپودر Al_2O_3 ۶۲

شکل ۴-۱۱: (a) نمودار هیستریزیس نوار آمورف $Fe_{78}Si_{13}B_9$ (درصد اتمی) بدون نانو پودر تا ۱ درصد وزنی نانوپودر Al_2O_3 و (b) جزئیات نمودار در ناحیه مشخص شده ۶۳

شکل ۴-۱۲: نمودار های مربوط به مقادیر مغناطیسی نوار آمورف $Fe_{78}Si_{13}B_9$ (درصد اتمی) (as-received) ۶۵

شکل ۴-۱۳: نمودار جریان بر حسب ولتاژ نوار آمورف $Fe_{78}Si_{13}B_9$ (درصد اتمی) (as-received) حاوی الف) ۰/۱ درصد وزنی، ب) ۰/۲ درصد وزنی، ج) ۰/۵ درصد وزنی و د) ۱ درصد وزنی نانوپودر Al_2O_3 ۶۶

شکل ۴-۱۴: نمودار مقاومت بر حسب جریان نوار آمورف $Fe_{78}Si_{13}B_9$ (درصد اتمی) (as-received) حاوی الف) ۰/۱ درصد وزنی، ب) ۰/۲ درصد وزنی، ج) ۰/۵ درصد وزنی و د) ۱ درصد وزنی نانوپودر Al_2O_3 ۶۶

شکل ۴-۱۵: نمودار مقاومت بر حسب درصد اتمی نانو پودر آلومینا در نوار آمورف $Fe_{78}Si_{13}B_9$ (درصد اتمی) ۶۸

شکل ۴-۱۶: الگوی پراش اشعه X نوار آمورف $Fe_{78}Si_{13}B_9$ (درصد اتمی) (a) بدون نانو پودر و حاوی ۰/۲ درصد وزنی نانوپودر (b) Al_2O_3 ، (c) MgO و (d) SiO_2 ۶۹

شکل ۴-۱۷: نمودار هیستریزیس نوار آمورف $Fe_{78}Si_{13}B_9$ (درصد اتمی) بدون نانو پودر تا ۰/۲ درصد وزنی نانوپودر Al_2O_3 ۷۱

شکل ۴-۱۸: (a) نمودار هیستریزیس نوار آمورف $Fe_{78}Si_{13}B_9$ (درصد اتمی) بدون نانو پودر تا ۰/۲ درصد وزنی نانوپودر Al_2O_3 ، MgO و SiO_2 و (b) جزئیات نمودار در ناحیه مشخص شده ۷۲

شکل ۴-۱۹: نمودار های مقادیر مغناطیسی نوار آمورف $Fe_{78}Si_{13}B_9$ (درصد اتمی) (as-received) حاوی ۰/۲ درصد وزنی نانوپودر آلومینا، منیزیا و سیلیس ۷۳

شکل ۴-۲۰: نمودار جریان بر حسب ولتاژ نوار آمورف $Fe_{78}Si_{13}B_9$ (درصد اتمی) (as-received) حاوی ۰/۲ درصد وزنی نانوپودر الف) MgO و ب) SiO_2 ۷۴

شکل ۴-۲۱: نمودار مقاومت بر حسب جریان نوار آمورف $Fe_{78}Si_{13}B_9$ (درصد اتمی) (as-received) حاوی ۰/۲ درصد وزنی نانوپودر الف) MgO و ب) SiO_2 ۷۵

شکل ۴-۲۲: نمودار مقاومت بر حسب نوع نانو پودر با درصد وزنی مشابه ۰/۲ در نوار آمورف $Fe_{78}Si_{13}B_9$ (درصد اتمی) ۷۵

فهرست جداول

عنوان	صفحه
جدول ۱-۲: برخی از جامدات آمورف، نوع پیوند و دمای استحاله‌ی شیشه‌ای آنها	۸
جدول ۲-۲: سیستم‌های شیشه‌ی فلزی توده‌ای و سال تولید آنها	۱۵
جدول ۳-۲: خواص و حوزه‌های کاربردی ممکن شیشه‌های فلزی توده‌ای	۳۵
جدول ۱-۳: مقادیر مصرفی هریک از مواد اولیه	۴۴
جدول ۲-۳: شرایط مذاب ریسی آلیاژ $Fe_{70}C_{10}Mo_{14}B_6$ (درصد اتمی)	۴۵
جدول ۳-۳: مقادیر مصرفی هریک از مواد اولیه بر مبنای ۴۰۰g ماده اولیه	۴۶
جدول ۴-۳: نمونه‌های مورد آزمایش با درصدهای وزنی و اندازه ذره	۴۷
جدول ۵-۳: شرایط مذاب ریسی آلیاژ $Fe_{78}Si_{13}B_9$ (درصد اتمی)	۴۷
جدول ۱-۴: اطلاعات آزمون اشباع مغناطیسی نوار مذاب ریسی شده $Fe_{78}Si_{13}B_9$ (درصد اتمی) در مقایسه با فولاد سیلیسیم‌دار	۵۸
جدول ۲-۴: اطلاعات مربوط به آزمون اشباع مغناطیسی نوارهای مذاب ریسی شده $FeSiB$ بدون نانو پودر تا ۱ درصد وزنی نانو پودر آلومینا	۶۴
جدول ۳-۴: اطلاعات مربوط به آزمون چهار نقطه نوارهای مذاب ریسی شده $FeSiB$ حاوی ۰/۱ تا ۱ درصد وزنی نانو پودر آلومینا	۶۷
جدول ۴-۴: اطلاعات مربوط به آزمون اشباع مغناطیسی نوارهای مذاب ریسی شده $FeSiB$ بدون نانو پودر و حاوی ۰/۲ درصد وزنی نانو پودر آلومینا، منیزیا و یا سیلیس	۷۳
جدول ۵-۴: اطلاعات مربوط به آزمون چهار نقطه نوارهای مذاب ریسی شده فلز شیشه‌ای $FeSiB$ حاوی ۰/۲ درصد وزنی نانو پودرهای آلومینا، منیزیا و سیلیس	۷۵

چکیده

در این پروژه، آلیاژ $Fe_{78}Si_{13}B_9$ (درصد اتمی) توسط روش ذوب القایی در خلاء تولید شده و سپس توسط روش مذاب ریسی، آلیاژ تبدیل به نوارهایی به ضخامت ۳۰ میکرون و پهنای ۷۸۰ میکرون شد. آزمون با پراش اشعه ایکس بر روی نوارهای حاصله مبین آمورف بودن نوارها بود. در چنین شرایطی خواص مغناطیسی نوارها توسط روش VSM و خواص الکتریکی آنها توسط آزمون چهار نقطه مورد بررسی قرار گرفت و برای مشخص نمودن اثر حضور نانو مواد در خواص مغناطیسی و الکتریکی این ماده‌ی آمورف، از نانو مواد آلومینا (در درصدهای وزنی مختلف)، سیلیس (SiO_2) و منیزیا (MgO) استفاده شد. مطالعات نشان می‌دهد که خواص مغناطیسی و الکتریکی آلیاژ در حضور ذرات نانو مواد تحت تأثیر قرار گرفته و با حضور ۰/۲ درصد وزنی نانو آلومینا (Al_2O_3) بهینه‌ترین خواص مغناطیسی در ماده آمورف حاصل می‌شود به نحویکه نفوذپذیری نسبی در مقایسه با ماده‌ی آمورف در حد ۲/۸ برابر افزایش یافته و میزان تلفات انرژی مغناطیسی در ماده تا حد ۹۶ درصد کاهش یافته (و یا صفر شده) است. در این شرایط بهترین خواص الکتریکی در حضور ۰/۲ درصد وزنی منیزیا حاصل می‌شود.

واژه‌های کلیدی: نوار آمورف، مذاب ریسی، الگوی پراش اشعه X، نانو مواد، خاصیت مغناطیسی، تست چهار نقطه.

آلیاژهای آمورف^۱ برای اولین بار بیش از ۵۰ سال پیش توسعه یافتند و کاربردهایی از قبیل هسته‌های مغناطیسی برای آنها یافته شد و یا اینکه به عنوان تقویت‌کننده‌ها به دیگر مواد اضافه شدند. تحقیقات انجام شده در دو دهه‌ی اخیر، عمدتاً توسط گروهی از دانشمندان ژاپنی و آمریکایی انجام شده است [۱].

شیشه‌های فلزی^۲ دارای خواص مکانیکی برجسته‌ای از قبیل استحکام بالا، الاستیسیته‌ی بالا، مقاومت عالی در برابر سایش و خوردگی هستند [۲]. همچنین برخی از شیشه‌های فلزی توده‌ای^۳ می‌توانند استحکام کششی بیش از ۳۰۰۰ MPa با چقرمگی^۴ مناسب، اصطکاک داخلی کم و توانایی فرآوری خوب را داشته باشند [۱].

خواص حاصل در فلزات شیشه‌ای بر مبنای نبود نابجایی‌ها^۵ و مرز دانه‌ها است، که در مواد بلورین به وفور دیده می‌شود. تنش تسلیم شیشه‌های فلزی به اصطلاح حد الاستیک گفته شده، که دلیل اصلی برای خواص مکانیکی منحصر به فرد آنها بالا بودن حد الاستیک این نوع مواد است [۲]. شیشه‌های فلزی در ساختار اتمی خود با یک بی‌نظمی مواجه هستند و در مقایسه با فلزات بلورین، نظم اتمی با دامنه‌ی بلند، آلیاژهای آمورف غیربلوری دارای نظم اتمی کوتاه هستند. موادی که دارای ساختارهایی بی‌نظم بوده و مستقیماً از حالت مایع در طول سرد کردن حاصل می‌شوند به اصطلاح شیشه‌ای نامیده می‌شوند [۳].

شیشه‌ی فلزی دارای یک تناقص به صورت پنهان است. بدین صورت که در یک آلیاژ فلزی با ساختاری منظم، اتم‌های فلزی به صورت طبیعی دارای آرایش منظمی هستند، در حالیکه در یک شیشه‌ی فلزی، اتم‌ها در هم‌ریخته و بی‌نظم هستند، تقریباً شبیه اتم‌های درون یک مایع یا شیشه می‌باشند. همچنین بایستی گفت یک شیشه‌ی فلزی مایع نیست، زیرا اتم‌های آنها در سر جای خود ثابت شده‌اند [۴].

1 -Amorphous alloys

2 -metallic glasses

3 -bulk metallic glasses (BMGs)

4 -toughness

5 -Dislocations

در گذشته دسته‌های کوچکی از فلزات آمورف از طریق روش‌های متنوع سریع سرد کردن تولید می‌شدند. به عنوان مثال، سیم‌های فلزی آمورف توسط ریختن فلز مذاب بر روی یک دیسک چرخان تولید می‌شد. معمولاً با سریع سرد کردن مذاب با سرعتی در حد یک میلیون درجه بر ثانیه، که بسیار سریع‌تر از سرعت شکل‌گیری کریستال‌ها است، می‌توان موجب گیر افتادن ماده در حالت شیشه‌ای شد [۳]. این سرعت سرد کردن بسیار زیاد بوده و حتی اگر فنجانی از مذاب را در فریزر قرار دهیم، باز هم سرعت حاصله برای شیشه‌ای شدن کافی نخواهد بود. امروزه، شیشه‌های فلزی با سختی سه برابر و انعطاف پذیری ۱۰ برابر بیشتر از بهترین فولاد صنعتی را تولید کردند [۴].

در آلیاژهای فلزی کریستالی، اتم‌ها در مناطقی که «دانه» نامیده می‌شوند، منظم بوده و مرزهای بین‌دانه‌ها نقاط بسیار ضعیف در ماده به شمار می‌رود. شیشه‌های فلزی دارای این مرزهای دانه نبوده و همین مطلب سبب استحکام بیشتر آنها شده است [۴] که قبلاً اشاره شد. در اصابت یک چکش به یک فلز کریستالی، مقداری انرژی توسط مرزهای دانه جذب شده و باعث می‌شود فلز بلورین خمیده شود. اما اتم‌ها در فلز آمورف به صورت محکمی به یکدیگر متصل شده‌اند که بعد از ضربه به راحتی به شکل اصلی خود بازگشته و احیا می‌شوند [۴].

در جهت نیل به سرعت سرد کردن بالا، پل داویز^۶ در انستیتو تکنولوژی کالیفرنیا^۷، پاسخی پیدا کرد. داویز توانست توسط ریختن فلز مذاب بر روی یک دیسک استوانه‌ای مسی چرخان، ورقه‌های فلز آمورف از طریق فوق تبرید بسازد. مشکل داویز اینجا بود که ضخامت این ورقه‌ها بسیار کم و فقط چند نانومتر بود. اگر او سرعت چرخش استوانه را کم‌تر می‌کرد، ورقه‌ها ضخیم می‌شدند، ولی زمان کافی برای بلورین شدن بوجود می‌آمد. این مسأله توسط ویلیام جانسون^۸ یکی از شاگردان سابق داویز بررسی شد و برای مدت زیادی جانسون ادعا می‌کرد که راه دیگری برای ایجاد شیشه‌ی فلزی با ضخامت بیشتر از ۱ mm

6 -Pol Duwez

7 -Caltech

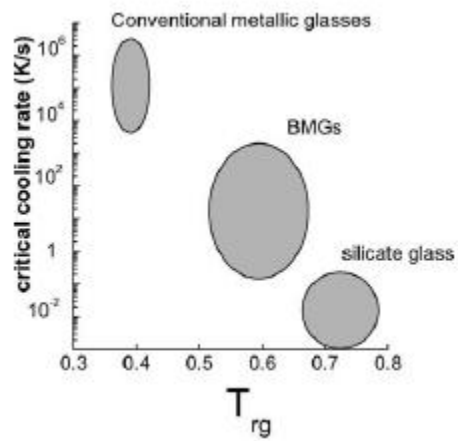
8 -William Johnson

وجود ندارد. در آن زمان جانسون درباره‌ی کار اینو^۵] در دانشگاه توهوکو^{۱۰} مطالبی شنید. بدین صورت که اینو به کمک اتم‌های بزرگ، ساختمان بلورین را بر هم زده و از این طریق منجمد کردن آلیاژها به حالت شیشه‌ای را در ضخامت بیشتر و بدون سرد کردن شدید ممکن ساخته است [۴].

تحقیق بر روی شیشه‌های فلزی در اوایل ۱۹۷۰ و ۱۹۸۰ میلادی یعنی درست زمانیکه فرآیندهای ریخته‌گری پیوسته برای کارخانجات تجاری تولید نوارها، سیم‌ها و ورقه‌های شیشه‌های فلزی توسعه یافتند، سود بخش بود. به‌هرحال، نرخ بالای تبرید، اشکال مهندسی آلیاژهای آمورف را برای ورق‌ها و سیم‌های نازک محدود ساخت (شکل ۱-۱) [۱].

امروزه فلزات شیشه‌ای دارای تنوع بسیار زیادی از نظر جنس و خواص بوده و در حال حاضر فلزات شیشه‌ای توده‌ای به راحتی قابل تولید بوده و بررسی‌های گسترده‌ای جهت مطالعه‌ی خواص مختلف آنها و نیز کامپوزیت کردن آنها و یا کامپوزیت کردن فلزات توسط ذرات چنین فلزات شیشه‌ای در حال انجام می‌باشد.

در این تحقیق سعی به بررسی اثر حضور نانو ذرات اکسیدی بر خواص فلز شیشه‌ای پایه آهن $Fe_{78}Si_{13}B_9$ تولیدی توسط روش مذاب ریسی، می‌باشد. دو خصوصیت مغناطیسی و مقاومت الکتریکی این نوع مواد شیشه‌ای در حضور درصدهای وزنی مختلف از نانو ذرات آلومینا و نیز اثر حضور ذرات مختلف منیزیا و سیلیس مورد مطالعه قرار گرفت.



(دمای نسبی استحاله‌ی شیشه‌ای شدن) برای آلیاژهای شیشه‌ای [۱]. شکل ۱-۱: مقایسه‌ی آهنگ سرد کردن بحرانی در برابر

۲-۱ ضوابط شکل‌گیری شیشه‌ی فلزی [۶]

برای تولید فلز شیشه‌ای می‌باید شرایط متالورژیکی زیر را حتی‌الامکان در آلیاژ تأمین نمود.

۱- آلیاژهای چند جزئی با سه عنصر یا بیشتر، پیچیدگی و اندازه سلول واحد کریستال را افزایش می‌دهد. به نحویکه شرایط انرژی‌تیکی برای پایداری و تشکیل یک ساختار منظم به واسطه‌ی برهم کنش اتمی مختل می‌شود.

۲- عدم تطابق شعاع‌های اتمی بین عناصر: $\frac{\Delta r}{r}$ بزرگتر از ۱۲٪ منجر به چگالی انباشتگی بالا و فضای خالی اندک میان اتم‌ها در حالت مایع می‌شود، در صورتیکه برای متبلور شدن مذاب نیازمند فضای بیشتری است.

۳- گرمای اختلاط منفی بین عناصر اصلی، سد انرژی جوانه‌زنی را در فصل مشترک مایع/ جامد افزایش می‌دهد. این موضوع سرعت موضعی چیدمان مجدد اتمی و آهنگ هسته‌زنی بلور را کاهش داده و محدوده‌ی دمای فوق‌تبرید مایع را افزایش می‌دهد.

۴- با استفاده از یک ترکیب آلیاژی نزدیک به نقطه‌ی یوتکتیک، می‌باید شرایط تشکیل مایعی پایدار را در دماهای پایین فراهم نمود به نحویکه بتوان با سرعت تبرید بحرانی کم، شیشه‌ی فلزی توده‌ای پایدار را توسط روش‌های متداول ریخته‌گری تولید نمود.

۲-۲ قابلیت شیشه‌ای شدن ۱۱

مواد جامد با پیوندهایی از نوع یونی، کووالانسی، واندروالس، هیدروژنی و فلزی را می‌توان از روش‌های مختلف به اشکال آمورف تولید نمود (جدول ۲-۱) که آلیاژهای آمورف فلزی (شیشه‌های فلزی) به عنوان گروه مواد آمورف جدید در این جدول وارد شده‌اند [۱].

جدول ۱-۲: برخی از جامدات آمورف، نوع پیوند و دمای استحاله‌ی شیشه‌ای آنها [۷]

<i>Glass</i>	<i>Bonding</i>	T_g ($^{\circ}K$)
SiO ₂	Covalent	1430
GeO ₂	Covalent	820
Si, Ge	Covalent	—
Pd _{0.4} Ni _{0.4} P _{0.2}	Metallic	580
BeF ₂	Ionic	570
As ₂ S ₃	Covalent	470
Polystyrene	Polymeric	370
Se	Polymeric	310
Au _{0.8} Si _{0.2}	Metallic	290
H ₂ O	Hydrogen bonded	140
C ₂ H ₅ OH	Hydrogen bonded	90
Isopentane	van der Waals	65
Fe, Co, Bi	Metallic	—

در مقایسه با دیگر روش‌ها مانند چگالش بخار، اهمیت کار داویز در این بود که روش کار او به اجازه می‌داد تا انواع آلیاژ به راحتی به صورت شیشه‌ای ساخته شود. بررسی‌هایی که در حوزه‌ی شکل‌گیری، ساختار و خاصیت شیشه‌های فلزی انجام می‌شود به دلیل کاربرد بهینه‌شان، افزایش توجهات را به خود جلب کرد. روش‌های کوئنچ کردن مذاب به صورت گسترده‌ای توسعه یافت و با دقت با هدف تولید تنوع گسترده‌ای از شیشه‌های فلزی شرح داده شد [۱۱].

کارهای تحقیقاتی ترنبال^{۱۲} و همکارش نشان داد که شباهت‌هایی بین شیشه‌های فلزی و دیگر شیشه‌های غیرفلزی از قبیل سیلیکات‌ها^{۱۳} و شیشه‌های سرامیکی و پلیمرها وجود دارد. آنها نشان دادند، یک استحاله‌ی شیشه‌ای به صورت متعارف برای مذابی که می‌خواهد بصورت شیشه‌ای درآید، در آهنگ تبرید بالا مشاهده می‌شود [۸].

پی‌بردن به قابلیت شیشه‌ای شدن یک راهنمای مناسب برای دست‌یابی به مواد غیربلورین جدید با خواص توسعه یافته و قدرت ساخت بالا برای کاربردهای مهندسی است [۸]. در گذشته، تدابیری متنوعی از قبیل دسترسی به ترکیب مناسب، مدل‌های ساختاری، تئوری الکترون آزاد، فاکتورهای شیمیایی (الکترونگاتیوی، انتقال الکترون، استحکام باند و یونیزاسیون)، مشخصه‌های دیاگرام فازی، معیار اندازه‌ی اتمی و مدل محلول جامد وجود داشت، که برای پی‌بردن به این مطلب که آیا برخی سیستم‌ها می‌توانند شیشه‌ای شوند، محدوده‌ی ترکیبی‌ای مشخص می‌کرد که شیشه بتواند تشکیل شود. به هر حال، عملاً هیچ‌یک از این‌ها نمی‌توانند تحلیل مناسبی را برای قابلیت شیشه‌ای شدن مواد آمورف مختلف ارائه دهند زیرا که هیچ‌یک از آنها در خصوص سینتیک شکل‌گیری شیشه پیش‌بینی دقیقی را ارائه نمی‌دهد [۸].

برخی شاخص‌های ساده، برای بازتاب قابلیت شیشه‌ای شدن سیستم‌های مختلف از فرآیندهای سینتیکی مانند آهنگ رشد بلور و آهنگ جوانه‌زنی مورد استفاده قرار گرفته است. به عنوان مثال دمای T_{rg} که دمای نسبی استحاله‌ی شیشه‌ای شدن است به صورت زیر تعریف می‌شود [۸]:

$$T_{rg} = T_g / T_m \quad (1-2)$$

که T_g دمای شیشه‌ای شدن و T_m دمای ذوب یا دمای مایعات آلیاژهاست که به صورت T_L هم نمایش داده می‌شود [۸].

ترنبال پیشنهاد کرد که این نسبت می‌تواند به‌عنوان یک معیار برای تعیین قابلیت شکل‌گیری شیشه (شیشه‌ای شدن) یک آلیاژ بیان گردد. مطابق معیار ترنبال، یک مایع با $\frac{T_g}{T_m} = \frac{2}{3}$ دارای سرعت تبلوری بسیار آهسته مطابق در مقیاس زمان آزمایشگاهی است. این قبیل مایعات می‌توانند به راحتی تحت تبریدهایی با آهنگ تبرید کم به حالت شیشه‌ای درآیند. این معیار تاکنون برای جلوگیری از تبلور در مذاب‌های تحت تبرید مناسب بوده و یک تخمین بسیار خوبی برای قابلیت شیشه‌ای شدن مذاب‌ها است [۸]. دمای ΔT نیز میزان دمای تحت تبرید را مشخص می‌کند [۸].

$$(2-2) \Delta T = T_x - T_g$$

که T_x دمای شروع تبلور می‌باشد. با این حال این پارامترها نمی‌تواند به خوبی روند قابلیت شیشه‌ای شدن را در بسیاری از سیستم‌های شیشه‌ای فلزی توده‌ای و سیستم‌های شیشه‌ای فسفاتی پیشگویی کند [۸]. برای قابلیت شیشه‌ای شدن (GFA^{14}) می‌توان گفت که [۹]:

$$GFA \propto \frac{T_x}{T_l - T_x} \quad (3-2)$$

همچنین قابلیت شیشه‌ای شدن آلیاژ متناسب است با [۹]:

$$GFA \propto \frac{T_g}{T_l - T_x} \quad (4-2)$$

با ترکیب معادلات ۲-۳ و ۲-۴ رابطه‌ی جدیدی در ارتباط با قابلیت شیشه‌ای شدن یک آلیاژ با مشخصه‌های حرارتی T_g , T_x , T_l بصورت زیر است [۹]:

$$GFA \propto \frac{T_x}{T_l - T_x} \times \frac{T_g}{T_l - T_x} = \frac{T_x \times T_g}{(T_l - T_x)^2} \quad (5-2)$$

برطبق معادله‌ی ۲-۵ معیار جدید و بدون بُعدی برای قابلیت شیشه‌ای شدن، معیار β به صورت زیر تعریف می‌شود [۹]:

$$\beta = \frac{T_x \times T_g}{(T_l - T_x)^2} \quad (6-2)$$

معادلات ۲-۷ و ۲-۸ دو معیار جدید برای قابلیت شیشه‌ای شدن را بیان می‌کنند [۹]:

$$\phi = \text{Trg}((T_x - T_g)/T_g)^{0.143} \quad (7-2)$$

$$\delta = T_x / (T_l - T_g) \quad (8-2)$$

۲-۳ بررسی‌های تئوری شیشه‌ای شدن

معیار قابلیت شیشه‌ای شدن مذاب مشخص می‌کند که این سیستم می‌تواند بدون تشکیل مقدار قابل توجهی از فاز بلورین در حین سرد شدن به ماده‌ای آمورف تبدیل شود. در این بررسی باید دو جنبه در مورد قابلیت شیشه‌ای شدن در نظر گرفته شود:

۱- میزان پایداری فاز مایع

۲- قابلیت شکل‌گیری فاز شیشه در رقابت با فازهای بلورین (مقاومت به بلورین شدن)

این دو جنبه به هم وابسته بوده ولی دارای خواص متفاوتی هستند. پایداری فاز مایع به طور اساسی به نظم کم‌دامنه شیمیایی و ساختار اتم‌ها در حالت مذاب، وابسته است. مقاومت به بلورین شدن عمدتاً توسط رقابت میان فاز شیشه‌ای و جوانه‌زنی و رشد فازهای بلورین تعیین می‌گردد. اگر فاز مایع در برابر انجماد پایدار باشد (پایداری بالای فاز مایع) و رقابت فازهای بلورین در رسوب‌کردن دشوار باشد (مقاومت بالا به بلورین شدن)، در این حالت شکل‌گیری شیشه از مذاب ساده خواهد بود. با توجه به قابلیت شیشه‌ای شدن، هر دوی این جنبه‌ها بایستی تاحدی رخ دهد [۸].

نمودار TTT تمامی اطلاعات مورد نیاز برای پیشگویی قابلیت شکل‌گیری و پایداری یک مایع مفروض برای شیشه‌ای شدن را به ما می‌دهد. برای اینکه یک ماده‌ی جامد آمورف شکل گیرد، باید مذاب از دمایی بالای دمایی لیکوئیدوس تا دمایی استحالته‌ی شیشه‌ای با سرعت زیاد سرد شده و منحنی تبرید آن منحنی