بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده مهندسی مواد و متالورژی

پایان‌نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد مهندسی مواد- شکل دادن فلزات

عنوان:

بررسی ریزساختار و خواص مکانیکی آلیاژ AA8011 پردازش شده با استفاده از اکستروژن از طریق کانال زاویه دار با مقاطع یکسان(ECAE)

دانشجو:

محمد خالقی

استاد راهنما:

دکتر امیر حسنی

آبان ماه ۱۳۹۰

تقدیم به:

مادر عزیزم: آرام جانم و مهربانتر از من به من, او که در نیایش های دیروزش امروز مرا از خدا خواست. او که گذشت از هر آنچه نمی توان گذشت.

پدر مهربانم: او که لبخندهای امروزم را به بهای سیاهی موهایش و طراوت زندگیش برایم به ارمغان آورده است.

و

همسر عزیز و مهربانم:

که سایه مهربانیش سایه سار زندگیم خواهد بود، او که اسوه صبر و تحمل بوده و یاد او مشکلات مسیر را برایم تسهیل نمود.

تشکر و قدردانی

در آغاز لازم می دانم از زحمات پدر و مادر گرامی ام و همچنین خواهر و برادرانم و کلیه کسانیکه در دوران تحصیل همواره مشوق و پشتیبان اینجانب بوده اند کمال تشکر را بنمایم.

به رسم ادب بر خود واجب می دانم که از زحمات استاد راهنمای عزیزم جناب آقای **دکتر امیر حسنی** که با توجهات و راهنمایی های بی دریغ و تلاش پیگیر و مستمرشان نه تنها در انجام این پروژه مرا یاری نمودند، بلکه با تشویق اینجانب به تلاش بیشتر، به این حقیر درس زندگی آموختند و با محبت، احترام و دلسوزی خود معنای واقعی معلم بودن را نشان دادند، تشکر و سپاس فراوان و آرزوی توفیقات روز افزون را داشته باشم.

همچنین از کلیه اساتید و کارکنان عزیزی که در تمام مراحل این پایان نامه به هر شکلی راهنمایی ها و مساعدت هایشان رو نگفتنی راهم بوده و بویژه دوست خوبم آقای مهندس سعید جوانمرد، و نیز اساتید محترم، آقایان دکتر اسماعیل عماد الدین و دکتر حمیدرضا محمدیان سمنانی، که قبول زحمت کرده و برای هرچه بهتر شدن کار، مسئولیت داوری اینجانب را بر عهده گرفتند، تشکر و قدردانی می کنم. همچنین دوستان و عزیزانی که لازم میدانم با ذکر نامشان همواره از مهر و محبتشان یادی شود، باشد که بتوانیم زحماتشان را به ثمر بنشانیم.

تشکر می کنم از دوستان و برادران عزیزم آقایان غلامی، پیغمبری، روستا، نصیری، رحمانی، عباس زاده، خدایی، سیدین قناد، رحیمی، شرفی، برگستوان، ذوالفقاری، خداداد، فتحی، زنده دل، دهقان، ابارشی، زارع، حسین زاده، پولادوند، محمدی لنگرج، دوجی نژاد، باباکوهی، ابراهیمی، اسدالله زاده، یوسفی و بستان پیرا که واژگان معرفت و رفاقت را در همه آنها یافتم، به یاد تمام خاطرات خوب در کنار هم بودنمان.

همین طور از مسئول محترم آموزش گروه، جناب آقای کاشانی و نیز مسئول محترم تحصیلات تکمیلی جناب آقای شهریاری، مسئولین محترم کارگاه ها و آزمایشگاه های دانشکده مهندسی مواد، آقایان دادگری، شاهی، ملک جعفریان، علیان نژاد، خرمی و زیاری صمیمانه تشکر و قدردانی می کنم.

چکیده

اکستروژن از طریق کانال زاویه دار با مقاطع یکسان یکی از روش‌های اصلی تغییرشکل پلاستیک شدید فلزات است. در این پژوهش آلیاژ AA8011 با استفاده از این فرایند ۱۲ پاس پردازش شد. ریز ساختار توسط میکروسکوپ نوری و الکترونی مورد بررسی قرار گرفت. آزمون‌های کشش، ریز سختی و ضربه برای مطالعه خواص مکانیکی نمونه‌ها انجام شد. نتایج نشان داد که اندازه دانه پس از ۱۲ پاس از μm ۹۰ برای نمونه خام به μm ۲۳ کاهش یافت. استحکام کششی نهایی از MPa ۸۲ برای نمونه خام به MPa۱۶۰ افزایش یافت. ازدیاد طول نمونه‌ها از ۰/۳۸ برای نمونه خام به ۰/۲۳ در پاس اول کاهش یافت و با افزایش تعداد پاس‌ها در نمونه ۸ پاسه به ۰/۳ افزایش یافته و تا پاس ۱۲ تقریباً ثابت ماند. این افزایش چقرمگی مورد نادری در زمینه تغییر شکل پلاستیک شدید است که در مورد آلیاژهای دیگر گزارش نشده است. همچنین مقدار میانگین ریزسختی پس از ۱۲ پاس از ۳۳ ویکرز برای نمونه خام به ۴۹/۶ ویکرز افزایش یافت و مقدار جذب انرژی در آزمون ضربه در دمای صفر درجه سانتی گراد پس از ۱۲ پاس از ۱۸/۵ ژول برای نمونه ۱ پاس به ۱۰/۶ ژول کاهش یافت.

کلمات کلیدی: اکستروژن از طریق مجرای زاویه دار با مقاطع یکسان، AA8011، استحکام نهایی، ازدیاد طول

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل۱ مقدمه ۱

مقدمه ۲

فصل ۲ مروری بر منابع مطالعاتی ٤

۲-۱- روش های گوناگون ECAE ۵

۲-۱-۱- کاربرد ECAE برای نمونه های صفحه ای یا تخت ٦

۲-۱-۲- روش های ECAE متناوب: قالب های چرخشی، اکستروژن جانبی، و قالب های چند پاسه..... ۸

۲-۱-۳- ECAE در کانال های موازی ۱۱

۲-۱-٤- ECAE پیوسته: برش نواری محدود پیوسته، و برش مخالف ۱۳

۲-۱-۵- فرایند ECAE تطبیقی ۱۵

۲-۲- تثبیت و فشردن مواد با ECAE ۱٦

۲-۳- ساختار دستگاه ECAE ۱۷

۲-٤- پارامتر های اساسی ECAE ۱۹
۲-٤-۱- کرنش اعمالی در فرایند ECAE ۱۹
۲-٤-۲- مسیر های مختلف فرایند ECAE ۲۲
۲-٤-۳- سیستم لغزش برای انواع مختلف فرایند ۲۳
۲-٥- الگوی برش در فرایند ECAE ۲٥
۲-٦- عوامل تأثیر گذار بر فرایند ECAE ۲۷
۲-٦-۱- تأثیر زاویه قالب ϕ ۲۸
۲-٦-۲- تأثیر زاویه انحنای بیرونی قالب ψ ۳۱
۲-٦-۳- تأثیر سرعت پرس ۳٤
۲-٦-٤- تأثیر دمای کار ۳٦
۲-٦-٥- افزایش دمای نمونه در فرایند ECAE ۳۷
۲-٦-٦- تأثیر فشار پشتی ۳۷
۲-۷- رفتار سوپر پلاستیک ۳۹
۲-۸- تحولات ریزساختاری در تغییر شکل پلاستیک ٤۰
۲-۸-۱- ساختار مرزدانه ها ٤۰
۲-۸-۲- ریز شدن دانه ها ٤۲
۲-۸-۳- اندازه دانه بحرانی و مکانیزم های تغییر شکل ٤٥
۲-۹- مشخصات ساختاری ماده پس از فرایند ECAE ٥۰

۲-۱۰- توزیع کرنش در فرایند ECAE و در قالب های متداول ۵۲
۲-۱۱- آشنایی با آلومینیوم و آلیاژ های آن..... ۵۳
۲-۱۲- آلیاژ AA8011 ..... ۵۵
۲-۱۳- نورد انباشتی آلیاژ AA8011 ..... ۵۷
۲-۱۳-۱- بر هم کنش رسوب و تبلور مجدد در ورقه های آلیاژ AA8011 ..... ۵۷
۲-۱۳-۲- خاصیت نرم شوندگی آلیاژ AA8011 پردازش شده توسط نورد انباشتی..... ۵۹
۲-۱۳-۳- افزایش ازدیاد طول در ورقه های آلیاژ آلومینیوم Al-Fe-Si فوق ریزدانه..... ٦۲

فصل۳ شرح آزمایشات ٦۸

۳-۱- شمای کلی انجام این پژوهش..... ٦۹
۳-۲- قالب استفاده شده برای فرایند ECAE..... ۷۰
۳-۳- آماده سازی نمونه‌ها..... ۷۲
۳-٤- بررسی ریز ساختار..... ۷٦
۳-۵- بررسی خواص مکانیکی..... ۷۷
۳-۵-۱- آزمون کشش..... ۷۷
۳-۵-۲- ریز سختی..... ۷۸
۳-۵-۳- آزمون ضربه شارپی..... ۷۸

فصل۴ نتایج و بحث ۸۰

٤-١- بررسی ریز ساختار ۸۱

٤-٢- آزمون کشش ۸۹

٤-٢-١- نمونه های ECAE شده با سرعت فک ۵ mm/s ۸۹

٤-٢-٢- تصاویر SEM از سطح شکست.....۹۷

٤-٢-٣- نمونه های ECAE شده با سرعت فک ۰/۰۷ mm/s ۱۰۲

٤-٣- ریز سختی.....۱۰۳

٤-٤- آزمایش ضربه برای تعیین تغییرات جذب انرژی و حالت شکست با افزایش تعداد پاس‌های ECAE
.....۱۰٦

٤-٤-١- جذب انرژی در دمای اتاق.....۱۰۷

٤-٤-٢- جذب انرژی در دمای ۰ °C ۱۱۰

٤-٤-٣- تصاویر SEM از سطح شکست نمونه های آزمون ضربه در ۰ °C ۱۱۱

٤-٤-٤- نتیجه گیری ۱۱٤

مراجع ۱۱٦

فهرست اشکال

عنوان **صفحه**

فصل۱ مقدمه ۱

فصل ۲ مروری بر منابع مطالعاتی ۶

شکل ۲-۱- شماتیکی از دستگاه ECAE، صفحات X، Y، و Z به ترتیب نشانگر صفحات عرضی، سیلان، و طولی می باشند ۵

شکل ۲-۲- نمایش صفحه برش و اثر برش بر یک المان از ماده ٦

شکل ۲-۳- کاربرد ECAE در نمونه های تخت ۷

شکل ۲-٤- روش B_{CZ} برای اکسترود نمونه های تخت ۸

شکل ۲-۵- فرایند ECAE با استفاده از قالب چرخشی ۹

شکل ۲-٦- شماتیک فرایند اکستروژن جانبی در ECAE ۱۰

شکل ۲-۷- شماتیک تک قالب چند پاسه ۱۰

شکل ۲-۸- ECAE در کانال های موازی ۱۲

شکل ۲-۹- فرایند DCAP در روش پیوسته ۱۳

شکل ۲-۱۰- فرایند برش مخالف ۱٤

شکل ۲-۱۱- شماتیک فرایند ECAE تطبیقی ۱۵

شکل ۲-۱۲- قطعه آلومینیومی برگرفته شده از فرایند ECAE تطبیقی ۱۵

شکل ۲-۱۳- قالبی برای فشرده سازی پودر آلومینیوم ۱۷

شکل ۲-۱٤- قالب ECAE با کانال متحرک(نواحی سایه دار) ۱۸

شکل ۲-۱۵- اصول ECAE ۲۰

شکل ۲-۱٦- تغییرات کرنش معادل با تغییر ϕ و ψ ۲۲

شکل ۲-۱۷- چهار مسیر اساسی در فرایند ECAE ۲۳

شکل ۲-۱۸- سیستم های لغزش در صفحات X، Y، و Z با استفاده از مسیر های مختلف ECAE ۲٤

شکل ۲-۱۹- اعوجاج ایجاد شده در المان مکعبی تحت فرایند ECAE از طریق چهار مسیر مختلف.... ۲۵

شکل ۲-۲۰- الگوی برش در صفحات X، Y، و Z برای مسیر های مختلف فرایند و تا ٤ پاس ECAE ۲٦

شکل ۲-۲۱- شماتیکی از قالب های ساخته شده برای بررسی اثر زاویه قالب بر خواص ماده..... ۲۸

شکل ۲-۲۲- ریزساختار و الگوی SAED حاصل از قالب های نشان داده شده در شکل ۲-۲۱..... ۲۹

شکل ۲-۲۳- تصویر شمش هایی از تنگستن خالص قبل و بعد از انجام فرایند ECAE ۳۰

شکل ۲-۲٤- شماتیک یک قالب ECAE با زاویه $\varphi = ٦۰^{\circ}$ ۳۱

شکل ۲-۲۵- خطوط رسم شده نشان دهنده مقادیر سختی ثبت شده بر روی صفحه X از نمونه های آلومینیوم خالص پس از ٤ پاس می باشند ۳۲

شکل ۲-۲۶- شماتیک قالب ECAE دارای انحنای بیرونی و درونی با شعاع R ۳۳

شکل ۲-۲۷- تغییرات تنش تسلیم با سرعت پرس ۳٤

شکل ۲-۲۸- اندازه دانه پس از فرایند ECAE بر حسب دمای انجام فرایند ۳٦

شکل ۲-۲۹- شماتیک قالب ECAE با فشار پشتی ۳۹

شکل ۲-۳۰- مدل ارائه شده برای مرزدانه های غیر تعادلی شامل دو نوع نابجایی..... ٤۲

شکل ۲-۳۱- مرز نابجایی تشکیل شده در یک دانه حین تغییر شکل پلاستیکی..... ٤٤

شکل ۲-۳۲- شماتیک لغزش مرزدانه ای تطابق یافته با فرایند های نابجایی درون دانه ای..... ٤۷

شکل ۲-۳۳- شماتیک لغزش نابجایی های کامل مجزا در دانه های با مقیاس نانو..... ٤۹

شکل ۲-۳٤- الف)توزیع رنگی کرنش مؤثر و ب) توزیع نموداری با افزایش فاصله از قسمت بالایی کانال خروجی و در امتداد مقطع عرضی..... ۵۲

شکل ۲-۳۵- دیاگرام به صورت شماتیک و کلی نشان دهنده بر هم کنش بین رسوب و تبلور مجدد می‌باشد..... ۵۸

شکل ۲-۳٦- سختی ویکرز به عنوان تابعی از زمان آنیل..... ۵۹

شکل ۲-۳۷- الف) ریزسختی و ب) خواص کششی در دمای محیط، برای آلیاژ های AA8011 و AA1100 ..... ٦۰

شکل ۲-۳۸- الف)منحنی تنش-کرنش نامی و ب) استحکام و ازدیاد طول- کرنش معادل برای آلیاژ AA8011..... ٦۳

شکل ۲-۳۹- نمایش میکروگراف های SEM مربوط به مورفولوژی ذرات فاز ثانویه در ورق های AA8011 پردازش شده از طریق فرایند ARB ٦٤

فصل۳ شرح آزمایشات ٦٨

شکل ۳-۱- فلوچارت مراحل انجام این پژوهش..... ٦٩

شکل ۳-۲- قالب استفاده شده برای فرایند ECAE در سه نما..... ٧١

شکل ۳-۳- ساختار ریختگی: (الف)بدون اچ و (ب) و (پ) ماکرو اچ شده در دو بزرگنمایی..... ٧٣

شکل ۳-٤- نمونه تهیه شده برای اعمال فرایند ECAE، الف) قبل از فرایند و ب) بعد از فرایند ٧٥

شکل ۳-٥- نمونه استاندارد برای آزمون کشش..... ٧٧

شکل ۳-٦- مقطع عرضی نمونه در حال خروج از قالب ECAE و جهت گرفتن ریزسختی با فواصل ۰/٦ mm ٧٨

شکل ۳-۷- الف) شماتیک نحوه قرار گرفتن نمونه در آزمون ضربه، ب)نمونه واقعی..... ٧٩

شکل ۳-۸- شماتیک آونگ استفاده شده در آزمون ضربه ٧٩

فصل۴ نتایج و بحث ٨٠

شکل ٤-۱- الف) نمونه ریخته گری شده، و ب) نمونه ریخته گری + اکسترود + آنیل شده در دمای ۳٥۰°C ٨٢

شکل ٤-۲- تصاویر میکروسکوپ نوری نمونه های ECAE شده با تعداد پاس های مختلف ٨٤

شکل ٤-۳- تصویر میکروسکوپ نوری از مقطع طولی(موازی با محور ECAE) ٨٥

شکل ٤-٤- تصاویر SEM از سطح نمونه های الف)۱، ب)٤، پ)۸، و ت)۱۲ پاس ECAE..... ٨٨

شکل ٤-٥- منحنی تنش- کرنش آزمون کشش برای نمونه های اکسترود+آنیل شده و ECAE شده با تعداد پاس های مختلف و با سرعت فک ٥ mm/s ٩٠

شکل ٤-٦- نمودار مقایسه ای تنش-کرنش آزمون کشش برای نمونه های اکسترود+آنیل شده و ECAE شده با تعداد پاس های مختلف.....٩٢

شکل ٤-٧- نمودار مقایسه ای استحکام و ازدیاد طول برای نمونه های اکسترود+ آنیل شده و ECAE شده با تعداد پاس های مختلف ٩٢

شکل ٤-٨- آنالیز EDX برای نمونه ١٢ پاس الف)در مرز دانه و ب)درون دانه ٩٥

شکل ٤-٩- تصاویر SEM از سطح شکست آزمون کشش برای نمونه های اکسترود+آنیل شده و ECAE شده با تعداد پاس های مختلف ١٠٠

شکل ٤-١٠- منحنی تنش- کرنش نمونه های الف)ECAE شده تا ٢ پاس و ب)ECAE شده تا ٨ پاس و با سرعت فک ٠/٠٧ mm/s ١٠٢

شکل ٤-١١- نمودار های مقایسه ای تنش- کرنش برای نمونه های الف)٢ پاس و ب)٨ پاس ECAE با سرعت های فک متفاوت ١٠٣

شکل ٤-١٢- نتایج آزمون ریز سختی روی مسیر نشان داده شده در شکل ٣-٦ .....١٠٤

شکل ٤-١٣- مقادیر میانگین ریز سختی برای تعداد پاس های مختلف ECAE ١٠٦

شکل ٤-١٤- میزان جذب انرژی در آزمون ضربه در دمای اتاق و بعد از پاس های مختلف ECAE ١٠٨

شکل ٤-١٥- تغییر شکست از حالت نرم(نمونه سمت راست) به مخلوط رشته ای و دانه ای(نمونه سمت چپ) با افزایش تعداد پاس های ECAE ١٠٩

شکل ٤-١٦- میزان جذب انرژی در آزمون ضربه در ٠°C و بعد از تعداد پاس های مختلف ECAE ١١١

شکل ٤-١٧- تصاویر SEM از سطح شکست نمونه های آزمون ضربه بعد از تعداد پاس های مختلف ECAE ١١٤

فهرست جداول

عنوان **صفحه**

فصل۱ مقدمه ۱

فصل۲ مروری بر منابع مطالعاتی ٤

جدول ۲-۱- محدوده زوایای لغزش برای مسیرهای مختلف فرایند ۲٦

جدول ۲-۲- مکانیزم های تغییر شکل در جامدات ٤٦

جدول ۲-۳- محدوده اندازه دانه بحرانی ٤۸

جدول ۲-٤- طبقه بندی آلیاژ های آلومینیوم ٥٤

جدول ۲-٥- ترکیب شیمیایی دو آلیاژ AA8011 و AA1100 ..... ٦۰

فصل۳ شرح آزمایشات ٦۸

جدول ۳-۱- نتایج آنالیز کوانتومتری برای تعیین ترکیب شیمیایی ۷٤

فصل۴ نتایج و بحث ۸۰

جدول ٤-١- کاهش اندازه دانه با افزایش تعداد پاس های ECAE ٨٤

جدول ٤-٢- مقادیر ریز سختی برای نمونه های مختلف ١٠٥

جدول ٤-٣- میزان جذب انرژی در آزمون ضربه در دمای اتاق ١٠٨

جدول ٤-٤- میزان جذب انرژی در آزمون ضربه در دمای ۰°C ١١٠

فصل اول

مقدمه

مقدمه

فرآیند فشارش از طریق کانال زاویه دار با مقاطع یکسان یا به اختصار ECAP[1] که با عنوان اکستروژن از طریق کانال زاویه دار با مقاطع یکسان یا به اختصار ECAE[2] نیز شناخته می‌شود، اولین بار توسط سگال[3] و همکارانش در دهه‌های ۱۹۷۰ و ۱۹۸۰ در موسسه‌ی مینسک[4] در اتحاد جماهیر شوروی سابق ساخته شد و هدف از این اختراع، ساخت دستگاهی برای شکل دهی فلزات با اعمال کرنش‌های بزرگ بر یک شمش فلزی توسط برش ساده بود. سال ۱۹۹۰ تحقیقات بیشتری بر روی فرآیند ECAE صورت گرفت و دستگاه‌های پیشرفته‌تری ساخته شد.

هر چند خواص فیزیکی و مکانیکی مواد بلورین به عوامل زیادی بستگی دارد، معمولاً اندازه دانه ماده در این باره نقش بسیار مهمی ایفا می‌کند. بنابراین استحکام تمام مواد چند بلوری توسط معادله هال- پچ[5] با اندازه دانه، d، مرتبط است که در این معادله تنش تسلیم، σ_y، با رابطه ۱-۱ داده می‌شود[۱]:

$$\sigma_y = \sigma_0 + K_y d^{-1/2} \qquad (۱-۱)$$

که در آن σ_0 تنش اصطکاکی، K_y ثابت تسلیم و d اندازه دانه است. با توجه به معادله ۱-۱، استحکام ماده با کاهش اندازه دانه، افزایش می‌یابد و این افزایش در مواد با دانه بندی بسیار ریز(UFG)[6]، با سطوح بالایی ادامه پیدا می‌کند[۲]. اندازه دانه آلیاژ های تجاری تا حدی که برای کاربرد های معین مناسب باشد توسط عملیات‌های ترمومکانیکی کاهش می‌یابد.

[1] - Equal Channel Angular Pressing
[2] - Equal Channel Angular Extrusion
[3] - Segal
[4] - Minsk
[5] - Hall-Petch
[6] - Ultra Fine Grained

مواد با دانه بندی بسیار ریز، مواد پلی کریستالی هستند که اندازه دانه آن‌ها تقریباً کمتر از ۱ میکرومتر می‌باشد. یک لازمه دیگر برای مواد حجیم UFG آن است که باید دارای ساختار همگن و هم محور بوده و اکثر مرزدانه ها دارای ناهم جهتی با زاویه بزرگ باشند. حضور مرز های زاویه بزرگ برای حصول خواص منحصر به فرد و پیشرفته ضروری است.

یکی از روش‌های دست‌یابی به موادی با این خصوصیات، اعمال کرنش‌های شدید است. اولین فعالیت‌ها برای ساخت مواد UFG با روش دوم به ابتدای دهه ۱۹۹۰ برمی گردد که مقالاتی در باب فلزات خالص و آلیاژ ها منتشر شد. این مقالات بیانگر قابلیت ساخت مواد UFG با دانه بندی زیر میکرون، ساختار های همگن و هم محور و دارای مرز های زاویه بزرگ توسط اعمال کرنش‌های شدید پلاستیک بودند[۳ و ۴].

از آن زمان به بعد تکنیک‌های SPD بسیاری پیشنهاد، تولید و بررسی شده‌اند[۱ و ۵]. این تکنیک‌ها شامل فشارش از طریق کانال زاویه دار با مقاطع یکسان(ECAP)[۶ و۷]، پیچش با فشار بالا(HPT)[1]، آهنگری در چند جهت[۸]، اکستروژن پیچشی[۹]، فشار و اکستروژن سیکلی(CEC)[2]، اکستروژن رفت و برگشتی[3]، نورد انباشتی(ARB)[4] [۱۰] و روش‌های متنوع دیگر می‌باشد که تمام این روش‌ها قادر به اعمال کرنش‌های پلاستیک شدید و ریزدانه کردن قابل توجه دانه‌ها در قطعات حجیم می‌باشند.

در این میان فشارش از طریق کانال زاویه دار با مقاطع یکسان(ECAP)، دارای مزایای زیادی است که در دهه‌های اخیر آن را مرکز توجه محققان قرار داده است.

[1] - High Pressure Torsion
[2] - Cyclic Extrusion Compression
[3] - Reciprocating Extrusion
[4] - Accumulative Roll Bonding

فصل دوم

مروری بر منابع

مطالعاتی