



Journal

RANDEMAN

University of Tabriz

Scientific Quarterly - Issue 2

Spring 2025

نشریه

راندمان

دانشگاه تبریز

فصل نامه علمی شماره دو

بهار ۱۴۰۴



In this issue:

Introduction to Manufacturing Engineering

Introduction to Manufacturing Methods

Chernobyl: The Story of an Engineering Disaster

Underwater Welding: A Different World Beneath the Sea



در این شماره:

معرفی گرایش ساخت و تولید

آشنایی با روش های تولید

چرنوبیل؛ روایت یک فاجعه مهندسی

جوشکاری زیر آب؛ دنیایی متفاوت در دل دریا



randeman.journal



journal.randemanx.ir



randemanjournal



journal@randemanx.ir



شناسنامه

اعضاء هیئت تحریریه

(به ترتیب حروف الفبا)

آریا اقبال عنصرودی

مبین آذرمجو

صدرا آئینه ساز جدید

علی پورمحمدی امامیه

دکتر وحید پویافر

مهدی تقی یام

ماهان حبیب آذر

تاریخ اخذ مجوز:
۱۴۰۳/۰۸/۲۹

شماره مجوز:
ک ن ح ۱۱۲/۲



اگر شما هم ...

اگر شما هم علاقه مندید در شماره های بعدی نشریه همراه ما باشید یا ایده ها و مطالب خود را با ما به اشتراک بگذارید، می توانید از طریق کد QR زیر یا ایمیل نشریه با ما در ارتباط باشید

صاحب امتیاز:

ساجد زین العابدین زاده

استاد مشاور:

دکتر محمدعلی حامد

مدیر مسئول:

آریا اقبال عنصرودی

سر دبیر:

مهدی تقی یام

دبیر علمی:

علی پورمحمدی امامیه

دبیر خبری:

ماهان حبیب آذر

ویراستار علمی:

دکتر هادی تیموری

ویراستار فنی:

علی پورمحمدی امامیه

مترجم:

نیما حافظی

طراح گرافیک و صفحه آرایی:

ساجد زین العابدین زاده



ایران

وطن

ایران



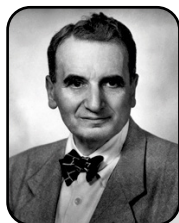
مهدی تقی‌یام

دانشجوی مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز

سخن‌سر دبیر

سلام به شما همراهان فرهیخته و کنجگلو،
با افتخار، شماره جدید نشریه را تقدیم حضورتان می‌کنیم.
شماره که در آن کوشیده‌ایم ترکیبی جذاب از دانش
مهندسی، رویدادهای تاریخی و نوآورانه‌های علمی روز دنیا را گرد
هم آوریم.
هر شماره برای ما هرفه مجموعه‌ای از صفحات و مطالب
نیست؛ بلکه سفری است در دل ایده‌ها، چالش‌ها،
پرسش‌ها و ایده‌هایی که جهان مهندسی و فناوری با خود به
همراه دارد.
در این مسیر، هدف ما تنها انتقال اطلاعات نیست، بلکه
خلق تجربه‌ای تازه از یادگیری است؛ تجربه‌ای که علم را از
دل مفاهیم پیچیده بیرون می‌کشد، کن را به زبان ساده بیان
می‌کند و پلی می‌زند میان ذهن‌های جوان و دنیای واقعی صنعت
و فناوری.
در این شماره تلاش کرده‌ایم طیف متنوع از موضوعات فنی،
تاریخی و آینده‌نگار را در کنار یکدیگر بنهیم؛ از مرور هفت
روشن مهم تولید صنعت و معرفی فناوری‌های نوین، تا بررسی

فاجعه چرنوبیل و کوشش‌های دنیای پر رمز و راز جوشکاری زیر
آب. همچنین، نگاهی نزدیک‌تر به رشته‌های مختلف و تولید و
چالش‌ها و فرصت‌هایی که پیش روی کن قرار دارد.
اگر مطالب این شماره حتی یک «چرا؟» یا «چطور؟» در ذهن
شما ایجاد کرده باشد، یعنی ما نوریت ما به‌شمار نیست است.
در پایان، از همه عزیزانی که در تهیه و شکل‌گیری این شماره
همراه ما بودند صمیمانه سپاسگزاریم؛ از نویسندگان که با دقت و
استقامت قلم زدند، تا دوستانی که مسئولیت طراحی، صفحه‌آرایی و
بازبینی را بر عهده داشتند.
و مهم‌تر از همه، از شما خوانندگان گرامی که با نگاه گرم، نقد‌ها
سازنده و حمایت‌های دلبگرم‌کننده‌تان، ما را در ادامه این مسیر
پر شور و یاد می‌کنید، قدر دان می‌کنیم.
به امید اینکه این صفحات، نه‌یابین، بلکه کاشانه‌ای باشد برای
گفت‌وگوهای تازه میان ما و شما؛ گفت‌وگویی که در شماره‌های
آینده پویاتر و پرمعناتر ادامه یابد.
با احترام و آرزوی پیشرفت



THEODORE VON KARMAN

“The scientist discovers what is, the engineer creates what has never been.”

فهرست مطالب

۶ معرفی گرایش ساخت و تولید

آشنایی با یک گرایش مهندسی مکانیک، مهارت‌ها، دروس، چالش‌ها، فرصت‌های شغلی و روندهای آینده آن.

۱۲ آشنایی با روش‌های تولید

آشنایی با ۷ فرآیند اصلی تولید، توضیح ساده هر روش همراه با مثال‌های کاربرد صنعتی آن‌ها.

۱۸ چرنوبیل؛ روایت یک فاجعه مهندسی

بررسی انفجار چرنوبیل ۱۹۸۶؛ دلایل، اقدامات اضطراری، قربانیان، پیامدها و نقش افراد کلیدی بحران.

۲۴ مسابقه و سرگرمی

جدول کلمات مکانیکی: سرگرمی علمی با محک دانش مکانیکی و شرکت در قرعه‌کشی جوایز.

۲۵ جوشکاری زیر آب؛ دنیایی متفاوت در دل دریا

آشنایی با جوشکاری زیر آب، روش‌های خشک و مرطوب، کاربردها، مهارت‌ها، فرصت‌های شغلی و چشم‌انداز آینده.

۳۳ اخبار علمی

معرفی نوآوری‌های فناوری: برنامه‌نویسی خودکار CNC، ربات پرنده، استخراج آب و حس لامسه در دست مصنوعی.

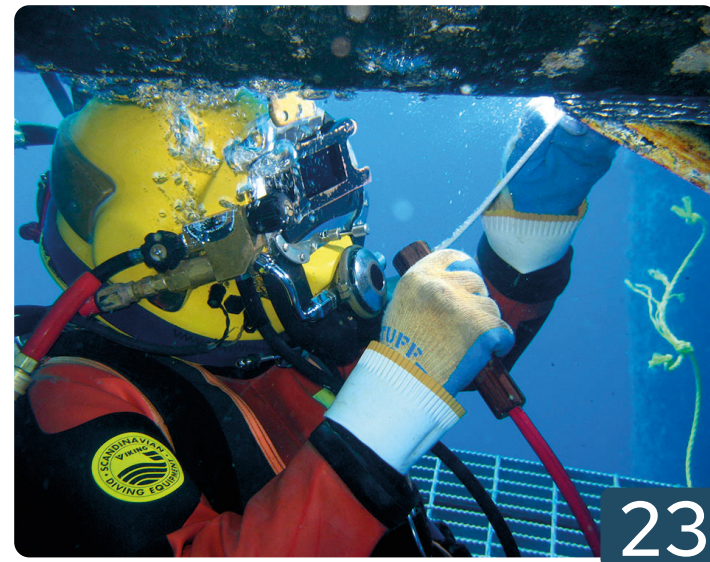


TABLE OF CONTENT

34 Introduction to Manufacturing Engineering

An introduction to a mechanical engineering specialization, its skills, courses, challenges, career opportunities, and future trends.

39 Introduction to Manufacturing Methods

An introduction to the 7 main manufacturing processes, with simple explanations of each method along with examples of their industrial applications.

44 Chernobyl: The Story of an Engineering Disaster

Analysis of the 1986 Chernobyl Explosion: Causes, Emergency Actions, Victims, Consequences, and the Role of Key Figures in the Crisis.

49 Underwater Welding: A Different World Beneath the Sea

An introduction to underwater welding, dry and wet methods, applications, skills, job opportunities, and future outlook.

56 Scientific News

Introduction to Technological Innovations: Automated CNC Programming, Flying Robots, Water Extraction, and Tactile Sensation in Prosthetic Hands.



گرایش ساخت و تولید

علی پور محمدی امامیه

دانشجوی کارشناسی مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز



این متن با اتکا به منابع معتبر و روزآمد و با بهره‌مندی از راهنمایی‌های علمی و ارزشمند جناب آقای دکتر وحید پویافر، عضو محترم هیئت علمی دانشگاه تبریز، تدوین و گردآوری شده است. حضور و نظرات راه‌گشای ایشان تأثیری چشمگیر در غنای علمی و ارتقای کیفیت مطالب داشته است.

دکتر وحید پویافر

عضو هیئت علمی دانشگاه تبریز



در تمدن‌های باستانی مانند مصر، یونان و چین، ساخت ابزار و سازه‌های پیچیده‌تر مانند اربابه‌ها، پرس‌های مکانیکی و سیستم‌های ابتدایی انتقال قدرت به مرور توسعه یافت.

انقلاب صنعتی اول (قرن ۱۸ میلادی): این دوره آغاز تحول جدی در تولید صنعتی بود. اختراع ماشین بخار توسط جیمز وات (James Watt) و پیدایش کارخانه‌ها، نقطه شروع ساخت در مقیاس انبوه شد. در این دوره ماشین‌های ابزار اولیه مثل تراش و فرز ساخته شدند و استانداردسازی قطعات شکل گرفت.

انقلاب صنعتی دوم (اواخر قرن ۱۹ و اوایل قرن ۲۰): رشد برق، فولاد، موتورهای درون‌سوز و تکنولوژی‌های نوین باعث گسترش صنایع شد. هنری فورد (Henry Ford) با ایجاد خط مونتاژ در کارخانه خودروسازی، تحول بزرگی در تولید انبوه ایجاد کرد.

جنگ‌های جهانی و

پیشرفت در متالورژی و

ماشین‌کاری: جنگ جهانی

اول و دوم، نیاز به تولید انبوه و دقیق سلاح و تجهیزات را بالا برد که منجر به توسعه ماشین‌ابزارهای خودکار و فناوری‌های دقیق‌تر شد.

انقلاب صنعتی سوم – عصر دیجیتال (از دهه ۱۹۷۰ به بعد): ورود رایانه‌ها به صنعت، توسعه سیستم‌های CAD/CAM، ماشین‌های CNC و اتوماسیون صنعتی را انجامید.



Figure 1

شکل ۱

انقلاب صنعتی چهارم – تولید هوشمند و دیجیتال (Industry 4.0):

ورود فناوری‌های اینترنت اشیا، هوش مصنوعی، کلان‌داده و واقعیت افزوده به فاز هوشمندسازی تولید. توانایی آینده برای تولید دیجیتال و در اختیار گرفتن هوش مصنوعی برای بهره‌وری بیشتر.

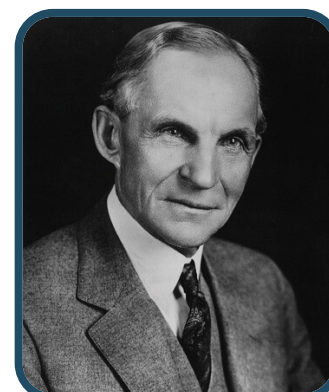


Figure 3 Henry Ford

شکل ۳

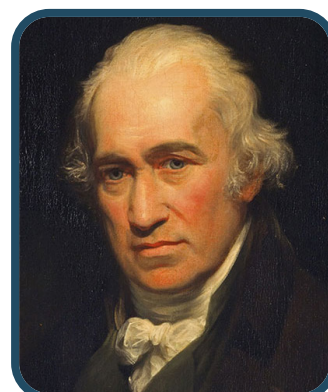


Figure 2 James Watt

شکل ۲

مقایسه با گرایش طراحی جامدات و حرارت و سیالات

گرایش طراحی جامدات: تمرکز بر طراحی و تحلیل قطعات و البته بیشتر نظری و تحلیلی.

گرایش حرارت و سیالات: تمرکز بر سیستم‌های حرارتی و سیالات؛ بیشتر مدل‌سازی و تحلیل انرژی.

ساخت و تولید: ساخت و تولید بر فرآیندهای ساخت و تولید فیزیکی تمرکز دارد، اما تلفیقی از دانش نظری و عملی است؛ به عبارت دیگر، این گرایش ظهور محصول طراحی‌شده را در عرصه عمل، با کنترل روش‌های تولید، فرآیندهای ساخت و بهینه‌سازی ممکن می‌سازد.



Figure 4

شکل ۴

✓ بازار کار گسترده و متنوع

✓ ترکیب دانش نظری و مهارت عملی

✓ فرصت کار در پروژه‌های متنوع

✓ امکان ادامه تحصیل و تخصص در حوزه‌های نوین

✓ نقش کلیدی در بهبود بهره‌وری و کاهش هزینه‌ها

✓ نیاز به تجربه عملی و حضور در محیط صنعتی

✓ کار فیزیکی و شرایط محیطی سخت، نیازمند فیزیک بدنی

✓ قوی در بسیاری از امور عملی

✓ فشار زمانی و مسئولیت پاسخگویی سریع به مشکلات

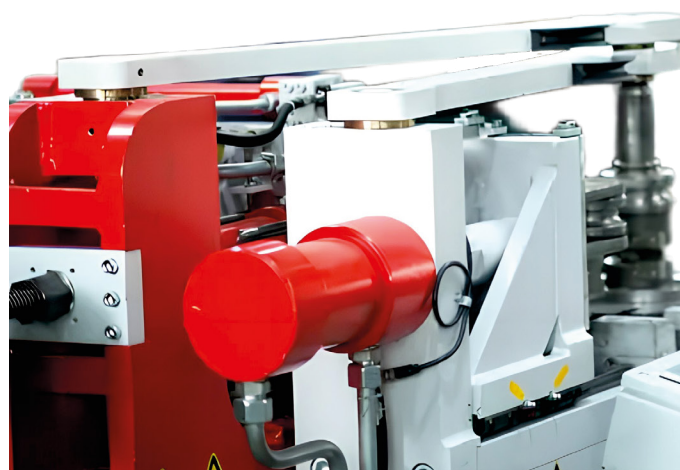
تولید

✓ نیاز به به‌روزرسانی مداوم دانش

✓ هماهنگی با تیم‌های مختلف

هدف از ایجاد گرایش ساخت و تولید در دانشگاه‌ها

گرایش ساخت و تولید، به‌عنوان یکی از گرایش‌های تخصصی مهندسی مکانیک، با هدف تأمین نیروی انسانی متخصص در فرآیندهای صنعتی و تولیدی شکل گرفته است. در سال‌های اخیر، دانشجویان از طریق انتخاب گرایش ساخت و تولید در مقطع کارشناسی مهندسی مکانیک وارد این رشته می‌شدند، اما بعدها ادامه تحصیل در آن به‌عنوان یک گرایش در مقطع کارشناسی‌ارشد امکان‌پذیر بود. با این حال، طی چند سال گذشته (حدود ۴ تا ۵ سال، بسته به سیاست دانشگاه‌های مختلف)، گرایش ساخت و تولید



علاوه بر مقطع کارشناسی‌ارشد، به‌عنوان یک رشته مستقل در مقطع کارشناسی نیز با کد رشته مجزا اقدام به پذیرش دانشجو می‌کند. این گرایش می‌کوشد شکاف میان طراحی مهندسی و تولید صنعتی را پر کند و افرادی تربیت نماید که هم درک فنی از فرآیندهای ساخت دارند و هم توانایی تحلیل، بهینه‌سازی و پیاده‌سازی آن‌ها در صنعت را دارا هستند.

اهداف آموزشی دانشگاه‌ها:

- آموزش اصول طراحی فرآیند ساخت
- تربیت نیروهای متخصص در کار با ماشین‌های ابزار سنتی و CNC
- آموزش نرم‌افزارهای مهندسی ساخت و طراحی صنعتی
- ارتباط با صنعت و انجام پروژه‌های صنعتی و میدانی
- یادگیری کنترل کیفیت و تیرانس‌گذاری هندسی و ابعادی
- آمادگی برای ورود به سیستم‌های تولید پیشرفته

دروس اصلی و تخصصی گرایش ساخت و تولید

دانشجویان گرایش ساخت و تولید طی دوره تحصیل با مجموعه‌ای از دروس تخصصی و عملی آشنا می‌شوند که پایه‌های علمی و مهارتی لازم برای ورود به صنعت را فراهم می‌کند.

دروس پایه و مقدماتی

- استاتیک و مقاومت مصالح
- ترمودینامیک و انتقال حرارت
- مکانیک سیالات
- ریاضیات مهندسی و معادلات دیفرانسیل

دروس تخصصی اصلی

- تکنولوژی ماشین‌کاری
- ماشین‌های ابزار
- روش‌های تولید پیشرفته
- ریخته‌گری
- طراحی قالب، جیگ و فیکسچر
- عملیات حرارتی
- سیستم‌های CAD/CAM
- برنامه‌نویسی CNC
- کنترل کیفیت و اندازه‌گیری
- برنامه‌ریزی و کنترل تولید
- اتوماسیون صنعتی و رباتیک

دروس عملی و کارگاهی

- کارگاه‌های ماشین‌کاری و ماشین‌ابزار
- آزمایشگاه کنترل کیفیت و متالورژی
- کارآموزی در صنایع مختلف
- پروژه‌های عملی و طراحی قالب و فرآیند تولید

مهارت‌های نرم و سخت مورد نیاز دانشجویان

مهندسی ساخت و تولید علاوه بر دانش فنی و تخصصی، نیازمند مجموعه‌ای از مهارت‌های سخت و نرم است.

مهارت‌های سخت:

- تسلط بر نرم‌افزارهای مهندسی و طراحی (CAD، CAM، ANSYS و ...)
- توانایی برنامه‌نویسی و کار با ماشین‌های CNC
- شناخت فرآیندهای ساخت و مواد
- کنترل کیفیت و اندازه‌گیری
- برنامه‌ریزی تولید و مدیریت پروژه



Figure 5

مهارت‌های نرم:

- توانایی کار تیمی
- حل مسئله و تفکر تحلیلی
- خلاقیت و نوآوری
- مهارت‌های ارتباطی و گزارش‌نویسی
- انعطاف‌پذیری و یادگیری مستمر

زمینه‌های پژوهشی و نوآوری در ساخت و تولید

این گرایش حوزه‌ای پویا و در حال تحول است و از فناوری‌ها و تحقیقات جدید بهره می‌برد.

زمینه‌های کلیدی پژوهش:

- تولید افزایشی (چاپ سه‌بعدی)
- ماشین‌کاری پیشرفته و فرآیندهای دقیق
- اتوماسیون و رباتیک صنعتی
- مواد و متالورژی پیشرفته
- سیستم‌های تولید هوشمند و دیجیتال
- تولید سبز و پایدار
- طراحی برای تولید و مونتاژ (DFM/DFA)

بازار کار و فرصت‌های شغلی فارغ‌التحصیلان

فارغ‌التحصیلان این رشته در صنایع متنوع فرصت شغلی بسیار زیادی دارند.

حوزه‌های اصلی:

صنایع خودروسازی/ صنایع هوافضا/ صنایع نفت، گاز و پتروشیمی/ صنایع دفاعی و نظامی/ صنایع پزشکی/ کارخانه‌ها و کارگاه‌های تولیدی/ شرکت‌های طراحی و مهندسی



Figure 6



Figure 7

شغل‌های متداول:

مهندس فرآیند/ مهندس تولید/ مهندس کنترل کیفیت/ برنامه‌ریز تولید/ مدیر خطوط تولید/ کارشناس CNC و برنامه‌نویس ماشین‌آلات/ متخصص طراحی قالب و ابزار/ مشاور و پژوهشگر

با توجه به گسترش و صعود با شیب زیاد در بخش آینده نوین، این گرایش نیز از این روند مستثنا نبوده و می‌توان چنین مواردی را انتظار داشت:

روندهای کلیدی: تولید هوشمند و کارخانه‌های هوشمند/ تولید افزایشی و چاپ سه‌بعدی/ اتوماسیون و رباتیک پیشرفته/ فناوری‌های نوین مواد و نانو تکنولوژی/ تولید پایدار و دوستدار محیط زیست/ هوش مصنوعی و یادگیری ماشین

مهندسان این رشته باید دانش و مهارت‌های خود را به‌روز کنند تا در این تغییرات نقش فعال داشته باشند.

زیر مجموعه‌های گرایش ساخت و تولید:

همانطور که در متون قبلی نیز به این مورد اشاره شده است؛ ساخت و تولید یکی از گرایش‌های اصلی رشته مهندسی مکانیک می‌باشد که خود دارای زیر مجموعه و زمینه‌های علمی مربوط به حوزه کاری این گرایش است. در این بخش به معرفی زیر مجموعه‌های گرایش ساخت و تولید که دانشجویان و اساتید(دانشگاه تبریز) در مقاطع تحصیلات تکمیلی و زمینه‌های کاری به آن مشغول هستند، می‌پردازیم.

ماشین‌کاری:

ماشین‌کاری یکی از روش‌های اصلی و قدیمی در فرآیندهای ساخت و تولید هست که در آن قطعه کار با استفاده از ابزار برشی، تراشیده و شکل‌دهی می‌شود تا به ابعاد و فرم دلخواه برسد. این بخش بر پایه حذف ماده از روی قطعه صورت می‌گیرد. این مجموعه به صورت کلی می‌توان به دو زیر مجموعه ماشین‌کاری سنتی(تراشکاری، سنگ‌زنی و ...) و نوین(EDM, USM و ...) تقسیم‌بندی کرد. بخش ماشین‌کاری خود دارای فرآیندهای مختلفی است که جلوتر در بخش‌های پیش‌رو به صورت کامل به آن‌ها پرداخت شده است.

جوشکاری:

جوشکاری یکی از مهم‌ترین فرآیندهای اتصال دائم فلزات و بعضی پلاستیک‌ها است که در آن دو یا چند قطعه به کمک حرارت، فشار یا هر دو به هم متصل می‌شوند که در آن استحکام جوش با خود فلز پایه برابر یا حتی بیشتر است. جوشکاری نیز می‌تواند برای خود زیر مجموعه‌های کاری داشته باشد که اعم از: جوشکاری با قوس الکتریکی - جوشکاری مقاومتی - جوشکاری زیر آب(بررسی کامل در بخش‌های جلوتر) - جوشکاری گازی - جوشکاری حالت جامد - روش‌های پیشرفته(لیزی، پرتو الکتریکی و ...)

ریخته‌گری:

ریخته‌گری یکی از قدیمی‌ترین و پرکاربردترین روش‌های تولید قطعات فلزی است که در آن فلز مذاب داخل یک قالب ریخته می‌شود و پس از انجماد، شکل قالب را به خود می‌گیرد. امکان تولید قطعات بزرگ و سنگین با این روش وجود دارد.

ریخته‌گری در قالب ماسه‌ای- ریخته‌گری تحت فشار- ریخته‌گری دقیق- ریخته‌گری گریز از مرکز- ریخته‌گری پوسته‌ای، پیوسته، تحت خلأ و ...

شکل‌دهی:

شکل‌دهی فرآیندی است که در آن قطعه‌کار بدون حذف ماده (برخلاف ماشین‌کاری) و تنها با اعمال نیرو تغییر شکل داده و به شکل و ابعاد دلخواه در می‌آید. این تغییر شکل معمولاً در حالت پلاستیک فلز (تغییر شکل دائمی) رخ می‌دهد. با توجه به تعریف جرم ماده تغییر نمی‌کند و همچنین استحکام فلز پس از تغییر شکل افزایش می‌یابد یا به نوعی سخت‌کاری سرد صورت می‌گیرد. در حالت کلی به دو زیر مجموعه: فرآیندهای فشاری- فرآیندهای ورق‌کاری:

و به صورت ریزتر:

فرآیندهای فشاری: نورد- آهنگری- اکستروژن و کشش ...

فرآیندهای ورق‌کاری: خمکاری- برشکاری- کشش عمیق- فرم‌دهی

غلطکی و هیدرولیکی و ...

3D پرینتر (پرینتر سه بعدی):

چاپ سه‌بعدی یک فرآیند افزایشی است؛ یعنی قطعه به‌جای براده‌برداری یا ذوب و ریختن، به‌صورت لایه‌به‌لایه ساخته می‌شود. مدل سه‌بعدی قطعه در نرم‌افزار طراحی (CAD) ایجاد شده و سپس پرینتر آن را با مواد مختلف می‌سازد. در این روش قطعات با هندسه پیچیده و غیر ممکن در روش سنتی، ساخته می‌شوند. امکان تولید سریع نمونه اولیه، مصرف مواد حداقلی و انعطاف‌پذیری بالا در تغییر طراحی از ویژگی‌های مهم این مجموعه به حساب می‌آید.

پوشش‌دهی:

پوشش‌دهی یعنی ایجاد یک لایه محافظ یا تزئینی روی سطح قطعه‌کار (فلزی، پلیمری، سرامیکی و ...) به منظور بهبود خواص سطحی مثل مقاومت به خوردگی، سایش، حرارت یا حتی زیبایی. در این روش هدف: افزایش مقاومت به خوردگی- افزایش مقاومت به سایش- بهبود ظاهر و ایجاد خواص خاص مانند رسانایی و اصطکاک و ... که منجر به افزایش عمر مفید قطعه، بهبود ظاهر و زیبایی و امکان ترکیب خواص می‌شود.

دسته‌بندی فرایندهای پوشش‌دهی: پوشش‌های مکانیکی و شیمیایی- پوشش‌های فیزیکی بخار- پوشش‌دهی حرارتی- پوشش‌های خاص و نانوپوشش‌ها.

تست‌های مخرب:

تست مخرب یعنی آزمایشی که در آن قطعه تحت بار یا شرایطی قرار می‌گیرد که در نهایت باعث تغییر شکل دائمی یا شکست آن می‌شود. در نتیجه قطعه پس از تست قابل استفاده نیست. این تست‌ها برای بررسی خواص مکانیکی، فیزیکی و متالورژیکی مواد استفاده می‌شوند.

از مهم‌ترین تست‌های مخرب: کشش- سختی- ضربه- خمش- خستگی- خزش- سختی پذیری- متالوگرافی.

زیر مجموعه‌های گرایش ساخت و تولید که بررسی شدند از بخش‌های مهم و کاربردی در این رشته به حساب می‌آیند؛ اما بدین معنی نیست که این گرایش صرفاً در این بخش‌ها محدود می‌شوند. بر همین اساس خود اساتید و دانشجویان دانشگاه تبریز در بخش‌های دیگر نیز فعالیت و تحقیقات انجام داده و به جامعه علمی و دانشگاهی خدمات بسزایی ارائه می‌دهند. اما در پایان سخن قابل ذکر است که اساتید و دانشجویان در زیر مجموعه‌های یاد شده محدود نشده و نخواهند شد؛ به قطع حوزه فعالیت هر فعال دانشگاهی در عرصه علم و عمل فراتر از این توصیه‌هاست.

اساتید فعال در گرایش ساخت و تولید**دکتر وحید پویافر**

زمینه‌های فعالیت:

- بخش شکل‌دهی
- بخش پوشش‌دهی
- بخش متالورژی نیمه جامد

مرتبه علمی: استادیار

**دکتر محمد زادشکویان**

زمینه‌های فعالیت:

- بخش شکل‌دهی سرد و گرم و تغییر شکل پلاستیک

مرتبه علمی: دانشیار

**دکتر محمدرضا شبگرد**

زمینه‌های فعالیت:

- بخش الکترو فیزیکال (EDM، LBM و EBM ...)

مرتبه علمی: استاد

**دکتر کریم شلش نژاد**

زمینه‌های فعالیت:

- بخش پلیمر

مرتبه علمی: استاد

**دکتر مقصود شلوندی**

زمینه‌های فعالیت:

- بخش ماشین‌کاری و اولتراسونیک
- بخش پوشش‌دهی

مرتبه علمی: استادیار

**دکتر مهران محبوب خواه**

زمینه‌های فعالیت:

- بخش پرینتر سه بعدی

مرتبه علمی: استاد

**دکتر امیر مصطفی پور اصل**

زمینه‌های فعالیت:

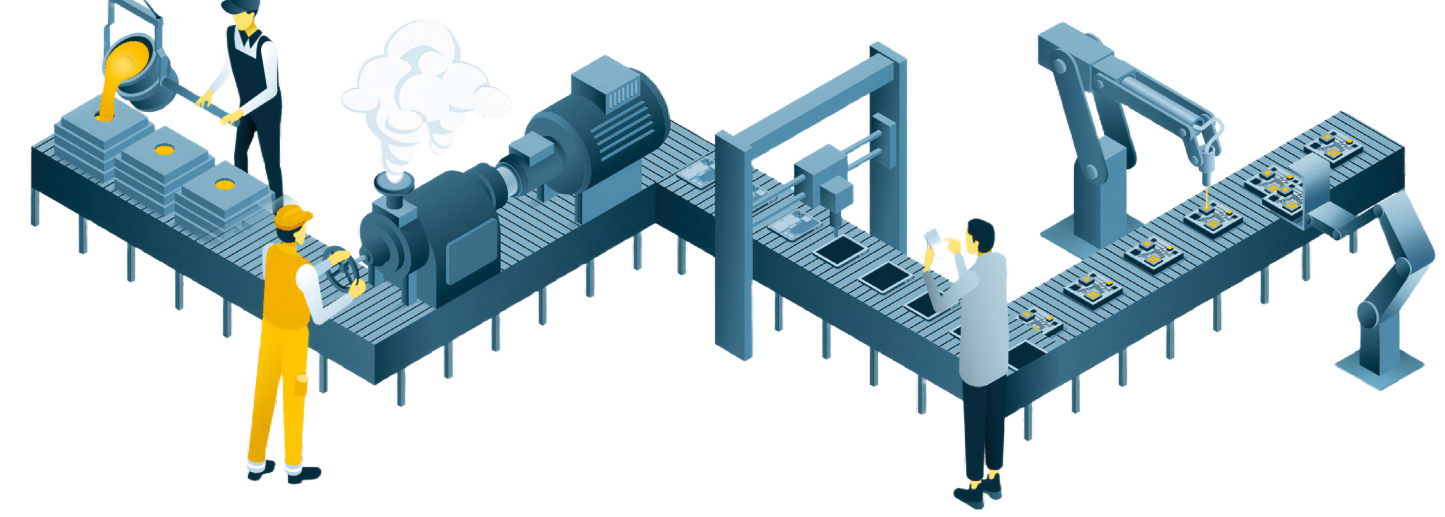
- بخش جوش‌کاری
- بخش پوشش‌دهی
- بخش تست‌های غیر مخرب

مرتبه علمی: استاد



آشنایی با روش های تولید

مهدی تقی یام
دانشجوی کارشناسی مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز



انواع مختلف عملیات ماشین کاری

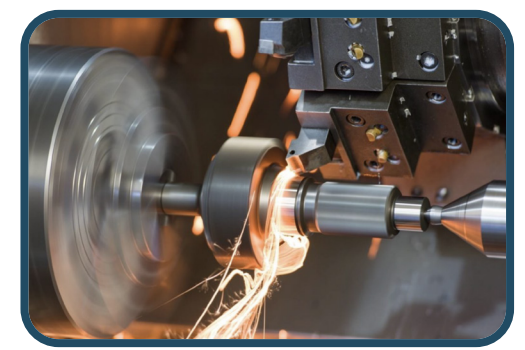
کاربرد گسترده ماشین کاری در صنعت منجر به توسعه فرآیندهای متنوعی شده است. در ادامه، به برخی از رایج ترین عملیات ماشین کاری اشاره می شود:

۱) فرزکاری^۵ و تراشکاری^۶: برای ایجاد سطوح تخت، شیار یا قطعات استوانه ای.



شکل ۹ فرزکاری و تراشکاری Figure 9

۲) سوراخ کاری^۷ و سوراخ تراشی^۸: برای ایجاد یا بهبود سوراخ ها با دقت بیشتر.



شکل ۸ Figure 8

فرآیندهای تولید، قلب تپنده صنعت و مهندسی ساخت به شمار می روند. شناخت این فرآیندها، از ماشین کاری سنتی گرفته تا روش های نوین مانند تولید افزایشی، برای طراحی، ساخت و بهینه سازی محصولات صنعتی ضروری است. در این متن، نگاهی جامع و دسته بندی شده به انواع روش های تولید خواهیم داشت.

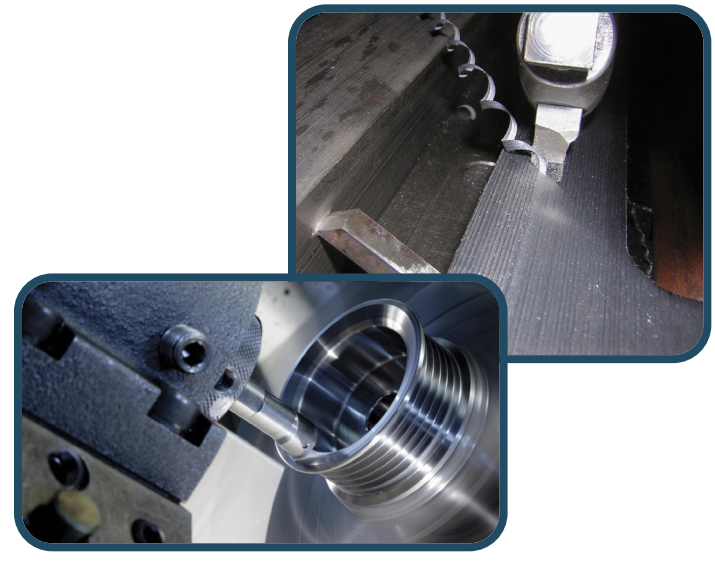
۱. ماشین کاری^۱

ماشین کاری، فرآیندی کاهشی است که در آن شکل مورد نظر با حذف بخش هایی از یک قطعه کار بزرگ تر به دست می آید. این حذف ماده معمولاً به صورت براده برداری انجام می شود. بیشتر روش های ماشین کاری از دقت بالایی برخوردارند و برای اغلب مواد مهندسی قابل استفاده هستند. امروزه اغلب ماشین کاری ها با دستگاه های CNC^۲ و به کمک فایل های CAD^۳/CAM^۴ انجام می شوند.

- ۱ Machining
- ۲ CNC: Computer Numerical Control
- ۳ CAD: Computer Aided Design
- ۴ CAM: Computer Aided Manufacturing

- ۵ Milling
- ۶ Turning
- ۷ Drilling
- ۸ Boring

۳ صفحه تراشی^۹: برای صاف کردن سطوح یا ایجاد شیارهای هم زمان.



شکل ۱۰ صفحه تراشی، سوراخ تراشی Figure 10

همچنین، روش هایی مانند برش لیزری^{۱۰}، واتر جت^{۱۱}، پلاسما^{۱۲}، سوخت گازی^{۱۳} و ماشین کاری جرقه ای (EDM)^{۱۴} نیز وجود دارند که بدون تماس مستقیم با قطعه، عملیات برش یا شکل دهی را انجام می دهند و برای مواد سخت یا اشکال پیچیده کاربرد دارند.

مزایا ماشین کاری:

◀ دقت بالا، قابلیت پردازش انواع مواد، کیفیت یکنواخت و امکان اتوماسیون.

معایب ماشین کاری:

◀ هزینه ی اولیه ی بالا، نیاز به اپراتور ماهر، تولید ضایعات نسبتاً زیاد ماشین کاری در اکثر صنایع کاربرد گسترده ای دارد. از جمله کاربردهای مهم ماشین کاری می توان به ساخت قالب های صنعتی اشاره کرد که نیازمند دقت بالا و کیفیت سطحی مناسب هستند. همچنین، به عنوان عملیات ثانویه برای بهبود صافی و دقت سطح نیز به کار می رود.

۲. ریخته گری^{۱۵}



شکل ۱۱ Figure 11

ریخته گری فرایندی قدیمی است که در آن مواد مذاب در قالب هایی با شکل دلخواه ریخته می شود و پس از سرد شدن، به

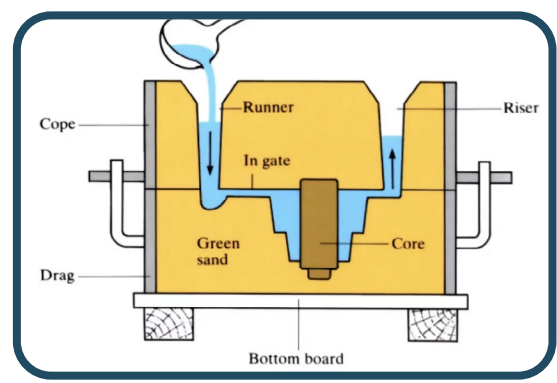
- ۹ Planing
- ۱۰ Laser cutting
- ۱۱ Waterjet cutting
- ۱۲ Plasma cutting
- ۱۳ Oxy-fuel cutting
- ۱۴ EDM: Electric Discharge Machining
- ۱۵ Casting

شکل جامد درمی آید. تولیدکنندگان از ریخته گری برای ساخت قطعات پیچیده و دقیق استفاده می کنند. همچنین این فرایند، با وجود سرمایه گذاری اولیه، باعث کاهش زمان تولید و هزینه های جاری در فرآیند ساخت می شود و مونتاژ را ساده می کند؛ اساساً قطعه از قالب آماده خارج می شود. بنابراین می تواند برای تولید انبوه مناسب باشد.

انواع ریخته گری

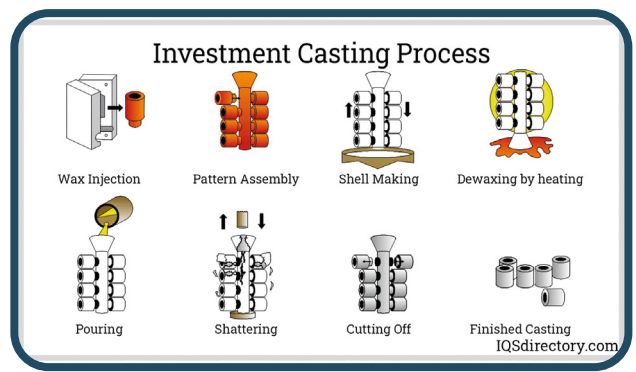
در منابع فنی، حدود ۱۴ نوع اصلی ریخته گری معرفی شده است که به محبوب ترین آن ها اشاره می کنیم:

۱) ریخته گری ماسه ای^{۱۶}: با قالب هایی از ماسه فشرده، ارزان و پرباربرد؛ اما کیفیت سطح متوسط دارد.



شکل ۱۲ ریخته گری ماسه ای Figure 12

۲) ریخته گری دقیق^{۱۷} (مومی): با قالب سرامیکی و الگوی مومی؛ دقت و جزئیات بالا.



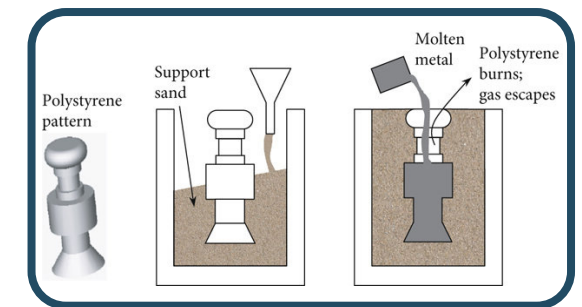
شکل ۱۳ ریخته گری دقیق Figure 13

۳) ریخته گری تحت فشار^{۱۸}: تزریق فلز مذاب به قالب فلزی با فشار بالا؛ مناسب تولید انبوه و قطعات دقیق.

۴) ریخته گری گریز از مرکز^{۱۹}: مناسب قطعات توخالی؛ ساختار یکنواخت تر با استحکام بالاتر.

- ۱۶ Sand Casting
- ۱۷ Investment Casting
- ۱۸ Die Casting
- ۱۹ Centrifugal Casting

۵ ریخته‌گری لاست فوم: الگوی فومی با قابلیت تبخیر در تماس با مذاب؛ قالب‌گیری ساده بدون نیاز به خروج الگو.



شکل ۱۴ ریخته‌گری لاست فوم Figure 14

مزایای ریخته‌گری

- امکان ساخت اشکال پیچیده و قطعات بزرگ یا کوچک
- استحکام بالا به‌دلیل کنترل فرآیند انجماد
- بازیافت‌پذیری بخشی از ضایعات

معایب ریخته‌گری

- هزینه و زمان بالای ساخت قالب‌های دائمی
- کیفیت سطح پایین در برخی روش‌ها
- احتمال بروز عیوب داخلی مانند تخلخل یا حبس گاز

ریخته‌گری در صنایع مختلفی به‌کار می‌رود که نیازمند تولید قطعات حجیم، پیچیده یا دارای شکل‌های خاص هستند. این روش همچنین به‌دلیل قابلیت ساخت قطعه در یک مرحله، گزینه‌ای مناسب برای تولید انبوه با صرفه‌جویی در زمان مونتاژ محسوب می‌شود.

۳. شکل‌دهی

شکل‌دهی یکی از فرآیندهای اصلی تولید است که در آن، ماده‌ی اولیه تحت تأثیر نیروهایی مانند فشار، کشش یا خمش، بدون افزودن یا حذف ماده، به شکل دلخواه در می‌آید. این فرآیند با ایجاد تغییر شکل پلاستیک در ماده، عمدتاً بر روی ورق‌های فلزی و مواد چکش‌خوار اجرا می‌شود.



شکل ۱۵ Figure 15

- ۱ Los Foam Casting
- ۲ Shaping

به‌دلیل تولید کم‌ضایعات، بهره‌وری بالا و بهبود خواص مکانیکی قطعه، شکل‌دهی نقش مهمی در صنایع گوناگون ایفا می‌کند.

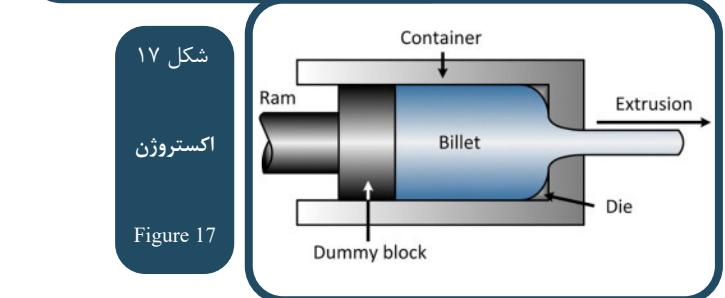
شکل‌دهی نیز بنا بر نیازهای به‌وجود آمده در صنعت، انواع متفاوتی دارد که به برخی از آن‌ها اشاره می‌کنیم:

۱ آهنگری: اعمال فشار شدید (معمولاً در حالت داغ) برای تولید قطعات مستحکم با ساختار یکنواخت.

۲ اکستروژن: عبور ماده از قالب برای تولید مقاطع یکنواخت؛ رایج در ساخت



شکل ۱۶ آهنگری Figure 16

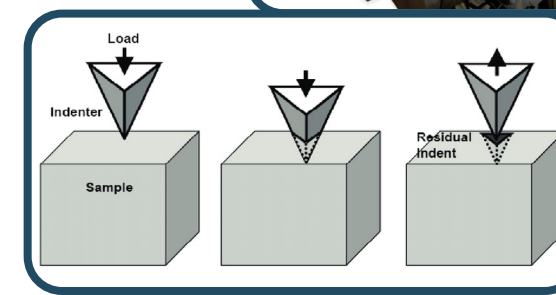


شکل ۱۷ اکستروژن Figure 17

۳ نورد: کاهش ضخامت و افزایش طول قطعه با عبور از بین غلتک‌ها؛ کاربردی در تولید ورق فولادی.

۴ فرورفتگی: ایجاد اثر دائمی با فشار ابزار نوک‌تیز یا شکل‌دار؛ برای سختی‌سنجی یا نشانه‌گذاری.

شکل ۱۸ نورد Figure 18



شکل ۱۹ فرورفتگی Figure 19

- ۳ Forging
- ۴ Extrusion
- ۵ Rolling
- ۶ Indentation

مزایای شکل‌دهی

- افزایش استحکام و ریزدانه شدن ساختار
- ضایعات بسیار کم نسبت به ماشین‌کاری
- مناسب برای تولید انبوه با سرعت بالا
- امکان ساخت قطعات با هندسه‌ی پیچیده بدون نیاز به ماشین‌کاری

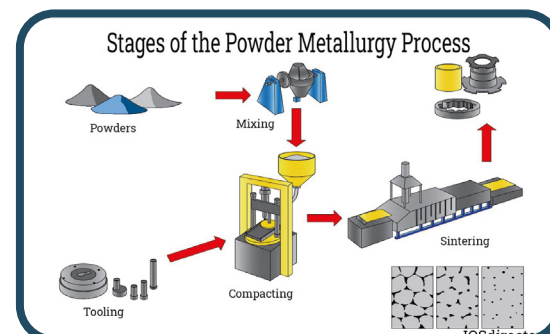
معایب شکل‌دهی

- هزینه بالای تجهیزات اولیه (پرس، قالب و...)
- محدودیت در شکل‌پذیری برخی مواد
- دشواری در کنترل تلرانس و برگشت فنری
- محدودیت در اعمال شکل‌دهی به قطعات ضخیم

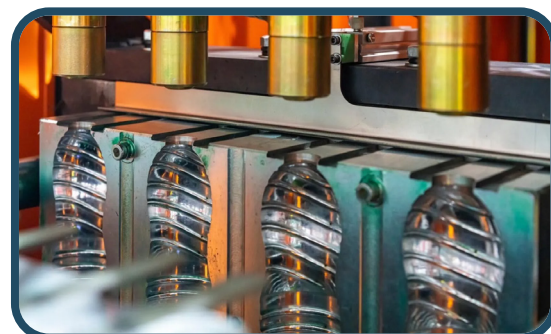
فرآیند شکل‌دهی در بسیاری از صنایع، از جمله خودروسازی، هوافضا و تولید قطعات الکترونیکی، به‌دلیل سرعت تولید و کاهش ضایعات، به‌طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۴. متالورژی پودر

در متالورژی پودر، فلزات پودر شده تحت فشار و حرارت به قطعات جامد تبدیل می‌شوند. این روش به‌دلیل سادگی نسبی، کاهش ضایعات و قابلیت بالای تولید انبوه، در صنایع مختلف جایگاه ویژه‌ای یافته است.



شکل ۲۰ مراحل متالورژی پودر Figure 20



شکل ۲۱ مراحل متالورژی پودر Figure 21

مزایای متالورژی پودر

- بازدهی بالا با ضایعات کمتر از ۳٪
- امکان کنترل دقیق خواص مکانیکی و فیزیکی
- تولید قطعات پیچیده و دقیق بدون نیاز به ماشین‌کاری
- کاهش نیاز به عملیات تکمیلی پس از تولید
- مناسب برای تولید انبوه با قابلیت اتوماسیون کامل

معایب متالورژی پودر

- محدودیت در اندازه‌ی قطعه (معمولاً کمتر از ۲۰ کیلوگرم)
- هزینه‌بر در تولید با تیراژ پایین
- چگالی غیر یکنواخت در قطعه، که ممکن است خواص مکانیکی را تحت تأثیر قرار دهد.

از متالورژی پودر در ساخت یاتاقان‌ها، چرخ‌دنده‌ها و قطعات کوچک در صنعت خودرو و همچنین در تولید قطعات دقیق، سبک و اقتصادی در صنایع هوافضا و پزشکی استفاده می‌شود.

۵. قالب‌گیری

قالب‌گیری یکی از روش‌های شکل‌دهی است که در آن، ماده‌ی خام با اعمال فشار به درون قالب هدایت شده و به شکل و ابعاد مورد نظر درمی‌آید.

تنوع در طراحی قالب‌ها، این فرآیند را به نقطه‌ی تلاقی صنعت و خلاقیت تبدیل کرده است و امکان تولید اشکال متنوع و خاص را فراهم می‌سازد. در این روش، بسته به نوع قطعه و کاربرد، می‌توان از طیف وسیعی از مواد استفاده کرد. با این حال، به‌دلیل سهولت فرآیند، هزینه‌ی پایین و تنوع بالا، قالب‌گیری عمدتاً برای مواد پلیمری و پلاستیکی مورد استفاده قرار می‌گیرد. قالب‌گیری روش‌های متعددی دارد که به برخی از آن‌ها اشاره می‌کنیم:

۱ قالب‌گیری تزریقی: ماده‌ی مذاب با فشار بالا به قالب تزریق می‌شود؛ مناسب برای تولید انبوه قطعات پیچیده و دقیق.

فرآیند متالورژی پودر را می‌توان به چهار مرحله‌ی اصلی تقسیم کرد:

۱ تولید پودر: پودر فلز با روش سنگ‌زنی، خرد کردن یا اتمیزه شدن^۸ تولید می‌شود.

مخلوط‌سازی: افزودنی‌هایی مانند روان‌ساز یا چسب به پودر اضافه می‌شوند.

۳ فشرده‌سازی: ترکیب پودری تحت فشار بالا در قالب شکل می‌گیرد.

۴ تف‌جوشی: قطعه‌ی فشرده‌شده در دمای بالا (کمتر از نقطه ذوب) حرارت داده می‌شود تا ذرات به هم متصل شوند.

۷ Powder Metallurgy

۸ اتمیزه شدن (Atomization): به فرآیند تبدیل فلز مذاب به ذرات ریز، اتمیزه شدن گویند.

۹ تف‌جوشی: نوعی عملیات حرارتی که پیوند دائمی بین ذرات فلز ایجاد می‌کند.

- ۱۰ Molding
- ۱۱ Injection Molding

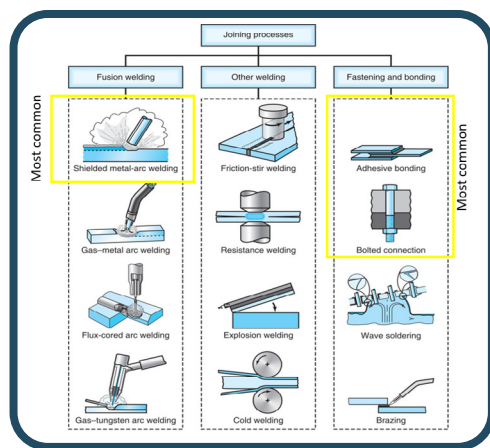


Figure 25

شکل ۲۵

۱ جوشکاری: اتصال فلزات با ذوب موضعی و گاه استفاده از

ماده‌ی پرکننده.

۲ پرچ کاری: اتصال مکانیکی با میخ پرچ؛ انواع سر پرچ‌ها شامل

سر تخت، گرد، خزینه‌ای و دکمه‌ای.

۳ چسب: اتصال شیمیایی بدون آسیب به قطعه؛ مناسب برای

برخی مواد.

۴ مهره، پیچ و واشر: اتصال مکانیکی قابل باز شدن؛ واشر از

آسیب و شل شدن جلوگیری می‌کند.

روش‌های اتصال، بسته به نوع ماده، کاربرد مورد نظر و شرایط عملکردی

انتخاب می‌شوند. در بسیاری از محصولات صنعتی، ترکیبی از این روش‌ها

برای رسیدن به استحکام، پایداری و سهولت در تعمیرات به کار می‌رود.

در نهایت، روش‌های تولید متنوع هر کدام با مزایا و محدودیت‌های خاص

خود، جایگاه مهمی در صنعت دارند و انتخاب صحیح آن‌ها بر اساس نوع

محصول، حجم تولید و دقت مورد نیاز، تاثیر مستقیم بر کیفیت و هزینه

نهایی خواهد داشت. با پیشرفت فناوری‌ها، ترکیب این روش‌ها و بهره‌گیری

از نوآوری‌ها، امکان تولید قطعات پیچیده و با دقت بالا بیشتر شده است.

اما سوال این است: چگونه محصولاتی با دقت و پیچیدگی بسیار بالا،

مانند گوی‌های دقیق، ساخته می‌شوند؟

منابع

- [1] 3ERP – What is Machining? <https://www.3erp.com/...>
- [2] TechniWaterjet – Machining Processes <https://www.techniwaterjet.com/...>
- [3] Xometry – What is Casting? <https://www.xometry.com/...>
- [4] RapidDirect – What is Casting? <https://www.rapiddirect.com/...>
- [5] Dassault – Forming Guide <https://www.3ds.com/...>
- [6] AlphaPrecision – Powder Metallurgy <https://www.alphaprecision-pm.com/...>
- [7] 3ERP – Molding <https://www.3erp.com/blog/molding/>
- [8] MinaPrem – Joining <https://www.minaprem.com/joining/>

۲ رسوب گذاری با انرژی متمرکز: ذوب سیم یا پودر فلزی با منبع

انرژی متمرکز؛ کاربرد در ترمیم قطعات فلزی.

۳ اکستروژن مواد: ذوب و لایه گذاری فیلامنت پلاستیکی؛ رایج ترین

روش در چاپگرهای خانگی.

۴ لمینت ورق: اتصال ورق‌های نازک به صورت لایه لایه با چسب،

حرارت یا ارتعاش؛ قابل استفاده برای فلز، پلاستیک یا کامپوزیت.

۵ همجوشی بستر پودری: ذوب پودر با لیزر یا پرتو الکترونی؛ برای

ساخت قطعات فلزی یا پلیمری دقیق.

مزایای تولید افزایشی

◀ نمونه سازی سریع و کم هزینه

◀ تولید ضایعات بسیار کم

◀ مصرف انرژی کمتر نسبت به روش‌های سنتی

◀ سازگاری بیشتر با محیط زیست

◀ امکان ساخت قطعات با شکل‌های پیچیده و خاص

معایب تولید افزایشی

◀ محدودیت در تنوع مواد اولیه

◀ هزینه نسبتاً بالا برای مواد و دستگاه‌ها

◀ سرعت پایین در تولید انبوه

در صنعت، تولید افزودنی به منظور ساخت قطعات پیچیده، سبک وزن،

سفارشی و نمونه‌های اولیه در حوزه‌های هوافضا، پزشکی، خودروسازی و

مهندسی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۷. اتصالات^{۱۰}

ساخت مستقیم محصولات پیچیده، هم از نظر فنی دشوار و هم از نظر

اقتصادی پرهزینه است. در چنین شرایطی، تولید قطعات کوچک تر و اتصال

آن‌ها به یکدیگر به عنوان راهکاری منطقی و رایج در نظر گرفته می‌شود.

در تولید، فرایند اتصال به معنای مونتاژ دو یا چند قطعه برای تشکیل

یک ساختار یکپارچه است. اتصالات به طور کلی به دو دسته‌ی موقت و دائمی

تقسیم می‌شوند:

۱ اتصالات موقت امکان جداسازی قطعات بدون آسیب به آن‌ها را

فراهم می‌کنند.

۲ اتصالات دائمی در هنگام جداسازی به قطعات آسیب می‌زنند.

برخی از روش‌های رایج اتصال در صنعت به شرح زیر هستند:

- ۶ Direct Energy Deposition
- ۷ Material Extrusion
- ۸ Sheet Lamination
- ۹ Powder Bed Fusion
- ۱۰ Joining

ریخته‌گری	قالب‌گیری	
ریختن ماده مذاب در قالب و جامد شدن آن	شکل‌دهی ماده در قالب با اعمال فشار	نحوه انجام فرایند
مایع (اغلب فلز مذاب)	معمولاً جامد یا نیمه جامد (پودر، گرانول)	حالت ماده در آغاز
پایین تر (نسبت به قالب‌گیری)	بالا	دقت جزئیات
مناسب برای تولید قطعات با ابعاد بزرگ یا پیچیده	مقرون به صرفه برای تولید انبوه	مقیاس اقتصادی
عمدتاً فلزات، گاهی پلیمرهای تخصصی	عمدتاً مواد پلیمری، برخی فلزات	جنس مورد استفاده

در صنعت، فرآیند قالب‌گیری به منظور تولید اجزایی مانند قطعات موتور

با مقاومت حرارتی بالا، قطعات سبک وزن و بادوام و سایر محصولات مهندسی

مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۶. تولید افزایشی^۴

فناوری تولید افزایشی، چاپ سه بعدی، فرآیندی است که برخلاف

ماشین کاری، با افزودن مواد به صورت لایه لایه انجام می‌شود. این روش به

دلیل کارآمدی و هزینه کمتر نسبت به بسیاری از روش‌های سنتی تولید،

معمولاً برای ساخت نمونه‌های اولیه یا تولید در مقیاس محدود مورد استفاده

قرار می‌گیرد.

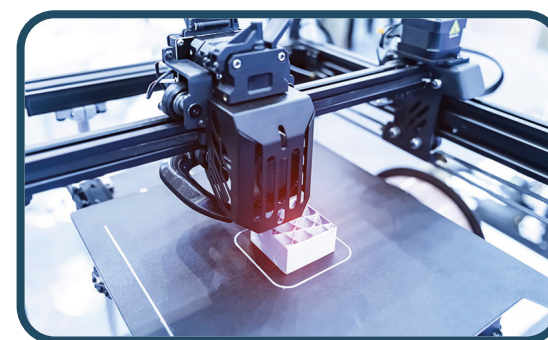


Figure 24

شکل ۲۴

در این فرآیند، ابتدا یک مدل سه بعدی به صورت دیجیتال طراحی

می‌شود. سپس مدل به لایه‌های نازک تقسیم شده و چاپگر، ماده‌ی اولیه را

به صورت لایه لایه روی یکدیگر قرار می‌دهد تا شکل نهایی قطعه ایجاد شود.

در پایان، قطعه از بستر ساخت جدا می‌گردد.

تولید افزایشی دارای انواع مختلفی است که در ادامه به برخی از آن‌ها

اشاره شده است:

۱ بایندر جتینگ^۵: اتصال ذرات پودر با چسب مایع؛ مناسب قطعات

سبک و رنگی.

- ۴ Additive Manufacturing
- ۵ Binder Jetting

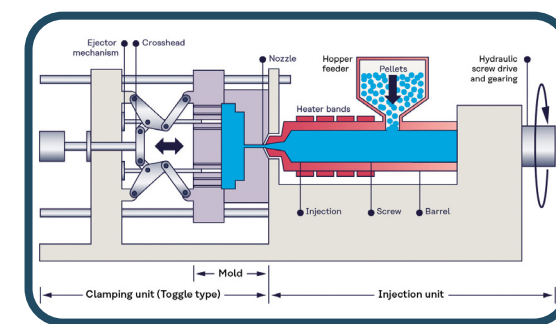


Figure 21

قالب‌گیری تزریقی

شکل ۲۱

۲ قالب‌گیری تزریقی واکنشی^۱: مواد مایع واکنش پذیر در قالب

تزریق شده و پس از واکنش، سخت می‌شوند؛ مناسب قطعات سبک و

مستحکم.

۳ قالب‌گیری بادی^۲: مخصوص تولید قطعات توخالی مانند بطری؛

با دمیدن هوا به درون ماده‌ی گرم شده شکل نهایی حاصل می‌شود.

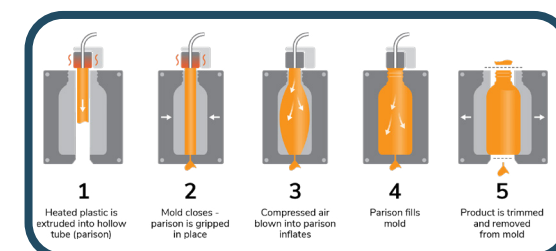


Figure 22

قالب‌گیری بادی

شکل ۲۲

۴ قالب‌گیری فشاری^۳: ماده‌ی گرم شده در قالب قرار گرفته و با

اعمال فشار شکل می‌گیرد؛ مناسب قطعات ساده و حجیم با هزینه پایین.

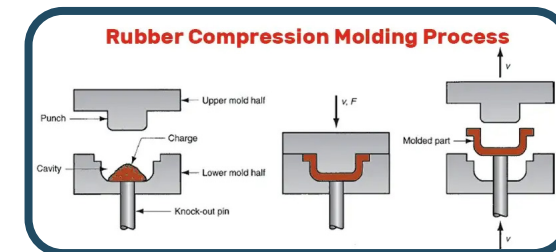


Figure 23

قالب‌گیری فشاری

شکل ۲۳

تفاوت ریخته‌گری و قالب‌گیری

در دنیای تولید، اصطلاحات «ریخته‌گری» و «قالب‌گیری» گاهی به جای

یکدیگر به کار می‌روند، اما در واقع این دو، فرآیندهایی متمایز با اصول اجرایی

و کاربردهای متفاوت هستند. در جدول زیر، برخی از تفاوت‌های کلیدی

میان این دو روش ارائه شده است:

- ۱ Reaction Injection Molding
- ۲ Blow Molding
- ۳ Compression Molding

چرنوبیل

روایت یک فاجعه مهندسی

آریا اقبال عنصرودی

دانشجوی کارشناسی مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز



نیروگاه هسته‌ای چرنوبیل در نزدیکی شهر پریپیات، در منطقه‌ای به نام چرنوبیل واقع شده است؛ شهری کوچک که در گذشته، یکی از نمادهای پیشرفت و زندگی مدرن در اتحاد جماهیر شوروی محسوب می‌شد. پریپیات، شهری با جمعیتی در حدود ۴۴,۰۰۰ نفر بود که بیشتر ساکنان آن را کارکنان، مهندسان، دانشمندان، کارگران و سایر نیروهای

شاغل در نیروگاه چرنوبیل و نهادهای وابسته تشکیل می‌دادند. این شهر مانند بسیاری از شهرهای برنامه‌ریزی‌شده شوروی، از زیرساخت‌های کامل شهری همچون مدارس، بیمارستان‌ها، رستوران‌ها، فروشگاه‌ها، ادارات دولتی و مراکز تفریحی برخوردار بود و نمادی از آرمان شهر صنعتی سوسیالیستی به‌شمار می‌رفت.

اما پس از فاجعه‌ی هسته‌ای ۲۶

آوریل ۱۹۸۶، حیات اجتماعی و اقتصادی شهر به‌طور کامل متوقف شد. ساکنان شهر، تنها چند ساعت پس از وقوع انفجار، به‌طور اضطراری تخلیه شدند و از آن زمان تاکنون، دیگر هیچ‌گاه اجازه‌ی بازگشت دائمی به آن داده نشده است. پریپیات، که زمانی پر از زندگی، نور و جنب‌وجوش بود، به شهری متروکه و خاموش بدل شد.



Figure 26

شکل ۲۶

امروزه، پس از گذشت بیش از سه دهه از آن حادثه‌ی فاجعه‌بار، این منطقه به سکونت‌گاه پرندگان، سگ‌های وحشی و برخی جانداران کوچک دیگر تبدیل شده است. هیچ اثری از حضور انسان، به‌جز نشانه‌هایی خاموش از گذشته، در آن به چشم نمی‌خورد؛ چراکه عامل اصلی تداوم زندگی، امنیت زیستی، در این منطقه برای قرن‌ها از بین رفته است.

حادثه‌ی چرنوبیل، که از آن به‌عنوان بزرگ‌ترین و مرگبارترین فاجعه‌ی اتمی غیرنظامی جهان یاد می‌شود، در نخستین ساعات بامداد روز ۲۶ آوریل ۱۹۸۶ میلادی رخ داد؛ در شبی که ساکنان منطقه در آرامش به خواب رفته بودند، بی‌آن‌که تصور کنند به‌زودی ناگزیر خواهند شد خانه و کاشانه‌ی خود را برای همیشه ترک کنند. این فاجعه در ساعت ۱۲:۰۴ بامداد آغاز شد.

در آن زمان، کارکنان نیروگاه چرنوبیل مشغول اجرای آزمایشی بودند که هدف آن ارزیابی عملکرد میله‌های کنترل‌کننده‌ی راکتور شماره چهار و بررسی توانایی تولید برق در شرایط خاصی از کارکرد راکتور، به‌ویژه در سطح توان حدود ۷۰۰ مگاوات حرارتی، بود. این آزمایش بخشی از برنامه‌ای بود که به‌دستور مقامات عالی‌رتبه‌ی اتحاد جماهیر شوروی برنامه‌ریزی

شده و در چهارچوب ارزیابی ایمنی و بهره‌برداری اضطراری از نیروگاه اجرا می‌شد.

نظارت بر این عملیات به‌عهده‌ی مدیر نیروگاه، ویکتور بریوخانوف (Victor Bryukhanov)، بنیان‌گذار و مسئول ارشد اجرایی نیروگاه چرنوبیل، قرار داشت. انتظار می‌رفت در صورت موفقیت‌آمیز بودن آزمایش، از عملکرد تیم مدیریتی و فنی تقدیر شود. مسئولیت مستقیم اجرای این آزمون نیز به رئیس بخش فنی و آزمایش راکتور، آقای آناتولی دیاتلوف (Anatoly Dyatlov)، سپرده شده بود.

در آن ساعت، کارکنان نیروگاه گزارش دادند که توان راکتور دیگر افزایش نمی‌یابد و در سطح بسیار پایینی باقی مانده است. با این حال، به‌دستور ویکتور بریوخانوف، مدیر نیروگاه، که تحت فشار مقامات بالادستی قرار داشت و همچنین انگیزه‌هایی برای موفق جلوه دادن آزمایش داشت، تصمیم گرفته شد برای افزایش توان خروجی، میله‌های کنترل‌کننده راکتور (یا به‌عبارت دقیق‌تر، میله‌های کندکننده‌ی نوترون) به‌طور گسترده از قلب راکتور خارج شوند.

گرچه تعدادی از اپراتورها نسبت به خطرناک بودن این اقدام ابراز تردید کرده بودند، اما به‌دلیل فشار سازمانی و دستورات مستقیم، ناگزیر شدند این دستور را اجرا کنند. به‌دنبال این اقدام، در ساعت ۱۲:۵۴ بامداد، توان حرارتی راکتور شماره چهار به سطح ۷۰۰ مگاوات رسید و ظاهراً هدف آزمایش تحقق یافت. اما شرایط ناپایدار ادامه پیدا کرد.



Figure 27 Control Room of Chernobyl Nuclear Power Plant

شکل ۲۷

در ساعت ۱:۲۳ بامداد، به‌طور ناگهانی فشار بخار در قلب راکتور افزایش یافت و سامانه از وضعیت پایدار خارج شد. برای بازگرداندن شرایط به حالت عادی، کارکنان سعی کردند با فعال‌سازی سیستم خاموش‌سازی اضطراری، موسوم به AZ-5، میله‌های کنترل را مجدداً وارد راکتور کنند. اما این اقدام، به‌جای کاهش فوری توان، به‌دلیل طراحی معیوب میله‌ها و تأخیر در عملکرد، موجب تشدید ناپایداری شد.

لحظاتی بعد، انفجار عظیمی در راکتور رخ داد. این انفجار نه تنها سقف ۱۲۰۰ تنی راکتور را به بیرون پرتاب کرد، بلکه باعث پخش گسترده‌ی مواد رادیواکتیو در جو شد. در اتاق کنترل، کارکنان در ابتدا تصور می‌کردند با یک انفجار معمولی مواجه شده‌اند و از ماهیت فاجعه‌آمیز حادثه آگاه نبودند.

در همان دقایق اولیه، دزیمتری‌ها (ابزارهای اندازه‌گیری پرتو) عدد ۳,۶ رونتگن را نشان دادند که حداکثر ظرفیت سنجش این دستگاه‌ها بود. آن‌ها نمی‌دانستند که میزان واقعی پرتوها بسیار بیشتر از این مقدار است. راکتور، به‌طور کامل از هم پاشیده بود و حجم عظیمی از گازهای سمی، ذرات اورانیوم، گرافیت، ایزوتوپ‌های رادیواکتیو و گرد و غبار آلوده به عناصر سنگین در حال پراکنده شدن در جو و آلوده‌سازی مناطق اطراف بودند؛ فرایندی بی‌صدا و مرگبار.

در ساعت ۲:۰۰ بامداد، اپراتورهای نیروگاه متوجه شعله‌های آتش در بخش فوقانی راکتور شماره چهار شدند و موضوع را فوراً به واحد آتش‌نشانی و نیروهای عملیاتی حاضر در محل گزارش دادند. شعله‌هایی که از سقف راکتور به آسمان زبانه می‌کشید، نشان از فاجعه‌ای داشت که ابعاد آن هنوز برای هیچ‌کس به‌درستی روشن نبود.

آناتولی دیاتلوف، معاون مهندسی و مسئول شیفت شب، از شنیدن این خبر به‌شدت نگران شد؛ چراکه حتی کوچک‌ترین اختلال، می‌توانست مانعی برای دستیابی به اهداف سیاسی و افتخارات مورد انتظار او و مدیر نیروگاه، ویکتور بریوخانوف، باشد. با این حال، هیچ‌کدام از آن‌ها نمی‌دانستند که این رویداد نه‌تنها مسیر شغلی، بلکه تمام زندگی آن‌ها را برای همیشه تغییر خواهد داد.

در ساعت ۲:۴۰ بامداد، ویکتور بریوخانوف از وخامت اوضاع مطلع شد.

با رسیدن خبر به مقامات بلندپایه‌ی حزب کمونیست و دولت شوروی، تصمیم گرفته شد کمیسیونی اضطراری برای ارزیابی شدت و پیامدهای این حادثه تشکیل شود و اعضای آن به سرعت راهی چرنوبیل شدند تا از نزدیک وضعیت نیروگاه را بررسی کنند.

تا ساعت ۶:۱۵ صبح، اغلب مدیران ارشد، مقامات محلی و اعضای کمیسیون در نیروگاه حضور یافتند تا گزارش‌های اولیه را دریافت کنند. برای ارزیابی دقیق میزان تشعشعات رادیواکتیو، یک کارشناس فنی به‌طور خاص مأمور شد تا سطح پرتوایی را در اطراف راکتور اندازه‌گیری کند.

گزارش او همه‌ی حاضران را شوکه کرد: دستگاه‌های دقیق‌تر نشان دادند که میزان تشعشعات نه ۳,۶ رونتگن، بلکه حدود ۱۵,۰۰۰ رونتگن بر ساعت است، رقمی که به‌مراتب فراتر از حد مرگبار برای انسان محسوب می‌شود. چنین میزانی از پرتوگیری، حتی از تابش‌های لحظه‌ای بمباران اتمی هیروشیما نیز در برخی نقاط بالاتر بود.

این فرد، که بدون تجهیزات ایمنی کافی به محل اعزام شده بود، پس از مدت کوتاهی دچار علائم شدید سندرم حاد پرتوی شد؛ از جمله تورم زبان، سوختگی‌های پوستی و علائم عصبی. چند ساعت بعد، او جان خود را از دست داد. به‌دلیل شدت آلودگی بدنش، جسد وی برای مدت‌ها اجازه‌ی خروج از محوطه را پیدا نکرد.

در همین زمان، ویکتور بریوخانوف با هدف حفظ ظاهر و کاهش واکنش اضطراری مقامات مرکزی، گزارشی نادرست به مسکو مخابره کرد که در آن، میزان تشعشعات «ناچیز» و در حدود ۳,۶ رونتگن اعلام شده بود. این گزارش، موجب شد اعضای کمیسیون با تأخیر و بدون آمادگی لازم وارد منطقه شوند و اقدامات اولیه برای مهار بحران، با کندی و بی‌برنامگی همراه شود.

با وجود ورود کمیسیون بررسی به محل، واکنش مؤثری از سوی اعضای آن مشاهده نشد و اقدامات فوری لازم برای مهار بحران انجام نگرفت. در این شرایط، مسئولیت اخلاقی و فنی مقابله با پیامدهای فاجعه بر دوش کارکنان نیروگاه افتاد. از میان آن‌ها، دست‌کم ۱۷۴ نفر که در زمان حادثه در داخل محوطه‌ی نیروگاه حضور داشتند، خود را در قبال آنچه رخ داده بود، مسئول می‌دانستند.

بسیاری از این کارکنان معتقد بودند که خطوط لوله‌ی سیستم خنک‌کننده منفجر شده‌اند و دمای قلب راکتور به‌طرز نگران‌کننده‌ای افزایش یافته است. آنان، در حالی که از شدت تشعشعات و احتمال مرگ قریب‌الوقوع خود آگاه بودند، همچنان به‌کار خود ادامه دادند، زیرا می‌دانستند که شهر پریبیات با جمعیتی حدود ۴۴,۰۰۰ نفر، که عمدتاً شامل خانواده‌ها و عزیزانشان بود، در معرض فاجعه‌ای خاموش قرار دارد.

با این احساس مسئولیت، بسیاری از آنان به‌طور داوطلبانه تلاش کردند شیرهای دستی سامانه‌های اضطراری خنک‌کننده را باز کنند تا شاید بتوانند دمای راکتور را کاهش دهند. این در حالی بود که راکتور دیگر ساختار مشخص و پایداری نداشت؛ تخریب کامل درونی آن باعث شده بود حتی واژه‌ی «راکتور» نیز برای توصیف آن کافی نباشد.

اعضای کمیسیون به‌خوبی می‌دانستند که سامانه‌های لوله‌کشی، زیر لایه‌های ضخیم بتنی و در میان انبوهی از آلودگی‌های رادیواکتیو، کاملاً نابود شده‌اند. هر کسی که برای بازرسی به محل راکتور نزدیک می‌شد، در معرض دوزهای کشنده‌ی پرتو قرار می‌گرفت و معمولاً پس از چند ساعت، با علائم حاد تشعشع مانند تورم شدید زبان، سوختگی‌های پوستی و نارسایی اندام‌ها، جان می‌سپرد.

سرانجام در ۲۷ آوریل ۱۹۸۶، مقامات، پس از درک ابعاد فاجعه و بیم از افزایش تلفات، تصمیم به تخلیه‌ی شهر پریبیات گرفتند. بیش از ۱,۰۰۰ اتوبوس به‌سوی شهری فرستاده شد که ساکنان آن هنوز نمی‌دانستند تنها سه کیلومتر دورتر از خانه‌هایشان چه فاجعه‌ای در حال رخ دادن است. هدف مقامات، جلوگیری از ایجاد وحشت عمومی و کنترل اطلاعات بود؛ از این‌رو، اطلاع‌رسانی به حداقل ممکن محدود شد.

هزاران کودک، زن و مرد، بی‌خبر از حجم عظیم ذرات رادیواکتیو در حال جذب توسط بدن‌هایشان، در روزهای اولیه‌ی حادثه در معرض دوزهای بالای تشعشع قرار گرفتند. به آن‌ها گفته شد که تنها برای چند روز از شهر خارج می‌شوند و به‌زودی بازخواهند گشت، وعده‌ای که هرگز عملی نشد. در روزهای بعد، تمام نواحی مسکونی در شعاع ۳۰ کیلومتری نیروگاه، شامل ده‌ها شهرک و روستا، به‌طور کامل تخلیه و به منطقه‌ی موسوم به «منطقه ممنوعه» تبدیل شدند. این عملیات، حدود ۱۳۰,۰۰۰ نفر را دربر گرفت که هیچ‌گاه به خانه‌های خود بازنگشتند. افزون بر این، حدود ۳۰,۰۰۰ هکتار زمین کشاورزی، جنگل و نواحی مسکونی در اوکراین و بلاروس تحت قرنطینه‌ی دائمی قرار گرفت.

به‌گفته ایگور کاستین، عکاس و خبرنگار روزنامه‌ی نووستی، که در روزهای نخست پس از انفجار چندین نوبت با هلیکوپتر بر فراز نیروگاه چرنوبیل پرواز کرده و از محل حادثه عکاسی کرده بود، پس از ظاهر کردن عکس‌ها متوجه شد که اکثر تصاویر تیره و مات شده‌اند. او بعدها گزارش داد که شدت تشعشعات در محل چنان بالا بوده که امولسیون فیلم‌های دوربین‌های آنالوگ را تخریب کرده و باعث سوختن نگاتیوها شده بود، نشانه‌ای از میزان بالای پرتوایی محیط در همان ساعات نخست.

با این وجود، هیچ‌گونه اطلاع‌رسانی گسترده و شفاف‌ی از سوی دولت صورت نگرفت. تنها در گوشه‌ای از یکی از شماره‌های روزنامه‌ی پراودا، خبر حادثه با لحنی کم‌اهمیت منتشر شد و عنوان شد که «وضعیت تحت کنترل



شکل ۲۸ Valery Legasov

است و جای نگرانی نیست». در همان حال، ابرهای آلوده به ذرات رادیواکتیو، که حاوی ایزوتوپ‌هایی چون سزیم-۱۳۷، ید-۱۳۱ و استرونیسم-۹۰ بودند، به سمت غرب و جنوب اروپا حرکت می‌کردند. بارندگی‌هایی که به‌دنبال آن‌ها در کشورهای مختلف از جمله جنوب فرانسه رخ داد، این مواد را با خود به زمین کشاند و باعث آلودگی وسیع مراتع و منابع طبیعی شد.

در همین زمان، والری لگاسوف، شیمی‌دان برجسته و عضو آکادمی علوم شوروی که به‌عنوان مشاور ارشد علمی کمیسیون بررسی فاجعه منصوب شده بود، در شب سوم حادثه، با ارائه‌ی گزارشی صریح و شفاف به مقامات، آن‌ها را وادار کرد که هرچه سریع‌تر عملیات مهار و پاک‌سازی را آغاز کنند. او همان شب جلسه‌ای اضطراری با جمعی از دانشمندان تشکیل داد تا راه‌حلی برای جلوگیری از تشدید فاجعه بیابد.

یکی از پیشنهادهای اولیه‌ی این گروه، ریختن مقادیر زیادی سرب در داخل هسته‌ی تخریب‌شده‌ی راکتور بود؛ زیرا سرب خاصیت جذب پرتوهای یون‌ساز را دارد و می‌توانست جلوی پراکندگی بیشتر تشعشعات را بگیرد. با این حال، لگاسوف این گزینه را رد کرد. او هشدار داد که تماس سرب با آب موجود در زیر راکتور می‌تواند موجب افزایش دمای بیش از حد و در نتیجه انفجاری دوم شود، انفجاری به‌مراتب قوی‌تر از انفجار اول، که می‌توانست نه‌تنها منطقه‌ی چرنوبیل، بلکه بخش‌های وسیعی از اتحاد جماهیر شوروی و اروپای شرقی را تحت تأثیر قرار دهد و جان میلیون‌ها نفر را به خطر اندازد. در نهایت، لگاسوف تصمیم گرفت که به‌جای سرب، از ترکیبی شامل شن، ماسه، خاک رس، بور و دولومیت استفاده شود و این مواد از طریق پرتاب هوایی بر روی راکتور فروریزخته‌شده ریخته شود. این مواد می‌توانستند به‌طور مؤثرتری دما را کنترل کنند، واکنشی با آب نشان ندهند و بخشی از واکنش‌های زنجیره‌ای را نیز متوقف سازند. این اقدام، سرآغاز چیزی شد که بعدها با عنوان «نبرد چرنوبیل» شناخته شد؛ نبردی که نه با دشمنی مشخص، بلکه با نیرویی نامرئی، خاموش و مرگبار ادامه یافت و شاید هنوز هم پایان نیافته باشد.

برای اجرای عملیات مهار راکتور آسیب‌دیده، بیش از ۶۰۰ خلبان نظامی داوطلب شدند، خلبانانی که می‌دانستند پرواز بر فراز راکتور احتمالاً به بهای جان‌شان تمام خواهد شد. مأموریت آن‌ها این بود که از فاصله‌ای حدود ۱۰۰ متری، کیسه‌هایی به وزن تقریبی ۸۰ کیلوگرم شامل شن، ماسه، سرب، دولومیت و بور را مستقیماً بر روی راکتور فروریزخته‌شده پرتاب کنند. به‌دلیل



شکل ۲۹ Figure 29

شدت تشعشع، هر خلبان تنها می‌توانست یک پرواز کوتاه و پرتاب یک کیسه را انجام دهد.

علاوه بر خلبانان، ده‌ها سرباز و نیروی پشتیبانی نیز در هلیکوپترها حضور داشتند تا کیسه‌ها را آماده‌سازی و تخلیه کنند. در روز نخست حادثه، حدود ۱۱۰ پرواز انجام شد و این تعداد تا روز سوم به بیش از ۳۰۰ پرواز در روز افزایش یافت. در مجموع، طی روزهای

ابتدایی، بیش از ۴,۰۰۰ سورتی پرواز^۱ بر فراز نیروگاه چرنوبیل صورت گرفت؛ اقدامی بی‌سابقه که به بهای جان و سلامت ده‌ها تن از نیروهای شرکت‌کننده انجام شد.

با این حال، نگرانی اصلی دانشمندان و مهندسان حاضر در محل، نه فقط تشعشع هوایی، بلکه افزایش دمای هسته‌ی مذاب و احتمال نفوذ آن به لایه‌های زیرین زمین بود. اگر مواد مذاب رادیواکتیو، شامل حدود ۱۹۵ کیلوگرم اورانیوم و ترکیبات دیگر، به مخازن آب زیرزمینی یا حوضچه‌های خنک‌کننده زیر راکتور نفوذ می‌کردند، برخورد آن با آب می‌توانست منجر به انفجار حرارتی عظیمی شود که هزاران برابر شدیدتر از بمباران هیروشیما برآورد شده بود. چنین انفجاری می‌توانست نه‌تنها منطقه چرنوبیل، بلکه شعاعی به گستردگی چندین هزار کیلومتر مربع را برای قرن‌ها غیرقابل سکونت سازد.

برای جلوگیری از این سناریوی فاجعه‌بار، تصمیم گرفته شد که آب حوضچه‌های خنک‌کننده‌ی زیر راکتور به‌سرعت تخلیه شود. در عملیاتی شجاعانه و بی‌سابقه، سه کارمند نیروگاه، آلکسی آنانکو، والری بزالوف و بوریس بارانوف، به‌صورت داوطلبانه به عمق بخش‌های آلوده‌شده رفتند تا شیرهای تخلیه‌ی آب را به‌صورت دستی باز کنند.

این غواصان، با حداقل تجهیزات حفاظتی و در محیطی کاملاً آلوده به پرتوهای کشنده، موفق شدند عملیات را با موفقیت به انجام برسانند. در نهایت، آب موجود در زیر لایه‌ی بتنی راکتور تخلیه شد و از بروز فاجعه‌ای به مراتب بزرگ‌تر جلوگیری به عمل آمد.

اما حادثه به اینجا ختم نشد، زیرا مواد مذاب و رادیواکتیو هیچ‌گاه به‌طور کامل خنک و بی‌خطر نشدند و همچنان در حال نفوذ به لایه‌های زیرین زمین بودند؛ وضعیتی که حتی از تماس مستقیم با آب نیز خطرناک‌تر بود. به همین دلیل، در ۱۲ مه ۱۹۸۶، تمام معدن‌چیان ماهر و داوطلب از سراسر

۱ هر نوبت پرواز یک هواپیما برای انجام مأموریتی مشخص

اتحاد جماهیر شوروی برای شرکت در این «نبرد» به چرنوبیل فراخوانده شدند.

در ۱۳ مه، حدود ۱۰,۰۰۰ معدنچی که از مخاطرات کار خود به خوبی آگاه بودند و مرگ را تقریباً قطعی می‌دانستند، وارد منطقه شدند. به آن‌ها اعلام شده بود که باید تونلی در معدن تولا حفر کنند تا دستگاه خنک‌کننده‌ای زیر راکتور نصب شود. اما این وعده هرگز عملی نشد.

معدن‌چیان بدون هیچ‌گونه ماسک یا لباس محافظ مناسب، شروع به کار کردند و تونلی به طول ۱۰۴ متر، در عمق ۱۲ متری زمین و با عرض و ارتفاع حدود ۳۰ متر حفر کردند. پس از بیش از یک ماه تلاش طاقت‌فرسا، پروژه به پایان رسید، اما هیچ دستگاه خنک‌کننده‌ای نصب نشد. در عوض، تونل با بتن پر شد تا از نفوذ بیشتر مواد رادیواکتیو به زمین جلوگیری شود و بخشی از آلودگی مهار گردد.

متأسفانه، حدود یک‌چهارم از این معدن‌چیان، پیش از رسیدن به سن ۴۰ سالگی جان خود را از دست دادند. میزان تشعشعات در بیرون تونل تقریباً ۳۰۰ برابر بیشتر از داخل آن بود و کارگران نمی‌توانستند بیش از چند ساعت در این محیط کشنده باقی بمانند. امروز تنها اطلاعات محدودی درباره‌ی وضعیت سه نفر از این معدن‌چیان در دست است و از سرنوشت ۹,۹۹۷ نفر دیگر خبری در دسترس نیست.

حدود ۱۸ روز پس از وقوع حادثه، مقامات شوروی که از ابعاد فاجعه به شدت نگران و مضطرب شده بودند، مجبور شدند حقیقت را به اطلاع مردم برسانند تا از قربانی شدن افراد بیشتر جلوگیری شود. یکی از مقامات ارشد در یک برنامه تلویزیونی اعلام کرد که این نخستین بار است که انرژی هسته‌ای، که پیش‌تر به عنوان نیرویی برای توسعه و رونق منطقه به کار می‌رفت، اکنون به تهدیدی جدی نه‌تنها برای اتحاد جماهیر شوروی، بلکه برای سراسر جهان تبدیل شده است.

پس از این حادثه، اتحاد جماهیر شوروی برای مقابله با این تهدید عظیم، نیروی انسانی عظیمی را بسیج کرد تا عملیات پاک‌سازی و مهار آلودگی را انجام دهند. نیکولای کاتانوف به عنوان فرمانده نیروهای زمینی منصوب شد؛ این نیروها بالغ بر ۵۰,۰۰۰ نفر تخمین زده می‌شدند. مأموریت اصلی آن‌ها پاک‌سازی حدود ۳۰۰,۰۰۰ متر مکعب خاک آلوده از مواد رادیواکتیو بود.

این افراد، که با انگیزه‌ای بی‌نظیر برای حفاظت از وطن خود داوطلبانه به میدان آمده بودند، اغلب بدون تجهیزات حفاظتی کافی و لباس‌های ایمنی مناسب، کار خود را آغاز کردند. به گفته‌ی ایگور کاستین، خبرنگار خبرگزاری نووستی: «ما همه درگیر انجام وظایف بسیار دشوار بودیم. مجبور بودیم به طور مکرر دست‌ها و بدن‌مان را بشوییم؛ روزانه حدود هفت بار دوش می‌گرفتیم. با لیف و صابون‌های قوی، دستان‌مان را به طور مستمر می‌شستیم

و سپس غذا می‌خوردیم. شرایط بسیار سختی بود. لباس‌های چندلایه و ضخیم، وزن زیادی داشتند و همه ما تحت فشار فیزیکی زیادی بودیم.»

این افراد، که بیشتر از میان نیروهای ذخیره انتخاب شده بودند، بعدها با نام «پاک‌سازان» شناخته شدند. آن‌ها به تدریج به شرایط محیطی آلوده به مواد رادیواکتیو عادت کردند؛ ماسک‌ها پس از مدتی به دلیل رطوبت دچار خیس‌شدگی می‌شدند و تنفس را برایشان دشوار می‌کردند. به مرور، بسیاری از آن‌ها از ماسک استفاده نمی‌کردند و در کنار هم به پاک‌سازی محیط ادامه می‌دادند.

پاک‌سازان حتی حیوانات مثل سگ، گربه و دیگر موجودات کوچک را که در منطقه مشاهده می‌کردند، می‌کشتند و اجساد آن‌ها را در محل‌های مخصوص دفن می‌کردند، زیرا نگرانی از انتقال آلودگی رادیواکتیو از طریق این حیوانات بسیار بالا بود.



شکل ۳۰ گروهی از نیروهای پاک‌سازی

پس از حدود هشت هفته تلاش بی‌وقفه، پاک‌سازان عملیات را به قلب راکتور منتقل کردند تا آلودگی را از ریشه مهار کنند. در این مرحله، تفاوتی میان درجه نظامی یا وضعیت اجتماعی افراد باقی نمانده بود؛ همه از فرمانده گرفته تا سرباز ذخیره و جوان‌ترین نیروی داوطلب، دست در دست هم گذاشته بودند تا جان انسان‌های بیشتری را نجات دهند.

هر فرد بیش از شش دقیقه نمی‌توانست به‌طور مستقیم در محوطه نیروگاه فعالیت کند، چرا که میزان تشعشعات در این منطقه بسیار بالاتر از حد تحمل بدن انسان بود. تمامی فعالیت‌ها با برنامه‌ریزی دقیق و زمان‌بندی شده پیش می‌رفتند. همه ماشین‌آلات و تجهیزات با پوشش‌های فلزی ضدتشعشع و لایه‌های سرب محافظت شده بودند و بسیاری از دستگاه‌ها از راه دور کنترل می‌شدند، اما انسان‌ها نقش حیاتی در راه‌اندازی، هدایت و کنترل این ماشین‌آلات داشتند.

پس از حدود ۱۲ هفته، تمامی تجهیزات و ماشین‌آلات به صورت کامل زره‌پوش و مقاوم‌سازی شدند. هدف نهایی این تلاش‌ها، ساخت پوششی بتنی و عظیم‌الجثه بود که بتواند به طور مؤثر از خروج مواد رادیواکتیو از داخل نیروگاه جلوگیری کند و بدین ترتیب دامنه آلودگی را محدود سازد

در همین زمان، کنفرانسی با حضور سران کشورهای متأثر از بحران هسته‌ای در شهر وین برگزار شد. ریاست این کنفرانس بر عهده هانس بلیکس بود و از جانب اتحاد جماهیر شوروی، والرئ لگاسف به عنوان نماینده شرکت داشت. لگاسف در این نشست تلاش کرد تا حقایق مربوط به حادثه و عوامل آن را به‌طور شفاف بیان کند، اما به دلیل فقدان اسناد و مدارک رسمی، موفق نشد نظر خود را به اثبات برساند. مقامات شوروی نیز به شدت مانع انتشار سخنان و گزارش‌های او شدند و از افشای واقعیت‌ها به بیرون جلوگیری کردند.

در نهایت، پاک‌سازان که هزاران نفر از آنان در این راه جان خود را از دست داده بودند، توانستند این دیوار عظیم بتنی موسوم به «سارکوفگ» (Sarcophagus) را بر روی راکتور شماره چهار نیروگاه چرنوبیل بنا کنند و به این ترتیب، قدمی اساسی در مهار فاجعه برداشتند.

حادثه چرنوبیل به یکی از بزرگ‌ترین و وخیم‌ترین فاجعه‌های هسته‌ای غیرنظامی در تاریخ جهان تبدیل شد که تأثیرات آن تا سال‌ها پس از وقوع، زندگی میلیون‌ها نفر را تحت تأثیر قرار داد.

والرئ لگاسف، دانشمند برجسته و مشاور کمیسیون بررسی حادثه، سال‌ها تلاش کرد تا عوامل اصلی این فاجعه را آشکار سازد. یکی از مهم‌ترین



عوامل، نصب میله‌های کنترل جدید به دستور مقامات، به‌ویژه ویکتور بریکائف، در نخستین آزمایش‌های راکتور بود. این اقدام با اعمال فشار بیش از حد، موجب افزایش غیرمجاز چرخش و حرارت آب در راکتور شد و در نهایت کنترل راکتور را از دست خارج کرد. با این حال، لگاسف هرگز موفق نشد این حقایق را به‌طور عمومی و مستدل اثبات کند.

او به دلیل مخالفت با روایت رسمی و افشای دروغ‌های مقامات، در خانه خود تحت حبس خانگی قرار گرفت و بسیاری از اسناد و مدارکی که تهیه کرده بود، توقیف و سانسور شدند. نهایتاً، لگاسف در دومین سالگرد فاجعه، یعنی سال ۱۹۸۸، تحت فشارهای روحی و عذاب وجدان ناشی از مسئولیت‌های علمی و انسانی خود، در خانه‌اش خودکشی کرد (۱۹۲۷-۱۹۸۸).

سال‌ها پس از این فاجعه، مطالعات پزشکی و پژوهش‌های علمی نشان دادند که میزان ابتلا به بیماری‌های سرطان در مناطق متأثر تا ۵۰ برابر افزایش یافته است. همچنین، تولد نوزادان دارای ناهنجاری‌های ژنتیکی و بروز تغییرات ساختاری در DNA بسیاری از ساکنان کشورهای بلاروس، اوکراین، روسیه، فرانسه و چندین کشور دیگر، گواهی بر گستردگی و عمق فاجعه چرنوبیل بود که همچنان اثرات آن نسل‌ها باقی مانده است.

منابع

- [1] Serhii Plokyh – Chernobyl: History of a Nuclear Catastrophe Basic Books, 2018.
- [2] Journal of Radiological Protection – Articles on Chernobyl Peer-reviewed papers on radiation effects and safety.
- [3] IAEA – Chernobyl Reports (1986–1991) Official reports by the International Atomic Energy Agency.
- [4] UNSCEAR – 2000 Report UN Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation.
- [5] Declassified Soviet Archives – KGB & Communist Party Documents Post-1991 documents on the Chernobyl disaster.



جوشکاری زیر آب

دنیایی متفاوت در دل دریا

صدرا آئینه ساز جدید

دانشجوی کارشناسی مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز



مقدمه

جوشکاری یکی از مهم ترین روش های اتصال فلزات است که در صنایع مختلف استفاده می شود. در این فرآیند، با ایجاد گرما، فلزات ذوب شده و به هم متصل می شوند. اما با پیشرفت علم و تکنولوژی، کم کم نیاز به دستیابی به فناوری انجام جوشکاری در شرایط غیرعادی، از جمله محیط های آبی، احساس شد.

جوشکاری زیر آب از پیچیده ترین و تخصصی ترین شاخه های این علم است که ترکیبی از مهارت های فنی و دانش غواصی را در بر می گیرد. جوشکاری زیر آب، نه تنها به عنوان یک مهارت فنی بلکه به عنوان یک هنر نیز شناخته می شود، زیرا انجام آن نیازمند دقت بالا، توانایی تصمیم گیری سریع در شرایط بحرانی و توان جسمانی و روانی بالاست.

بسیاری از افراد تصور می کنند که انجام جوشکاری در زیر آب غیرممکن یا عجیب است، زیرا جوشکاری را به طور کلی با آتش و شعله مرتبط می دانند؛ در حالی که بیشتر فرآیندهای جوشکاری در اصل مبتنی بر قوس الکتریکی هستند، نه شعله. در محیط خشک، این قوس از طریق یونیزه شدن هوا شکل می گیرد؛ اما در زیر آب، قوس الکتریکی از طریق یونیزه شدن بخار آب در اطراف الکترود و قطعه کار ایجاد می شود. بنابراین، روشن شدن قوس و انجام جوشکاری در زیر آب، اگرچه چالش برانگیز است، اما از نظر فنی کاملاً ممکن و منطقی است.

مسابقه و سرگرمی

جدول کلمات مکانیکی!

مبین آذرمجو

دانشجوی کارشناسی مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز



در این شماره با یک جدول کلمات مکانیکی مهمان ذهن شما هستیم! جدول را کامل کنید و کلمه های را که در خانه مشخص شده قرار دارد پیدا کنید. سپس با اسکن QR Code پایین صفحه و ورود به سایت، پاسخ خود را ثبت کنید. اگر پاسخ تان درست باشد، در قرعه کشی جوایز ویژه شرکت داده می شوید. این هم یک سرگرمی مفید است، هم فرصتی برای محک زدن دانش مکانیکی شما و البته، بردن جایزه

- ۱ تغییر شکل نسبی در ابعاد یک جسم تحت تاثیر بار
- ۲ روش انتقال گرما بدون نیاز به محیط مادی بین دو جسم
- ۳ در آن ارتعاشات یک سیستم در فرکانس خاصی تقویت می شود
- ۴ شکست ماده در اثر اعمال نیروی های تکراری یا نوسانی
- ۵ یکی از ماشین های ساده که شامل یک میله و تیکه گاه است
- ۶ ماشینی که انرژی سیال را به انرژی مکانیکی تبدیل میکند
- ۷ شاخه ای از مکانیک که به اجسام در حال سکون و تعادل نیروها می پردازد
- ۸ مقاومت یک جسم در برابر تغییر در حالت سکون یا حرکت
- ۹ قطعه دایره شکل با دنده برای انتقال حرکت دورانی
- ۱۰ روش انتقال گرما توسط حرکت توده مولکول ها در سیالات
- ۱۱ مکانیزمی برای قطع و وصل انتقال نیرو در سیستم های مکانیکی
- ۱۲ قطعه ای داخل سیلندر که حرکت رفت و برگشتی دارد

جواب

اسکن کنید



فرآیند جوشکاری زیر آب، به دلیل محیط پیچیده و غیرقابل پیش‌بینی خود، نیازمند تجهیزات ویژه، روش‌های خاص و استانداردهای ایمنی دقیق است. عواملی مانند فشار آب، دمای پایین، جریان‌های قوی، کاهش دید و وجود گازهای خطرناک بر کیفیت جوش و ایمنی اپراتورها تأثیر می‌گذارد. علاوه بر این، جوشکاری زیر آب شامل روش‌های مختلفی است که هر کدام دارای کاربردهای خاص و تکنیک‌های منحصربه‌فرد هستند. جوشکاران زیر آب نیز باید علاوه بر داشتن مهارت‌های جوشکاری پیشرفته، غواصان ماهری نیز باشند. آن‌ها باید توانایی کار در شرایط سخت، مدیریت استرس و تصمیم‌گیری سریع در موقعیت‌های اضطراری را داشته باشند. این ترکیب از مهارت‌ها باعث می‌شود که شغل جوشکاری زیر آب یکی از پردرآمدترین و درعین‌حال خطرناک‌ترین مشاغل در صنایع فنی باشد.



Figure 31

شکل ۳۱

در این شماره از مجله، تلاش می‌کنیم تا به‌طور جامع به بررسی جنبه‌های مختلف جوشکاری زیر آب بپردازیم؛ از تاریخچه و روند تکامل این فناوری گرفته تا انواع روش‌ها، کاربردها، مزایا و معایب، آینده این صنعت و حتی بررسی فرصت‌های شغلی و درآمد‌های مرتبط با آن. هدف از این مطلب، ارائه‌ی درکی کامل از این حوزه‌ی تخصصی و بیان اهمیت آن در دنیای امروز است.

تاریخچه جوشکاری زیر آب

تاریخچه‌ی جوشکاری زیر آب به دوران پیشرفت‌های صنعتی و نیاز روزافزون به نگهداری و تعمیر سازه‌های دریایی بازمی‌گردد. هرچند مفهوم اتصال فلزات از طریق حرارت و جوشکاری به دوران باستان مربوط می‌شود، اما کاربرد این تکنیک در محیط‌های زیر آب، یک پیشرفت نسبتاً مدرن است که از اوایل

قرن بیستم آغاز شد. توسعه‌ی این فناوری نتیجه‌ی نیاز به انجام تعمیرات سریع و مؤثر در محیط‌های آبی، به‌ویژه در صنایع نظامی، دریایی، نفت و گاز بوده است.

۴ پیش از توسعه فناوری (پیش از قرن بیستم):

پیش از توسعه‌ی فناوری جوشکاری الکتریکی، تعمیرات زیر آب عمدتاً با استفاده از روش‌های مکانیکی مانند پرچ‌کاری و استفاده از پیچ و مهره انجام می‌شد. در آن زمان، غواصان برای تعمیر بدنه‌ی کشتی‌ها و سایر سازه‌های دریایی از روش‌های ابتدایی استفاده می‌کردند. محدودیت‌های فنی و نبود تکنولوژی مناسب برای ایجاد قوس الکتریکی در زیر آب، مانع از پیشرفت این نوع تعمیرات می‌شد.

۴ توسعه اولیه (آغاز قرن بیستم):

اولین گام‌های واقعی در جهت جوشکاری زیر آب در اوایل دهه‌ی ۱۹۰۰ برداشته شد. پیشرفت در تکنیک‌های جوشکاری قوسی (Arc Welding) که در محیط‌های خشک به کار می‌رفت، انگیزه‌ای شد تا مهندسان به فکر توسعه‌ی روش‌هایی برای استفاده از این فناوری در زیر آب بیفتند. در دهه‌ی ۱۹۳۰، نیروی دریایی روسیه یکی از پیشگامان این حوزه بود که توانست با یافته‌های کنستانتین خرینوف، اولین آزمایش‌های موفقیت‌آمیز در زمینه‌ی جوشکاری زیر آب را انجام دهد. در این دوره، مهندسان روسی توانستند از تکنیک جوشکاری قوسی دستی با الکترودهای مخصوص در محیط‌های آبی کم‌عمق استفاده کنند. این موفقیت، آغازگر توسعه‌ی گسترده‌تر این فناوری در سایر کشورها شد.

۴ نقش جنگ جهانی دوم در پیشرفت جوشکاری زیر آب:

جنگ جهانی دوم یکی از مهم‌ترین عوامل پیشرفت سریع فناوری جوشکاری زیر آب بود. در این دوره، نیاز به تعمیرات سریع کشتی‌های جنگی، زیردریایی‌ها و تأسیسات دریایی آسیب‌دیده باعث شد تا کشورهای درگیر در جنگ به‌سرعت به‌دنبال راهکارهای نوین برای افزایش کارایی تعمیرات دریایی باشند.

نیروی دریایی ایالات متحده‌ی آمریکا و بریتانیا سرمایه‌گذاری‌های زیادی در توسعه‌ی تجهیزات پیشرفته‌ی جوشکاری زیر آب انجام دادند. جوشکاران آموزش‌دیده که توانایی غواصی نیز داشتند،

نقش حیاتی در نگهداری و بازسازی ناوگان دریایی ایفا کردند. در همین دوران، روش‌های جدیدی مانند جوشکاری خشک، که در آن از اتاقک‌های فشار برای ایجاد محیط خشک در زیر آب استفاده می‌شد، توسعه یافت.



Figure 32

شکل ۳۲

۴ تحولات پس از جنگ و دوره مدرن (۱۹۸۰-۱۹۵۰):

پس از پایان جنگ جهانی دوم، توجه به جوشکاری زیر آب از حوزه‌ی نظامی فراتر رفت و در صنایع غیرنظامی مانند نفت و گاز دریایی، کشتیرانی و ساخت‌وسازهای زیربنایی گسترش پیدا کرد. کشف میدان‌های نفتی در آب‌های عمیق و نیاز به ساخت و نگهداری سکوهای نفتی دریایی در دهه‌های ۱۹۵۰ و ۱۹۶۰، محرک اصلی برای توسعه‌ی بیشتر این فناوری بود. در دهه‌ی ۱۹۶۰، پیشرفت‌های قابل توجهی در تکنیک‌های جوشکاری خشک صورت گرفت. استفاده از محفظه‌های فشار پیشرفته، به جوشکاران این امکان را می‌داد تا در عمق‌های بیشتر و تحت فشارهای بالا، عملیات جوشکاری را با کیفیت بالاتر انجام دهند. این پیشرفت‌ها باعث افزایش اطمینان از کیفیت جوش‌ها و کاهش خطرات ناشی از کار در محیط‌های زیر آب شد.

۴ ظهور فناوری‌های پیشرفته (۱۹۸۰ تا امروز):

در دهه‌های اخیر، پیشرفت‌های تکنولوژیکی باعث بهبود کیفیت و ایمنی جوشکاری زیر آب شده‌اند. توسعه‌ی ربات‌های کنترل از راه دور (ROVs) و سیستم‌های جوشکاری خودکار، انقلابی در این صنعت ایجاد کرده است. این فناوری‌ها خطرات مرتبط با حضور انسان در محیط‌های خطرناک زیر آب را کاهش می‌دهند و امکان انجام عملیات در عمق‌های بسیار زیاد را فراهم می‌کنند.



شکل ۳۳ ربات‌های زیر آبی کنترل از راه دور Figure 33

همچنین، پیشرفت در تولید الکترودهای مقاوم در برابر آب و استفاده از تکنیک‌های جدید مانند جوشکاری لیزری زیر آب، به بهبود کیفیت جوش‌ها و افزایش کارایی عملیات منجر شده است. روش‌های بازرسی غیرمخرب (NDT) مانند اولتراسونیک و رادیوگرافی نیز برای ارزیابی دقیق‌تر کیفیت جوش‌های زیر آب توسعه یافته‌اند.

۴ نقش استانداردها و سازمان‌های بین‌المللی

با گسترش کاربردهای جوشکاری زیر آب، سازمان‌های بین‌المللی مانند انجمن جوشکاری آمریکا (AWS) و انجمن مهندسان مکانیک آمریکا (ASME) شروع به تدوین استانداردهای تخصصی برای این حوزه کردند.

این استانداردها شامل دستورالعمل‌های دقیق برای تجهیزات، تکنیک‌ها، ایمنی و آموزش جوشکاران زیر آب می‌شوند.

۴ جوشکاری زیر آب در ایران

در ایران، با توسعه صنعت نفت و گاز در خلیج فارس، نیاز به جوشکاری زیر آب افزایش یافت. از دهه ۱۳۵۰ (۱۹۷۰ میلادی)، این فناوری وارد کشور شد و ابتدا برای تعمیر سکوهای نفتی و تأسیسات دریایی مورد استفاده قرار گرفت. در سال‌های بعد، با آموزش نیروی انسانی متخصص و استفاده از تجهیزات پیشرفته، ایران توانست در این حوزه پیشرفت کند. امروزه، جوشکاری زیر آب در ایران برای پروژه‌های نفتی، تعمیر خطوط لوله، ساخت اسکله‌ها، عملیات عمرانی در دریا و نیز کاربردهای نظامی استفاده می‌شود و کشور توانسته در این زمینه به خودکفایی نسبی برسد.

۴ کاربردهای جوشکاری زیر آب

جوشکاری زیر آب از فناوری‌های کلیدی صنایع دریایی است که نقش حیاتی در نگهداری، تعمیر و ساخت سازه‌های مختلف در زیر آب ایفا می‌کند. این تکنیک به دلیل توانایی انجام عملیات در محیط‌های چالش‌برانگیز، از پروژه‌های صنعتی بزرگ گرفته تا مأموریت‌های نظامی و عملیات‌های نجات، کاربرد گسترده‌ای دارد. در این بخش، به‌تفصیل به بررسی کاربردهای متنوع جوشکاری زیر آب در صنایع مختلف می‌پردازیم.

① صنایع نفت و گاز فراساحلی:

یکی از مهم‌ترین حوزه‌های کاربرد جوشکاری زیر آب، صنایع نفت و گاز است. در این صنعت، بسیاری از تأسیسات مانند سکوهای نفتی، خطوط انتقال گاز و پایه‌های زیرآبی در معرض شرایط سخت محیطی قرار دارند و نیازمند نگهداری و تعمیرات مداوم هستند. سکوهای دریایی که برای استخراج نفت و گاز در دریاها ساخته می‌شوند، به دلیل تماس مداوم با آب شور، دچار خوردگی و آسیب‌های ساختاری می‌شوند. جوشکاری زیر آب برای تعمیر پایه‌ها، اتصالات و تقویت ساختار این سکوها استفاده می‌شود. همچنین خطوط انتقال نفت و گاز که در بستر دریا قرار دارند، نیازمند جوشکاری دقیق برای اتصال بخش‌های جدید یا تعمیر بخش‌های آسیب‌دیده هستند.

② صنعت کشتیرانی و حمل‌ونقل دریایی:

در صنعت کشتیرانی، جوشکاری زیر آب ابزاری ضروری برای حفظ و تعمیر کشتی‌ها، زیردریایی‌ها و سایر وسایل نقلیه دریایی است. آسیب‌های ناشی از برخورد، خوردگی یا ترک‌های ساختاری در بدنه‌ی کشتی می‌تواند بدون نیاز به خارج کردن کشتی از آب، توسط جوشکاران زیر آب برطرف شوند. پروانه‌ها و شفت‌های رانش نیز که به دلیل سایش یا برخورد آسیب می‌بینند، اغلب در محل و زیر آب تعمیر می‌شوند. همچنین زیردریایی‌های

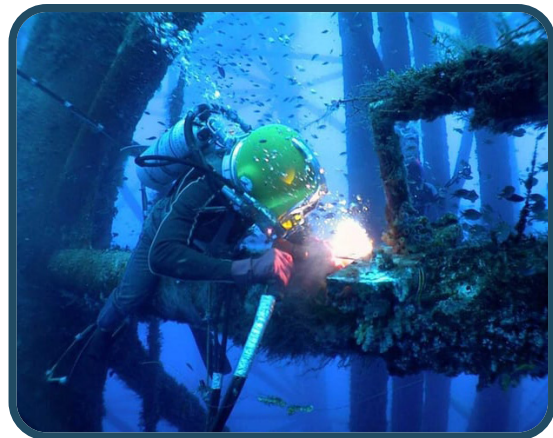
نظامی و تحقیقاتی نیاز به تعمیرات دوره‌ای دارند که بسیاری از آن‌ها مستقیماً در زیر آب انجام می‌شود.



شکل ۳۴ تعمیر پره‌های کشتی

3 زیرساخت‌های دریایی و ساحلی:

زیرساخت‌های حیاتی مانند پل‌ها، اسکله‌ها، سدها و پایه‌های سکوها بادی دریایی در تماس مستقیم با آب قرار دارند و نیازمند نگهداری مداوم هستند. ستون‌ها و پایه‌های پل‌هایی که بر روی آب ساخته شده‌اند، به دلیل جریان‌های آب و خوردگی، نیاز به تقویت و تعمیرات دوره‌ای دارند. سدهای بزرگ و تأسیسات مدیریت آب نیز برای جلوگیری از نشت یا آسیب‌های ساختاری، نیازمند جوشکاری زیر آب هستند. اسکله‌های دریایی که برای پهلوگیری کشتی‌ها استفاده می‌شوند، اغلب به دلیل فشارهای مکانیکی و شرایط محیطی دچار آسیب می‌شوند.



شکل ۳۵ تعمیر زیرساخت‌های دریایی

4 صنایع نظامی و دفاعی:

نیروهای دریایی در سراسر جهان از جوشکاری زیر آب برای تعمیرات اضطراری و عملیات‌های خاص استفاده می‌کنند. در زمان جنگ یا در شرایط اضطراری، جوشکاری زیر آب می‌تواند کشتی‌های آسیب‌دیده را به سرعت آماده عملیات کند. جوشکاری زیر آب برای بازایی تجهیزات غرق‌شده یا تعمیر سازه‌های آسیب‌دیده در مأموریت‌های ویژه کاربرد دارد. برخی

تأسیسات نظامی محرمانه، مانند ایستگاه‌های راداری یا سنسورهای زیر آبی، نیز از طریق جوشکاری زیر آب ساخته می‌شوند.

5 عملیات‌های نجات و بازیابی:

در عملیات‌های نجات دریایی و بازیابی کشتی‌های غرق‌شده یا آسیب‌دیده، جوشکاری زیر آب نقش مهمی ایفا می‌کند. جوشکاری زیر آب برای برش یا اتصال بخش‌های مختلف کشتی‌های غرق‌شده جهت عملیات نجات استفاده می‌شود. تجهیزاتی مانند کانتینرهای حمل بار یا ماشین‌آلات سنگین که به زیر آب سقوط کرده‌اند، می‌توانند از طریق جوشکاری مستحکم شده و بازیابی شوند. در عملیات‌های نجات، اغلب نیاز به نصب سیستم‌های شناوری موقت برای تثبیت یا بلند کردن سازه‌های بزرگ وجود دارد که از این فناوری استفاده می‌شود.



شکل ۳۶ بازیابی کشتی غرق شده

6 انرژی‌های تجدیدپذیر دریایی:

با رشد صنعت انرژی‌های تجدیدپذیر، جوشکاری زیر آب در ساخت و نگهداری تأسیسات تولید انرژی از منابع دریایی نقش برجسته‌ای دارد. پایه‌های توربین‌های بادی که در دریا نصب می‌شوند، نیاز به جوشکاری مقاوم در برابر فشار و خوردگی دارند. این نیروگاه‌ها که از انرژی حرکت آب استفاده می‌کنند، اغلب نیاز به تعمیرات زیر آب دارند. کابل‌های برق زیردریایی و سیستم‌های انتقال انرژی، به تعمیرات و نگهداری مستمر از طریق جوشکاری زیر آب نیاز دارند.

7 تحقیقات علمی و اکتشافات زیر آب:

جوشکاری زیر آب در پروژه‌های تحقیقاتی و اکتشافات علمی زیر آب نیز کاربرد دارد. ایستگاه‌های تحقیقاتی دریایی، برای مطالعه حیات دریایی یا شرایط زیست‌محیطی، نیازمند جوشکاری سازه‌های مقاوم هستند. در پروژه‌های اکتشاف کشتی‌های غرق‌شده باستانی، جوشکاری زیر آب می‌تواند برای تثبیت سازه‌های تاریخی استفاده شود. جوشکاری برای نصب یا تعمیر

سنسورها، دوربین‌ها و تجهیزات پایش زیست‌محیطی زیر آب نیز استفاده می‌شود.

انواع جوشکاری زیر آب

جوشکاری زیر آب به دو روش اصلی جوشکاری مرطوب و جوشکاری خشک انجام می‌شود. انتخاب روش مناسب بستگی به نوع پروژه، عمق آب، شرایط محیطی و میزان دقت مورد نیاز دارد. در ادامه، این دو روش را توضیح می‌دهیم.

1 جوشکاری مرطوب:

در جوشکاری مرطوب، عملیات جوشکاری مستقیماً در داخل آب انجام می‌شود. جوشکار با تجهیزات مخصوص غواصی به محل جوشکاری می‌رود و از الکترودهای مخصوصی که برای کار در آب طراحی شده‌اند، استفاده می‌کند. قوس الکتریکی که بین الکترود و سطح فلز ایجاد می‌شود، باعث ذوب شدن فلز و ایجاد اتصال جوش می‌شود.

• مزایای جوشکاری مرطوب

سرعت بالا: نیازی به نصب تجهیزات اولیه در محیط نیست و جوشکاری سریع انجام می‌شود.

هزینه کمتر: تجهیزات مورد نیاز برای جوشکاری مرطوب نسبت به جوشکاری خشک ارزان‌تر است.

دسترسی آسان: در هر عمقی از آب قابل انجام است و نیاز به محفظه‌های خاص ندارد.

• معایب جوشکاری مرطوب

کیفیت پایین‌تر جوش: آب می‌تواند باعث سرد شدن سریع جوش و ایجاد ترک‌های داخلی شود.

ایمنی پایین‌تر: جوشکار در معرض خطر برق‌گرفتگی، کاهش دید و فشار بالای آب قرار دارد.

خوردگی سریع‌تر جوش: به دلیل تماس مستقیم با آب، احتمال زنگ‌زدگی جوش بیشتر است.

• انواع جوشکاری مرطوب

جوشکاری مرطوب زیر آب با روش‌های متفاوتی انجام می‌شود که در اینجا به چند نوع پرکاربرد اشاره می‌شود:

الف) جوشکاری قوسی دستی با الکترود روکش‌دار (Wet SMAW)

رایج‌ترین نوع جوشکاری، مرطوب است. این روش مانند جوشکاری دستی روی آب و صرفاً با الکترودهای ویژه و روکش‌دار انجام می‌شود.

در این روش ابتدا آماده‌سازی سطح و تمیزکاری انجام می‌شود و همچنین الکترود ضد آب با روکش مخصوص متناسب با نوع کاربرد و جنس

فلز پایه انتخاب می‌شود. سپس با ایجاد قوس الکتریکی بین الکترود و فلز پایه زیر آب، جوشکاری انجام می‌شود.

این روش در تعمیر بدنه کشتی‌ها، اتصال اجزای فلزی اسکله‌ها و سکوها نفتی و همچنین تعمیر خطوط لوله نفت و گاز زیر دریا انجام می‌شود. این روش بسیار کم هزینه، آسان و سریع است و برای اعماق مختلف قابل استفاده است. اما کیفیت جوش بسیار پایین و نیز خطر برق‌گرفتگی بالایی دارد.

ب) جوشکاری قوسی فلزی با گاز محافظ (Wet GMAW)

این روش کمتر رایج است، اما برای برخی از پروژه‌ها با نیاز به کیفیت بهتر استفاده می‌شود. این روش نیز همانند جوشکاری MIG^۱ روی آب و با تجهیزات مخصوص انجام می‌شود.

در این روش، بعد از آماده‌سازی سطح و انتخاب الکترود مناسب، تجهیزات گازرسانی برای محافظت قوس نصب می‌شود. با تأمین گاز محافظ (معمولاً آرگون)، قوس الکتریکی بین الکترود و قطعه کار برقرار و جوشکاری (همانند جوشکاری MIG روی آب) انجام می‌شود.

این روش برای پروژه‌های نیازمند جوش با کیفیت بهتر، تعمیرات تخصصی در مناطق با دید بهتر زیر آب و همچنین در تعمیرات خطوط انتقال نفت و گاز زیر آب استفاده می‌شود. این نوع جوشکاری، نسبت به روش قبلی کیفیت نسبتاً بهتر و حوضچه جوش کنترل‌شده‌تری دارد، ولی تجهیزات گران‌تری نیاز دارد و در عمق بالا و جریان‌ات شدید محدودیت دارد.

ج) جوشکاری قوسی تنگستن با گاز محافظ (Wet GTAW)

این روش نیز همانند روش TIG^۲ و با تجهیزات خاص زیر آب انجام می‌شود و تفاوت آن با روش GMAW این است که در این روش، الکترود مورد استفاده، مصرف نمی‌شود و عمل جوش بسیار کنترل‌پذیرتر است. به همین دلیل، سرعت کمتری دارد و برای کارهای ظریف‌تر و دقیق‌تر در زیر آب مورد استفاده قرار می‌گیرد.

در این روش، پس از پاک‌سازی سطح و انتخاب الکترود تنگستن مناسب، تزریق گاز آرگون برای محافظت از منطقه جوش انجام و با برقراری قوس الکتریکی بین الکترود و قطعه، جوشکاری (همانند جوشکاری TIG روی آب) انجام می‌شود.

این روش برای جوش‌های دقیق و قطعات با ضخامت کم یا حساس، از جمله صنایع دفاعی و نظامی، استفاده می‌شود. این روش کیفیت بالا و حوضچه جوش با کنترل بالایی دارد و برای فلزات نازک بسیار کاربردی

۱ جوشکاری MIG: جوشکاری با سیم‌جوش مصرفی در محیط گاز بی‌اثر

۲ جوشکاری TIG: جوشکاری با الکترود تنگستن در محیط گاز بی‌اثر

است؛ اما سرعت پایین و تجهیزات پرهزینه‌ای دارد و به مهارت بالای جوشکار نیز نیاز دارد.

(د) جوشکاری با هسته پودری (Wet FCAW)

در این روش از سیم جوش با هسته فلاکس‌دار استفاده می‌شود که این فلاکس یا پودر هنگام جوشکاری ذوب شده و گازهایی تولید می‌کند که به‌عنوان گاز محافظ عمل می‌کنند و همچنین بر روی حوضچه مذاب، سرباره‌ای ایجاد می‌شود که از سطح جوش محافظت می‌کند. این روش معمولاً در عمق‌های کم یا پروژه‌های خاص به کار می‌رود.

در این روش نیز پس از تمیزکاری سطح قطعه و انتخاب سیم جوش هسته پودری (Flux-cored) مناسب، قوس الکتریکی میان الکترود و قطعه برقرار می‌شود. با ذوب شدن الکترود، بر روی حوضچه مذاب سرباره تشکیل می‌شود که پس از پایان جوشکاری، از سطح قطعه پاک می‌شود.

این روش برای جوشکاری سازه‌های سنگین در آب‌های کم‌عمق، تعمیر نقاط با دسترسی دشوار و انجام تعمیرات سریع اجزای سکوها دریا استفاده می‌شود. این روش سرعت بالایی دارد و در برابر تأثیرات منفی آب بر قوس، مقاوم‌تر است؛ اما کیفیت و دقت نسبتاً پایینی دارد. همچنین در حالت مرطوب، استفاده از سیم جوش پیوسته دشوارتر است و نیاز به تجهیزات خاصی دارد که کاربرد آن را محدود می‌کند.

◀ جوشکاری خشک:

در جوشکاری خشک، ابتدا یک محفظه ضد آب (اتاقک خشک) در محل جوشکاری نصب می‌شود. آب داخل این محفظه تخلیه شده و گاز (معمولاً ترکیبی از هلیوم و اکسیژن) به داخل آن پمپ می‌شود تا جوشکار بتواند در محیطی خشک و با فشار کنترل‌شده کار کند. پس از آماده‌سازی، جوشکاری با استفاده از همان روش‌های معمولی که در خشکی به کار می‌روند، در داخل این محفظه انجام می‌شود.

• مزایای جوشکاری خشک

کیفیت بالاتر جوش: به دلیل نبود آب در محل جوشکاری، جوش بدون ترک و عیب انجام می‌شود.

ایمنی بیشتر: جوشکار در محیطی ایمن‌تر کار می‌کند و احتمال برق‌گرفتگی کاهش می‌یابد.

دوام و استحکام بیشتر: چون جوش در محیط خشک ایجاد می‌شود، خطر خوردگی و زنگ‌زدگی به حداقل می‌رسد.

• معایب جوشکاری خشک

هزینه بالا: نیازمند تجهیزات گران‌قیمت و فناوری پیشرفته نیاز دارد. **زمان‌بر بودن:** نصب محفظه و تخلیه آب پیش از شروع جوشکاری زمان زیادی می‌برد.

محدودیت در عمق: در عمق‌های زیاد، ساخت و استفاده از محفظه‌های خشک دشوار و پرهزینه است.

• انواع جوشکاری خشک

جوشکاری خشک زیر آب نیز با روش‌های متفاوتی انجام می‌شود که در اینجا به چند نوع پرکاربرد آن اشاره می‌شود:

(الف) جوشکاری محفظه خشک در فشار پایین (Habitat Welding)

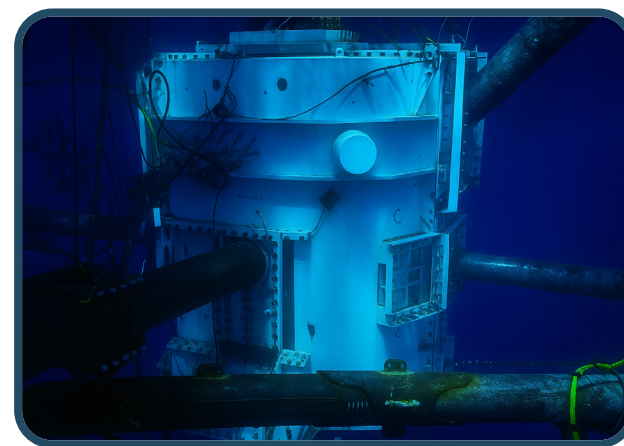
رایج‌ترین نوع، جوشکاری خشک است. یک اتاقک فلزی یا پلاستیکی ضدآب بزرگ در محل اتصال قرار می‌گیرد و داخل آن کاملاً خشک و تحت فشار تنظیم‌شده می‌شود. جوشکار داخل اتاقک قرار می‌گیرد و پس از تمیزکاری و خشک کردن سطح با روش‌های معمول جوشکاری را انجام می‌دهد.

این روش در ساخت و تعمیر سکوهای نفتی، پایه‌های پل‌ها و اسکله‌ها و سازه‌های عظیم دریایی استفاده می‌شود. این روش کیفیت جوش و ایمنی بالایی دارد، ولی به زمان و هزینه بالایی احتیاج دارد و همچنین در فضاهای محدود و عمق‌های بالا محدودیت دارد.

(ب) جوشکاری محفظه خشک در فشار بالا (Hyperbaric Welding)

این روش همانند روش قبلی فقط در عمق و فشار بالا انجام می‌شود. در این حالت، فشار داخل و خارج اتاقک تقریباً برابر و بسیار بالاتر از فشار اتمسفر است و هوای داخل اتاقک قابل تنفس نبوده و تنفس جوشکار از طریق ماسک مخصوص انجام می‌گیرد. این روش مخصوص جوشکاری در عمق‌های بسیار زیاد است و نیازمند تجهیزات پیچیده و تیم‌های تخصصی است.

این روش در خطوط لوله در اعماق زیاد، تعمیرات حیاتی در سازه‌های نفتی و زیردریایی‌ها، صنایع نظامی و نیز بازیابی کشتی‌ها و زیردریایی‌های غرق‌شده استفاده می‌شود. این روش در فشارهای بالا کیفیت جوش بالایی ارائه می‌دهد و بهترین روش برای انجام پروژه‌های حساس در اعماق بالا می‌باشد.



شکل ۳۷ محفظه جوشکاری پرفشار Figure 37

(ج) جوشکاری نقطه خشک (Dry Spot Welding)

این روش شبیه اتاقک فشار است اما کوچک‌تر و فقط منطقه جوش را خشک می‌کند. به شکلی که فقط دست و ابزار جوشکار در داخل محفظه

قرار گرفته و جوشکار از بیرون محفظه عملیات جوشکاری را انجام می‌دهد. برای تعمیرات موضعی و در جاهایی که امکان نصب اتاقک بزرگ وجود ندارد مناسب است.

در این روش ابتدا محفظه کوچک نصب و آب داخل محفظه تخلیه می‌شود. محل اتصال پاکسازی و خشک می‌شود و سپس جوشکار از بیرون محفظه، سطح درون محفظه را جوشکاری می‌کند.

این روش برای تعمیرات موضعی در خطوط لوله‌ها و نیز تعمیرات بخش‌های کوچک و اضطراری در پروژه‌های دریایی استفاده می‌شود. این روش انعطاف‌پذیری بالاتر، سرعت بیشتر و هزینه کمتری نسبت به سایر روش‌های دیگر جوشکاری خشک دارد. با این حال، به دلیل محدودیت فضای کاری، تنها برای جوشکاری‌های موضعی یا مقیاس کوچک مناسب است.



شکل ۳۸ جوشکاری نقطه خشک Figure 38

مشاغل و درآمد جوشکاری زیر آب

مشاغل مختلفی در جوشکاری زیر آب نقش دارند. از جمله: جوشکار زیر آب، بازرس جوشکاری، مهندس پروژه‌های دریایی، تکنسین تجهیزات غواصی و ... اما اصلی‌ترین نقش را در طی فرآیند همان جوشکار زیر آب انجام می‌دهد.

درآمد جوشکار زیر آب به عواملی مانند تجربه، مهارت، نوع پروژه، شرایط کاری و مدارک تخصصی بستگی دارد. ولی در کل به علت سختی و خطرناک بودن شغل، درآمد بالایی دارد. متوسط حقوق جوشکار زیر آب در جهان به طور تقریبی حدود ۴۰۰۰۰۰ الی ۶۰۰۰۰۰ دلار در سال است. اما برای جوشکار بسیار حرفه‌ای و پروژه‌های حساس ممکن است به ۳۰۰۰۰۰۰ دلار در سال نیز برسد.

آموزش و مدارک تخصصی

به دلیل حساسیت شغل جوشکاری زیر آب، دوره‌های تخصصی توسط ارگان‌های تخصصی مرتبط با صنایع دریایی برگزار می‌شود و گواهینامه‌ها

و مدارک تخصصی به شرکت‌کنندگان اهدا می‌شود. این مدارک معمولاً مهم‌ترین عامل در احراز مهارت جوشکار و استخدام توسط کارفرمایان را دارند.

فرایند دریافت این مدارک معمولاً به این ترتیب است که ابتدا در دوره‌های تخصصی غواصی پایه و سپس دوره‌های جوشکاری زیر آب شرکت کرده و بعد از شرکت در آزمون‌های عملی و تئوری (استانداردهای ایمنی و فنی)، گواهینامه به متقاضی اهدا می‌شود. این مدارک معمولاً هر ۲ یا ۳ سال نیاز به تمدید یا به‌روزرسانی دارند که با گذراندن دوره‌های تکمیلی امکان‌پذیر است.



شکل ۳۹ محفظه آموزشی شبیه‌ساز جوشکاری زیر آب Figure 39

جوشکاران باید در دوره‌های تخصصی غواصی صنعتی و جوشکاری زیر آب شرکت کنند که در مراکز معتبر بین‌المللی یا داخلی برگزار می‌شود. (CDA) Commercial Diving Academy در آمریکا، INPP در فرانسه و (PDSA) Professional Diving Schools Association در اروپا معتبرترین مراکز بین‌المللی برگزارکننده‌ی این دوره‌ها هستند.

گواهینامه‌های IMCA، ADCI، CSWIP و HSE Commercial Diver نیز از معتبرترین گواهینامه‌ها در حوزه مهارت‌های غواصی صنعتی، ایمنی و اقدامات اضطراری زیر آب، جوشکاری و بازرسی جوش زیر آب هستند.

تکنولوژی‌ها و آینده جوشکاری زیر آب

جوشکاری زیر آب یکی از مشاغل حیاتی و پرتقاضا در صنایع دریایی، نفت و گاز و زیرساخت‌های ساحلی است. با این حال، پیشرفت فناوری و نیاز به کاهش خطرات انسانی باعث شده است که این صنعت در سال‌های اخیر دستخوش تغییرات قابل‌توجهی شود و پیش‌بینی می‌شود در دهه‌های آینده نیز تحولاتی اساسی داشته باشد.

◀ استفاده از ربات‌ها و سیستم‌های اتوماتیک (ROV و AUV)

یکی از مهم‌ترین تغییرات پیش‌رو، جایگزینی بخشی از جوشکاری‌های زیر آب با ربات‌های زیرآبی کنترل از راه دور (ROV) و ربات‌های خودمختار

اخبار علمی

ماهان حبیب‌آذر

دانشجوی کارشناسی مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز



شرکت CloudNC افزونه‌ای به نام CAM Assist معرفی کرده که با کمک هوش مصنوعی، مسیر ابزار دستگاه‌های CNC را به‌صورت خودکار طراحی می‌کند.

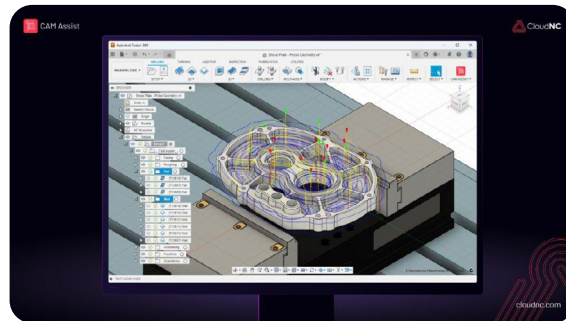
این فناوری می‌تواند در عرض چند دقیقه تصمیماتی بگیرد که قبلاً ساعت‌ها زمان و حضور مهندسان باتجربه نیاز داشت. به همین دلیل، این افزونه زمان برنامه‌نویسی را تا هشتاد درصد کاهش می‌دهد و حتی کاربران تازه‌کار را قادر می‌سازد تا قطعات پیچیده را بدون نیاز به تجربه‌ی زیاد ماشین‌کاری کنند.

کارشناسان آن را گامی مؤثر در کاهش وابستگی به نیروی متخصص و افزایش سرعت تولید می‌دانند و معتقدند این فناوری می‌تواند صنایع هوایی، خودروسازی، تجهیزات پزشکی و رباتیک را متحول سازد.

سرعت خیره‌کننده در برنامه‌نویسی؛
CNC با هوش مصنوعی

۲۷ خرداد ۱۴۰۴

CloudNC



دانشمندان MIT موفق به ساخت دستگاهی پنجره‌ای شکل شده‌اند که می‌تواند از رطوبت موجود در هوا، حتی در خشک‌ترین نقاط زمین مانند «دره مرگ» آمریکا، آب آشامیدنی سالم تولید کند. این سامانه بدون نیاز به انرژی خورشیدی یا باتری، تنها با اختلاف دما بین روز و شب کار می‌کند و می‌تواند راه‌حلی پایدار برای کم‌آبی در مناطق محروم باشد. این دستگاه شامل یک سطح جاذب رطوبت و ماده‌ای آزادکننده بخار است که با تغییرات دما، رطوبت را جذب و به‌صورت آب آزاد می‌کند. آزمایش‌ها نشان داده‌اند که این فناوری می‌تواند آب مورد نیاز یک خانواده را در مناطقی بدون منابع آب پایدار تأمین کند. این نوآوری نه‌تنها گامی مهم در مهندسی انرژی و محیط‌زیست به‌شمار می‌رود، بلکه نویدبخش نسل جدیدی از سیستم‌های آبرسانی قابل حمل و مستقل از زیرساخت است.

پیشرفت انقلابی در دست‌های مصنوعی؛ حس لامسه واقعی با رابط مغز-کامپیوتر

۷ بهمن ۱۴۰۳

UChicago News



پژوهشگران دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه کالیفرنیا برکلی، به‌تازگی کوچک‌ترین ربات پرنده بی‌سیم جهان را طراحی و ساخته‌اند که اندازه‌ای کمتر از یک سانتی‌متر و وزنی حدود ۲۱ میلی‌گرم دارد.

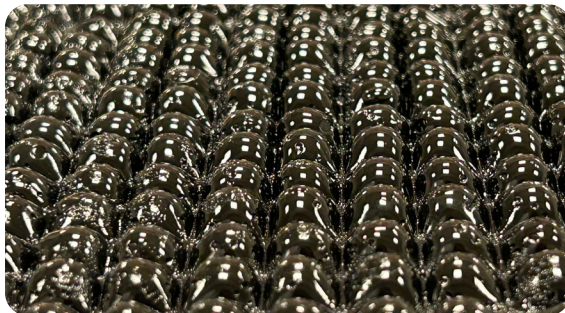
این ربات مینیاتوری با الهام از ساختار حشرات، به‌وسیله‌ی میدان مغناطیسی خارجی کنترل می‌شود و قادر است با دقت بالا پرواز کند، تغییر جهت دهد و در فضاهای بسیار کوچک و سخت‌دسترس حرکت کند.

این ربات کوچک، بخشی از پروژه‌ای برای توسعه‌ی سیستم‌های پروازی فوق‌سبک و چابک است که در آینده می‌توانند در عملیات‌هایی نظیر جست‌وجو و نجات، بازرسی در فضاهای تنگ و محیط‌های خطرناک به کار گرفته شوند.

آب از هوا؛ انقلابی در تأمین آب مناطق خشک

۲۲ خرداد ۱۴۰۴

MIT



محققان دانشگاه شیکاگو فناوری جدیدی معرفی کردند که با استفاده از رابط‌های مغز-کامپیوتر، حس لامسه‌ی واقعی را به کاربران دست‌های مصنوعی باز می‌گرداند. این سیستم با تحریک دقیق نواحی خاص مغز، امکان درک حرکت و شکل اجسام را فراهم کرده و کیفیت زندگی افراد استفاده‌کننده از پروتزها را به‌طور چشمگیری بهبود می‌بخشد. مطالعات بالینی اولیه نیز نشان داده‌اند که افراد پس از مدت کوتاهی توانسته‌اند با این سیستم اشیاء مختلف را تشخیص داده و از دقت حرکتی بالایی برخوردار شوند. این فناوری نویدبخش عصر جدیدی از پروتزهای هوشمند است.

نوآوری در ابعاد حشره؛ معرفی کوچک‌ترین ربات پرنده بی‌سیم جهان

۲۲ خرداد ۱۴۰۴

سایت دانشگاه برکلی



زیرآبی (AUV) است. این ربات‌ها می‌توانند در عمق‌های بالا و شرایط خطرناک، عملیات‌هایی مانند جوشکاری، برشکاری یا بازرسی را با دقت بالا و بدون نیاز به حضور انسان انجام دهند. این فناوری‌ها موجب کاهش ریسک جانی برای غواصان و جوشکاران، افزایش دقت و کیفیت جوش در عمق‌های بالا و صرفه‌جویی در زمان و هزینه اجرای پروژه‌ها می‌شوند.

با این حال، همچنان در بسیاری از پروژه‌ها استفاده از جوشکار انسانی ضروری خواهد بود، به‌ویژه در پروژه‌هایی که نیاز به خلاقیت و تصمیم‌گیری لحظه‌ای دارند.



شکل ۴۰ ربات خودمختار زیرآبی Figure 40

۴ توسعه فناوری‌های جوشکاری پیشرفته

روش‌های نوین جوشکاری زیر آب مانند جوشکاری با لیزر زیر آب و جوشکاری با اصطکاک در حال توسعه و آزمون هستند. این روش‌ها موجب بهبود کیفیت جوش، کاهش پاشش جرقه و تولید گازهای مضر و نیز افزایش قابلیت اجرا در محیط‌های پرچالش می‌شوند. همچنین تکنیک‌های جدید جوشکاری با گازهای محافظ در حال بهینه‌سازی برای انجام عملیات در عمق‌های بیشتر هستند.

۴ افزایش نقش بازرسی‌های غیرمخرب (NDT) هوشمند

هم‌زمان با پیشرفت رباتیک، ابزارهای بازرسی هوشمند مثل دوربین‌های با وضوح بالا، سنسورهای اولتراسونیک و لیدارهای زیرآبی نقش بیشتری در بررسی کیفیت جوش زیر آب پیدا خواهند کرد. این ابزارها می‌توانند قبل و بعد از جوشکاری، نقص‌ها را شناسایی کرده و نیاز به بازرسی دستی را کاهش دهند.

جوشکاری زیر آب یک حرفه تخصصی و حیاتی در صنایع دریایی و فراساحلی است که با وجود چالش‌های محیطی و ایمنی، نقش مهمی در ساخت و نگهداری سازه‌های زیرآبی ایفا می‌کند. پیشرفت فناوری و نیاز روزافزون به زیرساخت‌های دریایی، اهمیت این حرفه را دوچندان کرده و انتظار می‌رود توسعه فناوری‌های نوین نیز آینده این حوزه را به سمت محیط‌های ایمن‌تر، دقیق‌تر و کارآمدتر سوق دهد و زمینه‌ساز اشتغال و توسعه صنعتی باشد.

منابع

- [1] TWI Global – www.twi-global.com
- [2] American Welding Society (AWS) – www.aws.com
- [3] International Marine Contractors Association (IMCA) – www.imca-int.com
- [4] Commercial Diving Academy Technical Institute – www.cdtech.com
- [5] Wikipedia – en.wikipedia.org
- [6] Inspenet – inspenet.com
- [7] Water Welders – waterwelders.com
- [8] Home of Welding – home-of-welding.com
- [9] Kish Technology Campus – kishtech.ir

we introduce the subfields of Manufacturing and Production in which students and faculty members of the University of Tabriz are engaged at the postgraduate level as well as in their research activities:

Machining:

Machining is one of the fundamental and oldest methods in manufacturing processes, in which the workpiece is shaped and formed by means of a cutting tool until the desired dimensions and geometry are achieved. This process is based on the removal of material from the surface of the workpiece. In general, machining can be divided into two categories: traditional machining (such as turning, grinding, etc.) and advanced machining (such as EDM, USM, etc.). Machining itself involves various processes, which will be further discussed in the following sections.

Welding:

Welding is one of the most important processes for the permanent joining of metals and certain plastics, in which two or more parts are fused together by means of heat, pressure, or a combination of both. The resulting weld can achieve a strength equal to or even greater than that of the base metal. Welding itself includes several subfields and applications, such as: arc welding, resistance welding, underwater welding (discussed in detail in later sections), gas welding, solid-state welding, and advanced methods (laser, electron beam, etc.).

Casting:

Casting is one of the oldest and most widely used methods for producing metal components. In this process, molten metal is poured into a mold and, after solidification, takes the shape of the mold cavity. This technique makes it possible to manufacture large and heavy parts.

Casting methods include sand casting, die casting, investment casting, centrifugal casting, shell molding, continuous casting, vacuum casting, and others.

Forming:

Forming is a process in which the workpiece is shaped into the desired geometry and dimensions without material removal (unlike machining), but rather through the application of force. This deformation generally occurs in the plastic state of the metal (permanent deformation). According to the principle of mass conservation, the mass of the material does not change during the process, while the strength of the metal increases after deformation, often resulting in cold working.

In general, forming processes are divided into two main categories: bulk deformation processes and sheet metal forming processes. More specifically:

Bulk deformation processes: rolling, forging, extrusion, and drawing, etc.

Sheet metal forming processes: bending, shearing, deep drawing, roll forming, hydroforming, etc.

3D Printing:

Three-dimensional (3D) printing is an additive manufacturing process, meaning that instead of material removal or melting and casting, the part is built layer by layer. A 3D model of the part is first created using CAD (Computer-Aided Design) software, and then the printer fabricates it using various materials. This technique enables the production of complex geometries that are difficult or even impossible to achieve through traditional manufacturing methods.

Key advantages of 3D printing include rapid prototyping, minimal material consumption, and high flexibility in design modification.

Coating:

Coating refers to the application of a protective or decorative layer on the surface of a workpiece (metallic, polymeric, ceramic, etc.) to enhance surface properties such as resistance to corrosion, wear, heat, or even for aesthetic purposes. The main objectives of coating include: increasing corrosion resistance, improving wear resistance, enhancing appearance, and imparting specific properties such as conductivity or friction control. These improvements contribute to longer service life, better appearance, and the possibility of combining multiple functional properties in a single component.

Coating processes can be categorized into: mechanical and chemical coatings, physical vapor deposition, thermal coating, and specialized coatings including nanocoatings.

Destructive Testing:

Destructive testing refers to experiments in which a specimen is subjected to loads or conditions that ultimately cause permanent deformation or fracture. Consequently, the tested part cannot be used afterward. These tests are employed to evaluate the mechanical, physical, and metallurgical properties of materials.

Some of the most important destructive tests include: tensile testing, hardness testing, impact testing, bending, fatigue, creep, hardenability, and metallography.

The subfields of Manufacturing and Production discussed above represent key and practical areas within this discipline; however, this does not imply that the field is limited solely to these areas. Accordingly, faculty members and students at the University of Tabriz also engage in research and activities in other areas, providing significant contributions to the academic and scientific community.

- ▶ Fluid Mechanics
- ▶ Engineering Mathematics and Differential Equations

Core Specialized Courses:

- ▶ Machining Technology
- ▶ Machine Tools
- ▶ Advanced Manufacturing Methods
- ▶ Casting
- ▶ Design of Molds, Jigs, and Fixtures
- ▶ Heat Treatment
- ▶ CAD/CAM Systems
- ▶ CNC Programming
- ▶ Quality Control and Metrology
- ▶ Production Planning and Control
- ▶ Industrial Automation and Robotics

Practical and Workshop Courses:

- ▶ Machining and Machine Tools Workshops
- ▶ Quality Control and Metallurgy Laboratory
- ▶ Internships in Various Industries
- ▶ Practical Projects and Design of Molds and Production Processes

Hard and Soft Skills Required for Students

Manufacturing and Production engineering requires, in addition to technical and specialized knowledge, a set of both hard and soft skills.

Hard Skills:

- ▶ Proficiency in engineering and design software (CAD, CAM, ANSYS, etc.)
- ▶ Ability to program and operate CNC machines
- ▶ Knowledge of manufacturing processes and materials
- ▶ Quality control and measurement
- ▶ Production planning and project management

(Page 8 - Figure 5)

Soft Skills:

- ▶ Teamwork ability
- ▶ Problem-solving and analytical thinking
- ▶ Creativity and innovation
- ▶ Communication and report writing skills
- ▶ Flexibility and continuous learning

Research and Innovation Areas in Manufacturing and Production

This field is dynamic and continuously evolving, benefiting from new technologies and research.

Key Research Areas:

- ▶ Additive Manufacturing (3D Printing)
- ▶ Advanced Machining and Precision Processes
- ▶ Industrial Automation and Robotics
- ▶ Advanced Materials and Metallurgy
- ▶ Intelligent and Digital Production Systems
- ▶ Green and Sustainable Manufacturing
- ▶ Design for Assembly and Manufacturing (DFA/DFM)

Job Market and Career Opportunities for Graduates

Graduates of this field have a wide range of job opportunities in diverse industries.

Main Sectors:

Automotive Industry / Aerospace Industry / Oil, Gas, and Petrochemical Industry / Defense and Military Industry / Medical Industry / Manufacturing Plants and Workshops / Design and Engineering Companies

(Page 9 - Figure 6)

(Page 9 - Figure 7)

Common Jobs:

Process Engineer / Production Engineer / Quality Control Engineer / Production Planner / Production Line Manager / CNC Specialist and Machine Programmer / Mold and Tool Design Specialist / Consultant and Researcher

Considering the rapid growth and advancement in the modern industrial sector, this specialization is no exception and is expected to follow these key trends:

Key Trends:

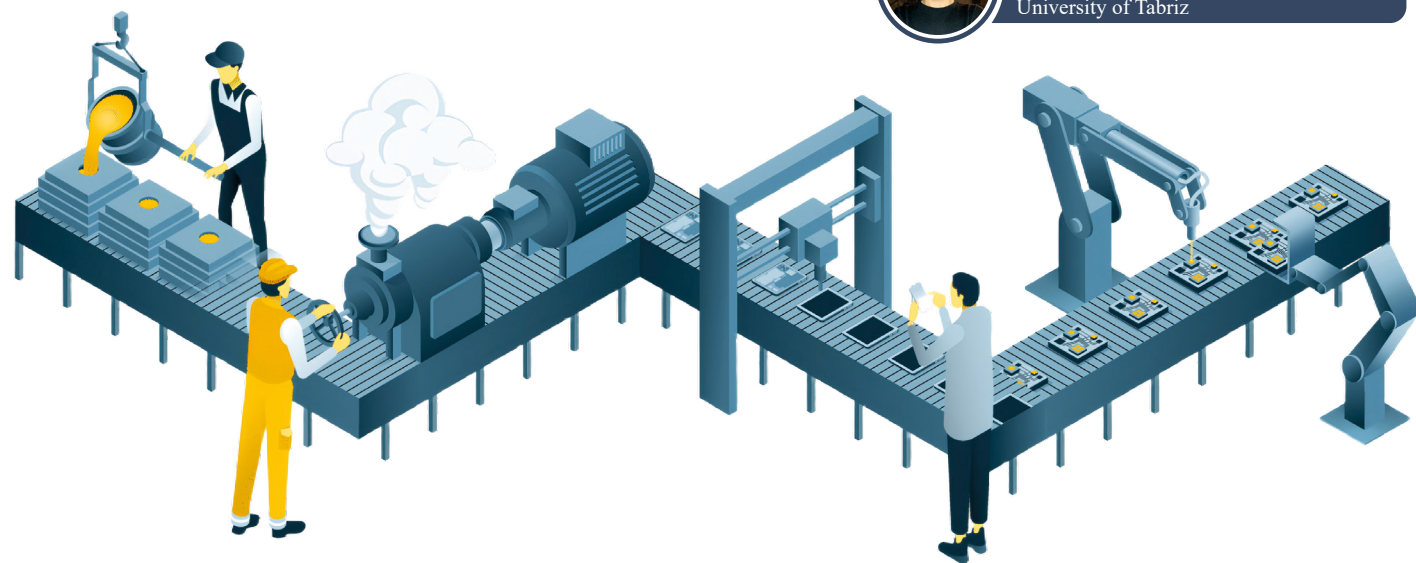
Smart Manufacturing and Smart Factories / Additive Manufacturing and 3D Printing / Advanced Automation and Robotics / New Materials Technologies and Nanotechnology / Sustainable and Environmentally Friendly Manufacturing / Artificial Intelligence and Machine Learning

Engineers in this field must continuously update their knowledge and skills to actively participate in these transformations.

Subfields of the Manufacturing and Production Engineering:

As mentioned in previous texts, Manufacturing and Production is one of the main fields of Mechanical Engineering, which itself encompasses several subfields and scientific areas related to this discipline. In this section,

Introduction to Manufacturing Processes



Mahdi Taghiyam
B.Sc. student in Mechanical Engineering,
University of Tabriz

(Page 11 - Figure 10)

Manufacturing processes are the beating heart of industry and production engineering. Understanding these processes—from traditional machining to modern methods such as additive manufacturing—is essential for the design, fabrication, and optimization of industrial products. In this text, we will take a comprehensive and categorized look at various production methods.

1. Machining

Machining is a subtractive process in which the desired shape is achieved by removing portions from a larger workpiece. This material removal is usually done in the form of chip cutting. Most machining methods offer high precision and are applicable to a wide range of engineering materials. Nowadays, most machining operations are performed using CNC/CAM systems and CAD files.

(Page 10 - Figure 8)

Various Machining Operations

The widespread use of machining in industry has led to the development of a variety of processes. Below are some of the most common machining operations:

- **Milling and Turning:** For creating flat surfaces, grooves, or cylindrical parts.

(Page 10 - Figure 9)

- **Drilling and Boring:** For creating or refining holes with greater accuracy.
- **Planing:** For flattening surfaces or creating grooves simultaneously.

Also, methods such as laser cutting, plasma, waterjet, gas fuel, and Electrical Discharge Machining (EDM) exist that perform cutting or shaping operations without direct contact with the workpiece and are used for hard materials or complex shapes.

Advantages of Machining:

High precision, ability to process various materials, consistent quality, automation capability.

Disadvantages of Machining:

High initial cost, need for skilled operators, relatively high material waste.

Machining is widely used in most industries. One of the most important applications of machining is the manufacturing of industrial molds, which require high precision and proper surface quality. It is also used as a secondary operation to improve surface smoothness and accuracy.

2. Casting

Casting is an ancient manufacturing process in which various molten materials are poured into a mold with the desired shape and, after cooling, solidify into the intended form. Manufacturers use casting to produce complex and precise parts. Despite requiring an initial investment, this process reduces production time and operational costs and simplifies assembly—essentially, the part comes out

In conclusion, it is worth noting that faculty members and students are not, and will not be, confined to the aforementioned subfields; the scope of each academic professional's activities in both science and practice extends far beyond these descriptions.

Active Faculty Members in the Manufacturing and Production Engineering



Dr. Karim Sheleshnejad

Areas of Expertise:
• Polymer Section

Academic Rank: Professor



Dr. Vahid Pouyafar

Areas of Expertise:
• Forming Section
• Coating Section
• Semi-Solid Metallurgy Section

Academic Rank: Assistant Professor



Dr. Maqsoud Shalvandi

Areas of Expertise:
• Machining and Ultrasonic Section
• Coating Section

Academic Rank: Assistant Professor



Dr. Mommad Zadshkovian

Areas of Expertise:
• Cold and Hot Forming & Plastic Deformation Section

Academic Rank: Associate Professor



Dr. Mehran Mahboubkhah

Areas of Expertise:
• 3D Printing Section

Academic Rank: Professor



Dr. Mohammadreza Shabgard

Areas of Expertise:
• Electrophysical Section (EDM, LBM, EBM, etc.)

Academic Rank: Professor



Dr. Amir Mostafapour Asl

Areas of Expertise:
• Welding Section
• Coating Section
• Non-Destructive Testing Section

Academic Rank: Professor

- Difficulty controlling tolerances and springback effects
- Limitations in shaping very thick parts

The forming process is widely used in many industries such as automotive, aerospace, and electronic parts manufacturing due to its production speed and waste reduction.

4. Powder Metallurgy

Powder metallurgy is a manufacturing process in which powdered metals are converted into solid parts under pressure and heat. Due to its relative simplicity, reduced waste, and high capability for mass production, it has found a special place in various industries.

(Page 13 - Figure 20)

The powder metallurgy process can be divided into four main stages:

- **Powder Production:** Metal powder is produced by grinding, crushing, or atomization.
- **Mixing:** Additives such as lubricants or binders are added to the powder.
- **Compaction:** The powder mixture is shaped under high pressure in a mold.
- **Sintering:** The compacted piece is heated at high temperature (below melting point) so that the particles bond together.

Advantages of Powder Metallurgy:

- High efficiency with waste less than 3%
- Precise control of mechanical and physical properties
- Production of complex and precise parts without need for machining
- Reduced need for secondary operations after production
- Suitable for mass production with full automation capability

Disadvantages of Powder Metallurgy:

- Size limitation of parts (usually less than 20 kg)
- Costly for low-volume production
- Non-uniform density in parts, which may affect mechanical properties

Powder metallurgy is used in manufacturing bearings, gears, and small parts in the automotive industry, as well

as producing precise, lightweight, and economical parts in aerospace and medical industries.

5. Molding (Casting/Forming by Mold)

Molding is one of the shaping methods in which the raw material is directed into a mold under pressure and takes the desired shape and dimensions.

(Page 13 - Figure 21)

The variety in mold design has made this process a convergence point of industry and creativity, enabling the production of diverse and special shapes.

Depending on the type of part and its application, a wide range of materials can be used in this method. However, due to the ease of the process, low cost, and high variety, molding is primarily used for polymeric and plastic materials.

Injection molding has various methods, some of which are:

- **Injection Molding:** The molten material is injected into the mold under high pressure; suitable for mass production of complex and precise parts.
- **Reaction Injection Molding:** Reactive liquid materials are injected into the mold and harden after reaction; suitable for lightweight and durable parts.
- **Blow Molding:** Specifically used for manufacturing hollow parts such as bottles; the final shape is formed by blowing air into the heated material.

(Page 14 - Figure 22)

- **Compression Molding:** The heated material is placed in the mold and shaped by applying pressure; suitable for simple and bulky parts at low cost.

(Page 14 - Figure 23)

Differences between Casting and Molding

In the manufacturing world, the terms “casting” and “molding” are sometimes used interchangeably, but in reality, these are two distinct processes with different execution principles and applications. The table below outlines some key differences between these two methods:

of the mold ready-made. Therefore, it is suitable for mass production.

(Page 11 - Figure 11)

Types of Casting

Technical sources describe around 14 main types of casting. The most popular ones include:

- **Sand Casting:** Uses compacted sand molds; inexpensive and widely used, though surface quality is moderate.

(Page 11 - Figure 12)

- **Investment Casting (Lost Wax):** Uses ceramic molds with wax patterns; offers high precision and detail.

(Page 11 - Figure 13)

- **Die Casting:** Injects molten metal into a metal mold under high pressure; suitable for mass production and precise parts.
- **Centrifugal Casting:** Suitable for hollow parts; produces more uniform structures with higher strength.
- **Lost Foam Casting:** Uses foam patterns that evaporate upon contact with molten metal; simplifies molding without needing pattern removal.

(Page 12 - Figure 14)

Advantages of Casting

- Ability to create complex shapes and both large and small parts
- High strength due to controlled solidification processes
- Partial recyclability of waste material

Disadvantages of Casting

- High cost and time required for making permanent molds
- Low surface quality in some methods
- Possibility of internal defects such as porosity or gas entrapment

Casting is used in various industries that require the production of bulky, complex, or specially shaped parts. This method, due to its capability to produce the part in a single step, is also a suitable option for mass production with savings in assembly time.

3. Forming

Forming is one of the main manufacturing processes in which the raw material is shaped into the desired form under the influence of forces such as pressure, tension, or bending, without adding or removing material. This process creates plastic deformation in the material and is mainly applied to metal sheets and ductile materials.

(Page 12 - Figure 15)

Due to low waste production, high efficiency, and improved mechanical properties of the part, forming plays an important role in various industries.

Forming has different types according to industrial needs; some of them include:

- **Forging:** Applying intense pressure (usually hot) to produce strong parts with a uniform structure.

(Page 12 - Figure 16)

- **Extrusion:** Forcing material through a die to produce uniform cross-sections; commonly used in making aluminum profiles.

(Page 12 - Figure 17)

- **Rolling:** Reducing thickness and increasing length of a part by passing it between rollers; used widely in steel sheet production.

(Page 12 - Figure 18)

- **Indentation:** Creating a permanent mark or shape by pressing a shaped or pointed tool; used for hardening or marking.

(Page 12 - Figure 19)

Advantages of Forming:

- Increased strength and grain refinement of the structure
- Much less waste compared to machining
- Suitable for high-speed mass production
- Ability to produce parts with complex geometries without machining

Disadvantages of Forming:

- High cost of initial equipment (presses, dies, etc.)
- Limitations in formability of certain materials

- **Adhesives:** Chemical bonding without damaging the parts; suitable for certain materials.
- **Nuts, bolts, and washers:** Mechanical fastening that can be disassembled; washers prevent damage and loosening.

Joining methods are selected based on the type of material, intended application, and operating conditions. In many industrial products, a combination of these methods is used to achieve strength, stability, and ease of repair.

Ultimately, various manufacturing methods, each with their own advantages and limitations, hold an important place in industry. Correct selection based on product type, production volume, and required precision directly affects the final quality and cost. With technological advancements, combining these methods and leveraging innovations has enabled the production of more complex and highly precise parts.

But the question remains: how are products with extremely high precision and complexity, such as precision spheres, manufactured?

References

- [1] 3ERP – What is Machining? <https://www.3erp.com/...>
- [2] TechniWaterjet – Machining Processes <https://www.techniwaterjet.com/...>
- [3] Xometry – What is Casting? <https://www.xometry.com/...>
- [4] RapidDirect – What is Casting? <https://www.rapiddirect.com/...>
- [5] Dassault – Forming Guide <https://www.3ds.com/...>
- [6] AlphaPrecision – Powder Metallurgy <https://www.alphaprecision-pm.com/...>
- [7] 3ERP – Molding <https://www.3erp.com/blog/molding/>
- [8] MinaPrem – Joining <https://www.minaprem.com/joining/>

Aspect	Molding	Casting
Process Method	Shaping the material in a mold by applying pressure	Pouring molten material into a mold and solidifying it
Material State Initially	Usually solid or semi-solid (powder, granules)	Liquid (often molten metal)
Detail Precision	Higher (compared to casting)	Lower (compared to molding)
Economic Scale	Cost-effective for mass production	Suitable for producing large or complex parts
Materials Used	Mainly polymers, some metals	Mainly metals, sometimes specialized polymers

In industry, molding is used to produce components such as high heat-resistant engine parts, lightweight and durable components, and other engineered products.

6. Additive Manufacturing

Additive manufacturing technology, or 3D printing, is a process contrary to machining, which adds material layer by layer. Due to its efficiency and lower cost compared to many traditional manufacturing methods, it is commonly used for prototyping or limited-scale production.

(Page 14 - Figure 24)

In this process, first a three-dimensional digital model is designed. Then, the model is divided into thin layers, and the printer deposits the raw material layer by layer on top of each other to create the final shape of the part. At the end, the part is separated from the build platform.

Additive manufacturing has various types, some of which are mentioned below:

- **Binder Jetting:** Bonding powder particles with a liquid adhesive; suitable for lightweight and colored parts.
- **Directed Energy Deposition:** Melting metal wire or powder with a focused energy source; used for repairing metal parts.
- **Material Extrusion:** Melting and layering plastic filament; the most common method in home 3D printers.

- **Sheet Lamination:** Layer-by-layer bonding of thin sheets using adhesive, heat, or vibration; applicable for metal, plastic, or composites.
- **Powder Bed Fusion:** Melting powder with laser or electron beam; for producing precise metal or polymer parts.

Advantages of Additive Manufacturing:

- Fast and low-cost prototyping
- Very low waste production
- Lower energy consumption compared to traditional methods
- More environmentally friendly
- Capability to create parts with complex and unique shapes

Disadvantages of Additive Manufacturing:

- Limited variety of raw materials
- Relatively high cost for materials and equipment
- Low speed in mass production

In industry, additive manufacturing is used to produce complex, lightweight, custom parts and prototypes in fields such as aerospace, medical, automotive, and engineering.

7. Joining Processes

Direct manufacturing of complex products is both technically challenging and economically costly. Under such circumstances, producing smaller parts and joining them together is considered a logical and common solution.

(Page 15 - Figure 25)

In manufacturing, the joining process refers to assembling two or more parts to form an integrated structure. Joints are generally classified into two categories: temporary and permanent.

- **Temporary joints** allow parts to be separated without damage.
- **Permanent joints** cause damage to parts upon separation.

Some common joining methods used in industry are as follows:

- **Welding:** Joining metals by local melting and sometimes using a filler material.
- **Riveting:** Mechanical fastening with rivets; rivet heads include flat, round, countersunk, and button types.

the neutron moderator rods) to increase the reactor's output.

Although some operators expressed concerns about the dangers of this action, organizational pressure and direct orders forced them to comply. As a result, at 12:54 a.m., the thermal power of Reactor No. 4 reached 700 megawatts, and the test goal appeared to be achieved — but instability continued.

(Page 17 - Figure 27)

At 1:23 a.m., steam pressure in the reactor core suddenly rose, and the system exited a stable state. To restore conditions, staff attempted to insert the control rods via the emergency shutdown system, known as AZ-5. But instead of immediately reducing power, the poorly designed rods and delayed system response caused further instability.

Moments later, a massive explosion tore through the reactor. It hurled the 1,200-ton reactor lid into the air and released vast quantities of radioactive materials into the atmosphere. In the control room, staff initially thought it was an ordinary explosion and did not realize the catastrophic nature of the event.

Radiation detectors showed a reading of 3.6 roentgen, the maximum capacity of those devices. Staff were unaware that the actual radiation levels were far beyond that. The reactor had completely disintegrated, and massive volumes of toxic gases, uranium particles, graphite, radioactive isotopes, and heavy-element-laden dust were being released into the air — a silent and deadly process.

At 2:00 a.m., operators noticed flames atop Reactor No. 4 and immediately reported it to the fire brigade and on-site emergency teams. The flames shooting skyward from the reactor roof indicated a disaster whose full scale was still unclear.

Anatoly Dyatlov, the engineering deputy and night-shift supervisor, became extremely alarmed. Even a minor malfunction could jeopardize the political goals and honors he and Viktor Bryukhanov expected. However, neither of them realized that the event would not only end their careers but change their lives forever.

At 2:40 a.m., Bryukhanov learned of the severity of the situation. As the news reached senior Communist Party and Soviet government officials, an emergency commission was formed to assess the situation and quickly dispatched to Chernobyl to inspect the plant firsthand.

By 6:15 a.m., most senior managers, local officials, and commission members had arrived at the power plant to receive preliminary reports. A technical expert was as-

signed to measure radiation levels near the reactor with more accurate instruments.

His report shocked everyone: the precise instruments revealed a radiation level not of 3.6 roentgen, but about 15,000 roentgen per hour — a level far beyond lethal for humans. In some areas, the radiation surpassed that of Hiroshima's atomic bombing.

The technician, who had gone to the site without adequate safety equipment, soon showed symptoms of acute radiation syndrome — including tongue swelling, skin burns, and neurological symptoms — and died a few hours later. His body was so contaminated that it could not be removed from the site for a long time.

At the same time, Bryukhanov, hoping to downplay the emergency and reduce panic at the central government level, sent a false report to Moscow, claiming radiation levels were "minor," around 3.6 roentgen. This led the commission members to enter the area unprepared, and the initial containment response was slow and disorganized.

Despite the commission's presence, no effective response was initiated, and the responsibility for containment fell to the plant workers. At least 174 staff members who were present at the plant during the explosion felt personally responsible for what had happened.

Many believed that the coolant system pipes had exploded and that the reactor's core temperature was rising dangerously. Fully aware of the deadly radiation and their likely deaths, they continued working — knowing the nearby city of Pripyat, home to their families, was at risk from a silent disaster.

Driven by this sense of duty, many voluntarily tried to open the manual valves of the emergency cooling systems to reduce reactor temperature. However, the reactor no longer had a clear or stable structure; internal destruction had rendered the term "reactor" itself inadequate.

The commission knew that the piping systems had been completely destroyed under thick concrete and a mass of radioactive contamination. Anyone who approached the reactor received a fatal dose of radiation and usually died within hours from symptoms like severe tongue swelling, burns, and organ failure.

On April 27, 1986, authorities finally ordered the evacuation of Pripyat after realizing the scale of the catastrophe and fearing mounting casualties. Over 1,000 buses were sent to the city, whose residents were still unaware of the tragedy unfolding just 3 km from their homes. Authorities restricted information to prevent public panic and control the narrative.



Chernobyl

The Story of an Engineering Disaster



Arya Eghbal Ansaroodi
B.Sc. student in Mechanical Engineering,
University of Tabriz



The Chernobyl Nuclear Power Plant was located near the city of Pripjat, in an area called Chernobyl — a small town that was once considered one of the symbols of progress and modern life in the Soviet Union.

Pripjat had a population of about 44,000, most of whom were workers, engineers, scientists, laborers, and other staff employed at the Chernobyl plant or its associated institutions. Like many of the Soviet Union's planned cities, Pripjat was equipped with full urban infrastructure including schools, hospitals, restaurants, shops, government offices, and recreational centers, and was seen as an industrial socialist utopia.

But after the nuclear disaster on April 26, 1986, the city's social and economic life came to a complete halt. Residents were evacuated only a few hours after the explosion, and since then, no one has ever been permitted to return permanently. Pripjat, once full of light and life, became a deserted and silent city.

(Page 16 - Figure 26)

Today, more than three decades after that catastrophic incident, the area has turned into a habitat for birds, wild dogs, and some small creatures. No trace of human life remains — except for silent signs of the past — because the essential factor for sustained life, biological safety, has been lost in the region for centuries.

The Chernobyl disaster, considered the world's worst non-military nuclear accident, occurred in the early hours of April 26, 1986 — on a night when residents of the region were peacefully asleep, unaware that they would soon be forced to abandon their homes forever. The incident began at exactly 12:04 a.m.

At the time, workers at the Chernobyl power plant were conducting a test to assess the performance of the control rods in Reactor No. 4 and to examine the ability to generate electricity under certain reactor conditions, especially at around 700 megawatts of thermal power. This test was part of a program ordered by high-ranking Soviet officials and was designed to evaluate the plant's safety and emergency operation capacity.

The test was overseen by plant director Viktor Bryukhanov, the founder and chief executive of the facility. A successful result was expected to bring praise to the management and technical team. The test was directly supervised by Anatoly Dyatlov, the chief of reactor testing.

At that hour, plant workers reported that the reactor's power level was not increasing and remained very low. However, under orders from Bryukhanov — who was under pressure from higher authorities and eager to present the test as successful — it was decided to extensively withdraw the reactor's control rods (or more precisely,

UNDERWATER WELDING

A DIFFERENT WORLD IN THE HEART OF THE SEA

**Sadra Ayinehsaz Jadid**B.Sc. student in Mechanical Engineering,
University of Tabriz

Introduction

Welding is one of the most important methods for joining metals and is widely used across various industries. In this process, metals are fused together through the application of heat. However, with the advancement of science and technology, the need to develop welding technologies capable of operating in non-standard environments—such as underwater settings—gradually emerged.

Underwater welding is one of the most complex and specialized branches of welding science, encompassing a combination of technical skills and diving knowledge. It is recognized not only as a technical skill but also as an art, requiring high precision, the ability to make quick decisions in critical situations, and strong physical and mental endurance.

Many people assume that welding underwater is impossible or bizarre, as welding is generally associated with fire and flame. However, welding is fundamentally based on electric arc, not flame. In dry environments, the arc is formed through the ionization of air; whereas underwater, the electric arc is created by the ionization of water vapor around the electrode and the workpiece. Therefore, although initiating an arc and performing welding underwater is technically challenging, it is entirely feasible and logical.

This action placed excessive pressure on the reactor, leading to unauthorized increases in water circulation and temperature, ultimately causing loss of reactor control.

However, Legasov was never able to publicly and conclusively prove these facts. Due to his opposition to the official narrative and his efforts to expose the authorities' lies, he was placed under house arrest, and many of the documents he had compiled were confiscated and censored. Ultimately, Legasov, under psychological pressure and tormented by his scientific and moral responsibilities, committed suicide in 1988, on the second anniversary of the disaster (1927–1988).

Years later, medical and scientific studies revealed that cancer rates in affected areas had increased up to 50 times. Additionally, the birth of infants with genetic abnormalities and structural changes in the DNA of many residents in Belarus, Ukraine, Russia, France, and several other countries stood as testimony to the vast and deep-reaching impact of the Chernobyl disaster — effects that still persist across generations.



References

- [1] Serhii Plokhly – Chernobyl: History of a Nuclear Catastrophe Basic Books, 2018.
- [2] Journal of Radiological Protection – Articles on Chernobyl Peer-reviewed papers on radiation effects and safety.
- [3] IAEA – Chernobyl Reports (1986–1991)
Official reports by the International Atomic Energy Agency.
- [4] UNSCEAR – 2000 Report
UN Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation.
- [5] Declassified Soviet Archives – KGB & Communist Party Documents
Post-1991 documents on the Chernobyl disaster.

Emergence of Advanced Technologies (1980 to Present)

In recent decades, technological advancements have significantly improved the quality and safety of underwater welding. The development of remotely operated vehicles (ROVs) and automated welding systems has revolutionized the industry. These technologies reduce the risks associated with human presence in hazardous underwater environments and enable operations at much greater depths.

Moreover, advances in water-resistant electrode manufacturing and the implementation of new techniques such as underwater laser welding have enhanced weld quality and operational efficiency. Non-destructive testing (NDT) methods like ultrasonic and radiographic inspections have also been developed to provide more accurate assessments of underwater weld quality.

(Page 27 - Figure 33)

Role of Standards and International Organizations

With the growing applications of underwater welding, international organizations such as the American Welding Society (AWS) and the American Society of Mechanical Engineers (ASME) began drafting specialized standards for this field. These standards include detailed guidelines for equipment, techniques, safety, and welder training.

Underwater Welding in Iran

In Iran, with the development of the oil and gas industry in the Persian Gulf, the need for underwater welding increased. This technology was introduced into the country in the 1970s and was initially used for repairing offshore platforms and marine facilities. In the following years, with the training of specialized human resources and the adoption of advanced equipment, Iran was able to make significant progress in this field. Today, underwater welding in Iran is used for oil-related projects, pipeline repairs, pier construction, marine civil engineering operations, and even military applications. The country has achieved a relative level of self-sufficiency in this area.

Applications of Underwater Welding

Underwater welding is a key technology in marine and offshore industries, playing a vital role in the maintenance, repair, and construction of various underwater structures. Due to its ability to function in challenging environments, it is used in a wide range of projects—from major industrial operations to military missions and res-

cue operations. This section explores the diverse applications of underwater welding in various industries.

1. Offshore Oil and Gas Industry:

One of the most significant application areas of underwater welding is the oil and gas industry. Many offshore installations—such as oil platforms, gas pipelines, and underwater terminals—are exposed to harsh environmental conditions and require constant maintenance and repairs. Offshore platforms, built for extracting oil and gas at sea, are vulnerable to corrosion and structural damage due to continuous contact with saltwater. Underwater welding is used to repair supports, joints, and reinforce the structure of these platforms. Additionally, underwater pipelines require precise welding for connecting new sections or repairing damaged parts.

2. Shipping and Marine Transportation Industry:

In the shipping industry, underwater welding is an essential tool for the maintenance and repair of ships, submarines, and other marine vessels. Damage caused by collisions, corrosion, or structural cracks in the hull can be repaired underwater without removing the ship from water. Propellers and drive shafts, which often get damaged by wear or impact, are also repaired in place and underwater. Military and research submarines require periodic maintenance, much of which is performed directly underwater.

(Page 28 - Figure 34)

3. Marine and Coastal Infrastructure:

Vital infrastructure such as bridges, docks, dams, and offshore wind turbine bases are in direct contact with water and require ongoing maintenance. The columns and bases of bridges constructed over water need periodic reinforcement and repair due to water flow and corrosion. Large dams and water management facilities also require underwater welding to prevent leaks or structural damage. Marine docks, used for mooring ships, often experience damage due to mechanical pressure and environmental conditions.

(Page 28 - Figure 35)

4. Military and Defense Industries:

Naval forces around the world use underwater welding for emergency repairs and special operations. During wartime or emergencies, underwater welding can quickly return damaged ships to operational condition. It is also used for recovering sunken equipment or repairing dam-

Due to its unpredictable and complex environment, underwater welding requires special equipment, specific methods, and strict safety standards. Factors such as water pressure, low temperature, strong currents, limited visibility, and the presence of hazardous gases can all affect weld quality and operator safety. Additionally, underwater welding includes various methods, each with its own unique applications and techniques.

Underwater welders must not only possess advanced welding skills but also be skilled divers. They must be capable of working under harsh conditions, managing stress, and making rapid decisions in emergencies. This combination of abilities makes underwater welding one of the highest-paying—and simultaneously, most dangerous—jobs in the technical industries.

(Page 26 - Figure 31)

In this issue of the magazine, we aim to thoroughly explore the various aspects of underwater welding: from its history and technological evolution to its different methods, applications, advantages and disadvantages, future outlook, and even job opportunities and potential incomes. The objective is to provide a comprehensive understanding of this specialized field and highlight its importance in today's world.

History of Underwater Welding

The history of underwater welding dates back to the era of industrial advancement and the growing need for maintenance and repair of marine structures. While the concept of joining metals using heat and welding dates to ancient times, the application of this technique in underwater environments is a relatively modern development that began in the early 20th century. The technology emerged as a response to the need for quick and efficient repairs in aquatic environments—especially in military, maritime, and oil and gas industries.

(Page 26 - Figure 32)

Before Technological Advancement (Pre-20th Century)

Before the development of electric welding technology, underwater repairs were mainly carried out using mechanical methods such as riveting and bolting. At that time, divers used primitive methods to repair ship hulls and other marine structures. The technical limitations and lack of appropriate technology for creating an electric

arc underwater hindered the progress of these types of repairs.

Early Developments (Early 20th Century)

The first real steps toward underwater welding were taken in the early 1900s. Advances in arc welding techniques used in dry environments motivated engineers to explore methods for adapting this technology for underwater use.

In the 1930s, the Russian Navy emerged as a pioneer in this field. Thanks to the work of Konstantin Khrenov, the first successful underwater welding experiments were conducted. During this period, Russian engineers managed to perform manual arc welding using special electrodes in shallow water environments. This achievement marked the beginning of broader development in other countries.

Role of World War II in the Advancement of Underwater Welding

World War II played a key role in the rapid development of underwater welding technology. During the war, the urgent need to repair damaged warships, submarines, and marine facilities drove nations involved in the conflict to rapidly seek innovative solutions for enhancing marine repair efficiency.

The U.S. Navy and the British Royal Navy made significant investments in developing advanced underwater welding equipment. Trained welders who were also skilled divers played a vital role in maintaining and restoring naval fleets. During this time, new methods such as dry welding—where pressure chambers are used to create a dry environment underwater—were developed.

Post-War Developments and the Modern Era (1950–1980)

After World War II, interest in underwater welding expanded beyond the military sector into civilian industries such as offshore oil and gas, shipping, and infrastructure construction. The discovery of offshore oil fields in deep waters and the need to build and maintain marine oil platforms in the 1950s and 1960s served as major drivers for further technological development.

In the 1960s, significant progress was made in dry welding techniques. The use of advanced pressure chambers allowed welders to operate at greater depths and under high pressures while achieving high-quality welds. These advancements increased confidence in weld quality and reduced the risks associated with underwater operations.

electrode provides high precision and control, making it suitable for fine or sensitive work.

- Applications:**
- Military and defense components
 - Thin or delicate metals
 - Situations requiring high weld quality
- Disadvantages:**
- Slower process
 - Requires high skill and expensive tools

d. Flux-Cored Arc Welding (FCAW Wet):

Uses a flux-cored wire, which produces shielding gas and slag during welding to protect the weld pool. Often used for shallow depths or specific structures.

- Applications:**
- Repairs on offshore platform elements
 - Heavy structures in shallow waters
 - Difficult-to-reach areas
- Advantages:**
- Faster than other methods
 - More resistant to arc instability from water
- Disadvantages:**
- Lower precision and weld quality
 - Continuous wire feeding is difficult underwater
 - Needs special equipment

2. Dry Welding:

In dry welding, a waterproof chamber (dry habitat) is placed around the welding site. Water is pumped out of the chamber, and gas—usually a helium-oxygen mixture—is introduced to create a controlled dry environment. Standard welding techniques used on land can then be performed inside the chamber.

- Advantages of Dry Welding:**
- Higher Weld Quality: No water interference; welds are cleaner and less prone to defects.
 - Greater Safety: Less risk of electric shock due to a dry and pressurized environment.
 - Greater Durability: Reduced corrosion and improved weld strength.

- Disadvantages of Dry Welding:**
- High Cost: Requires complex and expensive equipment
 - Time-Consuming: Setting up the chamber and clearing the water takes time
 - Depth Limitations: Difficult and costly to implement at very deep levels

Types of Dry Welding:

a. Welding Habitat (Dry Chamber Welding):

The most common dry welding method. A large water-proof chamber (metal or plastic) is installed over the weld area and pressurized. The welder enters the chamber, and standard welding is performed.

- Applications:**
- Building and repairing oil platforms
 - Underwater bridge columns
 - Large marine structures

b. Hyperbaric Dry Welding:

Similar to habitat welding, but performed at very high pressure and extreme depths. The inside and outside pressures are equalized, and the welder must use special breathing gear due to unbreathable gas mixtures.

- Applications:**
- Deep-sea pipeline repairs
 - Critical submarine repairs
 - Military and deep salvage operations

(Page 30 - Figure 37)

c. Spot Dry Welding:

A miniature chamber is used to isolate and dry only the welding spot. The welder works from outside the chamber with their hands and tools inserted into the dry area.

- Applications:**
- Localized repairs on pipes
 - Emergency or space-limited welding tasks
- Advantages:**
- More flexible and cost-effective
 - Faster setup than full chambers
- Disadvantages:**
- Only suitable for small-scale or spot welding

(Page 31 - Figure 38)

Careers and Income in Underwater Welding

Various professions play a role in the underwater welding process, including: underwater welder, welding inspector, marine project engineer, diving equipment technician, and more. However, the underwater welder holds the most central and critical role in the process.

The income of an underwater welder depends on several factors such as experience, skill level, project type, working conditions, and certifications. Never-

aged structures during special missions. Some classified military facilities—such as underwater radar stations or sensors—are constructed using underwater welding techniques.

5. Rescue and Recovery Operations:

Underwater welding plays an important role in marine rescue operations and the recovery of sunken or damaged vessels. It is used to cut or join different parts of sunken ships during rescue operations. Equipment such as cargo containers or heavy machinery that has fallen into the water can be stabilized and recovered through welding. Temporary buoyancy systems used for stabilizing or lifting large structures during rescue missions also utilize this technology.

(Page 28 - Figure 36)

6. Marine Renewable Energy:

With the growth of the renewable energy sector, underwater welding plays a key role in the construction and maintenance of marine energy production facilities. The bases of offshore wind turbines require corrosion- and pressure-resistant welding. Power plants that harness wave or tidal energy often need underwater repairs. Subsea power cables and energy transmission systems require regular maintenance using underwater welding.

7. Scientific Research and Underwater Exploration:

Underwater welding is also used in research and underwater exploration projects. Marine research stations, used for studying marine life or environmental conditions, require the welding of robust structures. In the exploration of ancient sunken ships, welding can be used to stabilize historical structures. Welding is also used to install or repair underwater sensors, cameras, and environmental monitoring equipment.

Types of Underwater Welding

Underwater welding is carried out using two main methods: wet welding and dry welding. The choice of method depends on factors such as the type of project, water depth, environmental conditions, and the level of precision required. Below is a detailed explanation of both approaches.

1. Wet Welding:

In wet welding, the welding process is performed directly in the water. The diver equipped with special diving gear reaches the welding site and uses special waterproof electrodes designed for underwater use. The electric arc

created between the electrode and the metal surface melts the metal and forms the weld joint.

- Advantages of Wet Welding:**
- **High Speed:** No need to install complex equipment on site; welding can be performed quickly.
 - **Lower Cost:** The required equipment is generally less expensive than for dry welding.
 - **Easy Access:** Can be conducted at various depths without the need for pressurized chambers.

- Disadvantages of Wet Welding:**
- **Lower Weld Quality:** Water cools the weld too quickly, increasing the risk of internal cracks.
 - **Lower Safety:** Welders are exposed to risks such as electric shock, poor visibility, and high water pressure.
 - **Faster Corrosion:** Direct exposure to water increases the risk of rust on the weld.

Common Types of Wet Welding:

a. Shielded Metal Arc Welding (SMAW Wet):

The most widely used wet welding method. Similar to standard manual arc welding (stick welding), but employs special waterproof electrodes. This method is simple, cost-effective, and suitable for various depths. However, it produces lower-quality welds and poses a higher risk of electric shock.

- Applications:**
- Ship hull repair
 - Welding components of piers and offshore platforms
 - Repairing underwater oil and gas pipelines

b. Gas Metal Arc Welding (GMAW Wet):

Similar to MIG welding, this technique is used less frequently but provides better quality welds. A shielding gas—usually argon—is supplied to protect the arc.

- Advantages:**
- Better weld quality and more stable weld pool than SMAW Wet
- Disadvantages:**
- Requires expensive equipment
 - Limited in deep or high-current waters

Applications:

- Specialized repairs with better visibility
- High-quality welding of submerged pipeline sections

c. Gas Tungsten Arc Welding (GTAW Wet):

Also similar to TIG welding, but performed underwater using special equipment. The non-consumable tungsten

- High-resolution cameras
- Ultrasonic sensors
- Underwater Lidars

...are playing an increasingly vital role in evaluating the quality of underwater welds.

These tools can detect flaws before and after welding, significantly reducing the need for manual inspection and improving the overall efficiency and accuracy of underwater construction and repair work.

Conclusion

Underwater welding is a highly specialized and vital profession within the marine and offshore industries. Despite its environmental and safety challenges, it plays an essential role in the construction and maintenance of underwater structures.

With the continued development of technologies and the growing need for underwater infrastructure, the importance of this profession is increasing. It is expected that the advancement of new technologies will drive this field toward safer, more precise, and more efficient environments, creating new opportunities for employment and industrial growth.



References

- [1] TWI Global – www.twi-global.com
- [2] American Welding Society (AWS) – www.aws.com
- [3] International Marine Contractors Association (IMCA) – www.imca-int.com
- [4] Commercial Diving Academy Technical Institute – www.cdatech.com
- [5] Wikipedia – en.wikipedia.org
- [6] Inspenet – inspenet.com
- [7] Water Welders – waterwelders.com
- [8] Home of Welding – home-of-welding.com
- [9] Kish Technology Campus – kishtech.ir

theless, due to the difficulty and danger of this profession, the salary is generally high. The average annual salary of an underwater welder worldwide is estimated to be between \$40,000 and \$60,000. However, for highly skilled welders working on critical or high-risk projects, the income can reach up to \$300,000 per year.

Training and Specialized Certifications

Given the high-risk nature of underwater welding, specialized training programs are organized by professional organizations related to the marine industries, and participants are awarded certificates and professional licenses. These certifications are often the most important factor in verifying a welder's skill and securing employment from potential employers.

The process of obtaining these certifications typically follows this path:

First, one must complete basic commercial diving training, then enroll in underwater welding courses, and finally, pass theoretical and practical exams (focused on safety standards and technical knowledge). Upon successful completion, candidates are awarded a professional certificate. These certificates generally require renewal or recertification every 2 to 3 years, which is possible through continuing education or refresher courses.

(Page 31 - Figure 39)

Underwater welders must attend industrial diving and underwater welding programs held at national or international accredited institutions.

Examples of such reputable centers include:

- Commercial Diving Academy (CDA) in the U.S.
- INPP in France
- Professional Diving Schools Association (PDSA) in Europe

Some of the most recognized international certifications in this field are:

- IMCA (International Marine Contractors Association)
- ADCI (Association of Diving Contractors International)
- CSWIP (Certification Scheme for Welding and Inspection Personnel)
- HSE Commercial Diver Certificate (UK Health & Safety Executive)

These certifications cover areas such as industrial diving skills, underwater safety protocols, emer-

gency procedures, underwater welding, and weld inspection techniques.

Technologies and the Future of Underwater Welding

Underwater welding is one of the critical and in-demand professions in marine industries, offshore oil and gas, and coastal infrastructure. However, advances in technology and the need to reduce human risk have led to significant changes in this field in recent years, and it is predicted that fundamental transformations will occur in the coming decades.

1. Use of Robots and Automated Systems (ROVs and AUVs)

One of the most significant upcoming changes is the partial replacement of human underwater welders with remotely operated vehicles (ROVs) and autonomous underwater vehicles (AUVs). These robots can operate at greater depths and in hazardous environments, performing tasks such as welding, cutting, or inspection with high precision—without human presence.

These technologies help:

- Reduce risks to divers and welders
- Improve weld quality at extreme depths
- Save time and reduce project costs

However, in many projects, human welders will still be essential, especially for tasks requiring creativity, on-the-spot judgment, and real-time decision-making.

(Page 32 - Figure 39)

2. Development of Advanced Welding Technologies

New underwater welding methods such as underwater laser welding and friction welding are under development and testing.

These techniques aim to:

- Improve weld quality
- Reduce spark splatter and the production of harmful gases
- Enhance feasibility in challenging environments

Furthermore, gas-shielded welding techniques are being optimized for deeper underwater applications, increasing their range and reliability.

3. Growth of Intelligent Non-Destructive Testing (NDT)

Alongside robotic advances, intelligent inspection tools such as:

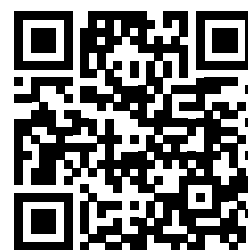
ما را در شبکه‌های اجتماعی همراهی کنید

Stay connected with us on social media


 journal.randemanx.ir

 journal@randemanx.ir

 randeman.journal

 randemanjournal


Scan

Scientific News



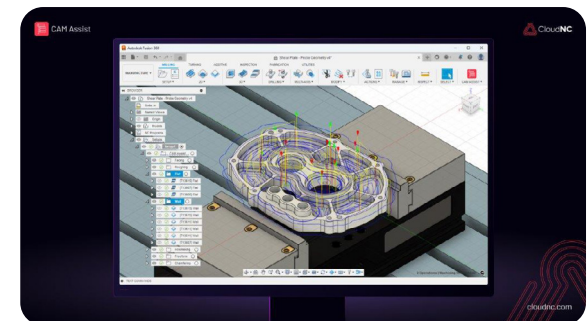
Mahan Habib Azar
B.Sc. student in Mechanical Engineering,
University of Tabriz

CloudNC has introduced an extension called Assist CAM, which uses artificial intelligence to automatically design toolpaths for CNC machines. This technology can make decisions within minutes—tasks that previously required hours of manual programming by experienced engineers. As a result, this extension reduces programming time by up to 80% and enables even novice users to machine complex parts with little experience. Experts consider this a significant step toward reducing reliance on specialized labor and increasing production speed, believing the technology could transform industries such as aerospace, automotive, medical equipment, and robotics

**Blazing Speed in Programming:
CNC with Artificial Intelligenc**

June 16, 2025

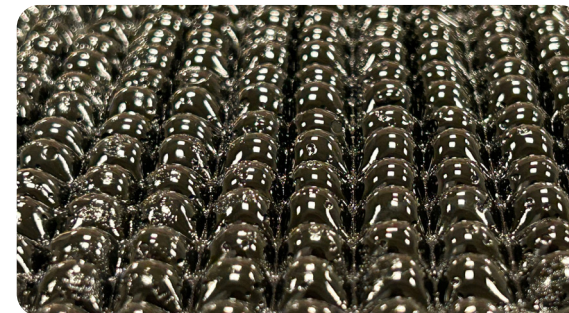
CloudNC



Water from Air: A Break-through for Arid Regions

June 11, 2025

MIT



MIT scientists have developed a window-like device that can extract clean drinking water from the air, even in the driest places on Earth—such as Death Valley in the U.S. The system operates without solar energy or batteries, relying solely on temperature differences between day and night. It consists of a vapor-absorbing surface and a vapor-releasing material that, through temperature changes, captures humidity and releases it as water. Experiments have shown that this technology can supply a family's water needs in areas with no stable water infrastructure. This innovation marks a major step forward in energy and environmental engineering, promising a new generation of portable, infrastructure-independent water supply systems.

Researchers at the University of Chicago have unveiled a new technology that restores real touch sensation to users of prosthetic hands through a brain-computer interface (BCI). By precisely stimulating specific regions of the brain, the system enables users to perceive the shape and motion of objects, significantly improving their quality of life. Early clinical trials show that participants were able to identify different objects and gain high motor accuracy within a short time. This advancement heralds a new era of smarter and more natural prosthetics, bridging the gap between artificial limbs and real human touch.

Insect-Sized Innovation: The World's Smallest Wireless Flying Robot

June 11, 2025

Berkeley Uni.



Researchers at the Department of Mechanical Engineering, UC Berkeley, have recently designed and built the world's smallest wireless flying robot, measuring less than one centimeter and weighing approximately 21 milligrams. Inspired by insect anatomy, this miniature robot is controlled by an external magnetic field and is capable of precise flight, directional changes, and navigating through extremely tight and hard-to-reach spaces. This tiny robot is part of a project aimed at developing ultra-light and agile aerial systems, which could one day be used in search and rescue operations, inspections in confined spaces, and hazardous environments.

Revolution in Prosthetics: Real Touch Sensation via Brain-Computer Interface

January 27, 2025

UChicago News





Faculty of Mechanical Engineering
University of Tabriz



journal.randemanx.ir



journal@randemanx.ir