



بررسی مقاومت الکتریکی و تحلیل حرارتی شکل‌دهی دورانی گرم تیتانیوم به روش مقاومتی

محسن غفاری^۱، مجید الیاسی^{۲*}، محمدجواد میرنیا^۲

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

۲- دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

* ایمیل نویسنده مسئول: elyasi@nit.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی

دریافت: ۲۲ مرداد ۱۴۰۲

پذیرش: ۱۶ دی ۱۴۰۲

کلیدواژگان:

شکل‌دهی دورانی گرم مقاومتی

انتقال حرارت رسانایی

جابجایی

تشعشع

چکیده

در این مقاله با معرفی شکل‌دهی دورانی گرم به روش مقاومتی، انتقال حرارت بین اجزای مختلف مدار در حین فرایند بررسی شده است. برای این منظور، ابتدا تجهیزات مورد نیاز جهت اعمال گرمایش مقاومتی به ورق و نیز پیکربندی دستگاه معرفی و تشریح شده که در نتیجه آن، همزمان با اعمال گرمایش مقاومتی و نیروی مکانیکی از سوی ابزار غلتکی، ورق تیتانیوم خالص تجاری به صورت مخروط ناقص تحت فرایند شکل‌دهی دورانی گرم مقاومتی شکل داده شده است. سپس، با بررسی و اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی اجزای مدار، روند تولید و انتقال گرما در بین آنها تحلیل شده و در نتیجه مقدار گرمای خالص تولید شده در ورق که باعث افزایش دما و ورود به محدوده تبلور مجدد می‌شود تخمین زده شده است. برای اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی که عامل اصلی تولید انرژی گرمایی است، مقاومت الکتریکی اجزای مدار بر اساس هندسه و مشخصات فیزیکی آنها و در شرایطی مشابه حالت شکل‌دهی، بررسی و محاسبه شد. همچنین تحلیل دقیق انتقال حرارت بین اجزای مدار با توجه به ماهیت فرآیند بسیار پیچیده بوده اما با ساده‌سازی و صرفنظر از برخی عوامل، دمای منطقه شکل‌دهی و مدت زمان رسیدن به آن با دقت قابل قبولی تخمین زده شد. نتایج بدست آمده از تحلیل‌های ریاضی که با انجام آزمون‌های تجربی نیز اعتبارسنجی شده و در دو حالت گذرا و پایدار بررسی شده، بیانگر این بوده که نرخ انتقال حرارت به اطراف از طریق تشعشع تا قبل از رسیدن به حالت پایدار، یعنی محدوده‌ی دمای بیشینه‌ی اجزا و نیز نرخ انتقال حرارت جابجایی برای قطعات غیردوار، کم و قابل اغماض است.

Thermal analysis of hot spinning of commercially pure titanium by resistance heating

Mohsen Ghafari¹, Majid Elyasi^{2*}, Mohammad Javad Mirnia²

1- PhD Student, Mechanical Engineering Department, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

2- Associate Professor, Mechanical Engineering Department, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

* Corresponding Author's Email: elyasi@nit.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received: 13 August 2023

Accepted: 6 January 2024

Keywords:

Electrical Resistance Hot Spinning

Heat Transformation Conduction

Convection

Radiation

Abstract

In this paper, introducing Electrical Resistance Hot Spinning (ERHS), heat transfer between the component of circuit is investigated. To this aim, at first the equipment and configuration of the process are described by which mechanical force of roller toll and resistance heating simultaneously deformed pure titanium blank to a conical shape in spinning process. Then by study in electrical resistance of the component and heat transfer between them, the amount of heat generated in blank which raises its temperature to recrystallization is estimated and achieved. For measuring the electrical resistance of the components this parameter calculated by geometrical and physical characters of each component. Furthermore, investigation of heat transfer between them and to environment because of the spinning of blank and moving the roller tool simultaneously is too complicated, but neglecting some of nonsignificant parameters this aim was achievable and the highest temperature of the blank the time needed was estimable. The results of the study which investigated in transient and steady state and verified by experimental examination showed that radiation in transient and convection for unrotated parts are neglectable.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Ghafari M, Elyasi M, Mirnia M J. Thermal analysis of hot spinning of commercially pure titanium by resistance heating. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2023 December 22;10(10):43-58. doi: 10.22034/IJME.2024.411268.1814 [In Persian]

۱- مقدمه

شکل‌دهی دورانی یکی از قدیمی‌ترین روش‌های شکل‌دهی ورق‌های فلزی است که پیشینه‌ی تاریخی آن به مصر باستان برگشته و به دلیل مزایای بسیاری که دارد، مانند سادگی ابزار و تجهیزات لازم، جایگاه قابل رقابتی را در مقایسه با بسیاری از فرآیندهای مشابه بدست آورده است. این روش مانند سایر انواع روش‌های شکل‌دهی، علاوه بر حالت سرد که در دمای اتاق انجام می‌شود، در حالت گرم نیز قابل انجام بوده و برای این منظور، روش‌های مختلفی مورد توجه محققان و پژوهشگران قرار گرفته که از آن جمله می‌توان به گرم‌کاری با شعله، استفاده از اشعه لیزر، استفاده از کوره القایی، پیش گرم کردن در کوره و سپس شکل‌دهی، گرم‌کاری اصطکاکی، استفاده از ابزار گرم شده و گرم‌کاری در فضای ایزوله شده اشاره کرد [۱-۳].

موراتا و همکاران [۴] برای بررسی تاثیر دمای ابزار بر شرایط شکل‌دهی لوله‌های منیزیمی AZ31، ماشین شکل‌دهی کنترل عددی جدیدی را ابداع کردند که در آن، دو ابزار غلتکی توسط دو المنت گرم‌کننده از جنس نیکروم و به کمک جریان برق، گرم شده و برای شکل‌دهی مورد استفاده قرار گرفت.

موری و همکاران [۵] شکل‌دهی دورانی برشی آلیاژهای آلومینیوم در حالت گرم را جهت بدست آوردن توزیع ضخامت مطلوب انجام دادند. جهت ایجاد گرمایش، قطعه‌کار، اطراف ورق، ماندل و ابزار را با حفاظ فولادی، ایزوله کرده و با دمش هوای گرم تا ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد، آن‌ها را گرم کردند. سپس ریزساختار ماده و عیوب ایجاد شده را بررسی نمودند.

رومرو و همکاران [۶] با استفاده از انرژی گرمایی لیزر، بهبود شکل‌پذیری فولادهای با استحکام بالا (DP600 و DP780) در شکل‌دهی دورانی را بررسی نمودند.

هان و همکاران [۷] با گرم کردن آلیاژ آلومینیوم ۳۲۱ به روش القایی به این نتیجه رسیدند که اگر دمای گرم‌کردن بیش از حد کم باشد، بهبود شکل‌پذیری قطعه بدست نیامده و سبب ایجاد عیوب در آن می‌شود.

هومبرگ و همکاران [۸] در پژوهشی برای شکل‌دهی قطعات با هندسه دوار و پیچیده از لوله‌ها، پروفیل‌ها و ورق‌های فلزی، شکل‌دهی دورانی را با جوشکاری اصطکاکی تلفیق داده و روش جدیدی را در شکل‌دهی دورانی گرم ارائه کرده و ضمن بررسی پارامترهای آن، ریزساختار قطعه را مورد مطالعه قرار دادند.

ژان و همکاران [۹] در پژوهشی برای بررسی تاثیر نسبت انحراف و دمای شکل‌دهی در شکل‌دهی دورانی برشی گرم آلیاژ تیتانیوم TA15، از روش گرم‌کاری به کمک شعله اکسی‌استیلن استفاده کرده و در جلوتر از ابزار، آن را حرکت دادند تا دمای ورق با ضخامت اولیه ۵ میلی‌متر را در محدوده ۵۰۰ تا ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد ثابت نگه دارد.

جان و ریو [۱۰] روشی را پیشنهاد دادند که طی آن نورد برخی از ورق‌های فلزی را با گرم‌کاری مقاومتی تلفیق داده و شکل‌پذیری ضعیف آن‌ها را بهبود بخشیدند. برای این منظور، چهار جنس مختلف شامل تیتانیوم خالص، آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V، اینکونل ۶۰۱ و فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ را انتخاب کرده و قبل از شکل‌دهی با غلتک‌های اصلی، توسط غلتک‌های دیگری در مسیر جریان الکتریسیته قرار دادند. در این فرآیند، دمای ایجاد شده در قطعه‌کار بر حسب مقاومت الکتریکی آن، گرمای ویژه، چگالی، جریان الکتریسیته، مساحت سطح مقطع قطعه، سرعت حرکت خطی قطعه‌کار و فاصله بین غلتک‌های گردان حامل جریان (الکترودها) گزارش شده است.

موری و همکاران [۱۱] به منظور بهبود شکل‌پذیری و کاهش برگشت فنری، گرم‌کاری ورق‌های فولادی با استفاده از روش مقاومتی، جهت جبران افت دمای قطعه در حد فاصل خروج قطعه از کوره تا شکل‌دهی در قالب را پیشنهاد و بررسی نمودند. در این پژوهش ورق مورد نظر بین نگهدارنده قرار گرفته و جریان الکتریسیته از آن عبور کرده است. از آنجا که این روش، گرم‌کاری بصورت بی‌دررو در نظر گرفته شده، افزایش دمای ورق بر حسب مقاومت الکتریکی، جریان الکتریسیته، عرض و ضخامت ورق، مدت زمان عبور جریان، گرمای ویژه و چگالی قطعه گزارش شده است.

فن و همکاران [۱۲] روش گرم‌کاری مقاومتی با استفاده از جریان برق مستقیم (DC) را پیشنهاد کردند و طی آن تاثیر برخی از پارامترهای ورودی مانند شدت جریان، اندازه ابزار، نرخ باردهی و گام عمودی بر روی شکل‌پذیری ورق‌های منیزیم AZ31 و تیتانیوم TiAl2Mn1.5 را بررسی نمودند.

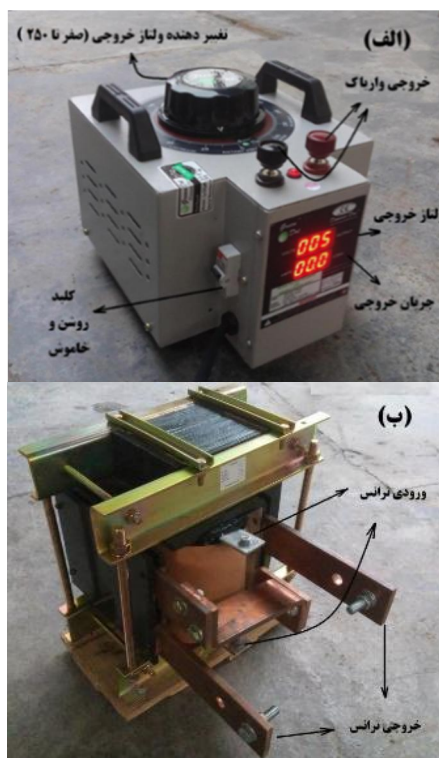
آمبروجیو و همکاران [۱۳] در فرآیند شکل‌دهی تدریجی گرم مقاومتی، آلیاژ آلومینیوم AA2024-T3، آلیاژ منیزیم AZ31B-0 و آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V را به کمک یک منبع جریان برق مستقیم گرم کرده و توسط یک ابزار نیمکره‌ای تحت شکل‌دهی قرار دادند.

در تحلیل انرژی گرمایی حاصل از عبور جریان، مقاومت الکتریکی کل را به دو بخش تقسیم کردند؛ مقاومت مدار و مقاومت سطح تماس؛ مقاومت مدار را قبل از شروع فرآیند به کمک اهم‌سنج اندازه‌گیری کرده و مقاومت سطح تماس را نیز با اندازه‌گیری ولتاژ و شدت جریان مصرفی بدست آوردند.

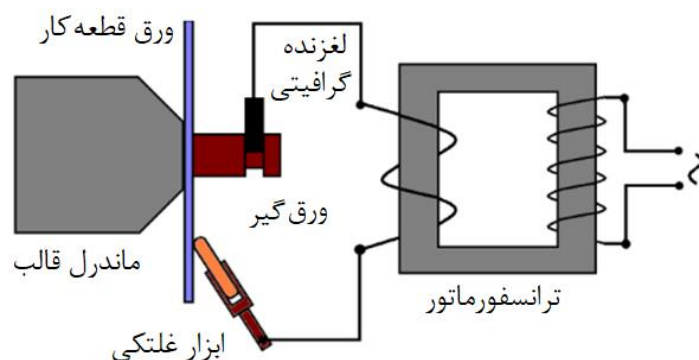
جهت بهبود دقت ابعادی ورق‌های فولادی کم‌کربن در فرآیند شکل‌دهی تدریجی، شی و همکاران [۱۴] این فرآیند را بصورت گرم‌کاری مقاومتی بررسی نمودند. برای این منظور از یک منبع جریان DC با ولتاژ صفر تا ۱۵ ولت و جریان صفر تا ۱۵۰۰ آمپر استفاده نموده و قطعه‌کار را از فولاد کم‌کربن DC04 با ضخامت ۰/۸ میلی‌متر و روانکار مربوطه را نیز MoS_2 انتخاب نمودند. با جمع‌بندی پژوهش‌های انجام شده مشاهده می‌شود که تحلیل افزایش دمای ورق و محاسبه مدت زمان آن با تغییر در پارامترهای ورودی مانند شدت جریان و ضخامت ورق، انجام نشده و لازم است با بررسی معادلات حاکم بر انتقال حرارت این موارد را مورد مطالعه قرار داد. بنابراین نوآوری پژوهش حاضر در اندازه‌گیری مقاومت و تحلیل حرارتی اجزای مدار و در نتیجه حرارت خالص ایجاد شده در ورق قطعه‌کار خواهد بود.

۲- مواد و تجهیزات مورد استفاده در انجام آزمایش‌ها

در این پژوهش از ورق‌های تیتانیومی خالص تجاری گرید ۲ با ضخامت یک میلی‌متر به عنوان قطعه‌کار اولیه استفاده شد. برای اعمال گرمایش مقاومتی از دو دستگاه ترانسفورماتور کاهنده و واریاک مطابق شکل ۱ استفاده شده به گونه‌ای که با تغییر ولتاژ خروجی واریاک (یا همان ورودی به ترانس)، جریان خروجی از ترانس، بطور پیوسته تغییر کند. در ادامه برای گرم‌کاری به روش مقاومتی و برقراری جریان الکتریکی و گرم کردن قطعه‌کار، مطابق شکل ۲ تجهیزات ابزار و قطعه‌کار به گونه‌ای به یکدیگر مرتبط شده‌اند که پس از برقراری تماس بین ابزار و ورق قطعه‌کار، جریان از ابزار وارد شده و پس از عبور از ورق، از سمت مرغک توسط نگهدارنده گرافیتی به کابل‌های خروجی متصل گردد. از آنجا که قالب بصورت دو تکه طراحی و ساخته شده، هیچ گونه انتقال جریان به سایر تجهیزات ماشین‌ابزار نداشته است. در سمت مرغک نیز یک نگهدارنده استوانه‌ای مسی استفاده شده که محل تماس آن با نوک مرغک عایق‌بندی شده است. بدین ترتیب، ورق به عنوان یک مقاومت اهمی در مسیر عبور جریان برق قرار داشته و با تغییر شدت جریان در مدار، دمای ورق نیز بطور پیوسته تغییر می‌کند.



شکل ۱ تجهیزات الکتریکی مورد استفاده؛ (الف) واریاک، (ب) ترانس اصلی



شکل ۲ مدار الکتریکی فرآیند و اجزای آن

برای اندازه‌گیری دمای ناحیه تحت تغییر شکل، از دماسنج مادون قرمز مطابق شکل ۳ استفاده شده که بصورت غیرتماسی و بر اساس اشعه مادون قرمز ساطع شده از سطح قطعه، دمای آن را اندازه‌گیری و نشان می‌دهد.



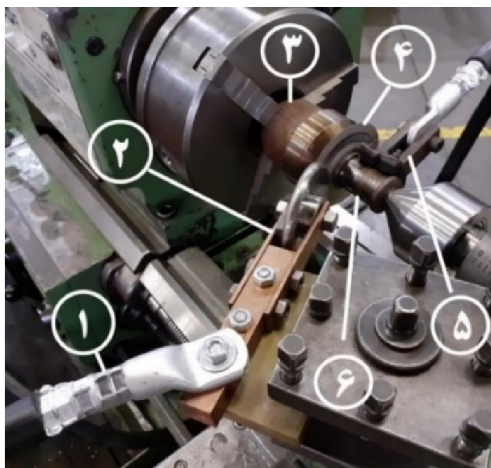
شکل ۳ دماسنج مادون قرمز

برای اندازه‌گیری مقاومت اجزای مدار، اندازه‌گیری شدت جریان مصرفی در حین فرآیند شکل‌دهی در شرایط مختلف و نیز اندازه‌گیری اختلاف پتانسیل مدار در ابتدا و حین فرآیند، از مولتی‌متر دیجیتال کلمپی دیجیتال DT266 با محدوده اندازه‌گیری صفر تا ۱۰۰۰ آمپر متناوب استفاده شده است که تصویر آن در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴ مولتی‌متر مورد استفاده برای اندازه‌گیری جریان، ولتاژ و مقاومت

این پژوهش به کمک ماشین تراش انیورسال انجام شده و مسیر حرکت در حین شکل‌دهی بصورت رفت و برگشتی و چند پاسه در نظر گرفته شده که برای بررسی دقیق‌تر صافی سطح نهایی، مسیر آخر به‌صورت یک پاسه و خطی یکنواخت در امتداد مولد مخروط انجام شده است. پیکربندی ابزار و قطعه‌کار نصب شده بر روی دستگاه در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵ پیکربندی ابزار و قطعه‌کار، (۱) اتصال کابل به ابزار، (۲) ابزار غلتکی، (۳) ماندول قالب (۴) ورق، (۵) لغزنده گرافیتی، (۶) نگهدارنده مسی سمت مرغک

به منظور بررسی فرایند شکل‌دهی دورانی گرم مقاومتی ورق‌های تیتانیومی، پارامترهایی مطابق با جدول ۱ شامل ضخامت ورق، شدت جریان مصرفی و نرخ باردهی در نظر گرفته شد و آزمون‌های تجربی با سه بار تکرار انجام شدند.

جدول ۱ پارامترهای بررسی شده در انجام پژوهش

پارامتر	مقدار
ضخامت ورق	یک میلی‌متر
شدت جریان مصرفی	۳۰۰، ۴۰۰ و ۵۰۰ آمپر
مقاومت الکتریکی	قابل بررسی
دما	قابل بررسی

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی مدار و مقاومت الکتریکی اجزای آن

همانگونه که در شکل ۱ نشان داده شد، تجهیزاتی که برای ایجاد جریان الکتریکی مورد استفاده قرار گرفت شامل ترانسفورماتوری با ۸۸ دور ورودی و ۲ دور خروجی و واریاک (متغیر) بوده است. این واریاک از برق شهر تکفاز با ولتاژ ۲۲۰ ولت تغذیه شده و خروجی آن ولتاژی متغیر است که از صفر تا ۲۵۰ ولت بطور پیوسته قابل تغییر بوده و به ترانسفورماتور اصلی متصل شده است. با توجه به مقاومتی که در مسیر خروجی این جریان قرار دارد (که در این پژوهش، شامل ابزار و ورق قطعه‌کار است)، می‌توان ولتاژ خروجی واریاک (ورودی به ترانس) را بگونه‌ای تغییر داد که جریان خروجی از ترانس، بطور پیوسته تغییر کند. قابل ذکر است، با توجه به قانون اهم ($V=RI$) با تغییر ولتاژ خروجی واریاک (بین صفر تا ۲۵۰ ولت) و تبع آن، تغییر ولتاژ خروجی ترانس اصلی، جریان خروجی از آن که در واقع عامل گرم‌کننده ورق قطعه‌کار است، بطور پیوسته قابل تغییر خواهد بود، بدین ترتیب می‌توان شدت جریان‌های مختلفی در مدار ایجاد نمود. توان الکتریکی مصرف شده در رسانا در حالت استفاده از جریان تکفاز و سه‌فاز، به ترتیب با روابط ۱ و ۲ مشخص خواهد شد.

$$P = \vec{V} \cdot \vec{I} = VI \cos \varphi = RI^2 \cos \varphi \quad (1)$$

$$P = \sqrt{3} \cdot \vec{V} \cdot \vec{I} = \sqrt{3}VI \cos\phi = \sqrt{3}RI^2 \cos\phi \quad (2)$$

در روابط ۱ و ۲ عبارت $\cos\phi$ به نام ضریب توان شناخته شده و مقدار آن برای مقاومت‌های اهمی تقریباً برابر یک خواهد بود، زیرا اختلاف فاز بین ولتاژ و جریان (ϕ) تقریباً صفر است. بنابراین با عبور جریان الکتریکی از ورق، به دلیل مقاومت در برابر عبور جریان، ورق گرم شده و گرمای ایجاد شده که بر اساس قانون ژول و با رابطه ۳ مشخص می‌شود، ریزساختار ماده را به دمای تبلور مجدد رسانده و سبب افزایش لغزش صفحات کریستالی و در نهایت، بهبود شکل‌پذیری ورق شود. در این رابطه، Q : گرمای ایجاد شده (بر حسب ژول)، R : مقاومت الکتریکی ورق در محل تماس با ابزار (بر حسب اهم)، I : شدت جریان الکتریکی (آمپر) و t : مدت زمان عبور جریان (ثانیه) است.

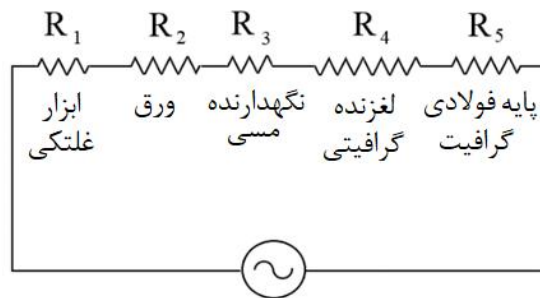
$$Q = RI^2t \quad (3)$$

از آنجا که پیکربندی این آزمایش مطابق شکل ۲ بصورت یک مدار سری بوده و جریان در تمام عناصر مدار یکسان است، برای تحلیل مدار، جریان را مبنا قرار داده و بقیه مشخصات مدار بر اساس آن بدست می‌آید. در اینجا نیز جریان عبوری از مدار که از هر سه مقاومت عبور می‌کند، با هم برابر و به کمک آمپرسنج در حین فرآیند شکل‌دهی قابل اندازه‌گیری است. در حین شکل‌دهی، همزمان با اندازه‌گیری شدت جریان‌های مصرفی در مدار در محدوده‌های ۳۰۰، ۴۰۰، ۵۰۰ و ۶۰۰ آمپر، ولتاژ خروجی واریاک نیز از روی نمایشگر آن قرائت شده و با محاسبه نسبت تعداد دور سیم‌پیچ‌های اولیه و ثانویه ترانس، ولتاژ دو سر مدار که همان خروجی ترانس اصلی است، مطابق جدول ۲ در محدوده ۲/۶ تا ۴/۲ ولت بدست آمده است.

جدول ۲ مقادیر ولتاژ و مقاومت معادل مدار در شدت جریان‌های مختلف

جریان (I)	ولتاژ خروجی واریاک (V)	ولتاژ خروجی ترانس (V)	مقاومت معادل مدار (Ω)
۳۰۰	۱۱۵	۲/۶	۰/۰۰۸۷
۴۰۰	۱۴۵	۳/۳	۰/۰۰۸۲
۵۰۰	۱۷۰	۳/۹	۰/۰۰۷۷
۶۰۰	۱۸۵	۴/۲	۰/۰۰۷۰

بنابراین مقاومت معادل اجزای مدار که با توجه قانون اهم ($V=RI$) از تقسیم ولتاژ مدار به شدت جریان آن بدست می‌آید بطور تقریبی در محدوده ۰/۰۰۸۷ تا ۰/۰۰۷۰ اهم خواهد بود. اما برای تحلیل مباحث انتقال حرارت در ورق و سایر اجزای مدار لازم است مقاومت الکتریکی تک تک آنها بطور مجزا اندازه‌گیری شود. با صرف‌نظر کردن از مقاومت کابل‌های مسی تک‌رشته افشان ۳۰۰، اجزای مدار که در شکل ۵ معرفی شده‌اند، مطابق مدار شکل ۶ بطور سری در مسیر عبور جریان قرار دارند.

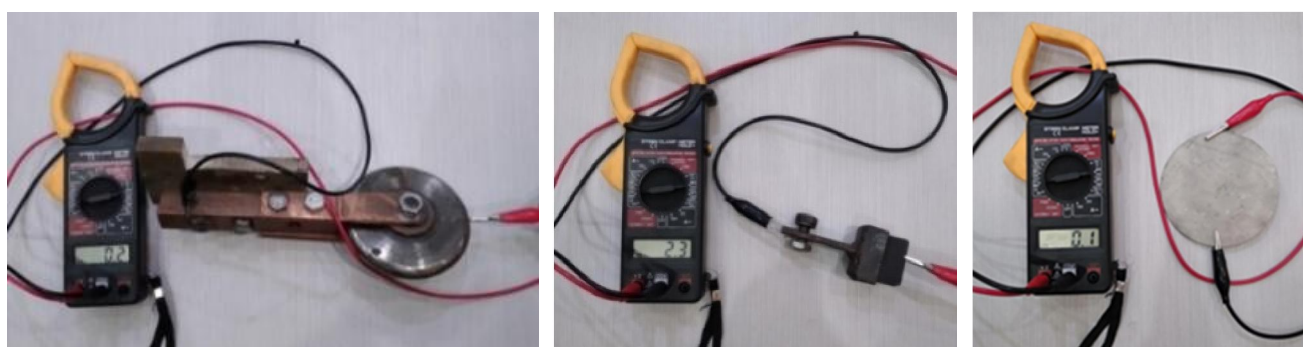


شکل ۶ مقاومت‌های اهمی اجزای مدار در مسیر عبور جریان

برای اندازه‌گیری مقاومت اجزای مدار، ساده‌ترین و ابتدایی‌ترین راهی که به نظر می‌رسد این است که قبل از شروع فرآیند به کمک اهم‌سنج بتوان مقاومت الکتریکی آنها را اندازه‌گیری کرد. با صرف‌نظر از مقاومت نگهدارنده استوانه‌ای مسی، با اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی ابزار غلتکی، پایه زغالی و ورق خام مطابق شکل ۷ مقادیر آنها به ترتیب حدود ۰/۲، ۲/۳ و ۰/۱ اهم بدست آمده است. اگر مقاومت معادل مدار که بدین ترتیب از روش مستقیم اندازه‌گیری شده طبق رابطه ۴ برابر جمع آنها یعنی ۲/۶ اهم باشد، در شدت جریان مثلاً ۴۰۰ آمپر، اختلاف پتانسیل مدار بیش از ۱۰۰۰ ولت بدست خواهد آمد که این امر با واقعیت مسئله و با اطلاعات بدست آمده در جدول ۲ اختلاف قابل توجهی خواهد داشت، بنابراین به نظر می‌رسد اندازه‌گیری مقاومت اجزای مدار به روش مستقیم صحیح نباشد.

$$R_t = R_1 + R_2 + R_3 = 0.2 + 0.1 + 2.3 = 2.6 \quad (4)$$

با بررسی دقیق‌تر نیز می‌توان علت را اینگونه پاسخ داد که از آنجا که سطح تماس در انتقال جریان و مقاومت الکتریکی بسیار موثر است، در صورت استفاده از اهم‌سنج، سطوح تماس انبرها برای انتقال جریان با آنچه در عمل و هنگام شکل‌دهی قطعات رخ می‌دهد اختلاف بسیار دارد، بنابراین نتیجه‌گیری می‌شود که مقاومت الکتریکی اجزای مدار بر اساس آنچه مطابق شکل ۷ بیان کرده قابل قبول نبوده و لازم است بطور مستقیم محاسبه شود. برای محاسبه مستقیم مقاومت الکتریکی اجزای مدار، باید از رابطه مستقیم قوانین فیزیک و بر اساس مقاومت ویژه مواد که در جدول ۳، ذکر شده استفاده نمود. نکته قابل توجه این است که مقاومت ویژه فلزات با افزایش دما بیشتر می‌شود، بنابراین برای دقیق‌تر شدن محاسبات، تاثیر این افزایش دما نیز در نظر گرفته شده است.



(ج)

(ب)

(الف)

شکل ۷ اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی اجزای مدار با اهم‌سنج، (الف) ورق خام، (ب) لغزنده گرافیتی و پایه آن، (ج) ابزار غلتکی

جدول ۳ مقاومت الکتریکی ویژه مواد مورد استفاده در اجزای مدار

نام فلز	مقاومت ویژه در 20°C (10 ⁻⁸ mΩ)	ضریب حرارتی مقاومت ویژه (10 ⁻³)
تیتانیوم خالص	۴۲	-
مس	۱/۶۸	۴/۲۹
فولاد	۱۴	۶/۷۵
گرافیت	۳۵۰۰	-۰/۰۰۵

اکنون با در نظر گرفتن داده‌های جدول ۳، مقاومت الکتریکی اجزای مدار را می‌توان بصورت زیر محاسبه نمود:
 برای پایه فولادی لغزنده گرافیتی با در نظر گرفتن تسمه‌ای به ابعاد مقطع ۵×۳۰ و طول ۵۰ میلی‌متر، و برای خود گرافیت هم با در نظر گرفتن ابعاد مقطع ۳۰×۲۰ و طول ۲۰ میلی‌متر مطابق روابط ۵ تا ۸ می‌توان مقاومت الکتریکی آنها را به روش مستقیم محاسبه نمود:

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha\Delta\theta) = 14 \times 10^{-8} \times \left[1 + (6.75 \times 10^{-3} \times 100) \right] = 23 \times 10^{-8} \quad (5)$$

$$R_{gr.h} = \rho \frac{l}{A} = (23 \times 10^{-8}) \times \frac{50 \times 10^{-3}}{(30 \times 10^{-3}) \times (5 \times 10^{-3})} = 7.6 \times 10^{-5} \Omega \quad (6)$$

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha \Delta\theta) = 3500 \times 10^{-8} \times [1 + (-0.005 \times 10^{-3} \times 100)] = 1750 \times 10^{-8} \quad (7)$$

$$R_{gr} = \rho \frac{l}{A} = 1750 \times 10^{-8} \times \frac{20 \times 10^{-3}}{(30 \times 10^{-3}) \times (20 \times 10^{-3})} = 58 \times 10^{-5} \Omega \quad (8)$$

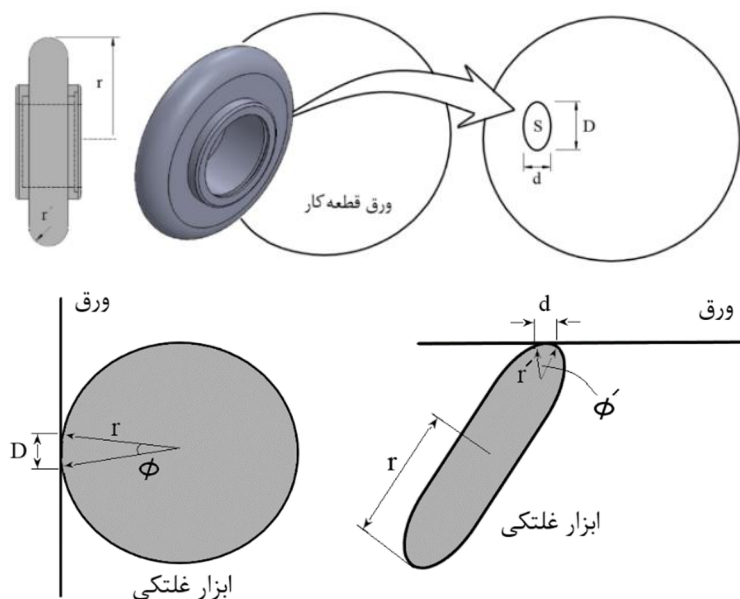
برای ورق قطعه‌کار نیز، به علت پیچیده‌تر بودن شکل هندسی و مسیر عبور جریان، مقاومت الکتریکی مانند سایر اجزای مدار به روش مستقیم محاسبه نشده است، پس از بدست آوردن مقاومت سایر اجزای مدار، به کمک شدت جریان و ولتاژ مدار و با کم کردن از مقاومت کل بدست آمده است. بدین ترتیب که با اندازه‌گیری‌های صورت گرفته از افزایش دمای اجزای مدار توسط دماسنج مادون قرمز، برای نگهدارنده مسی، لغزنده گرافیتی و پایه آن حدود ۱۰۰ درجه و برای ابزار غلتکی حدود ۵۵ درجه افزایش دما در شدت جریان ۳۰۰ آمپر مشاهده شده است.

برای استوانه مسی نگهدارنده ورق، قطر مقطع ۳۰ و طول آن ۵۰ میلی‌متر بوده و لغزنده گرافیتی در سطح خارجی استوانه با آن در تماس بوده است، بنابراین طول مسیر عبور جریان، در وسط طول استوانه یعنی ۲۵ میلی‌متر در نظر گرفته می‌شود:

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha \Delta\theta) = 1.68 \times 10^{-8} \times [1 + (4.29 \times 10^{-3} \times 100)] = 2.4 \times 10^{-8} \quad (9)$$

$$R_{Cu.h} = \rho \frac{l}{A} = 2.4 \times 10^{-8} \times \frac{25 \times 10^{-3}}{\frac{\pi (30 \times 10^{-3})^2}{4}} = 0.084 \times 10^{-5} \Omega \quad (10)$$

برای ابزار غلتکی با توجه به هندسه پیچیده‌تری که دارد به نظر می‌رسد از مقاومت الکتریکی شمش مسی پایه غلتک می‌توان صرف‌نظر نمود، در اینصورت برای غلتک فولادی طول مسیر عبور جریان تقریباً معادل نصف قطر غلتک بوده و بر اساس ابعاد آن حدود ۴۰ میلی‌متر می‌باشد. اما مساحتی از غلتک که جریان از آن عبور کرده و با ورق تماس می‌گیرد را باید بر اساس مشخصات هندسی آن بدست آورد. سطح تماس ابزار با ورق به شعاع نوک ابزار غلتکی (r)، قطر غلتک ($2r$) و فشار وارده بستگی دارد. اگر فرض شود ورق و ابزار حرکت چرخشی نداشته باشند، صرفاً با برقراری تماس بین این دو، مساحت مورد نظر بصورت یک بیضی تصور می‌شود که با توجه به قطر بزرگ (D) و کوچک (d) آن بر اساس شعاع نوک ابزار و شعاع غلتک مطابق شکل ۸ بدست خواهد آمد:



شکل ۸ محاسبه سطح تماس ابزار با ورق قطعه‌کار بر اساس شعاع غلتک و شعاع نوک آن

شعاع نوک ابزار مورد استفاده ۷/۵ و شعاع غلتک آن ۴۰ میلی‌متر می‌باشد، اگر زوایای تماس ϕ و ϕ' هر کدام حدود ۱۰ درجه فرض شود، سطح تماس غلتک با ورق و در نتیجه مقاومت آن در برابر عبور جریان برابر خواهد بود با:

$$S = \pi \frac{D}{2} \times \frac{d}{2} = \frac{\pi}{4} r \phi \times r' \phi' = \frac{\pi}{4} r \phi \times r' \phi' = \frac{\pi}{4} \times \left[40 \times \left(\frac{10 \times \pi}{180} \right) \right] \times \left[7.5 \times \left(\frac{10 \times \pi}{180} \right) \right] = 7.71 \text{ m}^2 \quad (11)$$

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha \Delta \theta) = 14 \times 10^{-8} \times \left[1 + (6.75 \times 10^{-3} \times 50) \right] = 19 \times 10^{-8} \quad (12)$$

$$R_t = \rho \frac{l}{A} = 19 \times 10^{-8} \times \frac{40 \times 10^{-3}}{7.1 \times 10^{-6}} = 107 \times 10^{-5} \Omega \quad (13)$$

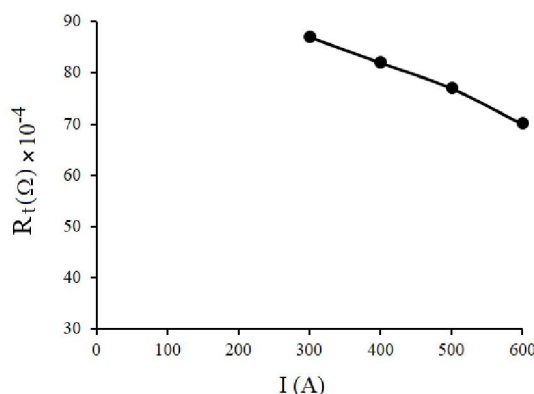
تاکید می‌شود مقدار این مقاومت که در محل تغییر شکل متصور است، به عوامل مختلفی از جمله مساحت سطح تماس بین ابزار و ورق که خود، ناشی از فشار ابزار است، بستگی دارد، لکن با توجه به شرایط آزمایش، مساحت بدست آمده از رابطه ۱۴ معقول و در نتیجه زوایای تماس مفروض ۱۰ درجه نیز منطقی به نظر می‌آید. مقادیری که از روابط ۶ تا ۱۳ برای مقاومت الکتریکی اجزای مدار (بجز ورق تیتانیوم) بدست آمدند، بر اساس مقاومت ویژه ماده در دمای نزدیک به مقدار واقعی مطابق داده‌های جدول ۳ می‌باشد. اکنون می‌توان با جمع مقادیر مقاومت الکتریکی اجزای مدار (در دمای شکل‌دهی) و کم کردن آن از مقاومت کل مدار (در شدت جریان ۳۰۰ آمپر) مطابق جدول ۲ مقاومت الکتریکی متوسط ورق تیتانیوم را با تقریب مناسبی بدست آورد:

$$R_{total} = R_{gr.h} + R_{gr} + R_{cu.h} + R_t + R_b = (7.6 \times 10^{-5}) + (58 \times 10^{-5}) + (0.084 \times 10^{-5}) + (107 \times 10^{-5}) + R_b = 0.0082 \quad (14)$$

$$R_b = 647 \times 10^{-5}$$

حال که مقاومت الکتریکی ورق در موضع شکل‌دهی با دقت قابل قبولی بدست آمد، عامل اصلی گرم شدن ورق یعنی میزان گرمایش مقاومتی بر اساس رابطه ۳ نیز مشخص شده و می‌توان افزایش دمای ورق با تغییر شدت جریان را بررسی نمود.

نکته حایز اهمیت دیگری که از بررسی مقاومت الکتریکی اجزای مدار برمی‌آید، کاهش مقاومت معادل مدار با افزایش شدت جریان بر اساس اطلاعات جدول ۳ می‌باشد که روند آن در نمودار شکل ۹ نیز نشان داده شده است. انتظار می‌رود با افزایش شدت جریان در مدار و افزایش دما، مقاومت معادل نیز بالا رود، اما روند کاهشی آن می‌تواند اینگونه توجیه شود که برخلاف فلزات، گرافیت با افزایش دما، کاهش مقاومت الکتریکی داشته که منفی بودن ضریب α آن و نیز بالا بودن مقاومت ویژه مطابق داده‌های جدول ۳ موید همین مطلب است. بنابراین نرخ کاهشی مقاومت الکتریکی گرافیت با افزایش شدت جریان، بر نرخ افزایش سایر اجزای مدار غلبه کرده و در مجموع کاهش مقاومت الکتریکی معادل در مدار مشاهده شده است.

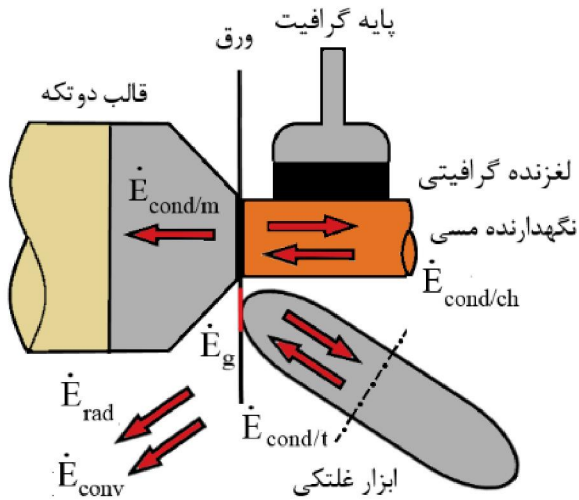


شکل ۹ تغییرات مقاومت الکتریکی با افزایش شدت جریان مصرفی

۳-۲- تحلیل انتقال حرارت و تاثیر شدت جریان بر افزایش دما

برای بررسی تغییر دمای قطعه‌کار با افزایش شدت جریان بر حسب سایر پارامترهای موجود و نیز تحلیل و بررسی معادلات انتقال حرارت، می‌توان در حالت کلی، تبادل حرارتی بخش‌های مختلف در حین فرآیند را مطابق شکل ۱۰ در نظر گرفت. اگر توزیع دما در تمام ورق تقریباً یکسان فرض شود، می‌توان تمام آن را بصورت یک حجم کنترل در نظر گرفته و قانون اول ترمودینامیک را در حالت کلی بدین صورت تعریف نمود:

$$\dot{E}_{in} + \dot{E}_g - \dot{E}_{out} = \dot{E}_{st} \quad (15)$$



شکل ۱۰ تبادل حرارتی بین اجزای مختلف مدار

\dot{E}_g : نرخ تولید انرژی گرمایی

\dot{E}_{out} : نرخ خروج انرژی

\dot{E}_{st} : نرخ افزایش انرژی ذخیره شده در حجم کنترل

\dot{E}_{rad} : نرخ گرمای منتقل شده از راه تشعشع به محیط اطراف

\dot{E}_{conv} : نرخ گرمای منتقل شده از راه جابجایی به محیط

\dot{E}_g : نرخ گرمای ایجاد شده بر اثر عبور جریان برق و اصطکاک

$\dot{E}_{cnd/m}$: نرخ گرمای منتقل شده به قالب از راه رسانایی

$\dot{E}_{cnd/t}$: نرخ گرمای منتقل شده به ابزار از راه رسانایی

$\dot{E}_{cnd/cu.t}$: نرخ گرمای منتقل شده به مسی از راه رسانایی

$$\dot{E}_{in} = 0 \quad (16)$$

$$\dot{E}_g = RI^2 + \dot{E}_f \quad (17)$$

$$\dot{E}_{out} = \dot{E}_{cnd/t} + \dot{E}_{cnd/m} + \dot{E}_{cnd/cu.t} + \dot{E}_{conv} + \dot{E}_{rad} \quad (18)$$

$$\dot{E}_{cnd/m} = Sh(\theta_s - \theta_\infty) \quad (19)$$

$$\dot{E}_{rad} = \varepsilon\sigma S(\theta_s^4 - \theta_\infty^4) \quad (20)$$

$$\dot{E}_{st} = mC\Delta\theta \quad (21)$$

اگر نرخ انتقال حرارت به ابزار غلتکی، ماندن قالب و نگهدارنده مسی مشخص باشد، با جایگذاری روابط ۱۶ تا ۲۱ در رابطه ۱۵ می‌توان آن را بدین صورت بازسازی نمود:

$$RI^2 + \dot{E}_f - \left[Sh(\theta_s - \theta_\infty) + \varepsilon\sigma S(\theta_s^4 - \theta_\infty^4) + \dot{E}_{cnd/t} + \dot{E}_{cnd/m} + \dot{E}_{cnd/cu.t} \right] = mC\Delta\theta \quad (22)$$

این رابطه را می‌توان به عنوان معادله انتقال حرارت در شکل‌دهی دورانی گرم مقاومتی با این پیکربندی در نظر گرفت، که در آن:

R: مقاومت الکتریکی ورق در محل تماس با ابزار

I: شدت جریان عبوری از مدار (A)

S: مساحت قسمتی از ورق در محل تماس با ابزار

h: ضریب انتقال حرارت جابجایی

θ_s : دمای سطح ورق در محل تماس با ابزار (°K)

θ_∞ : دمای محیط اطراف (°K)

ε : ضریب صدور

α : ثابت استفان بولتزمن

m: جرم بخشی از ماده در محل تماس با ابزار

C: گرمای ویژه ماده

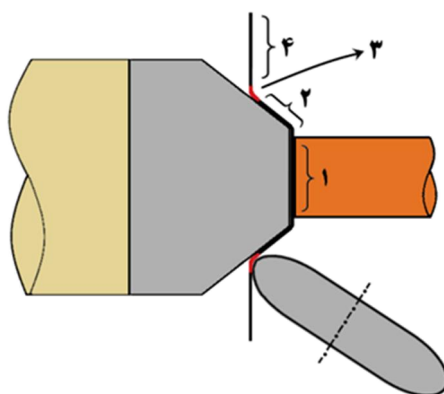
$\Delta\theta$: افزایش دمای ورق

برای محاسبه انتقال حرارت بین ابزار، قالب و نگهدارنده مسی از طریق رسانایی با ورق، مناسب‌ترین رابطه‌ای را که می‌توان در نظر گرفت این است که هر کدام از این سه جسم را مجدداً بصورت حجم کنترل در نظر گرفته و برای هر کدام روابطی مانند ۱۶ تا ۲۱ نوشته و با توجه به اینکه میزان افزایش دمای آنها از دمای محیط تا دمای حین شکل‌دهی مشخص بوده و قابل اندازه‌گیری است، می‌توان میزان انرژی منتقل شده بین این سه جسم با ورق را تخمین زد.

آنچه در عمل و هنگام شکل‌دهی دورانی با قالب مخروطی ناقص رخ می‌دهد این است که همزمان با دوران قطعه‌کار، ابزار حرکت خطی داشته تا شکل‌دهی ورق در امتداد مولد مخروطی قالب کامل شود. در این حالت باید دقت نمود که پیشروی ابزار و تغییر مکان آن، و نیز افزایش سطح تماس ورق با قالب سبب افزایش رسانایی حرارتی شده که با پیشرفت فرآیند شکل‌دهی بیشتر خواهد شد. بنابراین توزیع دما در تمام سطح قطعه یکنواخت نبوده و گرادیان حرارتی در قسمت‌های مختلف آن وجود خواهد داشت که در نتیجه‌ی آن لازم است معادله ۲۲ تنها برای بخشی از ورق در نظر گرفته شود.

برای تحلیل دقیق‌تر مسئله و محاسبه دمای موضع شکل‌دهی در این حلقه دوار می‌توان مطابق شکل ۱۱ ورق در حال شکل‌دهی را به چهار ناحیه مختلف تقسیم کرد:

- ناحیه اول: مرکز ورق می‌باشد که با استوانه مسی و مرکز قالب در تماس بوده و با انتقال حرارت رسانایی افزایش دما خواهد داشت، این ناحیه هیچ تبادل حرارتی با هوای اطراف از طریق جابجایی و تشعشع نداشته و به دلیل عدم دسترسی مستقیم، دمای آن در حین شکل‌دهی به کمک دماسنج مادون قرمز قابل اندازه‌گیری نبوده و مورد بحث نیز نمی‌باشد.



شکل ۱۱ نواحی مختلف ورق در حین شکل‌دهی دورانی گرم؛ (۱) منطقه تماس دائمی با قالب و نگهدارنده مسی؛ (۲) منطقه تغییر شکل یافته؛ (۳) منطقه تحت شکل‌دهی؛ (۴) منطقه تغییر شکل نیافته

- ناحیه دوم (منطقه تغییر شکل یافته): بخشی از ورق قطعه‌کار است که تغییر شکل مطلوب را یافته و با قالب در تماس است و با انتقال حرارت رسانایی، سبب افزایش دمای آن خواهد شد. با پیشرفت فرآیند شکل‌دهی این منطقه به تدریج گسترش یافته و تا لبه‌های خارجی ورق ادامه خواهد یافت.
 - ناحیه سوم (منطقه تحت تغییر شکل): این ناحیه مشابه حلقه حرارتی نشان داده شده در شکل ۱۲ بوده و در زیر ابزار غلتکی، تحت تغییر شکل قرار دارد. هدف از تحلیل تمام معادلات انتقال حرارت در این پژوهش، این است که افزایش دمای این قسمت محاسبه شده و بررسی شود که با تغییر در شدت جریان، به منطقه تبلور مجدد برسد.
 - ناحیه چهارم (منطقه تغییر شکل نیافته): محیط خارجی ورق قطعه‌کار که با پیشرفت فرآیند شکل‌دهی به تدریج کوچک‌تر شده و در نهایت به صفر می‌رسد. افزایش دمای این ناحیه، ناشی از انتقال حرارت رسانایی با ناحیه سوم بوده و طبعاً اتلاف انرژی آن نیز تنها بر اثر جابجایی با هوا و تشعشع خواهد بود.
- همانگونه که پیشتر نیز بیان شد، هدف اصلی از تحلیل معادلات انتقال حرارت، بررسی افزایش دما در ناحیه ۳ یعنی منطقه تحت تغییر شکل می‌باشد. بنابراین مقدار جرم ماده در این ناحیه که تحت افزایش دمای ناشی از عبور جریان قرار دارد، برابر کل جرم ورق نخواهد بود و لازم به نظر می‌رسد در محاسبه جرم تحت افزایش دما، تحلیل دقیق‌تری صورت گیرد.

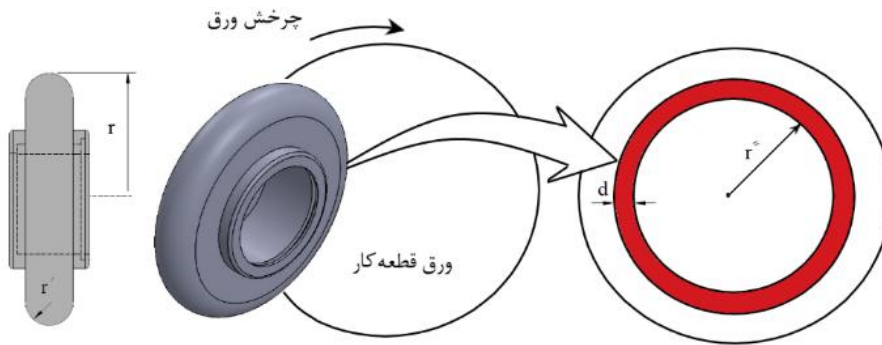
از آنجا که مقدار جرم منطقه تحت شکل‌دهی برای انجام محاسبات، بطور مشخص در دسترس نیست، می‌توان بر حسب چگالی (ρ) و حجم در نظر گرفت. حجم ماده نیز بر حسب ضخامت ورق (t) و سطح تماس (S) تعریف می‌شود.

$$m = \rho V = \rho S t \quad (23)$$

با تلفیق دو رابطه‌ی ۱۱ و ۲۳ در حالتی که ورق بدون چرخش با غلتک در تماس باشد، مقداری از جرم ماده که در زیر غلتک با آن تماس دارد از رابطه زیر تخمین زده می‌شود:

$$m = \frac{\pi}{4} \rho t r r' \phi \phi' \quad (24)$$

همانگونه که پیشتر نیز بیان شد، مقدار ϕ و ϕ' به فشار ابزار بستگی دارد، طوری که در ابتدای فرآیند که ورق قطعه‌کار، سرد است، سطح تماس کم بوده و با پیشرفت فرآیند شکل‌دهی و گرم‌تر شدن ورق و کاهش تنش سیلان آن، سطوح تماس بیشتر می‌شود. اما نکته قابل توجه دیگر که در آزمون‌های تجربی نیز مشاهده شده این است که زمانی که ورق در محل تماس با غلتک دوران داشته باشد، یک حلقه‌ی با دمای بالا بوجود خواهد آمد که مساحت آن مطابق شکل ۱۲ در شعاع چرخش r'' بصورت زیر بدست خواهد آمد:



شکل ۱۲ حلقه با دمای بالا و سطح تماس با ابزار

$$S = \pi (d + r'')^2 - \pi r'^2 = \pi (d^2 + d 2r'') \quad (25)$$

با صرف نظر از توان دوم d به علت کوچک بودن آن:

$$S \cong \pi d 2r'' = \pi 2r' \phi' r'' \quad (26)$$

که در آن، r'' شعاع نوک ابزار، ϕ' زاویه تماس نوک ابزار با سطح ورق بر حسب رادیان و r'' شعاع چرخش ورق در محل تماس با غلتک می‌باشد. بنابراین می‌توان برای این حلقه از ورق که باید تحت افزایش دما تا محدوده تبلور مجدد قرار گیرد، جرم ماده را با ترکیب روابط ۲۳ و ۲۶ بدین صورت تخمین زد:

$$m = t \rho S \cong \pi \rho 2r' \phi' r'' t \quad (27)$$

اکنون که وضعیت منطقه تحت تغییر شکل با تقریب خوبی بدست آمد، می‌توان برای سایر اجزای مدار نیز قانون اول ترمودینامیک و نرخ انرژی‌های منتقل شده به آنها را پیاده کرده و کل مدار را بدین گونه مورد جمع‌بندی و بررسی قرار داد:

اگر از نرخ انتقال حرارت رسانایی در دو سر کابل‌های ورودی و خروجی صرف‌نظر شود، با توجه به عایق‌بندی سایر اجزای مدار با بدنه ماشین ابزار، و نیز با توجه به اتصال اجزای مدار به یکدیگر و انتقال حرارت رسانایی، آن‌ها را به صورت یک مجموعه در نظر گرفت که با اتصال غلتک به ورق و برقرار شدن جریان الکتریسیته، نرخ انرژی تولید شده در کل سیستم باعث افزایش انرژی درونی خواهد شد، بنابراین با گذشت زمان، افزایش دما در تک‌تک قطعات رخ داده و این افزایش دما که در واقع حالت گذرا یا غیر دایم دارد تا آنجا ادامه می‌یابد که نرخ انتقال حرارت جابجایی و تشعشع بالا رفته و به اندازه‌ی نرخ انرژی تولید شده برسد، در اینصورت افزایش دمای سیستم (یعنی همان تک‌تک اجزای مدار) متوقف شده و پس از آن سیستم وارد حالت انتقال حرارت با شرایط دایم خواهد شد، که در

آن دمای اجزای مدار با اندکی نوسان تقریباً در مقدار ثابتی باقی خواهد ماند. بنابراین در حالت کلی، معادله انتقال حرارت سیستم در شرایط گذرا بصورت زیر خواهد شد:

$$\sum RI^2 t + E_f = (E_{rad/total} + E_{conv/total}) + [m_b C_b (\theta_3 - \theta_0)] + [m_m C_m (\theta_m - \theta_0)] + [m_t C_t (\theta_t - \theta_0)] + [m_{cu.h} C_{cu.h} (\theta_{cu.h} - \theta_0)] + [m_{gr} C_{gr} (\theta_{gr} - \theta_0)] + [m_{gr.h} C_{gr.h} (\theta_{gr.h} - \theta_0)] \quad (28)$$

که در آن نرخ انتقال حرارت جابجایی و تشعشع کل سیستم از جمع انتقال حرارت اجزا، مطابق رابطه ۲۹ بدست خواهد آمد:

$$\dot{E}_{rad/total} + \dot{E}_{conv/total} = (\dot{E}_{rad/t} + \dot{E}_{conv/t}) + (\dot{E}_{rad/m} + \dot{E}_{conv/m}) + (\dot{E}_{rad/b} + \dot{E}_{conv/b}) + (\dot{E}_{rad/cu.h} + \dot{E}_{conv/cu.h}) + (\dot{E}_{rad/gr} + \dot{E}_{conv/gr}) + (\dot{E}_{rad/gr.h} + \dot{E}_{conv/gr.h}) \quad (29)$$

عبارت‌های شامل انتقال حرارت تشعشع و جابجایی برای ابزار، قالب و سایر اجزا نیز با در نظر گرفتن حجم کنترل برای آن‌ها، از حل معادلات مشابه ۱۹ و ۲۰ بدست خواهند آمد.

اگر از اثر اصطکاک (E_f) نیز صرف‌نظر شود، حل معادله ۲۸ و بدست آوردن حداکثر دمای اجزای مدار با توجه به توان چهارم عبارت‌های انتقال حرارت تشعشع عملاً امکان‌پذیر نمی‌باشد، بنابراین نمی‌توان از این رابطه، دمای تک‌تک اجزا و نیز مدت زمان را بدست آورد، برای تقریب جواب و تخمین میزان افزایش دمای ورق، باید مسئله را ساده‌سازی کرد، برای این منظور:

- ابتدا حالت دایم در نظر گرفته شده است، یعنی فرض شده پس از برقرار شدن جریان در مدار و شروع افزایش دما در اجزا، با گذشت زمان (t) سیستم به حالت پایدار رسیده که در این حالت، نرخ تولید گرما با نرخ انتقال آن از طریق تشعشع و جابجایی برابر است. با توجه به اینکه دمای نهایی قالب، ابزار غلتکی و سایر اجزای مدار در حین فرایند قابل اندازه‌گیری است، با مساوی قرار دادن معادله ۲۹ با نرخ تولید گرما، دمای موضع شکل‌دهی یعنی همان ناحیه ۳ از ورق بدست خواهد آمد.

$$\sum RI^2 = (\dot{E}_{rad/t} + \dot{E}_{conv/t}) + (\dot{E}_{rad/m} + \dot{E}_{conv/m}) + (\dot{E}_{rad/b} + \dot{E}_{conv/b}) + (\dot{E}_{rad/cu.h} + \dot{E}_{conv/cu.h}) + (\dot{E}_{rad/gr} + \dot{E}_{conv/gr}) + (\dot{E}_{rad/gr.h} + \dot{E}_{conv/gr.h}) \quad (30)$$

پس از مشخص شدن دمای تمام اجزا می‌توان مدت زمان رسیدن اجزا به این دما را نیز با دقت قابل قبول بدست آورد که در واقع همان مدت زمان حالت گذرای مدار خواهد بود، بدین ترتیب که در معادله ۲۸ از عبارت‌های انتقال حرارت تشعشع و جابجایی صرف‌نظر شده و کل انرژی تولید شده، صرف افزایش انرژی درونی و افزایش دمای اجزای مدار در نظر گرفته شده است، با توجه به اینکه دمای نهایی آنها از قسمت قبل مشخص شد، اکنون مدت زمان (t) نیز محاسبه شده و می‌توان با نتایج تجربی نیز مقایسه نمود.

$$\sum RI^2 t = [m_b C_b (\theta_3 - \theta_0)] + [m_m C_m (\theta_m - \theta_0)] + [m_t C_t (\theta_t - \theta_0)] + [m_{cu.h} C_{cu.h} (\theta_{cu.h} - \theta_0)] + [m_{gr} C_{gr} (\theta_{gr} - \theta_0)] + [m_{gr.h} C_{gr.h} (\theta_{gr.h} - \theta_0)] \quad (31)$$

در این عبارت نیز از اثر اصطکاک بر افزایش دما صرف‌نظر شده است. با توجه به محاسبات فوق، اکنون می‌توان برای آزمایش‌های انجام شده در شدت جریان ۴۰۰ آمپر و ضخامت ورق ۱ میلی‌متر به حل مساله پرداخت. مشخصات فیزیکی اجزای مدار، از مراجع انتقال حرارت اخذ و به همراه سایر پارامترهای مورد نیاز در حل معادلات مورد نظر در جدول ۴ ذکر شده است.

بر اساس آنچه از انجام آزمایش‌های تجربی بدست آمده با اتصال ابزار به ورق قطعه‌کار و برقرار شدن شدت جریان ۴۰۰ آمپر در مدار، نگهدارنده مسی، لغزنده گرافیتی و پایه آن که با یکدیگر در تماس بوده‌اند به دمای بین ۱۷۰ تا ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد رسیده‌اند، دمای ابزار به محدوده ۱۲۰ تا ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد رسیده و در این بازه نوسان داشته است. دمای قالب نیز با تاخیر در افزایش نسبت به سایر اجزا (به دلیل اینکه در مسیر عبور جریان قرار نداشته)، روند افزایشی داشته و تا پایان فرایند شکل‌دهی و افزایش سطح تماس قطعه‌ی شکل‌داده شده با آن، در محدوده ۱۷۰ تا ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد رسیده است. برای کاهش حجم محاسبات، مقادیر نرخ انرژی‌های مورد نظر برای اجزای مدار بر اساس روابط مذکور محاسبه و در جدول ۵ وارد شده است.

جدول ۴ مقادیر پارامترهای لازم برای تحلیل حرارتی اجزای مدار

ورق	نگهدارنده مسی	پایه گرافیت	گرافیت	ابزار	قالب	
۶۴۷	۰/۰۰۸۲	۷/۶	۵۸	۱۰۷	-	R (10 ⁻⁸ Ω)
۴۰۰	۴۰۰	۴۰۰	۴۰۰	۴۰۰	-	I (A)
۰/۰۰۱	۰/۳۲	۰/۳	۰/۰۵	۰/۸	۱	m (kg)
۶۳۳	۳۹۰	۴۸۰	۹۹۰	۴۸۰	۴۸۰	C
		۳۰۰				θ ₀ (k)
؟	۴۵۰	۴۵۰	۴۵۰	۴۸۰	۴۶۰	θ (k)
۱۴۰	۲۰	۲۰	۲۰	۱۴۰	۱۴۰	h
		۵/۶۷ × ۱۰ ^{-۸}				σ
۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۵	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۵	۰/۰۲	S
۰/۵۰	۰/۵۸	۰/۳۳	۰/۹۵	۰/۳۳	۰/۳۳	ε

جدول ۵ مقادیر نرخ انرژی‌های ذخیره شده، تولید شده و منتقل شده

E _{rad}	E _{env}	E _{st}	E _g	
۱۳	۴۴۸	۷۸۴۰۰	۰	قالب
۱۷/۳	۷۴۲	۲۸۸۰۰	۱۷۱	ابزار
۱/۸	۳	۴۴۵۵	۹۳	گرافیت
۰/۶	۳	۷۲۰۰	۱۲	پایه گرافیت
۳/۲	۶۳	۱۱۸۵۰	۰/۱۳۴	نگهدارنده مسی
؟	؟	؟	۱۰۴۲	قطعه کار
۳۶	۱۲۵۹	۱۳۰۷۰۵	۱۳۱۸	جمع

بنابراین بر اساس رابطه ۳۰ می‌توان دمای موضع شکل‌دهی، یعنی منطقه ۳ در شکل ۱۱ را بدست آورد:

$$1318 = 1259 + 36 + [140 \times 0.0002 \times (\theta_3 - 300)] + [0.5 \times 5.67 \times 10^{-8} \times 0.0002 \times (\theta_3^4 - 300^4)]$$

$$0.028(\theta_3 - 300) + 5.67 \times 10^{-12}(\theta_3^4 - 300^4) = 23$$

$$0.028\theta_3 + 5.67 \times 10^{-12}\theta_3^4 = 31.445$$

$$\theta_3 = 955^\circ k = 682^\circ c \quad (32)$$

مقدار بدست آمده از آزمون‌های تجربی ۵۸۰ تا ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد بوده است. علت این اختلاف می‌تواند ناشی از خطای اندازه‌گیری دما در سایر اجزای مدار، خطا در مقادیر ضرایب انتقال حرارت، اتلاف انرژی از طریق رسانایی دوسر کابل‌های ورودی و خروجی، در نظر نگرفتن اثرات اصطکاک و در حالت کلی پیچیده بودن انتقال حرارت رسانایی بین اجزای مختلف باشد که در ابتدای توضیحات این پژوهش نیز بیان شد که با توجه به پیچیدگی مباحث انتقال حرارت، ساده‌سازی تحلیل، گریزناپذیر است.

اما در هر صورت، اکنون می‌توان مدت زمان رسیدن به حالت دائم را نیز تخمین زد. بر اساس معادله ۳۱ با اضافه کردن انرژی ذخیره شده در ورق و انرژی منتقل شده به ناحیه بیرونی آن (منطقه ۴ در شکل ۱۱) به مقادیر انرژی ذخیره شده در سایر اجزای مدار طبق جدول ۵:

$$\dot{E}_{cnd/3-4} = kA \frac{\Delta\theta}{\Delta l} = k \left(\pi 2r'' t \right) \frac{\theta_o - \theta_3}{\frac{D_o}{2} - r''} = 81$$

$$m_3 C \Delta\theta = (\pi \rho 2r'' \varphi r'' t) C (\theta_3 - \theta_o) = 384$$

$$\sum R I^2 t = \sum m C (\theta_3 - \theta_o) \rightarrow 0.0082 \times 400^2 \times t = 130705 + 81 + 384 \rightarrow t = 100 \text{ s} \quad (33)$$

مقدار بدست آمده در بررسی‌های تجربی حدود ۱۲۰ ثانیه بوده است، علت کاهش زمان محاسبه شده با مقدار واقعی می‌تواند این باشد که همانگونه که پیشتر نیز بیان شد، به دلیل پیچیده بودن انجام محاسبات معادله ۳۱، در این تحلیل، فرض شده است که در حالت گذرا، از انتقال انرژی به اطراف صرف‌نظر شده و تمام انرژی صرف افزایش انرژی درونی قطعات و گرم شدن آنها شده باشد، اما در عمل همزمان با افزایش دمای قطعات، انتقال حرارت به محیط اطراف نیز وجود خواهد داشت.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، با معرفی شکل‌دهی دورانی گرم تیتانیوم به روش مقاومتی، ابتدا مقاومت الکتریکی اجزای مدار و سپس انتقال حرارت بین آنها و در نهایت میزان افزایش دمای ورق و مدت زمان رسیدن به این دما بررسی شده است. نتایج پژوهش به شرح زیر است:

- ۱- برای اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی اجزای مدار در این فرآیند و موارد مشابه نمی‌توان به روش سنتی و مرسوم به کمک اهم‌سنج مقاومت را اندازه‌گیری نمود، لازم است بر اساس هندسه و مشخصات فیزیکی قطعات مختلف اجزای مدار، بطور مستقیم محاسبه شده و تغییرات دمایی نیز برای آن در نظر گرفته شود.
- ۲- در این فرآیند، محاسبه دقیق گرمای حاصل از مقاومت در برابر عبور جریان با توجه به ماهیت دورانی و حرکت خطی ابزار تا انتهای مراحل شکل‌دهی بسیار پیچیده است، اما با ساده‌سازی و به کمک معادلات انتقال حرارت قابل محاسبه و تخمین است.
- ۳- برای تخمین افزایش دمای ورق در شدت جریان‌های مختلف، لازم است آن را مانند یک حجم کنترل در نظر گرفته و با برقرار کردن قانون اول ترمودینامیک، تولید و انتقال حرارت بین اجزای مختلف مدار و نرخ تبادل حرارتی با محیط اطراف محاسبه شود.
- ۴- برای تخمین افزایش دمای اجزای مدار و به ویژه ورق، می‌توان کل فرآیند را به دو بخش گذرا و دائم تقسیم نمود، در حالت گذرا، با شروع برقرار شدن جریان، دمای اجزای مدار افزایش یافته تا جایی که نرخ انتقال حرارت تشعشع و جابجایی با نرخ انتقال حرارت تولیدی برابر شود که در این حالت، سیستم به حالت انتقال حرارت دائم رسیده است و در این حالت می‌توان دمای موضع شکل را با تقریب قابل قبولی محاسبه نمود.
- ۵- نرخ انتقال حرارت به اطراف از طریق تشعشع تا قبل از رسیدن به حالت دائم، یعنی محدوده‌ی دمای بیشینه‌ی اجزا و نیز نرخ انتقال حرارت جابجایی برای قطعات غیردوار کم و قابل اغماض است.

References

- [1] Elyasi M, Ghafari M, Bakhshi-Jooybari M. The effects of shape and tool material on aluminum sheet spinning. *Key Engineering Materials*. 2014;611:1116-23. doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.611-612.1116
- [2] M. Elyasi, M. Roein, M.J. Mirnia, Analysis of micro-tube bending using dimensionless bending Index, *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering*. 2023 October 6;1:1-28. doi: 10.1007/s40997-023-00714-1
- [3] Elyasi M, Paluch M, Hosseinzadeh M. Predicting the bending limit of AA8112 tubes using necking criterion in manufacturing of bent tubes. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017 February;88:3307-18. doi: 10.1007/s00170-016-9042-1
- [4] Zardoshtian A, Sabet H, Elyasi M. Improvement of the rotary draw bending process in rectangular tubes by using internal fluid pressure. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018;95:697-705. doi: 10.1007/s00170-017-1255-4

- [5] Roein M, Elyasi M, Mirnia MJ. Introduction of a new method for bending of AISI 304L stainless steel micro-tubes with micro-wire mandrel. *Journal of Manufacturing Processes*. 2021;66:27-38. doi: [10.1016/j.jmapro.2021.03.064](https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.03.064)
- [6] Roein M, Elyasi M, Mirnia MJ. Development of bending of AISI 304L micro-tubes with micro-wire mandrel and investigation of its effective parameters. *Journal of Manufacturing Processes*. 2021;64:723-38. doi: [10.1016/j.jmapro.2021.02.029](https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.02.029)
- [7] Elyasi M, Daeizadeh V. Effect of shape of workpiece on forming force in fine blanking process. *Materials Research Innovations*. 2011;15:s386-9. doi: [10.1179/143307511X12858957675075](https://doi.org/10.1179/143307511X12858957675075)
- [8] Elyasi M, Bakhshi-Jooybari M, Gorji A, Hosseinipour SJ, Nourouzi S. New die design for improvement of die corner filling in hydroforming of cylindrical stepped tubes. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2009;223:821-7. doi: [10.1243/09544054JEM1344](https://doi.org/10.1243/09544054JEM1344)
- [9] Darzi Sh, Mirnia MJ, Elyasi M. Single-point incremental forming of AA6061 aluminum alloy at elevated temperatures. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2021;116:1023-39. doi: [10.1007/s00170-021-07494-5](https://doi.org/10.1007/s00170-021-07494-5)
- [10] Nourmohammadi AA, Elyasi M, Mirnia MJ. Flexibility improvement in two-point incremental forming by implementing multi-point die. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019;102:2933-52. doi: [10.1007/s00170-019-03307-y](https://doi.org/10.1007/s00170-019-03307-y)
- [11] Elyasi M, Bakhshi-Jooybari M, Gorji AH. A new die design for the hydroforming of stepped tubes, *international journal of material forming*. 2010 March;3:71-5. doi: [10.1007/s12289-009-0419-7](https://doi.org/10.1007/s12289-009-0419-7)
- [12] Elyasi M. An Investigation on the Parametric Analysis of V-ring Indenter Mechanism in Fine-blanking Process. *International Journal of Mechanics and Applications*. 2013;3(4):76-80. doi: [10.5923/j.mechanics.20130304.03](https://doi.org/10.5923/j.mechanics.20130304.03)
- [13] Modanloo V, Alimirzaloo V, Elyasi M. Manufacturing of titanium bipolar plates using warm stamping process. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2020 February;45:9661-7. doi: [10.1007/s13369-020-04870-3](https://doi.org/10.1007/s13369-020-04870-3)
- [14] Modanloo V, Alimirzaloo V, Elyasi M. Optimal design of stamping process for fabrication of titanium bipolar plates using the integration of finite element and response surface methods. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2020 February;45:1097-107. doi: [10.1007/s13369-019-04232-8](https://doi.org/10.1007/s13369-019-04232-8)