مجله مهندسی مکانیک مدرس، آبان 1396، دوره 17، شماره 8، ص‌ص 201-212

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

مدل‌سازی و بهینه‌سازی فرآیند لپن‌کاری فولاد 440c توسط شبکه عصبی و الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه ازدحام ذرات

محمد شفیعی‌علویجه[1]، حسین امیرآبادی[2*]

1- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

* بیرجند، صندوق پستی 97175/615، hamirabadi@birjand.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 27 خرداد 1396

پذیرش: 21 تیر 1396

ارائه در سایت: 18 مرداد 1396

کلید واژگان:

لپن‌کاری

بهینه‌سازی چندهدفه ازدحام ذرات

زبری سطح

نرخ برداشت ماده

تختی

چکیده

مهم‌ترین مشکل در فرآیند لپن‌کاری پایین بودن نرخ برداشت ماده است که سبب افزایش هزینه و زمان تولید می‌شود، بنابراین در فرآیند لپن‌کاری انتخاب شرایطی که بتواند علاوه‌بر تولید قطعاتی با عدم تختی و زبری سطح مورد نیاز نرخ برداشت ماده بالایی نیز داشته باشد بسیار مهم و ضروری است. در این تحقیق در فرآیند لپن‌کاری تخت یک‌طرفه اثر پارامترهای اندازه ذرات ساینده، درصد وزنی ذرات ساینده در دوغاب لپن‌کاری و فشار لپن‌کاری بر نرخ برداشت ماده، عدم تختی و زبری سطح قطعاتی از جنس فولاد 440c به روش تجربی (آزمایشگاهی) مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه اثر پارامترهای بیان شده بر نرخ برداشت ماده، عدم تختی و زبری سطح قطعات لپن‌کاری شده توسط شبکه عصبی مصنوعی مدل‌سازی شده و در نهایت با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه ازدحام ذرات به بهینه‌سازی هم‌زمان نرخ برداشت ماده، زبری سطح و تختی قطعات لپن‌کاری شده پرداخته و جبهه پارتو مربوطه به دست آورده شده است. نتایج به دست‌آمده نشان می‌دهد که با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه ازدحام ذرات می‌توان قطعاتی با زبری سطح و تختی مورد نیاز را با نرخ برداشت ماده بالا تولید کرد. در نتیجه با استفاده از این روش علاوه‌بر ایجاد قطعاتی باکیفیت مطلوب، هزینه و زمان تولید نیز کاهش می‌یابد.

Modeling and optimizing lapping process of 440C steel by Neural Network and Multi-objective particle swarm optimization algorithm

Mohammad Shafiei Alavijeh[1], Hossein Amirabadi[1*]

1- Department of Mechanical Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran.
* P.O.B. 97175/615 Birjand, Iran, hamirabadi@birjand.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 17 June 2017
Accepted 12 July 2017
Available Online 09 August 2017

Keywords:
Lapping
Multi-Objective Particle Swarm Optimization
Surface Roughness
Material Removal Rate
Flatness

ABSTRACT

The most essential problem in lapping process is low material removal rate which leads to increase in production costs and time. Thus, in this process it is essential to select a condition that, besides producing pieces with required flatness and roughness has a high material removal rate. In this research effects of parameters such as abrasive particle size, abrasive particles concentration in slurry, and lapping pressure on material removal rate, flatness and surface roughness were studied by experimental method in single sided lapping of flat workpieces made of 440c steel. In the following, effect of the aforementioned parameters on material removal rate, flatness and surface roughness of lapped surface has been modeled using artificial neural network. Finally, by exerting multi-objective particle swarm optimization, simultaneous optimization of material removal rate, surface roughness and flatness of lapping pieces has been conducted and related Pareto front has been obtained. Obtained results show that by using Multi-objective particle swarm optimization algorithm we can produce workpieces with required surface roughness and flatness with high material removal rate. Consequently, by using this method, moreover, producing workpieces with desired quality, production cost and time would decrease.

1- مقدمه

امروزه با توسعه روزافزون صنعت نیاز به ساخت قطعاتی با دقت و کیفیت سطح بسیار بالا بیش از پیش احساس می‌شود که این دقت و کیفیت سطح بسیار بالا با روش‌های تولید مرسوم مانند سنگ‌زنی قابل حصول نیست؛ بنابراین در صنعت استفاده از روش‌هایی که توان ساخت قطعاتی با دقت و کیفیت سطح بسیار بالا را داشته باشند بیش از پیش گسترش یافته است. فرآیند لپن‌کاری یکی از این روش‌های تولیدی است. فرآیند لپن‌کاری[1] فرآیندی سایشی است که معمولاً جهت پرداخت‌کاری نهایی مورد استفاده قرار می‌گیرد. برداشت ماده در این فرآیند به وسیله ذرات ساینده‌ای که با سیالی مخلوط شده و بین ابزار لپن‌کاری و قطعه کار ریخته یا مالیده می‌شوند، انجام می‌شود [2,1].

[1] Lapping

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

M. Shafiei Alavijeh, H. Amirabadi, Modeling and optimizing lapping process of 440C steel by Neural Network and Multi-objective particle swarm optimization algorithm, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 8, pp. 201-212, 2017 (in Persian)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-16]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.8.52.6]

لپن‌کاری یک‌طرفه سطوح تخت[1] پرکاربردترین فرآیند لپن‌کاری در صنعت است؛ بنابراین در این تحقیق نیز این نوع فرآیند لپن‌کاری مورد بررسی قرار گرفته است. برخی از مهم‌ترین اهداف استفاده از فرآیند لپن‌کاری تخت یک‌طرفه کاهش خطای تختی[2] و زبری سطح[3] قطعات است. کاهش خطای تختی و زبری سطح تأثیر بسیار زیادی بر افزایش عمر، کارایی و عملکرد صحیح قطعات تولیدی دارد و سبب کاهش اصطکاک و افزایش آب‌بندی می‌شود. هرچند فرآیند لپن‌کاری مزایای بسیار زیادی از جمله رسیدن به دقت‌های ابعادی و هندسی بسیار بالا، کاهش تنش‌های سطحی، کاهش زبری سطح، کاهش عیوب سطحی و غیره را داراست، ولی نرخ برداشت ماده در این فرآیند بسیار پایین است که این امر سبب افزایش قابل ملاحظه هزینه و زمان تولید می‌گردد؛ بنابراین در این فرآیند انتخاب شرایطی که بتواند علاوه‌بر تولید قطعاتی با زبری سطح و خطای تختی پایین، نرخ برداشت ماده بالایی نیز داشته باشد بسیار مهم و ضروری است [3,1].

در ادامه برخی از مرتبط‌ترین تحقیقات انجام‌شده به این تحقیق آورده شده است. چونگ و همکاران [4] اثر فشار لپن‌کاری و استفاده هم‌زمان از ذرات ساینده بزرگ و کوچک را بر نرخ برداشت ماده و زبری سطح قطعات لپن‌کاری شده با استفاده از ماشین لپن‌کاری تخت یک‌طرفه لجیتک پی‌م5[4] با انجام یک‌سری آزمایش بررسی کرده‌اند. آن‌ها نتیجه گرفته‌اند که افزایش فشار لپن‌کاری تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای بر زبری سطح ندارد، ولی سبب افزایش نرخ برداشت ماده، همچنین استفاده هم‌زمان از ذرات ساینده بزرگ و کوچک با نسبت برابر بدون افزایش قابل‌ملاحظه زبری سطح قطعات لپن‌کاری شده سبب افزایش نرخ برداشت ماده می‌شود.

سو و همکاران [5] در فرآیند لپن‌کاری تخت با ذرات ساینده الماسه اثر پارامترهای سرعت چرخشی صفحه لپ، سرعت حمل‌کننده یا قفسه لپن‌کاری، فشار لپن‌کاری و اندازه ذرات ساینده را بر نرخ برداشت ماده و زبری سطح قطعات لپن‌کاری شده بررسی کرده‌اند. آن‌ها نتیجه گرفته‌اند که اندازه ذرات ساینده مهم‌ترین عامل مؤثر بر زبری سطح قطعه کار و نرخ برداشت ماده بوده و سرعت چرخشی صفحه لپ، فشار لپن‌کاری و سرعت قفسه لپن‌کاری تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای بر زبری سطح قطعات لپن‌کاری شده ندارند. آن‌ها مشاهده کرده‌اند که بزرگ‌تر شدن ذرات ساینده سبب افزایش زبری سطح قطعات لپن‌کاری شده و نرخ برداشت ماده می‌شود، همچنین افزایش سرعت قفسه لپن‌کاری و افزایش فشار سبب افزایش در نرخ برداشت ماده شده و افزایش سرعت چرخشی صفحه لپ در ابتدا نرخ برداشت ماده را افزایش داده، ولی پس از رسیدن به یک مقدار مشخص سبب کاهش نرخ برداشت ماده می‌شود.

گولو و کلیملی [6] اثر پارامترهای زمان و فشار لپن‌کاری را بر زبری سطح قطعات لپن‌کاری شده بررسی کرده‌اند. در این تحقیق قطعه کار از جنس فولاد ریخته‌گری شده GG6 و با ضخامت 15 میلی‌متر، قطر خارجی 70 میلی‌متر و قطر داخلی 50 میلی‌متر انتخاب شده است. آن‌ها نتیجه گرفته‌اند که زمان لپن‌کاری 25 دقیقه و فشار لپن‌کاری 689.5 کیلو پاسکال شرایط بهینه بوده و کمترین میزان زبری سطح قطعات تولید شده که برابر با 0.2 میکرومتر است در این شرایط مشاهده می‌شود.

ژانگ و همکاران [7] اثر پارامترهای زمان لپن‌کاری، سرعت چرخشی صفحه لپ، فشار لپن‌کاری و اندازه ذرات ساینده را در فرآیند لپن‌کاری تخت یک‌طرفه قطعاتی از جنس فولاد بر نرخ برداشت ماده و زبری سطح قطعه‌کار بررسی کرده‌اند. آن‌ها برای انجام آزمایش‌ها از ذرات ساینده اکسید آلومینیومی[5] و دستگاه لپن‌کاری لپ‌مستر[6] مدل 12C استفاده کرده‌اند. آن‌ها با استفاده از آنالیز واریانس نتیجه گرفته‌اند که پارامترهای اندازه ذرات ساینده، زمان لپن‌کاری، فشار لپن‌کاری و سرعت چرخشی صفحه لپ به ترتیب بیشترین تأثیر را بر زبری سطح قطعات تولیدی و پارامترهای اندازه ذرات ساینده، سرعت چرخشی صفحه لپ و فشار لپن‌کاری به ترتیب بیشترین تأثیر را بر نرخ برداشت ماده دارد. آن‌ها مشاهده کرده‌اند که افزایش زمان لپن‌کاری و سرعت چرخشی صفحه لپ و کاهش اندازه ذرات ساینده و فشار لپن‌کاری سبب کاهش زبری سطح قطعات تولیدی، همچنین افزایش اندازه ذرات ساینده، فشار لپن‌کاری و سرعت صفحه لپ سبب افزایش نرخ برداشت ماده می‌شود.

جیان و همکاران [8] به بهینه‌سازی فرآیند لپن‌کاری تخت یک‌طرفه پرداخته‌اند. آن‌ها اثر پارامترهای فشار لپن‌کاری، اندازه ذرات ساینده، سرعت چرخشی صفحه لپ، درصد وزنی ذرات ساینده در دوغاب ساینده[7] و نرخ تغذیه دوغاب ساینده را بر نرخ برداشت ماده، زبری سطح و تختی قطعات لپن‌کاری شده بررسی کرده‌اند. آن‌ها نتیجه گرفته‌اند که فشار 11 مگاپاسکال، سرعت صفحه لپ 35 دور بر دقیقه، میزان جریان دوغاب ساینده 228.75 میلی‌لیتر بر دقیقه، اندازه ذرات ساینده 7.95 و درصد وزنی ذرات ساینده در دوغاب 25% شرایط بهینه برای انجام این فرآیند لپن‌کاری است.

وانگ و همکاران [9] از تئوری ابتکاری حل مسأله (TRIZ[8]) برای بهینه‌سازی لپن‌کاری تخت یک‌طرفه یاقوت کبود استفاده کرده‌اند. آن‌ها اثر پارامترهای نیروی لپن‌کاری، اندازه ذرات ساینده، سرعت چرخشی صفحه لپ، تختی صفحه لپ و جریان دوغاب ساینده را بر نرخ برداشت ماده، زبری سطح و تختی قطعات لپن‌کاری شده بررسی کرده‌اند. آن‌ها با تنظیم مقادیر نیروی لپن‌کاری، سرعت دورانی، اندازه ذرات و غیره به بهینه‌سازی فرآیند لپن‌کاری پرداخته‌اند.

یوآن و همکاران [10] اثر پارامترهای فشار لپن‌کاری، سرعت چرخشی صفحه لپ و درصد وزنی ذرات ساینده در دوغاب لپن‌کاری را بر زبری سطح قطعات تولیدی در فرآیند لپن‌کاری تخت یک‌طرفه قطعاتی از جنس سرامیک را با استفاده از روش طراحی آزمایش تاگوچی بررسی کرده‌اند. آن‌ها با استفاده از آنالیز واریانس نتیجه گرفته‌اند که درصد وزنی ذرات ساینده در دوغاب در حدود 46%، سرعت چرخشی صفحه لپ در حدود 44% و فشار لپن‌کاری در حدود 8% بر تغییرات زبری سطح قطعات تولیدی مؤثر است. آن‌ها نتیجه گرفته‌اند که سرعت 10 دور بر دقیقه، فشار 30 کیلو پاسکال و درصد وزنی ذرات ساینده در دوغاب به میزان 10% شرایط بهینه بوده و کمترین میزان زبری سطح (Ra) که برابر با 10 نانومتر در این شرایط مشاهده شده است.

پارات و یاراسو [12,11] اثر پارامترهایی چون نیروی لپن‌کاری، زمان لپن‌کاری، جنس ذرات ساینده، غلظت ذرات ساینده در دوغاب و نوع سیال لپن‌کاری بر نرخ برداشت ماده و زبری سطح قطعات تولیدی در فرآیند لپن‌کاری تخت یک‌طرفه قطعاتی استوانه‌ای شکل از جنس چدن با قطر خارجی 50 میلی‌متر و قطر داخلی 45 میلی‌متر را با استفاده از روش طراحی آزمایش تاگوچی بررسی کرده‌اند. آن‌ها با استفاده از آنالیز واریانس نتیجه

[1] Single Sided Lapping of Flat Workpieces
[2] Flatness
[3] Surface Roughness
[4] Logitech PM5
[5] Aluminium Oxide
[6] Lapmaster
[7] slurry
[8] Theory of Inventive Problem Solving

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-16]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.8.52.6]

گرفته‌اند که جنس ذرات ساینده بیشترین تأثیر را بر نرخ برداشت ماده و زبری سطح قطعات تولیدی دارد، همچنین افزایش نیروی لپن‌کاری، کاهش زمان لپن‌کاری، استفاده از ذرات ساینده از جنس اکسید آلومینیوم به جای کاربید سیلیسیم[1] و استفاده از سیال روغنی به جای سیال از جنس نفت سفید سبب افزایش نرخ برداشت ماده، همچنین افزایش نیرو و زمان لپن‌کاری، استفاده از ذرات ساینده از جنس اکسید آلومینیوم به جای ذرات ساینده کاربید سیلیسیمی و استفاده از سیال روغنی به جای سیال از جنس نفت سفید سبب کاهش زبری سطح قطعات تولیدی می‌شود.

دشپاند و همکاران [13] در فرآیند لپن‌کاری تخت قطعاتی از جنس برنز و فولاد ضدزنگ اثر جنس ذرات ساینده را بر نرخ برداشت ماده، تختی، زبری و توپوگرافی[2] سطح قطعات لپن‌کاری شده بررسی کرده و دریافتند نوع ذرات ساینده تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای بر نرخ برداشت ماده ندارد، ولی بر زبری و توپوگرافی سطح قطعات لپن‌کاری شده تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای دارد.

آن و پارک [14] اثر پارامترهای اندازه ذرات ساینده، فشار لپن‌کاری و غلظت ذرات ساینده در دوغاب را در فرآیند لپن‌کاری تخت قطعات‌کاری از جنس آلومینا[3]، فریت Ni-Zn[4] و شیشه سیلیکات سدیم[5] بر نرخ برداشت ماده و زبری سطح قطعات لپن‌کاری شده و با استفاده از روش آزمایشگاهی بررسی کرده‌اند.

دملو و گوتزو [15] در فرآیند لپن‌کاری تخت قطعاتی از جنس کوارتز[6] با استفاده از دستگاه لپن‌کاری لجیتک پی‌ام4 [7] اثر پارامترهای زمان لپن‌کاری و اندازه ذرات ساینده را بر نرخ برداشت ماده و زبری سطح قطعات لپن‌کاری شده بررسی کرده‌اند.

سورس [16] اثر پارامترهای فشار لپن‌کاری، موقعیت قرار گرفتن قطعه در قفسه لپن‌کاری، سرعت صفحه لپ، غلظت ذرات ساینده در دوغاب، نوع سیال لپن‌کاری، نرخ تغذیه دوغاب ساینده، اندازه ذرات ساینده، تعداد شیارهای روی صفحه لپ، تعداد قطعات و نحوه قرارگیری آن‌ها روی صفحه لپ را بر نرخ برداشت ماده و زبری سطح قطعات لپن‌کاری شده را در فرآیند لپن‌کاری تخت یک‌طرفه بررسی کرده و دریافته است که افزایش فشار لپن‌کاری، افزایش سرعت صفحه لپ، افزایش نرخ تغذیه دوغاب ساینده و بزرگ‌تر شدن ذرات ساینده سبب افزایش نرخ برداشت ماده می‌شود. وجود یا نبود و همچنین تعداد شیارهای شعاعی صفحه لپ تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای بر نرخ برداشت ماده نمی‌گذارد.

لامبروپولوس و همکاران [17] در فرآیند لپن‌کاری تخت اثر اندازه ذرات ساینده را بر نرخ برداشت ماده و زبری سطح قطعات لپن‌کاری شده بررسی کرده و نتیجه بر آن شده است که بزرگ‌تر شدن ذرات ساینده سبب افزایش زبری سطح و نرخ برداشت ماده می‌شود.

آسکانیو و همکاران [18] در فرآیند لپن‌کاری تخت یک‌طرفه قطعاتی از جنس فولاد AISI 1045، اثر اندازه ذرات ساینده، زمان و فشار لپن‌کاری را بر میزان ماده برداشته‌شده و زبری سطح قطعات لپن‌کاری شده بررسی کرده‌اند. آن‌ها نتیجه گرفته‌اند که بزرگ‌تر شدن ذرات ساینده، افزایش فشار و افزایش زمان لپن‌کاری سبب افزایش برداشت ماده، همچنین کوچک‌تر شدن ذرات ساینده، کاهش فشار و افزایش زمان لپن‌کاری سبب کاهش زبری سطح می‌شود.

ایاما و همکاران [19] با استفاده از روش طراحی آزمایش تاگوچی در فرآیند لپن‌کاری تخت قطعاتی از جنس کاربید سمانته[8] اثر پارامترهای اندازه ذرات ساینده و زمان لپن‌کاری را بر زبری سطح و نرخ بهبود زبری سطح قطعه‌کار بررسی کرده و نتیجه گرفته‌اند که کوچک‌تر شدن ذرات ساینده و افزایش زمان لپن‌کاری سبب کاهش زبری سطح قطعات لپن‌کاری شده می‌شود، ولی پس از رسیدن به زبری سطح مشخصی برای هر اندازه از ذرات ساینده، افزایش زمان دیگر سبب کاهش زبری سطح قطعات لپن‌کاری شده نمی‌شود.

ملندا و باریلسکی [20] در فرآیند لپن‌کاری تخت یک‌طرفه قطعاتی از جنس اکسید آلومینیوم با استفاده از دستگاه لپن‌کاری ابرالپ 380[9] اثر پارامترهای اندازه ذرات ساینده، زمان و فشار لپن‌کاری را بر نرخ برداشت ماده و زبری سطح قطعات لپن‌کاری شده بررسی کرده و دریافتند کوچک‌تر شدن ذرات ساینده و افزایش زمان لپن‌کاری سبب کاهش نرخ برداشت ماده و زبری سطح قطعات لپن‌کاری شده می‌شود. افزایش فشار لپن‌کاری تأثیر مشخصی بر نرخ برداشت ماده ندارد، یعنی گاهی سبب افزایش و گاهی سبب کاهش نرخ برداشت ماده می‌شود.

ژو و همکاران [21] اثر استفاده هم‌زمان از ذرات ساینده بزرگ و کوچک را بر نرخ برداشت ماده و زبری سطح قطعه کار در فرایند لپن‌کاری با استفاده از ماشین لپن‌کاری تخت یک‌طرفه لجیتک پی‌ام5 بررسی و مشاهده کرده‌اند که بیشترین نرخ برداشت ماده و زبری سطح هنگامی به دست می‌آید که از ذرات ساینده کوچک و بزرگ با نسبت برابر استفاده شود. کمترین نرخ برداشت ماده و زبری سطح نیز هنگامی به دست می‌آید که از ذرات ساینده کوچک به‌طور خالص استفاده گردد.

یوآن و همکاران [22] اثر پارامترهای اندازه ذرات ساینده، سرعت و فشار لپن‌کاری را بر نرخ برداشت ماده و زبری سطح قطعات لپن‌کاری شده را در فرآیند لپن‌کاری تخت قطعاتی از جنس بلور کوارتز[10] بررسی و مشاهده کرده‌اند که بزرگ‌تر شدن ذرات ساینده، افزایش سرعت و فشار لپن‌کاری سبب افزایش نرخ برداشت ماده، همچنین افزایش سرعت و کوچک‌تر شدن ذرات ساینده سبب کاهش زبری سطح قطعات لپن‌کاری شده می‌شود.

در این تحقیق برای نخستین بار از شبکه عصبی مصنوعی[11] برای مدل‌سازی و پیش‌بینی مقادیر نرخ برداشت ماده، زبری سطح و عدم تختی قطعات لپن‌کاری شده استفاده شده است. برخلاف سایر تحقیقات انجام‌شده در زمینه فرآیندهای لپن‌کاری که بیشتر به بهینه‌سازی تک‌هدفه پارامترهای مؤثر بر نرخ برداشت ماده، زبری سطح و خطاهای هندسی قطعات تولیدی پرداخته‌اند، برای نخستین بار با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه ازدحام ذرات[12] به بهینه‌سازی هم‌زمان نرخ برداشت ماده، زبری سطح و تختی قطعه‌کار پرداخته و بهینه پارتو[13] و جبهه پارتو[14] مربوطه ارائه شده است.

در ادامه این مقاله نخست نحوه انجام آزمایش‌ها و نتایج به دست‌آمده از آزمایش‌ها شرح داده شده، سپس با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی مدل‌هایی برای پیش‌بینی مقادیر نرخ برداشت ماده، عدم تختی و زبری سطح قطعات لپن‌کاری شده با استفاده از مقادیر اندازه ذرات ساینده، درصد وزنی

[1] Silicon Carbide
[2] Topography
[3] Alumina
[4] Ni-Zn Ferrite
[5] Sodium Silicate Glass
[6] Quartz
[7] Logithec PM4

[8] Cemented Carbide
[9] ABRALAP 380
[10] Quartz Crystal
[11] Artificial Neural Network
[12] Multi-Objective Particle Swarm Optimization
[13] Pareto Optimal Solutions
[14] Pareto Front

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-16]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.8.52.6]

ذرات ساینده در دوغاب لپن‌کاری و فشار لپن‌کاری به دست آورده شده و در نهایت با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی تک‌هدفه و چندهدفه ازدحام ذرات به بهینه‌سازی نرخ برداشت ماده، زبری سطح و تختی قطعات لپن‌کاری شده پرداخته شده است.

2- مواد و تجهیزات مورد نیاز و روش انجام آزمایش‌ها

در این تحقیق از دستگاه لپن‌کاری لپ‌مستر 15[1] که در شکل 1 نشان داده شده برای انجام آزمایش‌های فرآیند لپن‌کاری تخت یک‌طرفه استفاده شده است. قطعات مورد استفاده در آزمایش‌ها از جنس فولاد 440c با سختی HV 620 است. قطعات به صورت استوانه‌هایی با قطر 38.1 میلی‌متر و ارتفاع 10 میلی‌متر است. آنالیز شیمیایی قطعات مورد استفاده در این تحقیق به وسیله دستگاه کوانتومتر ARL 3560 OES انجام شده و نتایج آن در جدول 1 نشان داده شده است.

به دلیل پایین بودن نرخ برداشت ماده در فرآیند لپن‌کاری و هزینه بالای این فرآیند، معمولاً پیش از انجام فرآیند لپن‌کاری با استفاده از فرآیندهای پرداخت‌کاری دیگر، سطح قطعه‌کار پرداخت‌کاری شده و در نتیجه کیفیت قطعه‌کار افزایش و خطاهای ابعادی و هندسی قطعه کاهش داده می‌شود؛ بنابراین مقدار اضافه بار کمتری برای فرآیند لپن‌کاری باقی خواهد ماند و در نتیجه هزینه و زمان تولید کاهش می‌یابد. در صنعت معمولاً پیش از فرآیند لپن‌کاری عملیات سنگ‌زنی روی قطعه‌کار صورت می‌گیرد [24,23]. در این تحقیق نیز پیش از انجام فرآیند لپن‌کاری سطح قطعات سنگ‌زنی شده است.

Fig. 1 LAPMASTER 15 lapping machine

شکل 1 دستگاه لپن‌کاری LAPMASTER 15

جدول 1 ترکیب شیمیایی قطعات کار از جنس فولاد 440c

Table 1 Chemical composition of 440c steel workpieces

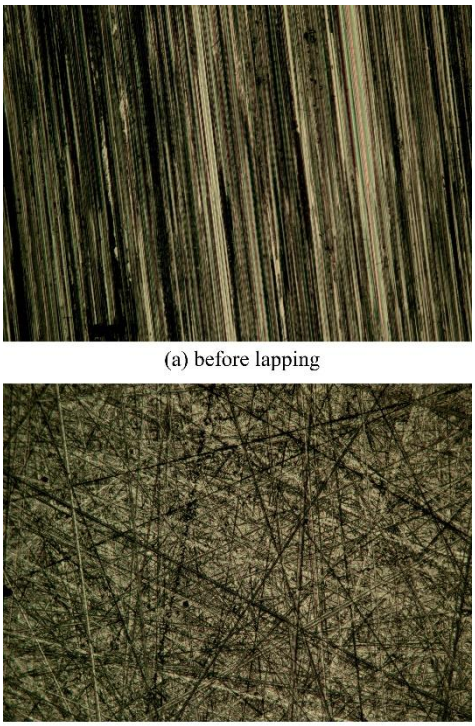
عناصر شیمیایی	آهن	کربن	منگنز	سیلیسیم	مولیبدن	کروم
درصد وزنی	فلز پایه	1.09	0.43	0.40	0.49	17.26

[1] LAPMASTER 15

در شکل 2-a تصویر بزرگ‌نمایی سطح قطعه کار سنگ‌زنی و آماده شده برای انجام فرآیند لپن‌کاری نشان داده شده است. در شکل 2-b سطح قطعه کار پس از انجام فرآیند لپن‌کاری نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود برخلاف سطح قطعه سنگ‌زنی شده که دارای شیارهایی در یک جهت مشخص، سطح قطعه لپن‌کاری شده دارای شیارهایی در جهات مختلف است که هر کدام از این شیارها به صورت تصادفی در یک جهت قرار گرفته‌اند. وجود شیارهای بی‌جهت[2] در سطح قطعات لپن‌کاری شده سبب افزایش قابلیت نگهداری روانکار[3] در قطعاتی می‌شود که روی یکدیگر می‌لغزند [23,20].

در این تحقیق سه پارامتر فشار لپن‌کاری، اندازه ذرات ساینده و درصد وزنی ذرات ساینده در دوغاب لپن‌کاری به عنوان عوامل کنترلی[4] در نظر گرفته شده و تأثیر این پارامترها بر نرخ برداشت ماده، زبری سطح و خطای تختی قطعات تولیدی بررسی شده است. سایر عوامل تأثیرگذار بر فرآیند لپن‌کاری برای افزایش دقت نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها تا حد امکان ثابت نگهداشته شده‌اند.

تمام آزمایش‌ها در دمای محیط کارگاه انجام شده و مدت زمان انجام فرآیند لپن‌کاری در هر آزمایش 60 دقیقه است. دوغاب ساینده مورد استفاده در آزمایش‌ها از ذرات ساینده‌ای از جنس اکسید آلومینیوم که با سیال لپن‌کاری مخلوط و تشکیل شده است. هنگام انجام آزمایش‌ها دوغاب ساینده با نرخ ثابت 2 میلی‌لیتر بر دقیقه بر صفحه لپ ریخته می‌شود. قطعات مورد استفاده در آزمایش‌ها دارای زبری سطح اولیه (R_a) 950±50 نانومتر و عدم تختی اولیه 5.598±0.311 میکرومتر است. برای اندازه‌گیری زبری سطح قطعات پیش و پس از فرآیند لپن‌کاری از دستگاه زبری‌سنج سورف‌تست



(a) before lapping

(b) after lapping

Fig. 2 Workpiece surface before and after lapping

شکل 2 سطح قطعه کار قبل و بعد از لپن‌کاری

[2] Undirected Processing Traces
[3] Lubricant Retention
[4] Signal Factor

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-16]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.8.52.6]

اس‌جی410[1] ساخت شرکت میتوتویو[2] استفاده شده است. این دستگاه زبری‌سنج قادر است R_a را با دقت (قدرت تشخیص) یک نانومتر اندازه‌گیری کند. ، زبری سطح در 5 نقطه از سطح هر قطعه برای افزایش صحت نتایج اندازه‌گیری و میانگین این 5 اندازه به عنوان زبری سطح آن قطعه در نظر گرفته شده است. میزان عدم تختی قطعات پیش و پس از فرآیند لپن‌کاری با استفاده از تختی‌سنج نوری[3] اندازه‌گیری شده است. نور قرمز با طول موج 0.622 میکرومتر نور مورد استفاده در این تختی‌سنج است. از آن‌جا که عدم تختی برابر با تعداد خطوط مشاهده شده ضرب در نصف طول موج است، این دستگاه قادر است عدم تختی را با دقت (قدرت تشخیص) 0.311 میکرومتر اندازه‌گیری کند.

در این تحقیق برای اندازه‌گیری نرخ برداشت ماده از یک ساعت برای اندازه‌گیری زمان فرآیند لپن‌کاری و از ترازوی الکترونیکی HR-200 که قادر است تا وزن قطعات را با دقت (قدرت تشخیص) 0.1 میلی‌گرم اندازه‌گیری کند برای اندازه‌گیری کاهش جرم قطعه در طول فرآیند لپن‌کاری استفاده شده است. برای محاسبه نرخ برداشت ماده از رابطه (1) استفاده شده است [7].

$$MRR = \frac{\Delta h}{\Delta t} = \frac{\Delta m \times 4 \times 10^4}{\pi \times d^2 \times \rho \times \Delta t} \quad (1)$$

در این تحقیق برای طراحی آزمایش‌ها از روش طراحی آزمایش عاملی کامل[4] استفاده شده و برای هر کدام از عوامل کنترلی مطابق جدول 2 چهار سطح در نظر گرفته شده است. هر آزمایش برای افزایش صحت نتایج با شرایط یکسان دو بار تکرار شده و در صورت عدم وجود اختلاف زیاد بین نتایج این دو آزمایش میانگین نتایج به دست آمده به عنوان مقدار آن آزمایش در نظر گرفته شده، در غیر این صورت این دو قطعه کنار گذاشته شده و آزمایش‌ها تکرار شده است.

پیش از انجام آزمایش‌ها ابتدا قطعات از میله‌ای از جنس فولاد 440c بریده، سپس قطعات سنگ‌زده شده و زبری سطح، عدم تختی و وزن آن‌ها اندازه‌گیری می‌شوند. قطعاتی که اندازه‌های آن‌ها در محدوده‌های قابل قبول (زبری سطح اولیه (R_a) 950±50 نانومتر و عدم تختی اولیه 5.598±0.311 میکرومتر) قرار داشته باشند، برای انجام آزمایش‌ها انتخاب می‌شوند. پیش از انجام هر آزمایش ذرات ساینده با اندازه قطر مشخص شده برای آن آزمایش و با نسبت وزنی مشخص شده برای آن آزمایش با سیال لپن‌کاری مخلوط می‌شوند. دوغاب ساینده در پمپ تغذیه دوغاب ساینده ریخته شده و دستگاه لپن‌کاری برای یک دقیقه روشن می‌شود تا دوغاب ساینده بر صفحه لپ ریخته شده و ذرات ساینده در سطح صفحه لپ فرو روند. قطعه‌کار درون قفسه لپن‌کاری قرارداده شده و وزنه‌ای برای اعمال فشار لپن‌کاری روی قطعه‌کار قرار داده می‌شود. با تغییر جرم وزنه می‌توان فشار لپن‌کاری مورد نیاز برای انجام هر آزمایش را تنظیم کرد.

جدول 2 عوامل کنترلی و سطوح آن‌ها

Table 2 Control factors and their levels

عامل کنترلی	سطح 1	سطح 2	سطح 3	سطح 4
درصد وزنی ذرات ساینده (%wt)	10	15	20	25
اندازه ذرات ساینده (μm)	16	32	63	122
فشار لپن‌کاری (kPa)	10	15	20	25

[1] SURFTEST SJ-410
[2] Mitutoyo
[3] Optical Flat
[4] Full Factorial

پس از قرار دادن قطعه‌کار در قفسه لپن‌کاری، دستگاه لپن‌کاری دوباره به مدت 60 دقیقه با سرعت صفحه لپ 50 دور بر دقیقه روشن می‌شود. پس از اتمام هر آزمایش ابتدا قطعه‌کار تمیز شده سپس وزن، زبری سطح و عدم تختی آن اندازه‌گیری می‌شود. نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش‌ها در جدول 3 نشان داده شده است.

3- نتایج

3-1- اثر فشار لپن‌کاری بر نتایج فرآیند لپن‌کاری

اثر تغییرات فشار لپن‌کاری بر نرخ برداشت ماده، زبری سطح و تختی قطعه لپن‌کاری شده به ترتیب در شکل‌های 3-5 نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل‌های 3 و 4 مشاهده می‌شود در مقادیر کوچک فشار لپن‌کاری با افزایش فشار لپن‌کاری به تدریج مقادیر نرخ برداشت ماده و زبری سطح قطعات لپن‌کاری شده افزایش می‌یابد، ولی با عبور فشار لپن‌کاری از مقدار معینی (20 کیلوپاسکال) مقادیر نرخ برداشت ماده و زبری سطح قطعات لپن‌کاری شده شروع به کاهش می‌کند؛ دلیل این پدیده این است که در ابتدا افزایش فشار لپن‌کاری سبب افزایش عمق خراش‌های ایجاد شده توسط ذرات ساینده روی سطح قطعه‌کار و درنتیجه افزایش نرخ برداشت ماده و زبری سطح قطعات لپن‌کاری شده می‌شود. پس از رسیدن به فشار مشخصی افزایش فشار لپن‌کاری سبب خرد شدن ذرات ساینده و یا فرو رفتن بیش از حد ذرات ساینده در صفحه لپ می‌شود درنتیجه نرخ برداشت ماده و زبری سطح شروع به کاهش می‌کند.

براساس شکل 5 افزایش فشار لپن‌کاری سبب کاهش خطای تختی قطعات لپن‌کاری شده می‌شود. افزایش فشار لپن‌کاری سبب افزایش فشار به سطح قطعه‌کار شده و درنتیجه برجستگی‌های روی سطح قطعه‌کار هموارتر شده و عدم تختی قطعات لپن‌کاری شده کاهش می‌یابد.

3-2- اثر درصد وزنی ذرات ساینده بر نتایج فرآیند لپن‌کاری

اثر تغییرات درصد وزنی ذرات ساینده در دوغاب لپن‌کاری بر نرخ برداشت ماده، زبری سطح و خطای تختی قطعات لپن‌کاری شده به ترتیب در شکل‌های 6-8 نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود در مقادیر کوچک درصد وزنی ذرات ساینده در دوغاب لپن‌کاری با افزایش درصد وزنی ذرات ساینده به تدریج مقادیر نرخ برداشت ماده افزایش و مقادیر زبری سطح و خطای تختی قطعات لپن‌کاری شده کاهش می‌یابد، ولی با عبور درصد وزنی ذرات ساینده در دوغاب لپن‌کاری از مقدار معینی (20%)،

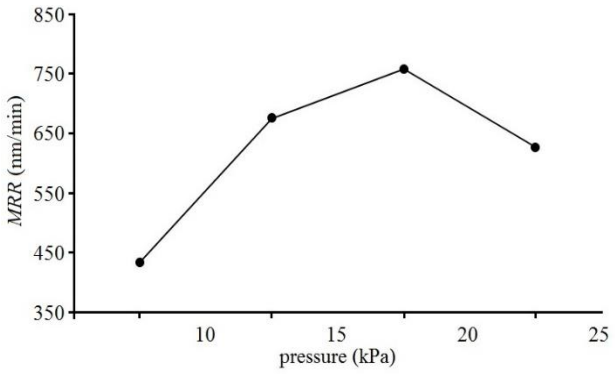


Fig. 3 Effect of lapping pressure on average values for material removal rate

شکل 3 اثر فشار لپن‌کاری بر میانگین مقادیر نرخ برداشت ماده

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-16]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.8.52.6]

جدول 3 نتایج آزمایشگاهی

Table 3 Experimental results

شماره آزمایش	فشار لپن کاری (kPa)	اندازه ذرات ساینده (μm)	درصد وزنی ذرات ساینده (%wt)	نرخ برداشت ماده (nm/min)	زبری سطح (nm)	عدم تختی (nm)
1	10	16	10	136	79	2021
2	15	16	10	350	119	1555
3	20	16	10	441	138	1399
4	25	16	10	319	141	1088
5	10	32	10	246	134	2177
6	15	32	10	542	174	1710
7	20	32	10	609	193	1555
8	25	32	10	493	193	1244
9	10	63	10	411	197	2332
10	15	63	10	659	232	1866
11	20	63	10	729	253	1555
12	25	63	10	595	247	1399
13	10	122	10	503	226	2488
14	15	122	10	675	249	2021
15	20	122	10	670	266	1555
16	25	122	10	496	259	1399
17	10	16	15	264	59	1866
18	15	16	15	514	94	1399
19	20	16	15	616	112	1088
20	25	16	15	474	111	933
21	10	32	15	447	122	2021
22	15	32	15	701	159	1555
23	20	32	15	782	179	1244
24	25	32	15	646	177	1244
25	10	63	15	569	182	2332
26	15	63	15	813	223	1866
27	20	63	15	909	242	1555
28	25	63	15	763	239	1399
29	10	122	15	564	205	2643
30	15	122	15	807	244	2021
31	20	122	15	891	259	1710
32	25	122	15	755	252	1555
33	10	16	20	306	53	1710
34	15	16	20	544	89	1244
35	20	16	20	635	106	1088
36	25	16	20	494	108	933
37	10	32	20	489	119	2021
38	15	32	20	740	157	1399
39	20	32	20	817	174	1088
40	25	32	20	691	171	1088
41	10	63	20	591	173	2177
42	15	63	20	857	212	1710
43	20	63	20	932	230	1399
44	25	63	20	796	226	1244
45	10	122	20	593	194	2488
46	15	122	20	831	229	2021
47	20	122	20	917	249	1710
48	25	122	20	780	244	1399
49	10	16	25	252	73	2021
50	15	16	25	493	104	1555
51	20	16	25	594	127	1244
52	25	16	25	441	131	1088
53	10	32	25	440	128	2021
54	15	32	25	699	165	1710
55	20	32	25	778	185	1399
56	25	32	25	654	189	1244
57	10	63	25	571	183	2332
58	15	63	25	789	224	1866
59	20	63	25	892	242	1555
60	25	63	25	792	241	1555
61	10	122	25	553	213	2799
62	15	122	25	774	250	2332
63	20	122	25	895	266	1866
64	25	122	25	822	262	1710

مقادیر نرخ برداشت ماده آغاز به کاهش و مقادیر زبری سطح و خطای تختی قطعات لپن‌کاری شده شروع به افزایش می‌کنند.

دلیل این پدیده این است که در ابتدا برای انجام فرآیند لپن‌کاری به میزان کافی ذرات ساینده در سیال لپن‌کاری وجود ندارند، درنتیجه افزایش درصد وزنی ذرات ساینده در دوغاب لپن‌کاری سبب افزایش نرخ برداشت ماده و کاهش زبری سطح و عدم تختی قطعات لپن‌کاری شده می‌شود، پس از

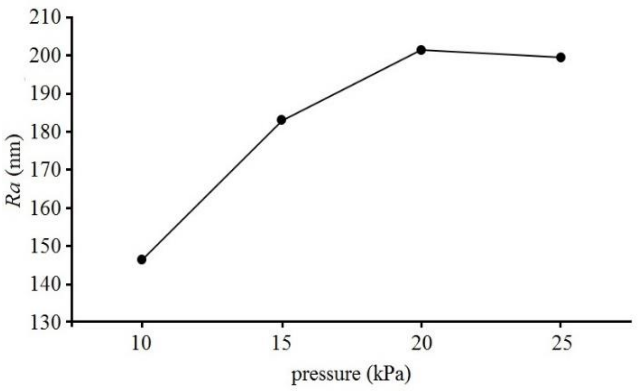


Fig. 4 Effect of lapping pressure on average values for surface roughness of lapped workpieces

شکل 4 اثر فشار لپن‌کاری بر میانگین مقادیر زبری سطح قطعات لپن‌کاری شده

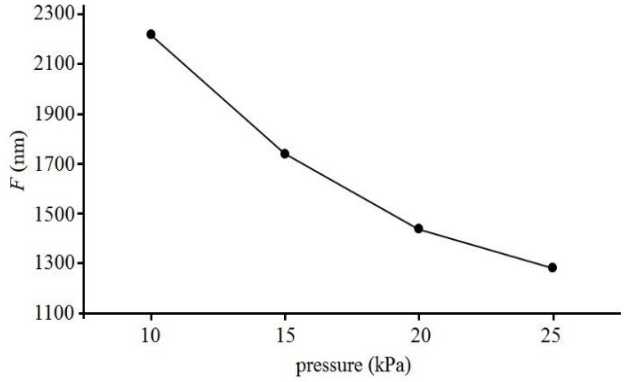


Fig. 5 Effect of lapping pressure on average values for out of flatness in lapped workpieces

شکل 5 اثر فشار لپن‌کاری بر میانگین مقادیر خطای تختی قطعات لپن‌کاری شده

رسیدن به درصد وزنی مشخصی ذرات ساینده به میزان کافی در سیال لپن‌کاری برای انجام فرآیند لپن‌کاری وجود دارند و افزایش بیشتر نه تنها سبب بهبود نرخ برداشت ماده، زبری سطح و عدم تختی قطعات لپن‌کاری شده نمی‌شود، بلکه وجود ذرات ساینده بیش از اندازه در سیال لپن‌کاری به دلیل کاهش سیالیت و در نتیجه حرکت نامناسب ذرات ساینده و مواد جدا شده از سطح قطعه لپن‌کاری شده، درگیری و سایش ذرات ساینده با یکدیگر، کاهش فشار وارد بر هر ذره ساینده و غیره سبب کاهش نرخ برداشت ماده و افزایش زبری سطح و خطای تختی قطعات لپن‌کاری شده می‌شود.

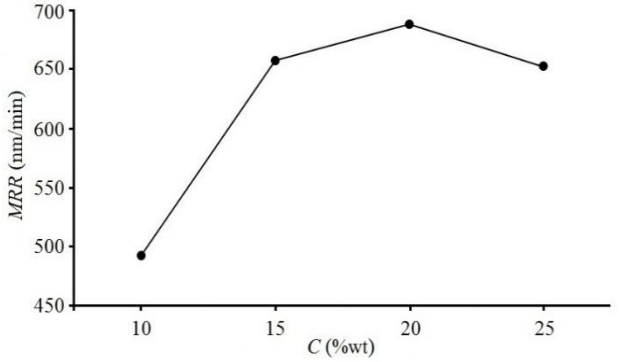


Fig. 6 Effect of concentration of abrasive particles on average values for material removal rate

شکل 6 اثر درصد وزنی ذرات ساینده در دوغاب لپن‌کاری بر میانگین مقادیر نرخ برداشت ماده

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-16]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.8.52.6]

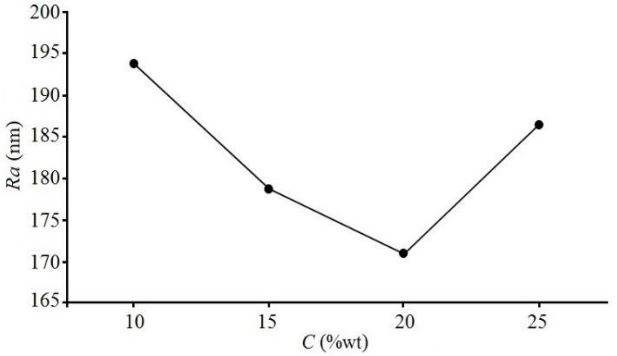


Fig. 7 Effect of concentration of abrasive particles on average values for surface roughness of lapped workpieces

شکل 7 اثر درصد وزنی ذرات ساینده در دوغاب لپن‌کاری بر میانگین مقادیر زبری سطح قطعات لپن‌کاری شده

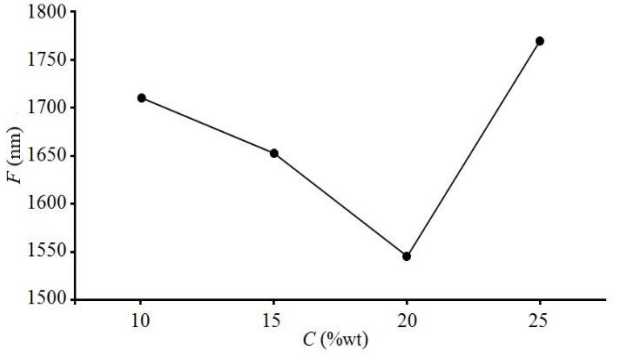


Fig. 8 Effect of concentration of abrasive particles on average values for out of flatness in lapped workpieces

شکل 8 اثر درصد وزنی ذرات ساینده بر میانگین مقادیر خطای تختی قطعات لپن‌کاری شده

3-3- اثر اندازه ذرات ساینده بر نتایج فرآیند لپن‌کاری

اثر تغییرات اندازه ذرات ساینده بر نرخ برداشت ماده، زبری سطح و خطای تختی قطعه لپن‌کاری شده به ترتیب در شکل‌های 9-11 نشان داده شده است. در شکل 9 مشاهده می‌شود که در مقادیر کوچک اندازه ذرات ساینده با بزرگ‌تر شدن ذرات ساینده به تدریج نرخ برداشت ماده افزایش می‌یابد، ولی با عبور اندازه ذرات ساینده از مقدار معینی (63 میکرومتر)، نرخ برداشت ماده شروع به کاهش می‌کند. دلیل این پدیده این است که در ابتدا بزرگ‌تر شدن ذرات ساینده سبب افزایش عمق و پهنای خراش‌های ایجاد شده توسط ذرات ساینده روی سطح قطعه‌کار و در نتیجه افزایش نرخ برداشت ماده می‌شود، اما پس از رسیدن به اندازه مشخصی، بزرگ‌تر شدن ذرات ساینده سبب خرد شدن و یا فرو رفتن بیش از حد این ذرات ساینده بزرگ در صفحه لپ در اثر فشار بالای وارد بر هریک از آن‌ها می‌شود. در نتیجه نرخ برداشت ماده شروع به کاهش می‌کند.

همان‌طور که در شکل 10 نشان داده شده است با بزرگ‌تر شدن ذرات ساینده، زبری سطح قطعات لپن‌کاری شده افزایش می‌یابد. بزرگ‌تر شدن ذرات ساینده سبب افزایش عمق و پهنای خراش‌های ایجاد شده توسط ذرات ساینده روی سطح قطعه‌کار شده و در نتیجه سبب افزایش زبری سطح قطعات لپن‌کاری شده می‌شود. هر چند به مرور با بزرگ‌تر شدن اندازه ذرات ساینده به دلیل خرد شدن این ذرات ساینده بزرگ در اثر فشار بالای وارد بر هر یک از آن‌ها آهنگ افزایش زبری سطح کاهش یافته و حتی در مواردی سبب کاهش زبری سطح قطعه لپن‌کاری شده می‌شود.

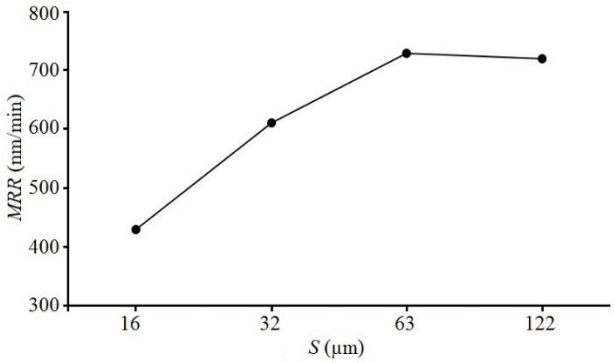


Fig. 9 Effect of abrasive particles size on average values for material removal rate

شکل 9 اثر اندازه ذرات ساینده بر میانگین مقادیر نرخ برداشت ماده

براساس شکل 11 بزرگ‌تر شدن ذرات ساینده سبب افزایش خطای تختی قطعات لپن‌کاری شده می‌شود. ذرات ساینده بزرگ‌تر سبب ایجاد خراش‌ها و حفره‌های بزرگ‌تری در سطح قطعات لپن‌کاری شده می‌گردند، در نتیجه پستی و بلندی‌های سطح قطعات لپن‌کاری شده بزرگ‌تر شده که این امر سبب افزایش خطای تختی قطعات لپن‌کاری شده می‌شود.

4-3- مدل‌سازی فرآیند لپن‌کاری به وسیله شبکه عصبی مصنوعی

پیش از انجام بهینه‌سازی فرآیند لپن‌کاری باید مدلی برای پیش‌بینی نتایج حاصل از این فرآیند به دست آورد. این مدل باید بتواند مقادیر خروجی‌های آزمایش‌ها (متغیرهای پاسخ) را با استفاده از مقادیر متغیرهای کنترلی پیش‌بینی کند. در این تحقیق متغیرهای کنترلی عبارت از فشار لپن‌کاری، درصد وزنی ذرات ساینده در دوغاب لپن‌کاری و اندازه ذرات ساینده و متغیرهای پاسخ عبارت از نرخ برداشت ماده، عدم تختی و زبری سطح قطعات لپن‌کاری شده است.

در این تحقیق برای مدل‌سازی فرآیند لپن‌کاری از شبکه عصبی مصنوعی با الگوریتم پس انتشار خطا[1] استفاده شده است. براساس پژوهش‌های انجام شده شبکه‌های عصبی قادر است تا خروجی فرایندهای مختلف ماشین‌کاری و پرداخت‌کاری را با دقت بالایی پیش‌بینی کند، همچنین براساس پژوهش‌های انجام شده استفاده از الگوریتم پس انتشار خطا برای آموزش شبکه‌های عصبی نتایج مطلوبی را در پیش‌بینی نتایج خروجی این فرآیندها داشته است [25-29].

در الگوریتم پس انتشار خطا به منظور به حداقل رساندن اختلاف بین نتایج پیش‌بینی شده و داده‌های خروجی واقعی (خطای آموزش)، وزن ارتباط داخلی شبکه عصبی در طی فرآیند آموزش تنظیم می‌شود. برای تنظیم وزن شبکه عصبی مصنوعی با الگوریتم پس انتشار خطا، داده‌ها از لایه خروجی به لایه پنهان باز می‌گردند و دوباره پردازش می‌شوند. وزن در این الگوریتم با استفاده روابط (2-4) تعیین می‌شود [31,30].

$$w_{ij}^{new} = w_{ij}^{old} + \Delta w_{ij} \quad (2)$$

$$\Delta w_{ij} = -\mu \frac{\partial E_P}{\partial w_{ij}} out_j \quad (3)$$

$$E_P = \frac{1}{2}\sum_{p=1}^{P}\sum_{k=1}^{K}\left(d_{pk} - o_{pk}\right) \quad (4)$$

برای پیش‌بینی مقادیر نرخ برداشت ماده، زبری سطح و خطای تختی قطعات

[1] Back Propagation

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-16]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.8.52.6]

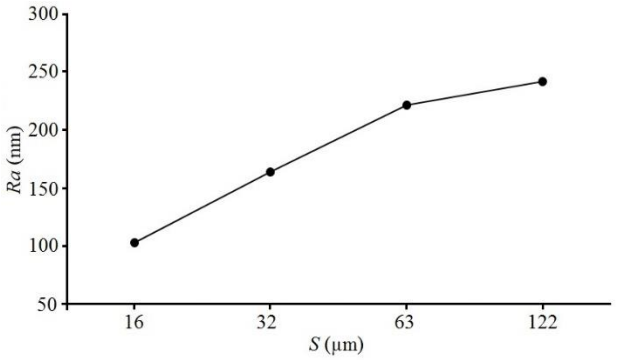


Fig. 10 Effect of abrasive particles size on average values for surface roughness of lapped workpieces

شکل 10 اثر اندازه ذرات ساینده بر میانگین مقادیر زبری سطح قطعات لپن‌کاری شده

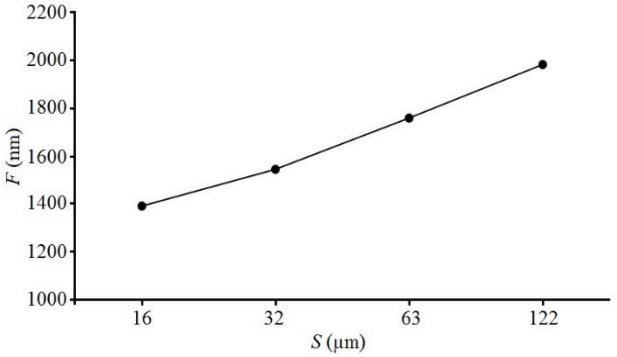


Fig. 11 Effect of abrasive particles size on average values for out of flatness in lapped workpieces

شکل 11 اثر اندازه ذرات ساینده بر میانگین مقادیر خطای تختی قطعات لپن‌کاری شده

لپن‌کاری شده، سه شبکه عصبی مصنوعی ایجاد و آموزش داده شده است. هر سه شبکه عصبی ایجاد شده دارای یک لایه ورودی، دو لایه مخفی یا میانی و یک لایه خروجی است. براساس شکل 12 هر کدام از این سه شبکه عصبی دارای 3 ورودی و یک خروجی است. سه پارامتر ورودی عبارت از فشار لپن‌کاری، اندازه قطر ذرات ساینده و درصد وزنی ذرات ساینده در دوغاب لپن‌کاری است. نرخ برداشت ماده، پارامتر خروجی شبکه عصبی اول، زبری سطح قطعه لپن‌کاری شده، پارامتر خروجی شبکه عصبی دوم و خطای تختی قطعه لپن‌کاری شده، پارامتر خروجی شبکه عصبی سوم است.

از آن‌جا که محدوده و واحدهای داده‌های ورودی فرآیند با یکدیگر تفاوت دارند، برای افزایش سرعت آموزش و کاهش خطای شبکه عصبی، داده‌های ورودی در بازه صفر تا یک نرمال شده‌اند.

از میان داده‌های نشان داده شده در جدول 3 داده‌های 54 آزمایش برای آموزش شبکه‌های عصبی ایجاد شده و داده‌های 10 آزمایش برای آزمون شبکه‌های عصبی ایجاد شده، به کار برده شده‌اند. انتخاب داده‌های مورد استفاده برای آموزش و آزمایش شبکه‌های عصبی ایجاد شده به صورت تصادفی انجام شده است.

در شکل‌های 13-15 به ترتیب اختلاف مقادیر پیش‌بینی شده توسط شبکه‌های عصبی مصنوعی آموزش داده شده و مقادیر متناظر به دست آمده از آزمایش‌های انجام داده شده، نشان داده شده است. در این شکل‌ها دیده می‌شود که شبکه‌های عصبی مصنوعی آموزش داده شده به داده‌های امتحانی مانند داده‌های آموزشی به خوبی پاسخ داده و تطابق مناسبی با داده‌های حاصل از آزمایش‌های انجام داده شده دارند. میانگین درصد خطای آموزش برای نرخ برداشت ماده، زبری سطح و خطای تختی قطعات لپن‌کاری شده به ترتیب 2.5%، 1.7% و 3.3% و میانگین درصد خطای آزمایش برای نرخ برداشت ماده، زبری سطح و خطای تختی قطعات لپن‌کاری شده به ترتیب 3.1%، 3% و 3.2% است. کوچک بودن میزان این خطاها و نزدیک بودن مقادیر خطاهای آموزش و آزمایش نشان‌دهنده آموزش صحیح و به اندازه شبکه‌های عصبی است.

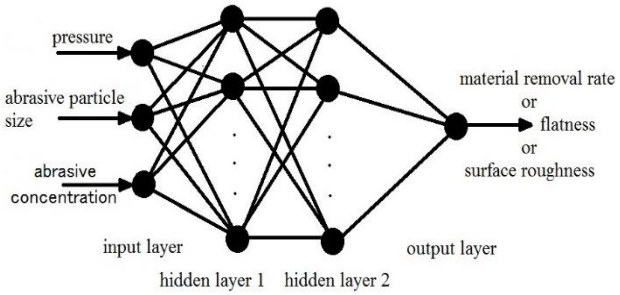


Fig. 12 the construction used in artificial neural network models for lapping process

شکل 12 معماری به کار رفته در مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی فرآیند لپن‌کاری

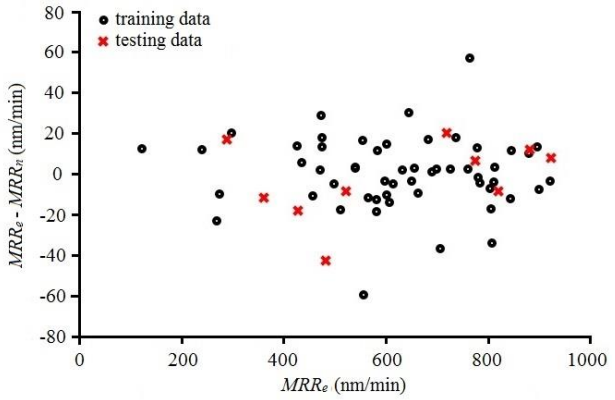


Fig. 13 Difference between material removal rate obtained from experiments and predicted by artificial neural network

شکل 13 اختلاف نرخ برداشت ماده به دست آمده از آزمایش‌ها و پیش‌بینی شده توسط شبکه عصبی مصنوعی

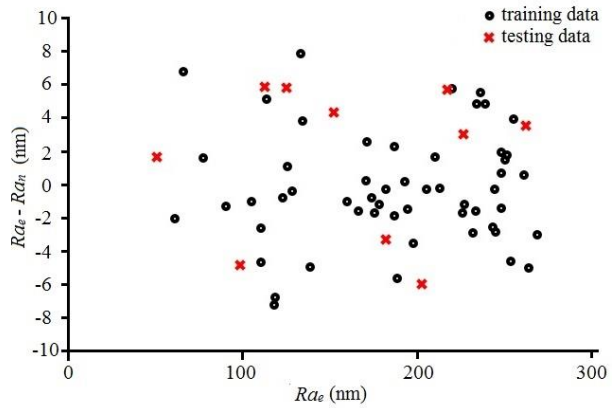


Fig. 14 Difference between surface roughness obtained from experiments and predicted by artificial neural network

شکل 14 اختلاف زبری سطح به دست آمده از آزمایش‌ها و پیش‌بینی شده توسط شبکه عصبی مصنوعی

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-16]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.8.52.6]

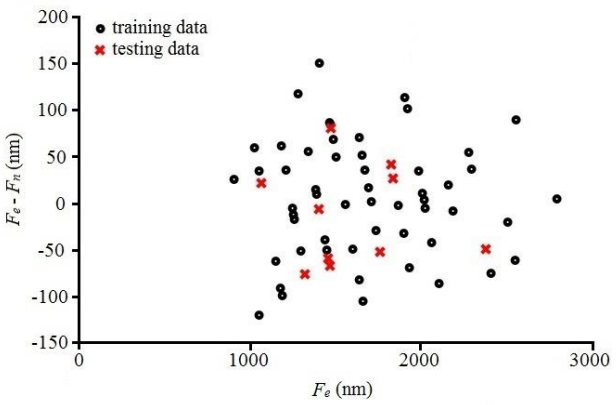


Fig. 15 Difference between out of flatness obtained from experiments and predicted by artificial neural network

شکل 15 اختلاف خطای تختی به دست آمده از آزمایش‌ها و پیش‌بینی شده توسط شبکه عصبی مصنوعی

5-3- بهینه‌سازی فرآیند لپن‌کاری

الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات در سال 1995 توسط کندی و ابرهارت [32] مطرح شد. این الگوریتم که از پرواز گروهی پرندگان الهام گرفته شده است، با ایجاد یک جمعیت تصادفی از ذرات (پاسخ‌های ممکن) شروع می‌شود. حرکت و جستجوی هر ذره در دو جهت صورت می‌گیرد؛ به سمت بهترین موقعیتی که ذره تاکنون به آن رسیده است و به سمت بهترین موقعیتی که مجموعه ذرات به آن رسیده‌اند. سرعت هر ذره و به تبع آن موقعیت جدید آن ذره همان‌طور که در شکل 16 نشان داده شده است با استفاده از روابط (6,5) محاسبه می‌شود.

$$V_i^{t+1} = WV_i^t + c_1 r_1 (p_i^t - X_i^t) + c_2 r_2 (G_t - X_i^t) \quad (5)$$

$$X_i^{t+1} = X_i^t + V_i^{t+1} \quad (6)$$

در این مقاله مقادیر c_1، c_2 و W به کمک روش سعی و خطا به ترتیب برابر با 2.5، 1.5 و 0.5 انتخاب شده‌اند.

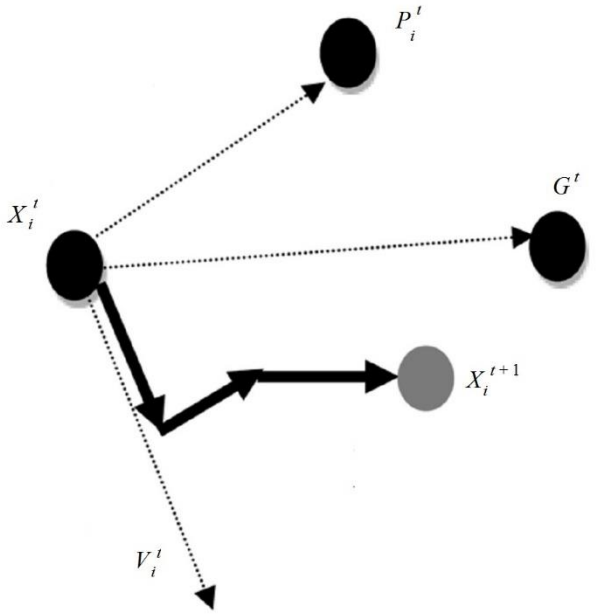


Fig. 16 The function of Particle Swarm Optimization Algorithm [32]

شکل 16 نحوه عملکرد الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات [32]

در این تحقیق از نرم‌افزار متلب[1] برای بهینه‌سازی فرآیند به روش ازدحام ذرات (PSO[2]) استفاده شده و حالت‌های بهینه برای رسیدن به بیشترین نرخ برداشت ماده، کمترین زبری سطح و کمترین خطای تختی قطعه لپن‌کاری شده به وسیله این نرم‌افزار به دست آورده شده است. حالت بهینه برای رسیدن به بیشترین نرخ برداشت ماده در فشار لپن‌کاری 19.7 کیلوپاسکال، درصد وزنی ذرات ساینده در دوغاب لپن‌کاری 19.3% و اندازه ذرات ساینده 66 میکرومتر به دست آمده است. با انجام آزمایش در این شرایط نرخ برداشت ماده 948 میکرومتر بر دقیقه به دست آمده که از بیشترین نرخ برداشت ماده به دست آمده از آزمایش‌های انجام شده (932 میکرومتر بر دقیقه) بیشتر است. حالت بهینه برای رسیدن به کمترین زبری سطح قطعه لپن‌کاری شده در فشار لپن‌کاری 10 کیلوپاسکال، درصد وزنی ذرات ساینده در دوغاب لپن‌کاری 19.1% و اندازه ذرات ساینده 16 میکرومتر به دست آمده است. با انجام آزمایش در این شرایط زبری سطح قطعه لپن‌کاری شده برابر با 51 نانومتر به دست آمده است که از کمترین زبری سطح به دست آمده از آزمایش‌های انجام شده (53 نانومتر) کمتر است. حالت بهینه برای رسیدن به کمترین خطای تختی در فشار لپن‌کاری 25 کیلوپاسکال، درصد وزنی ذرات ساینده در دوغاب لپن‌کاری 20.7% و اندازه ذرات ساینده 16 میکرومتر به دست آمده است. با انجام آزمایش در این شرایط خطای تختی قطعه لپن‌کاری شده برابر با 933 نانومتر به دست آمده است. همان‌طور که در جدول 3 مشاهده می‌شود این مقدار برابر با کمترین خطای تختی به دست آمده از آزمایش‌های انجام شده است.

بزرگ‌ترین مشکل فرآیند لپن‌کاری، پایین بودن نرخ برداشت ماده در این فرآیند است که این امر سبب افزایش قابل ملاحظه هزینه و زمان تولید می‌شود؛ بنابراین در فرآیند لپن‌کاری انتخاب شرایطی که بتواند علاوه‌بر تولید قطعاتی با زبری سطح و خطای تختی پایین، نرخ برداشت ماده بالایی نیز داشته باشد، بسیار مهم و ضروری است؛ بنابراین در این تحقیق علاوه‌بر بهینه‌سازی تک هدفه فرآیند لپن‌کاری، با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه ازدحام ذرات، به بهینه‌سازی هم‌زمان نرخ برداشت ماده، زبری سطح و تختی قطعات پرداخته شده و بهینه پارتو و جبهه پارتو مربوطه به دست آورده شده است.

الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه ازدحام ذرات (MOPSO) در سال 2004 توسط کوئلو و همکاران مطرح شد. این الگوریتم که تکامل یافته الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات ساده است، یکی از معروف‌ترین و پرکاربردترین الگوریتم‌های بهینه‌سازی چند هدفه است. در الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه ازدحام ذرات یک مفهوم به نام مخزن به الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات ساده اضافه شده است. اعضای مخزن بیانگر جبهه پارتو و شامل ذرات نامغلوب[3] هستند. مراحل اجرای این الگوریتم به شرح زیر است [33]:

1- ایجاد جمعیت اولیه به صورت تصادفی

2- جدا کردن اعضای نامغلوب و ذخیره کردن آن‌ها در مخزن

3- تقسیم‌بندی فضای هدف

4- انتخاب ذره رهبر که مشابه بهترین خاطره جمعی در الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات ساده است. برای این کار از بین تقسیمات ایجاد شده در مرحله قبل یکی از این خانه‌ها انتخاب می‌شود. هر قدر تعداد اعضای نامغلوب موجود در یک خانه کمتر باشد، شانس انتخاب آن خانه بیشتر است. این کار به تنوع

[1] MATLAB
[2] Particle Swarm Optimization
[3] Non-dominated

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-16]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.8.52.6]

و پراکندگی بهتر پاسخ‌ها کمک می‌کند. در نهایت از میان ذرات نامغلوب خانه انتخاب شده یکی به صورت تصادفی به عنوان ذره رهبر انتخاب می‌شود.

5- مشخص کردن موقعیت جدید هر ذره به کمک روابط (6,5)

6- به روزرسانی بهترین تجربه شخصی هر کدام از ذرات

برای این منظور اگر موقعیت جدید بهترین تجربه را مغلوب کند، آن‌گاه موقعیت جدید جای بهترین تجربه را می‌گیرد. اگر موقعیت جدید توسط بهترین تجربه مغلوب شود، هیچ اقدامی صورت نمی‌گیرد. اگر هیچ کدام از این موارد رخ ندهد یکی از دو موقعیت بالا به طور تصادفی به عنوان بهترین تجربه در نظر گرفته می‌شود.

7- اضافه شدن اعضای نامغلوب جمعیت کنونی به مخزن

8- حذف اعضای مغلوب مخزن

9- حذف اعضای بیش از ظرفیت مخزن

برای این کار از بین تقسیمات ایجاد شده در مرحله 3 یکی از این خانه‌ها انتخاب می‌شود. هر قدر تعداد اعضای نامغلوب موجود در یک خانه بیشتر باشد، شانس انتخاب آن خانه بیشتر است. این کار به تنوع و پراکندگی بهتر پاسخ‌ها کمک می‌کند. در نهایت از میان ذرات نامغلوب خانه انتخاب شده یکی به صورت تصادفی انتخاب و حذف می‌شود.

10- در صورت تحقق شرط پایان، توقف الگوریتم و در غیر این صورت بازگشت به مرحله 4

در این تحقیق برای بهینه‌سازی چندهدفه به روش ازدحام ذرات از کدهای نوشته شده در نرم‌افزار متلب استفاده شده است. بهینه پارتو و جبهه پارتو به دست آمده از نرم‌افزار متلب در جدول 4 آورده شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه ازدحام ذرات، ابزاری مفید و قدرتمند برای بهینه‌سازی هم‌زمان نرخ برداشت ماده، زبری سطح و خطای تختی قطعات لپن‌کاری شده است. با استفاده از این الگوریتم بهینه‌سازی می‌توان قطعاتی با زبری سطح و تختی مورد نیاز را با نرخ برداشت ماده بالا تولید کرد. در نتیجه با استفاده از این الگوریتم بهینه‌سازی علاوه‌بر ایجاد قطعاتی با کیفیت مطلوب، هزینه و زمان تولید نیز کاهش می‌یابد.

جدول 4 بهینه پارتو و جبهه پارتو

Table 4 Pareto optimal solutions and Pareto front

شماره	فشار لپن‌کاری (kPa)	اندازه ذرات ساینده (µm)	درصد وزنی ذرات ساینده (%wt)	نرخ برداشت ماده (nm/min)	زبری سطح (nm)	عدم تختی (nm)
1	10	16	19.1	289	52	1736
2	10.06	18.29	19.59	323	63	1755
3	11.45	16.31	19.27	378	66	1592
4	24.63	25.76	20.75	648	152	1005
5	15.79	16.57	20.35	574	98	1246
6	10.49	16.01	20.35	318	57	1683
7	23.01	16.07	20.78	588	114	938
8	12.59	16.09	20.51	435	74	1482
9	19.68	66.03	19.33	933	231	1439
10	12.11	16.1	20.46	411	71	1525
11	19.51	37.34	19.61	853	185	1256
12	17.62	23.1	20.64	703	134	1210
13	10	16	20.76	285	53	1732
14	17.7	28.68	19.98	766	154	1264
15	18.75	33.59	20.04	822	173	1256
16	10.99	16.58	20.47	356	64	1638
17	21.42	24.86	20.63	733	150	1069
18	17.14	44.38	19.54	863	194	1435
19	22.71	26.22	20.53	722	155	1047
20	13.78	17.08	20.76	503	88	1395
21	20	59.36	19.7	929	225	1386
22	18.85	54.96	19.77	920	217	1414
23	18.64	19.89	20.45	679	124	1125
24	14.83	20.17	19.73	594	108	1359
25	10.26	16.07	19.65	303	55	1706
26	17.89	48.97	19.29	892	205	1423
27	19.4	29.07	20.55	786	161	1184
28	11.79	16.03	19.18	394	68	1556
29	25	16	20.66	509	111	906

4- نتیجه‌گیری

در این تحقیق در فرآیند لپن‌کاری تخت یک‌طرفه فولاد 440c، تأثیر پارامترهای فشار لپن‌کاری، درصد وزنی ذرات ساینده در دوغاب لپن‌کاری و اندازه ذرات ساینده، بر نرخ برداشت ماده، زبری سطح و عدم تختی قطعات لپن‌کاری‌شده با استفاده از روش آزمایشگاهی بررسی شده است. از نتایج آزمایش‌های انجام شده نتایج زیر حاصل می‌شود.

1- در مقادیر کوچک فشار لپن‌کاری، با افزایش فشار، به تدریج مقادیر نرخ برداشت ماده و زبری سطح قطعات لپن‌کاری شده افزایش می‌یابد، ولی با عبور فشار لپن‌کاری از مقدار معینی (20 کیلوپاسکال)، مقادیر نرخ برداشت ماده و زبری سطح قطعات لپن‌کاری شده شروع به کاهش می‌کنند.

2- افزایش فشار لپن‌کاری سبب کاهش عدم تختی قطعات لپن‌کاری شده می‌شود.

3- در مقادیر کوچک درصد وزنی ذرات ساینده در دوغاب لپن‌کاری، با افزایش درصد وزنی ذرات ساینده در دوغاب لپن‌کاری، به تدریج مقادیر نرخ برداشت ماده افزایش و مقادیر زبری سطح و خطای تختی قطعات لپن‌کاری شده کاهش می‌یابد، ولی با عبور درصد وزنی ذرات ساینده در دوغاب لپن‌کاری از مقدار معینی (20%)، مقادیر نرخ برداشت ماده شروع به کاهش و مقادیر زبری سطح و خطای تختی قطعات لپن‌کاری شده شروع به افزایش می‌کنند.

4- در مقادیر کوچک اندازه ذرات ساینده، با افزایش اندازه ذرات ساینده، به تدریج نرخ برداشت ماده افزایش می‌یابد، ولی با عبور اندازه ذرات ساینده از مقدار معینی (63 میکرومتر)، نرخ برداشت ماده شروع به کاهش می‌کند.

5- با بزرگ‌تر شدن ذرات ساینده، زبری سطح قطعات لپن‌کاری شده افزایش می‌یابد.

6- بزرگ‌تر شدن ذرات ساینده سبب افزایش خطای تختی قطعات لپن‌کاری شده می‌شود.

در ادامه این تحقیق با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات تک‌هدفه به بهینه‌سازی این فرآیند لپن‌کاری پرداخته شده است. نتایج بهینه‌سازی تک هدفه نشان می‌دهند که بیشترین نرخ برداشت ماده در فشار لپن‌کاری 19.7 کیلوپاسکال، درصد وزنی ذرات ساینده در دوغاب لپن‌کاری 19.3% و اندازه ذرات ساینده 66 میکرومتر، کمترین زبری سطح قطعات لپن‌کاری شده در فشار لپن‌کاری 10 کیلوپاسکال، درصد وزنی ذرات ساینده در دوغاب لپن‌کاری 19.1% و اندازه ذرات ساینده 16 میکرومتر و کمترین خطای تختی قطعات لپن‌کاری شده در فشار لپن‌کاری 25 کیلوپاسکال، درصد وزنی ذرات ساینده در دوغاب لپن‌کاری 20.7% و اندازه ذرات ساینده 16 میکرومتر به دست می‌آید. در نهایت با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات چندهدفه به بهینه‌سازی هم‌زمان نرخ برداشت ماده، زبری سطح و عدم تختی قطعات لپن‌کاری شده پرداخته شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه ازدحام ذرات می‌توان قطعاتی با زبری سطح و تختی مورد نیاز را با نرخ برداشت ماده بالا تولید کرد. در نتیجه با استفاده از این روش علاوه‌بر ایجاد قطعاتی با کیفیت مطلوب، هزینه و زمان تولید نیز کاهش می‌یابد.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-16]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.8.52.6]

5- فهرست علایم

C	درصد وزنی ذرات ساینده در دوغاب لپن‌کاری (%wt)
c_1	پارامتر شناختی
c_2	پارامتر اجتماعی
d	قطر قطعه‌کار (cm)
d_{pk}	خروجی مطلوب برای نرون k-ام
E_p	خطای آموزش شبکه عصبی
F	خطای تختی (nm)
F_e	خطای تختی به دست آمده از آزمایش‌ها (nm)
F_n	خطای تختی پیش‌بینی شده به وسیله شبکه عصبی مصنوعی (nm)
G	بهترین موقعیتی که مجموعه ذرات به آن رسیده‌اند
K	تعداد نرون‌های شبکه عصبی مصنوعی
P	تعداد داده‌های آزمایشی
MRR	نرخ برداشت ماده (nm/min)
MRR_e	نرخ برداشت ماده به دست آمده از آزمایش‌ها (nm/min)
MRR_n	نرخ برداشت ماده پیش‌بینی شده به وسیله شبکه عصبی مصنوعی (nm/min)
out_j	خروجی نرون j-ام
p	بهترین موقعیتی که یک ذره به آن رسیده است
o_{pk}	خروجی محاسبه شده برای نرون k-ام
r	عددی تصادفی بین صفر و یک
Ra	میانگین زبری سطح (nm)
Ra_e	میانگین زبری سطح به دست آمده از آزمایش‌ها (nm)
Ra_n	میانگین زبری سطح پیش‌بینی شده به وسیله شبکه عصبی مصنوعی (nm)
S	میانگین اندازه ذرات ساینده (µm)
V	سرعت ذره
X	موقعیت ذره
W	اینرسی وزنی
w_{ij}	وزن اتصال بین نرون‌های i و j

علایم یونانی

μ	نرخ آموزش یا همگرایی در شبکه عصبی
Δh	اختلاف ارتفاع قطعات پیش و پس از فرآیند لپن‌کاری (nm)
Δm	اختلاف جرم قطعات پیش و پس از فرآیند لپن‌کاری (mg)
Δt	زمان لپن‌کاری (min)
ρ	چگالی ($\mathrm{gcm^{-3}}$)

بالانویس‌ها

t	شماره تکرار

زیرنویس‌ها

i	شماره ذره

6- تقدیر و تشکر

نویسندگان مقاله بر خود لازم می‌دانند از زحمات مهندس ظهیر کریمی و تمام کارکنان صنایع هواپیمایی ایران (صها) که در انجام این تحقیق از هیچ کوششی فروگذاری نکردند، تشکر نموده و مراتب سپاس و قدردانی خود را از ایشان اعلام دارند.

7- مراجع

[1] I. D. Marinescu, E. Uhlmann, T. K. Doi, *Handbook of Lapping and Polishing*, pp. 9-81, London: Taylor & Francis, 2007.

[2] Z. Dimkovski, F. Cabanettes, H. Löfgren, C. Anderberg, R. Ohlsson, B. G. Rosén, Optimization of cylinder liner surface finish by slide honing, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B, *Engineering Manufacture*, Vol. 226, No. 4, pp. 575-584, 2012.

[3] X. Le, M. L. Peterson, Material removal rate in flat lapping, *Manufacturing Processes*, Vol. 1, No. 1, pp. 71-78, 1999.

[4] C. Chung, C. S. Korach, I. Kao, Experimental study and modeling of lapping using abrasive grits with mixed sizes, *Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 133, No. 3, pp. 1-8, 2011.

[5] J. X. Su, L. X. Liu, Z. Q. Zhang, Z. X. Liu, Influence of lapping parameters on 6H-SiC Crystal Substrate (0001) C surface based on diamond particle, *Advanced Materials Research*, Vol. 565, pp. 237-242, 2012.

[6] A. Gullu, H. Calimli, The investigation of the effects of machining parameters on surface roughness in lapping, *Gazi University Journal of Science*, Vol. 18, No. 2, pp. 229-237, 2005.

[7] Y. Zhang, I. D. Marinescu, R. VandenBoom, Optimisation of D2 steel lapping with a polymer plate, *Abrasive Technology*, Vol. 3, No. 3, pp. 203-214, 2010.

[8] F. Jiang, J. H. Xiang, Z. W. Liang, C. L. Zhang, The optimization of lapping process parameters based on extension theory, *Key Engineering Materials*, Vol. 531, pp. 262-265, 2013.

[9] X. Wang, C. D. Lu, T. Hong, Applying TRIZ for optimization formulation of sapphire precision lapping, *Advanced Materials Research*, Vol. 102, pp. 564-567, 2010.

[10] J. L. Yuan, B. H. Lv, Z. Z. Zhou, B. C. Tao, Parameters optimization on the lapping process for advanced ceramics by applying Taguchi method, *Materials Science Forum*, Vol. 532, pp. 488-491, 2006.

[11] P. R. Parate, R. B. Yarasu, Application of Taguchi and ANOVA in optimization of process parameters of lapping operation for cast iron, *Mechanical Engineering and Sciences*, Vol. 4, pp. 479-487, 2013.

[12] P. R. Parate, R. B. Yarasu, Optimization of process parameters of lapping operation by Taguchi approach for surface roughness of SS 321, *Mechanical Engineering and Technology*, Vol. 4, No. 4, pp. 15-21, 2013.

[13] L. S. Deshpande, S. Raman, O. Sunanta, C. Agbaraji, Observations in the flat lapping of stainless steel and bronze, *Wear*, Vol. 265, No. 1, pp. 105-116, 2008.

[14] Y. Ahn, S. S. Park, Surface roughness and material removal rate of lapping process on ceramics, *Mechanical Science and Technology*, Vol. 11, No. 5, pp. 494-504, 1997.

[15] J. D. B. De Mello, P. L. Guzzo, Lapping, polishing and ultrasonic machining of quartz mono crystals, *International Journal of Surface Science and Engineering*, Vol. 2, No. 6, pp. 457-479, 2008.

[16] J. M. Sowers, *Examination of the Material Removal Rate in Lapping Polycrystalline Diamond Compacts*, PhD Thesis, A&M University, Texas, 2011.

[17] J. C. Lambropoulos, S. D. Jacobs, B. E. Gillman, H. J. Stevens, Deterministic microgrinding, lapping, and polishing of glass–ceramics, *the American Ceramic Society*, Vol. 88, No. 5, pp. 1127-1132, 2005.

[18] G. Ascanio, C. Cava, R. Chicurel, R. Reséndizc, Improved single-face lapping by using an air bearing supported lap, *Applied Research and Technology*, Vol. 5, No. 3, pp. 187-195, 2007.

[19] T. Iyama, I. Tanabe, A. L. Moe, K. Yoshi, F. Nasu, Development of intelligent lapping system estimation of finished surface roughness and its improvement speed, *Machine Engineering*, Vol. 10, pp. 5-12, 2010.

[20] J. Molenda, A. Barylski, Al_2O_3 sealing elements lapping, *Powertrain and Transport*, Vol. 19, pp. 311-318, 2012.

[21] X. Zhu, C. Chung, C. S. Korach, I. Kao, Experimental study and modeling of the effect of mixed size abrasive grits on surface topology and removal rate in wafer lapping, *Wear*, Vol. 305, No. 1, pp. 14-22, 2013.

[22] J. L. Yuan, P. Zhao, J. Ruan, Z. X. Cao, W. H. Zhao, T. Xing, Lapping and polishing process for obtaining super-smooth surfaces of quartz crystal, *Materials Processing Technology*, Vol. 138, No. 1, pp. 116-119, 2003.

[23] S. M. Fulmali, R. B. Chadge, Need of lapping machine for valve component: a case study, *Modern Engineering Research*, Vol. 2, No. 6, pp. 4609-4612, 2012.

[24] Z. Qiu, F. Z. Fang, L. Ding, Q. Zhao, Investigation of diamond cutting tool lapping system based on on-machine image measurement, *Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 56, No. 1, pp. 79–86, 2011.

[25] R. Sreenivasulu, Optimization of burr size, surface roughness and circularity deviation during drilling of Al 6061 using Taguchi design method and artificial neural network, *Management & Production*, Vol. 6, No. 1 pp. 93-108, 2015.

[26] F. Djavanroodi, Artificial neural network modeling of surface roughness in magnetic abrasive finishing process, *Applied Sciences, Engineering and Technology*, Vol. 6, No. 11, pp. 1976-1983, 2013.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-16]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.8.52.6]

method, *Materials Processing Technology*, Vol. 202, No. 1, pp. 574-582, 2008.

[31] N. Tosun, L. Ozler, A study of tool life in hot machining using artificial neural networks and regression analysis method, *Materials Processing Technology*, Vol. 124, No. 1, pp. 99-104, 2002.

[32] J. Kennedy, R. C. Eberhart, Particle swarm optimization, *Proceedings of International Conference on Neural Networks*, Perth, Australia: IEEE Press, pp. 1942-1948, 1995.

[33] H. R. Baghaee, M. Mirsalim, G. B. Gharehpetian, Multi-objective optimal power management and sizing of a reliable wind/PV microgrid with hydrogen energy storage using MOPSO, *Intelligent & Fuzzy Systems*, Vol. 32, No. 3, pp. 1753-1773, 2017.

[27] N. Mohanasundararaju, R. Sivasubramanian, R. Gnanaguru, N. Alagumurthy, A neural network and fuzzy-based methodology for the prediction of work roll surface roughness in a grinding process, *Computational Methods in Engineering Science and Mechanics*, Vol. 9, No. 2, pp. 103-110, 2008.

[28] A. Yahya, T. Andromeda, A. Baharom, A. A. Rahim, N. Mahmud, Material removal rate prediction of electrical discharge machining process using artificial neural network, *Mechanics Engineering and Automation*, Vol. 1, No. 4, pp. 298-302, 2012.

[29] R. Azouzi, M. Guillot, On-line prediction of surface finish and dimensional deviations in turning using neural network based sensor fusion, *Machine Tools and Manufacture*, Vol. 37, No. 9, pp. 1201–1217, 1997.

[30] U. Caydas, A. Hascalik, A study on surface roughness in abrasive water jet machining process using artificial neural networks and regression analysis

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-16]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.8.52.6]