دانشکده شیمی

گروه شیمی کاربردی

پایان‌نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد در رشته شیمی کاربردی

عنوان

ماشینکاری زیستی فلز مس توسط گلوکزاکسیداز

استاد راهنما

دکتر افضل کریمی

استادان مشاور

دکتر محمدرضا شبگرد

دکتر غلامرضا زرینی

پژوهشگر

محمدرضا اسکندریان

بهمن ماه ۱۳۹۰

بسم الله الرحمن الرحیم

در هر حرفه ای که هستید نه اجازه دهید که به بدبینی های بی حاصل آلوده شوید و نه بگذارید که بعضی لحظات تاسف بار که برای هر ملتی پیش می آید شما را به یاس و ناامیدی بکشاند. در آرامش حاکم بر آزمایشگاه ها و کتابخانه هایتان زندگی کنید.

نخست از خود بپرسید : "برای یادگیری و خود آموزی چه کرده ام ؟ " سپس هم چنان که پیشتر می روید بپرسید:

"من برای کشورم چه کرده ام ؟ "و این پرسش را آنقدر ادامه دهید تا به این احساس شادی بخش و هیجان انگیز برسید که : "شاید سهم کوچکی در پیشرفت و اعتلای بشریت داشته اید. "

اما هر پاسخی که زندگی به تلاش هایمان بدهد یا ندهد، هنگامی که به پایان تلاش هایمان نزدیک می شویم هر کدامان باید حق آن را داشته باشیم که با صدای بلند بگوییم :

"من آن چه را در توان داشته ام انجام داده ام "

لویی پاستور

نام خانوادگی دانشجو: اسکندریان **نام:** محمدرضا

عنوان پایان‌نامه: ماشینکاری زیستی فلز مس توسط گلوکزاکسیداز

استاد راهنما: دکتر افضل کریمی

استادان مشاور: دکتر محمدرضا شبگرد- دکتر غلامرضا زرینی

مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد **رشته:** شیمی **گرایش:** شیمی کاربردی **دانشگاه:** دانشگاه تبریز

دانشکده: دانشکده شیمی **تاریخ فارغ التحصیلی:** ۱۳۹۰/۱۱/۱۷ **تعداد صفحه:** ۷۶

واژه های کلیدی: ماشینکاری‌زیستی، آنزیم، گلوکزاکسیداز، براده‌برداری

چکیده:

ماشینکاری الکتروشیمیایی(ECM)، ماشینکاری تخلیه الکتریکی (EDM) و ماشینکاری با لیزر از جمله روش‌های مرسومی هستند که اثرات و نتایج موفقیت آمیزی را در ماشینکاری در ابعاد میکرو(میکروماشینکاری) بدست می‌دهند. این روش‌های ماشینکاری موجب تخریب سطح مورد نظر و آسیب دیدن آن، اعمال پتانسیل اضافی، ایجاد حفرات بر روی سطح مورد نظر و مشکلاتی دیگر می‌شوند. ماشینکاری زیستی یکی از جدیدترین روش‌های ماشینکاری است که از ارگانیسم‌های زنده مثل باکتری‌ها برای انجام فرآیند ماشینکاری بهره می‌گیرد. ماشینکاری با استفاده از باکتری‌های کمولیتوتروف مانند اسیدی تیوباسیلوس‌فرواکسیدانس(*Acidithiobacillus ferrooxidans*) در دهه‌ی اخیر توسعه یافته است. این روش نتایج نسبتاً موفقیت‌آمیزی را در ابعاد میکرو داشته است. از مهمترین مشکلات این روش ماشینکاری، اسیدی بودن محیط و محلول‌های ماشینکاری و تاثیرات مضر آن بر خصوصیات ریخت‌شناختی سطح قطعات ماشینکاری شده است. در خلال این فرآیند ماشینکاری، زبری سطوح قطعات به شدت افزایش می‌یابد که یک عامل بسیار نامطلوب به شمار می‌آید. در کار پژوهشی حاضر، ابتدا تمهیداتی جهت اصلاح ماشینکاری به روش باکتریایی انجام گرفت. این اصلاحات شامل تنظیمات pH، جداکردن میکروب از محلول باکتریایی و ماشینکاری با محلول آنزیمی حاصل از فیلتراسیون بود. این آزمایشات و بهینه‌سازی‌ها هیچگونه تاثیری در جهت رفع نواقص موجود نداشت. در ادامه‌ی پژوهش تصمیم بر استفاده از خاصیت کاتالیستی آنزیم‌ها جهت انجام ماشینکاری گردید. برای این منظور از آنزیم گلوکزاکسیداز برای براده‌برداری و ماشینکاری استفاده شد. در این آزمایشات، شرایط انجام فرآیند از نظر دما، سرعت همزدن و غلظت گلوکزاکسیداز به ترتیب برابر با ۴۰°C، ۱۳۰ دور بر دقیقه و gL^{-1} ۰/۲ در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که قطعه‌ی ماشینکاری شده با آنزیم بیشترین شباهت را از لحاظ خواص ظاهری به قطعه شاهد داشته است که تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی(SEM) نیز صحت ادعای فوق را تایید نمود. با انجام آزمایشات سنجش زبری سطوح ماشینکاری شده، مشخص گردید که قطعه‌ی موجود در محلول آنزیمی کمترین میزان زبری را در مقایسه با سایر روش‌ها نشان می‌دهد. به طوری که زبری میانگین اندازه‌گیری شده برای قطعات موجود در محلول آنزیمی در حدود ٪۵۰ زبری قطعات موجود در محلول باکتریایی بود. در مورد سایر نمونه‌ها نیز محلول آنزیمی نتایج بهتری را نشان داد. به این ترتیب روش ماشینکاری آنزیمی بیشترین صافی سطح را در مقایسه با سایر روش‌ها ارائه کرد. همچنین روش آنزیمی مزایایی چون کنترل‌پذیری بیشتر، یکنواخت بودن فرآیند براده‌برداری با گذشت زمان، سرعت کم براده‌برداری و امکان توقف کامل فرآیند براده برداری را دارا بود.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول- مقدمه و بررسی منابع

۱-۱مقدمه ۱

۱-۲ ماشینکاری ۱

۱-۳ روشهای ماشینکاری ۲

۱-۳-۱ ماشینکاری الکتروشیمیایی(ECM) ۲

۱-۳-۲ماشینکاری تخلیه‌ی‌الکتریکی(EDM) ۳

۱-۳-۳ ماشینکاری با لیزر ۳

۱-۳-٤ ماشینکاری زیستی ٤

۱-۳-٤-۱ دسته‌بندی از نقطه‌نظر انرژی مورداستفاده ۵

۱-۳-٤-۲ دسته‌بندی ارگانیسم ها از نقطه‌نظر منبع کربن و منبع انرژی ۵

۱-۳-٤-۳ اسیدی تیوباسیلوس فرواکسیدانس(Acidithiobacillus ferrooxidans) ۷

۱-٤ مطالعات و کارهای پیشین صورت گرفته در زمینه‌ی ماشینکاری‌زیستی ۸

۱-٤-۱ مطالعات و آزمایشات UNO و همکاران ۸

۱-٤-۲ مطالعات و آزمایشات Zhang, D.Y. و Li,Y.Q. ۱۲

۱-٤-۳ مطالعات و آزمایشات Johnson و همکاران ۱٤

۱-۵ ماشینکاری آنزیمی ۲۱

۱-٦ آنزیم‌ها ۲۱

۱-٦-۱ کاربرد آنزیم‌ها ۲۳

۱-٦-۲ مزایای کاربرد آنزیم ۲۳

۱-٦-۳ محدودیت کاربرد آنزیم ۲٤

۱-٦-٤ سینیتیک واکنش کاتالیزوری آنزیم ۲٤

۱-٦-٤-۱ اثر دما ۲٤

۱-٦-٤- ۲اثر pH ۲۵

۱-٦-٤-۳ اثر غلظت آنزیم ۲۵

۱-٦-٤-٤ اثر غلظت سوبسترا ۲۵

۱-٦-۵ فعالیت آنزیم ۲٦

اهداف پروژه..... ۲۷

فصل دوم-مواد، تجهیزات و روشها

۲-۱ مواد مصرفی..... ۲۹
۲-۲ تجهیزات..... ۳۱
۲-۳ تهیه محلول‌ها..... ۳۲
۲-۳-۱ تهیه محلول بافر استات..... ۳۲
۲-۳-۲ تهیه محلولهای آنزیمی..... ۳۳
۲-۳-۳ تهیه محلول باکتریایی..... ۳۳
۲-٤ روشها..... ۳٤
۲-٤-۱ سنجش فعالیت آنزیم گلوکزاکسیداز..... ۳٤
۲-٤-۲ کشت باکتری *Acidithiobacillus ferrooxidans*..... ۳٤
۲-٤-۳ تهیه‌ی محلول آنزیمی برای ماشینکاری آنزیمی..... ۳۵
۲-٤-٤ تهیه‌ی محلول اسیدی سولفوریک‌اسید برای ماشینکاری مقایسه‌ای..... ۳٦
۲-٤-۵ تهیه‌ی محلول اسیدی هیدروکلریک‌اسید برای ماشینکاری مقایسه‌ای..... ۳٦
۲-٤-٦ جداسازی میکروب از محلول باکتریایی توسط فیلتراسیون محلول باکتریایی..... ۳٦
۲-٤-۷ تعیین بهترین شرایط فعالیت باکتری اسیدی تیوباسیلوس فرواکسیدانس جهت انجام فرآیند ماشینکاری..... ۳۷
۲-٤-۸ انجام آزمایش موازی باکتریایی حاوی و فاقد میکروب اسیدی تیوباسیلوس فرواکسیدانس..... ۳۷

فصل سوم- نتایج و بحث

۳-۱ وزن‌سنجی قطعات ماشینکاری قبل و بعد از فرآیند براده‌برداری..... ٤۰
۳-۱-۱ حذف اثرات نامطلوب ماشینکاری باکتریایی..... ٤۳
۳-۱-۲ خنثی کردن محلول‌های باکتریایی و آنزیمی جهت کاهش اثرات نامطلوب اسید..... ٤٤
۳-۱-۳ تعیین شرایط بهینه فعالیت باکتری اسیدی‌تیوباسیلوس‌فرواکسیدانس در فرآیند ماشینکاری..... ٤٦
۳-۱-٤ آزمایش باکتریایی توسط محلول‌های حاوی و فاقد میکروب اسیدی‌تیوباسیلوس‌فرواکسیدانس..... ٤۷

۳-۱-۵ انجام آزمایش موازی باکتریایی حاوی و فاقد میکروب اسیدی تیوباسیلوس فرواکسیدانس.....۴۸
۳-۲- ماشینکاری آنزیمی.....۴۹
۳-۲-۱ انتخاب آنزیم.....۴۹
۳-۲-۲ اثرات پارامترهای موثر بر فرآیند ماشینکاری آنزیمی.....۵۱
۳ -۲-۲-۱ اثر دما بر ماشینکاری آنزیمی.....۵۱
۳-۲-۲-۲ اثر سرعت همزدن بر ماشینکاری آنزیمی.....۵۴
۳-۲-۲-۳ اثر pH بر ماشینکاری آنزیمی.....۵۶
۳-۲-۲-۴ اثر مقدار گلوکز مصرفی بر ماشینکاری آنزیمی.....۵۹
۳-۲-۲-۵ اثر مقدار گلوکزاکسیداز مصرفی بر ماشینکاری آنزیمی.....۵۹
۳-۲-۳ یکنواختی ماشینکاری آنزیمی (خطی‌بودن روند ماشینکاری).....۶۰
۳-۲-۴ اثرات ماشینکاری آنزیمی بر خواص ریخت شناختی قطعات ماشینکاری‌شده.....۶۲
۳-۲-۵ اثرات ماشینکاری آنزیمی بر زبری سطح قطعات ماشینکاری‌شده.....۶۵
۳-۳- مقایسه‌ی ماشینکاری به سه روش شیمیایی، باکتریایی و آنزیمی.....۶۶
۳-۴- نتیجه‌گیری.....۶۷
۳-۵- پیشنهادات.....۶۸
منابع ۷۰
مقالات مستخرج از پایان‌نامه.....۷۵

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

فصل اول- مقدمه و بررسی منابع

شکل۱-۱ تصویر میکروسکوپی باکتری *Acidithiobacillus ferrooxidans* ۷

شکل ۱-۲ مراحل انجام اولین آزمایشات در فرآیند ماشینکاری‌زیستی توسط UNO و همکاران.....۸

شکل ۱-۳ فرآیند ماشینکاری زیستی بر روی آهن(چپ) و مس(راست)..... ۹

شکل ۱-٤ تاثیر دما در نرخ براده‌برداری در فرآیند ماشینکاری زیستی.....۱۰

شکل ۱-۵ تاثیر اعمال پتانسیل الکتریکی روی نرخ براده‌برداری در فرآیند ماشینکاری زیستی برای آهن و مس..... ۱۱

شکل ۱-٦ تاثیر سرعت همزدن بر نرخ براده‌برداری در فرآیند ماشینکاری زیستی.....۱۱

شکل ۱-۷ دیاگرامهای نرخ براده‌برداری-زمان در فرآیند ماشینکاری‌زیستی آهن و مس.....۱۳

شکل ۱-۸ روند کلی فرآیندهای انجام شده در فرآیند ماشینکاری زیستی توسط جانسون و همکاران.....۱٤

شکل ۱-۹ نمونه‌ی اسیدی تیوباسیلوس فرواکسیدانس تهیه شده از ATCC (آمپول لیوفیلیزه).....۱۵

شکل ۱-۱۰ نمونه‌ای از رشد و تکثیر انجام شده‌ی باکتری (نمونه‌ی رشد یافته ونمونه‌ی رشد نکرده)..... ۱٦

شکل۱-۱۱ رشد باکتریهای اسیدی تیوباسیلوس فرواکسیدانس پس از ٤۸ و ۱۲۰ ساعت.....۱۷

شکل ۱-۱۲ خلاصه‌ای از نتایج آزمایشات زبری.....۱۸

شکل ۱-۱۳ خلاصه‌ای از نتایج زبری سطح قبل و بعد از فرآیند ماشینکاری‌زیستی.....۱۹

شکل۱ -۱٤ عکس‌برداری SEM و نحوه‌ی چسبندگی باکتری به سطح قطعه‌ی کار و اثرات آن ۲۰

فصل سوم- نتایج و بحث

شکل ۳-۱ رشد باکتری اسیدی تیوباسیلوس فرواکسیدانس قبل و بعد از رشد..... ٤٠

شکل۳-۲ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از مس خورده شده در محلول شاهد با بزرگنمایی۵۰۰ برابر..... ٤١

شکل۳-۳ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از مس خورده شده در محلول باکتریایی با بزرگنمایی‌های ۵۰۰ و ۲۰۰۰ برابر..... ٤٢

شکل ۳- ٤ اثر دما در براده‌برداری آنزیمی از سطح فلز مس(*pH=* ۵/۵ ، *GOx=2000 U/L* ، سرعت همزدن ۱۳۰ دور بر دقیقه)..... ۵٢

شکل ۳-۵ اثر دما بر نرخ براده‌برداری از فلز مس در یک بازه‌ی زمانی ٦ ساعته، (*pH=* ۵/۵ ، *GOx=2000 U/L* ، سرعت همزدن ۱۳۰ دور بر دقیقه)..... ۵۳

شکل ۳-٦ اثر سرعت همزدن در براده‌برداری آنزیمی از فلز مس(دمای ۲۵°C، *pH=* ۵/۵ ، *GOx=2000 U/L*) ۵٤

شکل ۳-۷ اثر سرعت همزدن بر نرخ براده‌برداری (دمای ۲۵°C، *pH=* ۵/۵ ، *GOx=2000 U/L*)..... ۵۵

شکل ۳-۸ اثرpH بر نرخ براده‌برداری فلز مس در ماشینکاری آنزیمی(دمای ۲۵°C، *GOx=2000 U/L* ، سرعت همزدن ۱۳۰ دور بر دقیقه)..... ۵٦

شکل ۳- ۹ تغییرات رنگ محلول ماشینکاری آنزیمی در شروع واکنش و پس از گذشت یک ساعت در محلول با pH=٤/۰ ، محلول با pH=۵/۵ ، محلول با pH=۷/۰ و شاهد..... ۵۸

شکل ۳-۱۰ اثر مقدار گلوکزاکسیداز بر سرعت براده‌برداری از فلز مس در ماشینکاری آنزیمی(دمای ۲۵°C، ۵/۵ *pH=* سرعت همزدن ۱۳۰ دور بر دقیقه)..... ۵۹

شکل ۳-۱۱ سرعت حذف آنزیمی فلز از قطعه‌ی ماشینکاری شده (دمای ۲۵°C، *pH=* ۵/۵ ، *GOx=2000 U/L* ، سرعت همزدن ۱۳۰ دور بر دقیقه)..... ٦١

شکل ۳-۱۲ آنالیز تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (الف)قطعه‌ی شاهد؛ و قطعات فلزی پس از فرآیند ماشینکاری در محلول‌های (ب) سولفوریک‌اسید 1N؛ (ج) هیدروکلریک‌اسید 1N؛ (د) باکتری

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

فصل اول- مقدمه و بررسی منابع

جدول ۱-۱ دسته‌بندی فرآیندهای مواد از نقطه نظر انرژی مورداستفاده و تغییرحجم.....۵

جدول ۱-۲ دسته‌بندی ارگانیسم‌ها از نقطه نظر منبع کربن و منبع انرژی.....٦

جدول ۱-۳ ترکیب محلول 9K..... ۹

جدول۱-٤ محلول‌های مورد نیاز برای کشت جامد باکتری- آگار..... ۱۵

جدول۱-۵ نتایج نرخ براده برداری در آزمایشات Johnson و همکاران..... ۲۰

جدول ۱-٦ طبقه بندی آنزیم‌ها..... ۲۲

فصل دوم-مواد، تجهیزات و روشها

جدول ۲-۱ فهرست برخی از مواد مورد استفاده..... ۳۰

جدول ۲-۲ محلول‌های مورد نیاز جهت تهیه‌ی محیط کشت 9K.....۳٤

فصل سوم- نتایج و بحث

جدول ۳-۱ نتایج حاصل از آزمون وزن‌سنجی قطعات ماشینکاری قبل و بعد از فرآیند براده‌برداری.....٤۰

جدول ۳-۲ نتایج حاصل از وزن‌سنجی قطعات ماشینکاری در محیطهای میکروبی، محلول آنزیمی فیلترشده از باکتری و محلول آنزیمی غیرفعال شده با حرارت(pH= ۱/۵-۲/۰).....٤۳

جدول ۳-۳ نتایج حاصل از آزمون وزن‌سنجی قطعات ماشینکاری‌شده در محلول آنزیمی فیلترشده از باکتری و خنثی شده با محلول سود(NaOH) ۰/۱ نرمال.....٤٥

جدول ۳-٤ نتایج حاصل از وزن‌سنجی قطعات ماشینکاری‌شده در محلول‌های آنزیمی به تفکیک روزهای جداسازی.....٤٦

جدول ۳-٥ نتایج حاصل از وزن‌سنجی قطعات ماشینکاری‌شده در محلول‌های باکتریایی و آنزیمی.....٤٧

جدول ۳-٦ زبری سطوح ماشینکاری‌شده در محیطهای مختلف ماشینکاری.....٦٥

Abbreviations

ABTS	2,2'-azino-di-[3-ethylbenzthiazolin-sulfonate]
CM	Chemical Machining
ECM	Electro Chemical Machining
EDM	Electro Discharge Machining
GOx	Glucose oxidase
MRR	Metal Removal Rate
R_a	Roughness average
R_{max}	Roughness maximum
SEM	Scanning Electron Microscopy
U	Unit

فصل اول

مقدمه و بررسی منابع

۱-۱ مقدمه

گستره‌ی روش‌های عملیاتی مورد استفاده برای مواد را می توان به طور کلی بر حسب انرژی استفاده شده در آن روش به دو دسته تقسیم کرد؛ فرآیندهای فیزیکی و فرآیندهای شیمیایی. علوم طبیعی یا سیستم‌های مهندسی به طور کلی در عمل به سه دسته تقسیم می شوند. فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی. روشهای ماشینکاری از جمله فرآیندهایی هستند که طبق این طبقه‌بندی جزء فرآیندهای فیزیکی- شیمیایی دسته‌بندی می‌شوند. ماشینکاری شیمیایی(CM[1])، ماشینکاری الکتروشیمیایی(ECM[2]) و ماشینکاری تخلیه‌ی الکتریکی (EDM[3]) از جمله روش‌های مرسومی هستند که اثرات و نتایج موفقیت آمیزی را در ماشینکاری در ابعاد میکرو(میکروماشینکاری) به‌دست می‌دهند. این روش‌های ماشینکاری موجب تخریب سطح مورد نظر و آسیب دیدن آن، اعمال پتانسیل اضافی، ایجاد حفرات بر روی سطح مورد نظر و مشکلاتی دیگر می‌شوند. در ماشینکاری شیمیایی که اغلب با اسید و دیگر مواد خطرناک و سمی انجام می‌شود، خطرات کار بسیار زیاد و فرآیند اغلب با دشواری‌های زیادی روبروست[۳-۱] . در سایر روشهای مرسوم قبلی هم این مشکلات وجود دارند. در روش حاضر امکانپذیری ماشینکاری زیستی با استفاده از واکنش کاتالیستی آنزیمی مورد بررسی قرار گرفته است که حاکی از مزایای قابل توجه این روش جدید در مقایسه با روشهای قبلی است.

۱-۲ ماشینکاری

فرآیند ماشینکاری عبارت از شکل دادن مواد توسط تراوش و برش می‌باشد. این عمل به وسیله ابزارها و ماشین‌های تراوش و برش انجام می‌گیرد[۱]. مقدار قشری که از قطعه اولیه برداشته می‌شود تا قطعه صیقلی و نهایی ایجاد گردد، اصطلاحا تراوش خور می‌نامند. به‌منظور رعایت مسائل اقتصادی، مقدار تراوش خور باید حداقل باشد تا مصرف فلز و هزینه‌های تراشکاری کاهش یابد[۱،۲].

در برش‌کاری (قیچی‌کاری) نیز برای برش و جدا کردن فلز از دو نیروی متقابل استفاده می‌شود. این نیروها ، توسط دو تیغه (با فاصله از یکدیگر) اعمال می‌شوند که با نیروی کافی موجب از هم‌گسیختگی و شکسته شدن فلز می‌گردند. در ماشینکاری قطعات، بر حسب نوع کار از ماشین‌های تراوش، فرز، مته صفحه تراش، کله‌زنی، سنگ‌زنی، تیزکاری و سوراخ‌کن استفاده می‌شود که معمولا این قطعات، خود محصول فرآیندهای ریخته‌گری، آهنگری، نورد و غیره می‌باشند. فرآیند ماشینکاری زیستی با میکروب نیز یکی از فرآیندهای جدید است که در ماشینکاری و خصوصاً میکروماشینینگ[4] مورد استفاده قرار گرفته است.

---

[1] Chemical Machining
[2] Electro Chemical Machining
[3] Electro Discharge Machining
[4] Micromachining

۱-۳ روش‌های ماشینکاری

۱-۳-۱ ماشینکاری الکتروشیمیایی(ECM)

پیش از ظهور روشهای نوین ماشینکاری نظیر ماشینکاری زیستی، از روشهایی چون ماشینکاری شیمیایی، ماشینکاری الکتروشیمیایی(ECM)، ماشینکاری تخلیه الکتریکی(EDM) و روشهای جدیدتری نظیر لیزر، ماشینکاری اولتراسونیک[1] و ماشینکاری واترجت[2] برای فرآیندهای ماشینکاری خصوصاً میکروماشینکاری استفاده شده است که هر یک از روشهای مذکور مزایا و معایبی را داراست. از جمله، الکترولیز به طور موفقیت‌آمیزی درفرآیندهای آبکاری برقی،شکل دهی برقی و پرداختکاری برقی بکار گرفته شده است. مشخصه قابل توجه الکترولیز این است که انرژی الکتریکی برای تولید واکنش شیمیایی مورد استفاده قرار می‌گیرد. بنابراین، فرآیند ماشینکاری که بر اساس این اصل استوار است به عنوان ماشینکاری الکتروشیمیایی می‌شناسند[۳] . این فرآیند بر اساس قوانین تجزیه الکتریکی فاراده عمل میکند. در ماشینکاری الکتروشیمیایی فلز جداشده، به صورت هیدروکسیدهای فلزی جامدرسوب کرده ظاهر می‌شود.

با استفاده از ماشینکاری الکتروشیمیایی می‌توان اشکال بسیار پیچیده و منحنی شکل را دریک مرحله‌ی ماشینکاری ایجاد نمود. این فرآیند چند مزیت دارد از جمله اینکه توانایی ماشینکاری قطعه کار مستقل از خواص فیزیکی و مکانیکی آن است. سطوح ماشینکاری شده بدون تنش و پلیسه با پرداخت سطح خوب، مقاومت بهتر در برابر خوردگی و دقت بهتررا می‌توان با این فرآیند ایجاد نمود[٤،٥] .

ماشینکاری الکتروشیمیایی، محدودیتهای خاص خود را دارد و تنها می‌تواند برای موادی که رسانای الکتریسیته هستند به کاررود[٦] . علاوه براین، دقت قطعات ماشینکاری شده به عواملی مانند طرح ابزار، مقدار کنترل اعمال شده بر فرآیند، پیچیدگی اشکال تولیدی و ... بستگی دارد. ماشینکاری موادی که دارای نقاط سخت،لبه‌های تیز، ذرات ناخالص، ماسه و پوسته باشند مشکلات اجرایی را ایجاد می‌کند. سالهاست اصول ماشینکاری الکتروشیمیایی برای انجام عملیات ماشینکاری متعددی بکار گرفته شده که چند نمونه از آنها عبارتنداز: گردتراشی(تراشکاری)، واشربری، سنگ‌زنی، مته کاری سوراخهای ریز، قالب سازی، سوراخ کاری،پلیسه‌زدایی و برش‌سنبه‌ای،این فرآیند بطور وسیعی در صنایع هوافضا، تکنولوژی هسته ای، سفینه‌های فضایی، خودروها، توربین ها وغیره استفاده می شود[٦،٧] .

---

[1] Ultrasonic machining
[2] Water jet machining

۱-۳-۲ ماشینکاری تخلیه الکتریکی(EDM)

روش دیگر ماشینکاری تخلیه‌الکتریکی است. ماشینهای تخلیه‌الکتریکی (EDM) به‌صورت فرآیندهای پرداخت فلزات رسانا، توسط جرقه‌های الکتریکی مشخص می‌شوند. امروزه (EDM)برای ساخت حفره‌ها و قالبهای هندسی و غیر هندسی بسیار پیچیده بکار می‌رود. در فرآیند ماشینکاری الکتریکی بر خلاف ماشینکاری مکانیکی فلز ابزار می‌تواند از فلز قطعه کار نرمتر باشد و براده‌برداری نیز هیچ ارتباطی به سختی مکانیکی قطعه کار ندارد. هر چند که فلزات سخت کمی سخت تر از فلزات نرم براده‌برداری می‌شوند[۸،۹] .

۱-۳-۳ ماشینکاری با لیزر

یکی از جدیدترین روش‌های ماشینکاری در سالهای اخیر می‌باشد. یکی از روش‌ها، استفاده از ماشینهایی است که در آنها از لیزر به عنوان کمک‌ابزار استفاده می‌شود. در جریان برش لیزر با قدرت زیاد در محل برش متمرکز می‌شود و ماده نرم‌تر شده و به راحتی برش داده می‌شود. به دلیل اینکه فقط بخش کوچکی گرم می‌شود ابزار برش خنک باقی می‌ماند و از این طریق میزان برش و سرعت عمل افزایش می‌یابد. برای کاهش بازتاب طبیعی سطح ماده یک لایه‌ی جاذب درست در محل فرود لیزر پاشیده می شود[۱۰]. کاربرد این گونه ماشین‌ها در صنعت به طور وسیع احتیاج به بررسی‌های بیشتر اقتصادی و بهینه سازی آنها دارد. ماشینکاری با استفاده از لیزر مزایای قابل توجهی دارد. ماشینکاری لیزری یک روش براده‌برداری غیر تماسی است که هیچ گونه نیرویی، بین ابزار و قطعه کار مبادله نمی‌شود. با ماشینکاری لیزری امکان برداشتن ذرات از ماده با دقت و مقدار بسیار کم امکان‌پذیر است به طوری که حتی براده‌برداری در حد اتم به اتم هم وجود دارد و ماشینکاری میکرونی را امکان‌پذیر ساخته است. با توجه به ماشینکاری لیزری میکرونی می‌توان حداقل مقدار ماده مورد نیاز را از قطعه کار جدا کرد بنابراین در هزینه مواد صرفه جویی زیادی خواهد شد. امکان براده برداری از مواد سخت، شکننده و ساینده به راحتی وجود دارد به طوری که حتی الماس – سخت‌ترین ماده شناخته شده در طبیعت – را می‌توان به راحتی ماشینکاری کرد. سرامیک‌ها، فولادی‌های سخت شده، آلیاژهای تیتانیوم که با روش‌های ماشینکاری سنتی به راحتی ماشینکاری نمی‌شوند را با این روش می‌توان ماشینکاری کرد. از طرفی این روش با مشکلاتی هم روبروست که مخروطی شدن قطعات ماشینکاری شده، مشکل بودن کنترل اندازه قطعات ماشینکاری شده ، عمر کم لامپهای مولد ، هزینه بالای اولیه دستگاه ، نیاز به اپراتور ورزیده از آن جمله است[۱۲،۱۱] .

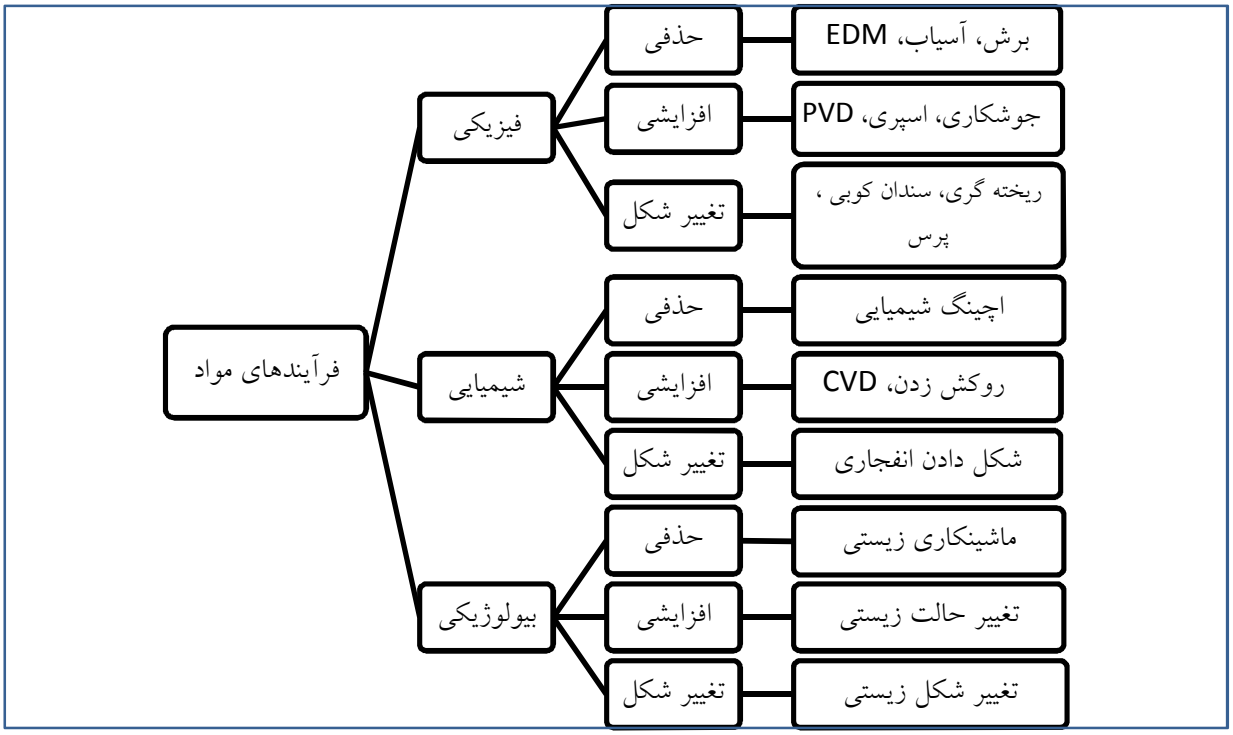
۱-۳-٤ ماشینکاری زیستی[1]

۱-۳-٤-۱ دسته‌بندی فرآیندهای مواد از نقطه‌نظر انرژی مورد استفاده وتغییر حجم

مطابق جدول ۱-۱، فرآیندهای مواد به طور کلی به سه دسته‌ی فرآیندهای فیزیکی، شیمیایی و یا بیولوژیکی بر حسب مقدار انرژی مصرفی و تغییر حجم در فرآیند دسته‌بندی می‌شوند. فرآیندهای مرسوم مواد را می‌توان به دو دسته‌ی فیزیکی یا شیمیایی، دسته‌بندی کرد، سپس هر دسته‌بندی می تواند بر حسب فرآیند زدایش، افزایش یا تغییر شکل دسته‌بندی شود[۱۳] .

یک روش جدید در فرآیندهای مواد، از انرژی بیولوژیکی برای فرآیندهای مواد بهره می گیرد که ماشینکاری زیستی طبق این تقسیم‌بندی به عنوان یک فرآیند زدایش بیولوژیکی تعریف شده است[۱۵،۱٤] .

جدول ۱-۱: دسته‌بندی فرآیندهای مواد از نقطه نظر انرژی مورداستفاده و تغییرحجم[۱٤]



۱-۳-٤-۲ دسته‌بندی ارگانیسم ها از نقطه نظر منبع کربن و منبع انرژی

اساس حیات موجودات زنده بر پایه‌ی کربن می‌باشد که این ترکیب‌ها متناوباً به‌وجود آمده و از بین می روند. بافتهایی که به لیتوتروف[2] موسومند، کربن خود را از منابع غیرزنده مثل کربن‌دی‌اکسید به دست می‌آورند. از طرفی دیگر ارگانوتروف‌ها[3] کربن خود را از

[1] Biomachining
[2] Lithotroph
[3] Organothroph

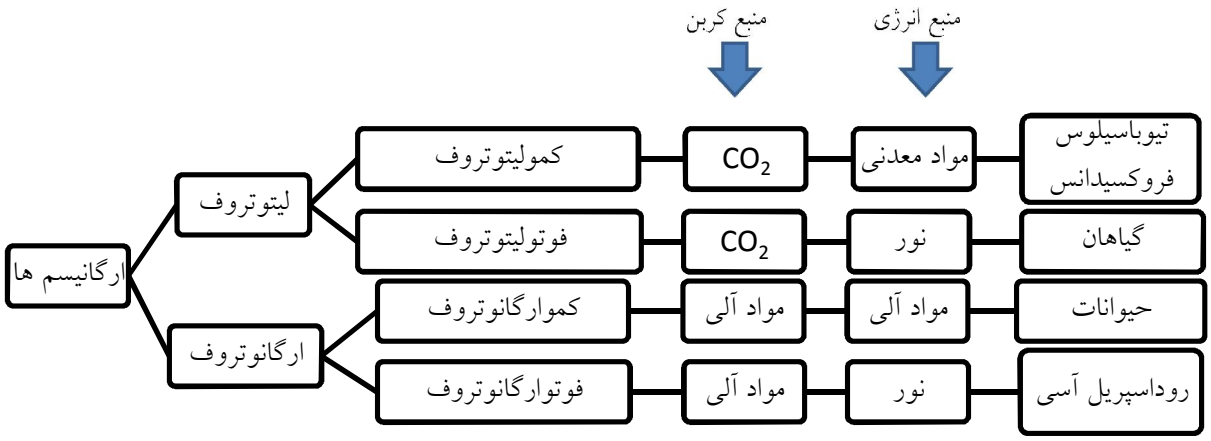
موجـودات زنـده بـه‌دسـت مـی‌آورنـد. هریـک ازگروههـای فـوق بـر حسـب چگـونگی بـه‌دسـت آوردن کربن موردنیاز خود به چند دسته تقسیم می شوند[۱۶] .

در این تقسیم‌بندی‌ها پیشوند کمو[1] برای آن‌دسته از فعل و انفعالاتی که در آنها انرژی تولید می شود، به کار می‌رود. اندام‌های بدن انسان و باکتریها در دسته‌ی کموارگانوتروف‌ها[2] قرار می گیرند. پیشوند فوتو[3] نیز برای دسته بندیهایی که برای فعل و انفعالاتی که به انرژی مثل نور نیاز دارند، به کار برده می‌شود.

اخیراً بافتهایی که در دسته ی کموارگانوتروف قرار دارند به خاطر توانایی منحصر به فردشان که در اکسایش و کاهش دارند، شدیداً مورد توجه قرارگرفته‌اند.

در فرآیند ماشینکاری‌زیستی انواع مختلف *Desulfovibro sp*، *Thiobacillus thioxidans* و *Acidithiobacillus ferrooxidans* توسط فعل و انفعالاتی که درون آنها رخ می‌دهد سبب براده برداری در حد میکرو و نانو می‌شوند. در این فرآیند اسیدی‌تیوباسیلوس‌فرواکسیدانس از دو جنبه دارای اهمیت است. اولاً به خاطر کشت راحت در آزمایشگاه و ثانیاً به خاطر برداشتن براده از قطعه حین رشد[۱۶،۱۷] . خلاصه‌ای از طبقه بندیهای فوق در جدول ۱-۲ نشان داده شده است.

جدول ۱-۲: دسته‌بندی ارگانیسم‌ها از نقطه نظر منبع کربن و منبع انرژی[۱۴]

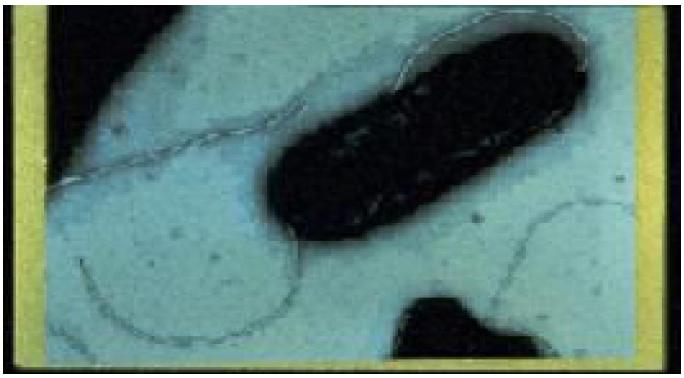


۱-۳-٤-۳ اسیدی تیوباسیلوس فرواکسیدانس (*Acidithiobacillus ferrooxidans*)

در گروه باکتریهای لیتوتروف و زیرشاخه‌ی کمولیتوتروف‌ها، بعضی از باکتریها وجود دارند که

[1] Chemo
[2] Chemo organothroph
[3] Photo

فلزات را "می‌خورند"[۱۸]. به عبارت دیگر توانایی زدایش فلز را دارند. اسیدی‌تیوباسیلوس-فرواکسیدانس یکی از همین دسته از باکتری‌ها می‌باشد که توانایی بالایی در حذف فلز از سطح را دارا می‌باشد.



شکل ۱-۱: تصویر میکروسکوپی باکتری *Acidithiobacillus ferrooxidans* [۱۵]

اسیدی‌تیوباسیلوس‌فرواکسیدانس(شکل ۱-۱) و اسیدی‌تیوباسیلوس‌تیواکسیدانس در این دسته جای می‌گیرند. این باکتری‌ها از انرژی تولید شده بوسیله‌ی اکسیداسیون آهن یا گوگرد به منظور تثبیت کربن دی‌اکسید موجود در هوا استفاده می‌کنند. برای مثال اسیدی‌تیوباسیلوس‌فرواکسیدانس می‌تواند انرژی را بوسیله‌ی اکسیداسیون آهن دوظرفیتی (Fe^{2+}) بدست آورد که طبق واکنش زیر نشان داده شده است:

$$4\,Fe^{2+} + O_2 + 4\,H^+ \longrightarrow 4Fe^{3+} + 2H_2O \quad (۱-۱)$$

در این واکنش، حدود ۸ کیلوکالری بر مول انرژی تولید می‌شود. در این مطالعه، یک فرآیند زدایش فلز با استفاده از باکتری کمولیتوتروف، اسیدی‌تیوباسیلوس‌فرواکسیدانس به عنوان ابزاری برای این کار، بررسی شده است[۱۷،۱۸] . این باکتری یکی از انواع کوتاه باسیلوس است که در حدود ۰/۵ میکرومترضخامت و ۱ میکرومتر درازا دارد. اگر فرآیند زدایش فلز با استفاده از این باکتری امکان پذیر گردد. یک مزیت و امتیاز بزرگ به عنوان یک ابزار برای میکروماشینکاری به دلیل حجم زدایش کوچک آن خواهد بود[۱۹] . بعلاوه، بعد از این، تابع متابولیک باکتری مورد استفاده قرار می‌گیرد، و نیازی به انرژی فیزیکی یا شیمیایی برای تغلیظ نقطه‌ی مورد نظر(نقطه‌ی ماشینکاری شده) نخواهد بود. و همچنین یک لایه‌ی آسیب دیده و یا یک ناحیه‌ی متاثر از حرارت در سطح ماشینکاری شده ایجاد نخواهد شد [۲۲-۲۰] .