



تأثیر عملیات حرارتی پیرسختی H900 و H1150 بر قابلیت ماشین کاری فولاد زنگ‌نزن 15-5PH

مصطفی الیاسی¹، عادل مقصودپور²، حمید سلیمانی مهر^{2*}، علی اخوان فرید³

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

2- استادیار، مهندسی مکانیک، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

3- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، مواد و ساخت، دانشگاه نائینگهام، سمنیه، مالزی

* تهران، صندوق پستی 775-14515. soleimanimehr@srbiau.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

فولاد 15-5 PH فولادی زنگ‌نزن با زمینه مارتنزیتی است که با فرآیند پیرسختی، سختی و استحکام آن افزایش می‌یابد. سختی بالا و ضریب هدایت حرارتی پایین این فولاد سبب سایش شدید ابزار و بالا بودن نیروی تراش و افزایش زبری سطح قطعه کار می‌شوند. روش متداول در تولید قطعات از این جنس، ماشین کاری در حالت محلول جامد (انحلال)¹ با حداکثر سختی 35HRC می‌باشد. سپس به منظور افزایش استحکام از عملیات سخت کاری استفاده می‌گردد. در این تحقیق به منظور تحلیل تأثیر عملیات حرارتی پیرسختی بر قابلیت ماشین کاری این فولاد، دو عملیات حرارتی متداول H900 و H1150 بر روی فولاد مذکور انجام شد و نتایج تراش کاری در هر عملیات انجام شده با نتایج تراش کاری در حالت محلول جامد مقایسه گردید. نیروی تراش در حین فرآیند به کمک دستگاه دینامومتر و زبری سطح قطعات پس از تراش کاری اندازه‌گیری شدند. نتایج نشان داد بهترین شرایط از نقطه نظر کاهش نیروی تراش و زبری سطح در حالت H1150 حاصل می‌شود. مقایسه بین تراش کاری در حالات H900 و محلول جامد نیز نشان می‌دهد اگرچه میانگین نیروی تراش در وضعیت H900 تقریباً 22 درصد بیشتر از حالت محلول جامد می‌باشد، اما متوسط زبری سطح، در حالت H900، 17 درصد بیشتر از حالت محلول جامد است. به علاوه انجام تراش کاری در حالت H900 سبب می‌شود که عیوبی مانند «لغزش جانبی» سطح قطعه کار و «شخم زنی» توسط ابزار، در مقایسه با تراش کاری در حالت محلول جامد کاهش یابد.

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 28 آبان 1400
داوری اولیه: 19 آذر 1400
پذیرش: 25 بهمن 1400

کلیدواژگان:

فولاد 15-5 PH
پیرسخت کردن
نیروی تراش
زبری سطح

The effect of H900 and H1150 heat treatment on the machinability of 15-5 PH stainless steel

Mostafa Elyasi¹, Adel Maghsoudpour¹, Hamid Soleimanimehr^{1*}, Ali Akhavan Farid²

1- Department of mechanical Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

2- Department of Mechanical, Materials and Manufacturing Engineering, University of Nottingham Malaysia, Semenyih, Malaysia

* P.O.B. 14515-775 Tehran, Iran, soleimanimehr@srbiau.ac.ir

Article Information

Original Research Paper
Received: 19 November 2021
First Decision: 10 December 2021
Accepted: 14 February 2022

Keywords:

15- 5PH Steel
Age hardening
Cutting force
Surface roughness

Abstract

15-5 PH steel is a stainless steel with a martensitic base that increases in hardness, hardness and strength with the aging process. The high hardness and low thermal conductivity of this steel cause severe wear of the tool and high cutting force and increase the roughness of the workpiece surface. The common method in the production of parts of this material is machining in solution (dissolution) with a maximum hardness of 35HRC. Then, in order to increase the strength, hardening operations are used. In this paper, in order to analyze the effect of hardening heat treatment on the machinability of this steel, two very common heat treatments H900 and H1150 were performed on the mentioned steel and the turning results in each operation were compared with the turning results in solution mode. Lathe force was measured during the process using a dynamometer and surface roughness of the parts after turning. The results showed that the best conditions in terms of reducing lathe force and surface roughness are obtained in H1150 mode. A comparison between turning in the H900 and solution modes also shows that, although the average turning force in the H900 mode is approximately 22% higher than the solution mode. But the average surface roughness, in the H900 mode, is 17% higher than the solution mode. In addition, turning in the H900 mode reduces defects such as lateral slippage of the workpiece material and plowing by the tool compared to lathe turning.

¹ Solution-Annealed or Solution

Please cite this article using:

M. Elyasi, A. Maghsoudpour, H. Soleimanimehr, A. Akhavan Farid, The effect of H900 and H1150 heat treatment on the machinability of 15-5 PH stainless steel, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 8, No. 12, pp. 11- 20, 2022 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

1- مقدمه

تراش‌کاری فولاد AISI4340 با سختی 47 راکول C مورد بررسی قرار دادند. آنها دریافتند که یک ارتباط قوی بین شکل براده و زبری سطح قطعه کار با نمودار نیروی تراش بر حسب زمان و به ویژه نوسانات نیروی تراش وجود دارد. لیو و همکارانش [5] نیروی تراش و زبری سطح قطعه را در فرآیند فرزکاری فولاد زنگ‌نزن رسوب سخت شده‌ی PH 4-17 مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان می‌داد که پارامترهای ماشین‌کاری بر زبری سطح قطعه و در نتیجه بر عمر خستگی قطعات تولید شده تأثیر بسزایی دارند. چین و تسای [6] با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی شرایط بهینه تراش‌کاری را جهت کاهش سایش ابزار در ماشین‌کاری فولاد PH 4-17 به دست آوردند. تحقیقات دیگری نیز در خصوص فولاد رسوب سخت PH 4-17 انجام شده و در آنها تأثیر متغیرهای تراش‌کاری بر سایش سطح آزاد ابزار، صافی سطح قطعه نهایی و نیروی ماشین‌کاری بررسی شده است [7-9]. در خصوص سایر مواد سخت-برش مانند سوپرآلیاژهای پایه-نیکل [10، 11] و آلیاژهای تیتانیوم [12-14] نیز تحقیقات جامعی در حوزه شبیه‌سازی نیروی تراش، آزمایش و اندازه‌گیری صافی سطح و ارتباط آن با نوسانات نیروی تراش انجام شده است.

جونیور و همکارانش [15] تأثیر نوع روانکار و روانکاری کمینه را بر سایش ابزار در فرآیند فرزکاری این فولاد با سختی 31 راکول C مورد بررسی قرار دادند. ستین و کیواک [16] با انجام آزمایش و استفاده از روش تاگوچی پارامترهای بهینه تراش‌کاری را با هدف کمینه کردن زبری سطح و نیروی تراش به دست آوردند. در تحقیق آنها سختی این فولاد 42 راکول C بود. پالانسمی و سنتیل [17] تأثیر سرعت برشی را در محدوده‌ی 100 تا 200 متر بر دقیقه بر روی زبری سطح قطعه کاری از این فولاد با سختی 480 ویکرز و عملیات H900 مورد بررسی قرار دادند. به دلیل سختی بالای این فولاد و به جهت افزایش قابلیت ماشین‌کاری گانتا و چاکرادر [18] از فرآیند تراش‌کاری داغ برای ماشین‌کاری این فولاد استفاده کردند. آنها با انجام آزمون‌های آزمایشگاهی یک مدل برای یافتن مقادیر بهینه سرعت برشی جهت کاهش زبری سطح قطعه در تراش‌کاری داغ این فولاد ارائه دادند. خنا و همکارانش [19] نیز تأثیر روانکاری متداول، روانکاری کمینه² و خنک‌کاری برودتی³ ابزار را بر نیروهای ماشین‌کاری و زبری سطح این فولاد پس از تراش‌کاری بررسی کردند. نتایج آزمایشگاهی نشان می‌داد که در سرعت

فولاد 5-5 PH یک فولاد زنگ‌نزن با زمینه مارتنزیتی است که قابلیت سخت شدن به روش پیرسختی را داراست. بسته به مقدار استحکام، سختی و خواص مورد نیاز، عملیات حرارتی پیرسختی در دماهای مختلف بر روی این فولاد انجام می‌شود. کمترین سختی این فولاد 31 راکول C می‌باشد که در حالت H1150 و با حرارت دادن در دمای 621 درجه سانتی‌گراد به مدت 4 ساعت حاصل می‌شود. بیشترین سختی این فولاد نیز در حالت H900 در محدوده 40 تا 47 راکول C می‌باشد که با حرارت دادن آن به مدت یک ساعت در دمای 482 درجه سانتی‌گراد حاصل می‌شود. این فولاد کاربرد زیادی در صنایع هوافضا، صنایع هسته‌ای، پتروشیمی، فرآوری مواد غذایی، صنایع تولید کاغذ، صنایع فلزکاری و همچنین ساخت چرخ‌دنده‌ها و پمپ‌ها دارد [1]. بخش عمده‌ای از قطعاتی که از این فولاد در صنایع مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند، با روش ماشین‌کاری تولید می‌شوند. وجود رسوب‌های ریز و سخت مس و ذرات سخت کارباید نظیر کارباید نایوبیوم که در زمینه مارتنزیتی این فولاد قرار گرفته‌اند [2]، سبب سایش شدید ابزار و افزایش زبری سطح قطعه نهایی می‌شوند. افزون بر این، ضریب هدایت حرارتی پایین این فولاد باعث تجمع حرارت در فصل مشترک ابزار/ براده می‌شود که به نوبه خود سبب افزایش دمای نوک ابزار می‌شود. این دو عامل سبب شده که این فولاد جزء مواد سخت-برش¹ به شمار آید. پژوهش‌گران حوزه مواد جهت رفع نیاز به مواد جدید با استحکام بالا و مقاوم در برابر حرارت و خوردگی در صنایع هوافضا، موشکی و هسته‌ای با چالش‌های فراوانی روبرو هستند. این مواد از سوپرآلیاژهای پایه نیکل، فولاد های آلیاژی، تنگستن، مولیبدن، تیتانیوم و برخی آلومینیوم‌های سخت شده [3] فرآوری می‌شوند. فولادهای زنگ‌نزن دسته‌ای از فلزات پرکاربرد در اغلب حوزه‌های صنعتی هستند که مقاومت به خوردگی بسیار خوبی دارند. بالاخص اگر استحکام بالا نیز مدنظر باشد از فولادهای زنگ‌نزن مارتنزیتی یا رسوب سخت شونده مثل فولاد 5-5 PH استفاده می‌شود. ابتدایی‌ترین چالش در ساخت قطعاتی از این فولاد، رفتار آن هنگام ماشین‌کاری و مشکلات متعددی مانند سایش ابزار و کیفیت سطح نامطلوب قطعات آنها می‌باشد. تحقیقات گسترده‌ای در خصوص زبری سطح قطعه کار و نیروی وارده به ابزار در ماشین‌کاری فولادهای سخت انجام شده است. بلهدادی و همکارانش [4] دامنه نوسانات نیروی برشی، فرکانس این نوسانات و زبری سطح قطعه نهایی را در فرآیند

² Minimum quantity of lubrication (MQL)³ Cryogenic¹ Difficult-to-cut

فرآیند تراش کاری خشک (بدون استفاده از سیال برشی) در سرعت‌ها و نرخ پیشروی‌های مختلف بر روی نمونه‌ها انجام شد (شکل 1). در انتخاب جنس ابزار و پوشش آن، از موارد پیشنهادی توسط یکی از سازندگان معتبر ابزارهای برشی یعنی شرکت «سندویک» استفاده شد. فولاد PH 5-15 در دسته‌بندی شرکت «سندویک» جزء فولادهای زنگ نزن ISO M با شماره 05.12 قرار گرفته است. گریدهای GC1115 و GC1125 از ابزارهای شرکت «سندویک» برای تراش کاری فولادهای زنگ نزن پیر-سخت شونده مناسب هستند.

در این تحقیق از ابزار شرکت «سندویک» با گرید GC1115 برای تراش کاری استفاده شد. جنس ابزار، تنگستن کارباید حاوی 6% وزنی کبالت است. تراش کاری برای حالت پرداخت¹ انجام شد، لذا از ابزار با هندسه CNMG120404 استفاده شده است. عمق برش 0/4 میلی‌متر، شعاع نوک ابزار 0/4 میلی‌متر و شعاع لبه برنده اصلی 0/02 میلی‌متر می‌باشد. برای انجام تراش کاری از دستگاه تبریز ساخت کشور ایران با حداکثر سرعت دورانی 1400 دور بر دقیقه استفاده شد. برای تحلیل داده‌های خروجی نظیر نیروی تراش و زبری سطح از آنالیز واریانس (ANOVA) در نرم‌افزار مینی‌تب 17 استفاده شد.

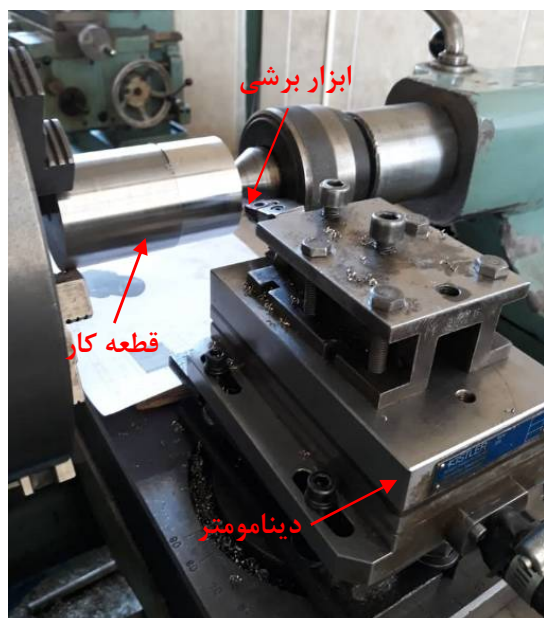


Fig. 1 Experimental setup

شکل 1 چیدمان انجام آزمایش‌ها

طبق توصیه شرکت سازنده ابزار (سندویک)، برای فولادهای پیرسخت شونده با سختی 33 راکول C، محدوده سرعت برشی

تراش کاری بالا (199 متر بر دقیقه) خنک کاری برودتی ابزار منجر به کاهش نیروی تراش به میزان حداقل 29 درصد نسبت به روش تراش کاری متداول با سیال برشی شده است. کلاویه و همکارانش [20] با تحلیل عددی، تأثیر سایش ابزار را بر میزان تنش پسماند و دمای سطح تراشیده قطعه کار بررسی کردند. برای برخی از قطعات صنعتی که استحکام و سختی نهایی با تمپر H900 (47 راکول C) مورد نظر طراح است، به دلیل حصول دقت ابعادی بالا، لازم است تا ماشین کاری بر روی این فولاد در حالت سخت شده انجام شود. چراکه انجام ماشین کاری در حالت نرم (حالت محلول جامد) و سپس عملیات حرارتی پیرسختی H900 می‌تواند سبب تابیدگی قطعه کار و از بین رفتن دقت ابعادی شود و لازم است که یک فرآیند تکمیلی مانند سنگ زنی و بالانس بر روی قطعه کار انجام شود. لذا در برخی موارد لازم است تا فرآیند ماشین کاری از ابتدا در حالت سخت شده بر روی این فولاد انجام شود. به همین دلیل در این تحقیق تراش کاری در حالت خشک بر روی فولاد PH 5-15 در حالت محلول جامد، پیرسخت شده با تمپر H900 و پیرسخت شده با تمپر H1150، انجام شد و مقادیر نیروی تراش و زبری سطح قطعه کار به عنوان دو مؤلفه قابلیت ماشین کاری اندازه‌گیری شدند. از آنجا که روش مرسوم فعلی ماشین کاری این فولاد، انجام تراش کاری در حالت محلول جامد می‌باشد، لذا نتایج حاصل از تراش کاری این فولاد با تمپرها H900 و H1150 با تراش کاری این فولاد در حالت محلول جامد مقایسه شد و از این طریق تأثیر عملیات حرارتی پیرسختی بر قابلیت ماشین کاری این فولاد مورد تحلیل واقع شده است.

2- مشخصات تجهیزات و روش انجام آزمایش‌ها

در مقاله حاضر برای انجام آزمایش‌ها، ابتدا مواد اولیه جهت تأیید ترکیب شیمیایی به روش «شیمی تر» مورد آزمایش قرار گرفت و نتایج مطابق جدول 1 بدست آمد. نتایج حاصل از آزمایش انطباق بسیار خوبی با ترکیب استاندارد این فولاد دارد.

جدول 1 نتایج آزمایش ترکیب شیمیایی فولاد 5-SPH

Table 1 Test results of chemical composition of steel 15-5PH

عنصر	درصد وزنی	عنصر	درصد وزنی
Fe	Bal	Ni	3/5 - 5/5
C	0/07	Cu	2/5 - 4/5
Max.		Si	1/0
Cr	14 - 15/5	Max.	
Mn Max.	1/0	P	0/04
S	0/03	Max.	
Max.		Nb+Ta	0/15 - 0/45

¹ Finishing

نمونه‌ها مطابق با جدول 2 و شکل 1 روتراشی شدند. در هر مرحله تراش کاری نیروی تراش با دستگاه دینامومتر اندازه‌گیری و ثبت شد. سپس زبری سطح نمونه‌های تراش کاری شده با دستگاه زبری‌سنج HOMMELWERKE مدل Turbo Roughness V3.34 اندازه‌گیری شد. برای مشاهده سطح قطعه کار از میکروسکوپ الکترونی FEI NOVA NanoSEM450 استفاده شد.



Fig. 3 Tensile tests

شکل 3 آزمون کشش

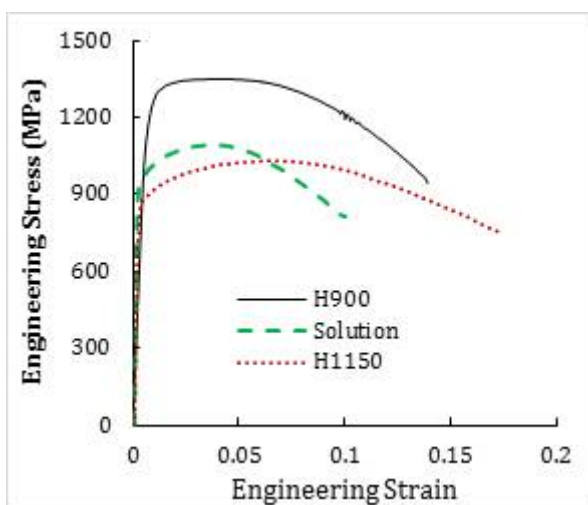


Fig. 4 Tensile tests results

شکل 4- نتایج آزمون کشش

3- تجزیه و تحلیل نتایج آزمایش‌ها

در این قسمت نتایج حاصل از انجام تراش کاری فولاد 5-SPH در شرایط مختلف ارائه می‌شود. مقدار نیروی تراش و زبری سطح در هر آزمایش به تفکیک درج شده است. در شکل 5- الف نحوه رسم نمودار نیروهای ماشین کاری بر حسب زمان توسط دینامومتر و لپ-تاپ برای یک حالت تراش کاری نشان داده شده است. در شکل 5- ب نمودار نیروی تراش در ماشین کاری فولاد

با استفاده از سیال برشی، 120 تا 185 متر بر دقیقه توصیه شده است. با این حال همان گونه که گفته شد در این تحقیق، فولاد 5-SPH در حالت پیرسخت شده با سختی 44 راکول C و بدون سیال برشی نیز تراش کاری می‌شود، لذا مقادیر سرعت برشی کمتر از مقدار توصیه شده توسط شرکت سازنده ابزار و در محدوده 62 تا 123 متر بر دقیقه انتخاب شدند.

مطابق جدول 2 در این تحقیق سه سطح از سرعت برشی در نظر گرفته شد. آزمایش‌ها در سه مقدار نرخ پیشروی 0/08، 0/14 و 0/2 و بصورت فول فاکتوریل انجام شد. برای انجام ماشین کاری ابتدا نمونه‌ها به سه گروه تقسیم شدند، سپس کُدگذاری قطعات متناسب با شرایط آزمون جهت ردیابی قطعات صورت پذیرفت و در هر گروه یک نمونه شاهد نیز قرارداد شد. مواد اولیه در شرایط محلول جامد (Solution) تهیه شد و به کمک یک کوره المنتی سیکل‌های عملیات حرارتی پیرسختی H900 و H1150 به ترتیب در دمای 482 و 621 درجه سانتی‌گراد مطابق نمودار شکل 2 روی مواد اولیه انجام شد.

پس از انجام عملیات حرارتی همه قطعات، بر روی نمونه‌های شاهد، آزمون‌های سختی‌سنجی و کشش به منظور استخراج خواص مکانیکی این فولاد انجام شد. آزمون کشش با استفاده از دستگاه INSTRON مدل 8052 مطابق شکل 3 انجام شد و نتایج آن در شکل 4 درج شده است.

جدول 2 مؤلفه‌های فرآیند تراش کاری

Table 2 Turning parameters

ردیف	عملیات حرارتی	سرعت برشی Vc-m/min	پیشروی f-mm/rev
1	Solution	62	0/08
2	H900	99	0/14
3	H1150	123	0/2

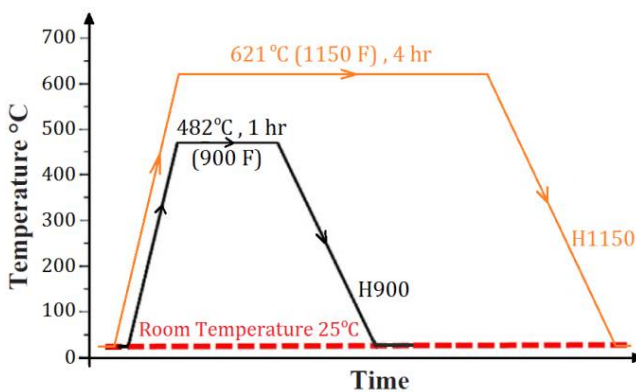


Fig. 2 Heat treatment graph

شکل 2 نمودار عملیات حرارتی

31/5% بیشتر است. بالا بودن نیروی تراش در فولادهای زنگ نزن پیرسخت شونده مانند فولاد PH 17-4 (AISI630) با تمپر H900 سبب افزایش سایش خراشان در سطح آزاد ابزار می شود [21، 22] و سبب می شود که عمر ابزار کوتاه تر شود.

استفاده از یک روش آماری می تواند منجر به درک بهتری از تأثیر متغیرهای ورودی مانند نوع عملیات حرارتی بر یک خروجی مشخص مانند نیروی تراش گردد. بنابراین برای مشاهده تأثیر مجزای نوع عملیات حرارتی، سرعت برشی و پیشروی بر روی میانگین نیروی تراش، از آنالیز واریانس استفاده شد و با استفاده از آن، نمودار اثرات اصلی در شکل 7 رسم شده است. با افزایش پیشروی، مقدار میانگین نیروی تراش به شدت افزایش می یابد. با افزایش سرعت برشی از 62 به 123 متر بر دقیقه مقدار میانگین نیروی تراش کاهش می یابد. میانگین نیروی لازم برای تراش کاری این فولاد در حالت محلول جامد تقریباً حالت H1150 برابر است، درحالی که مقدار میانگین نیروی لازم برای تراش کاری در وضعیت H900 تقریباً 22 درصد بیشتر از حالت محلول جامد و H1150 می باشد.

در حالت H900 با سرعت 62 متر بر دقیقه و پیشروی 0/08 میلی متر بر دور رسم شده است. همان گونه که از شکل 5-ب پیداست نمودار نیروی تراش نوسانی است، بنابراین در نمودارهای قسمت بعد مقدار متوسط نیروی تراش رسم شده است. برای اندازه گیری زبری سطح، در هر مقطع سه مرتبه با دستگاه زبری سنج اندازه گیری انجام شد و مقدار میانگین آن به همراه انحراف استاندارد در نمودارها رسم شد. سپس با استفاده از آنالیز واریانس (ANOVA)، تأثیر عملیات حرارتی پیرسختی بر قابلیت ماشین کاری این فولاد (نیروی تراش و زبری سطح قطعه کار) بررسی می شود. لازم به توضیح است در تمام موارد مقایسه با حالت انحلال صورت گرفته است.

3-1- تأثیر عملیات حرارتی، سرعت و پیشروی بر نیروی تراش
در شکل های 6-الف، 6-ب و 6-ج مقدار نیروی تراش بر حسب سرعت برشی برای پیشروی های مختلف رسم شده است. با استفاده از مقادیر نمودارهای شکل 6 مشاهده می شود که ماکزیمم نیروی تراش در تراش کاری این فولاد در حالت H900 از تراش کاری در حالات محلول جامد و H1150 به ترتیب 33% و

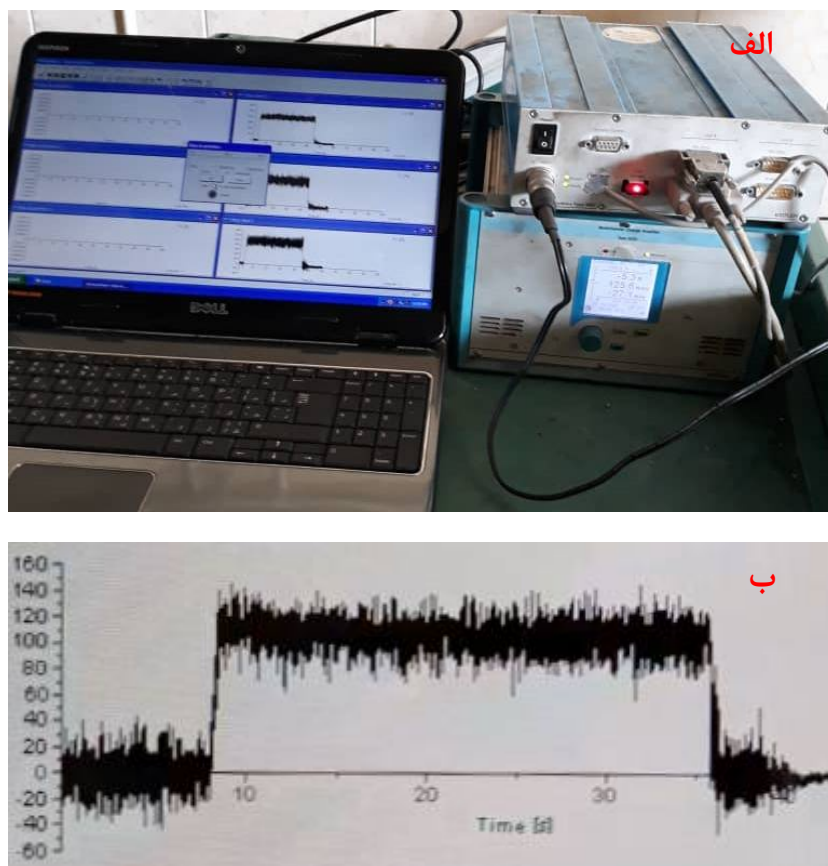


Fig. 5 a) Machining forces versus time. b) Cutting force for H900 condition at a speed of 62 m/min and a feed of 0.08 mm/rev

شکل 5-الف) نمودار نیروهای ماشین کاری بر حسب زمان. ب) نیروی تراش در حالت H900 با سرعت 62 m/min و پیشروی 0.08 mm/rev

مقدار احتمال هستند. اگر P Value برای یک پارامتر کمتر از 0/05 باشد نشان دهنده آن است که آن پارامتر بر نیروی تراش تأثیرگذار است. مشارکت پارامترهای حالت عملیات حرارتی فولاد، سرعت برشی و پیشروی در نیروی تراش به ترتیب 8/39%، 4/33% و 84/32% می باشد. ضریب رگرسیون منطبق شده یا R^2_{adj} برابر 96/15% است که نشان می دهد بیش از 96 درصد داده ها توسط مدل پوشش داده شده اند.

جدول 3 نتایج آنالیز واریانس برای نیروی تراش (، $S=9.927$ ، $R^2=97.04\%$ ، $R^2_{adj}=96.15\%$)

Source	DF	Seq. SS	Adj. MS	P Value	Contribution
Condition	2	5586	2793/0	0/000	8/39%
V_c	2	2879	1439/6	0/000	4/33%
f	2	56123	28061/5	0/000	84/32%
Error	20	1971	98/6	...	2/96%
Total	26	66559	100/00%

2-3- تأثیر عملیات حرارتی بر زبری سطح

در شکل 8- الف، ب و 8- ج زبری سطح بر حسب سرعت برشی برای پیشروی های مختلف رسم شده است. در این شکل ها مقدار میانگین به همراه یک انحراف استاندارد نشان داده شده اند. با توجه به این شکل، در پیشروی 0/08 میلی متر بر دور کمترین زبری در تراش کاری با حالت H1150 و بیشترین زبری در حالت محلول جامد حاصل شده است. در حالی که در پیشروی های 0/14 و 0/20 میلی متر بر دور، کمترین زبری سطح در شرایط H900 حاصل می شود.

در شکل 9 نمودار اثرات اصلی برای زبری سطح قطعه کار پس از تراش کاری نشان داده است. مشاهده می شود که با افزایش پیشروی از 0/08 به 0/20 میلی متر بر دور، متوسط زبری سطح از حدود 0/8 میکرومتر به 2/4 میکرومتر افزایش می یابد. با افزایش سرعت برشی از 62 به 123 متر بر دقیقه مقدار متوسط زبری سطح قطعه کار تقریباً 10 درصد کاهش می یابد. کمترین زبری سطح در حالت H900 حاصل شده است و بیشترین زبری سطح در تراش کاری این فولاد در حالت محلول جامد ایجاد شده است. بطوریکه متوسط زبری سطح در حالت محلول جامد 17 درصد بیشتر از حالت H900 است.

در شکل 10 پروفیل زبری سطح سه قطعه که با سرعت 62 متر بر دقیقه، پیشروی 0/14 میلی متر بر دور و با عمق برش 0/4 میلی متر در حالات مختلف عملیات حرارتی تراش کاری شده اند،

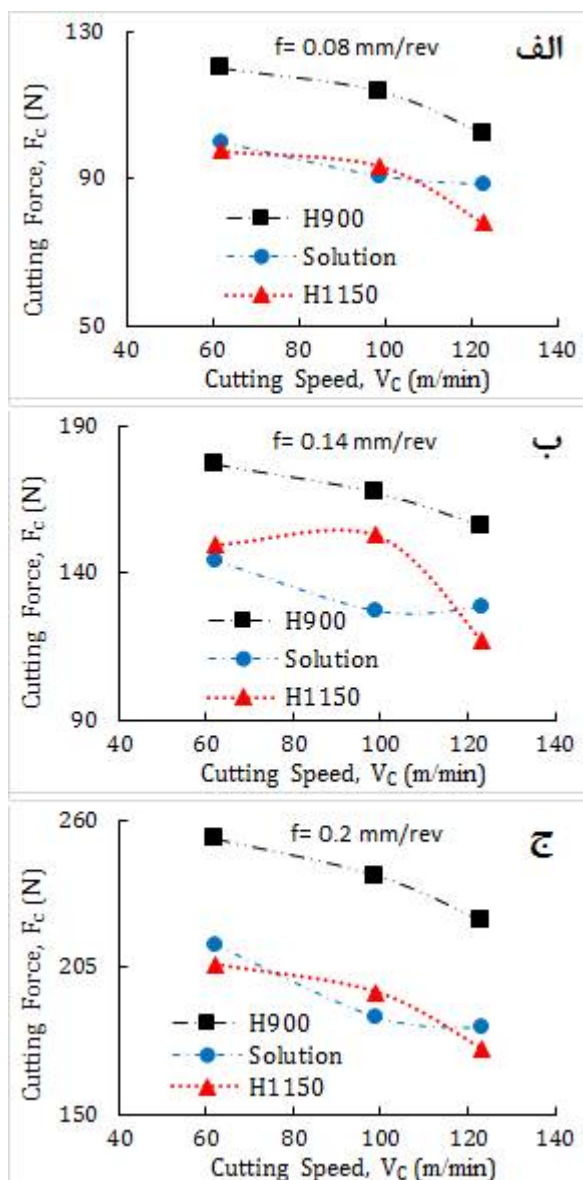


Fig. 6 The effect of feed rate and cutting speed on cutting force

شکل 6 تأثیر پیشروی و سرعت برشی بر نیروی تراش

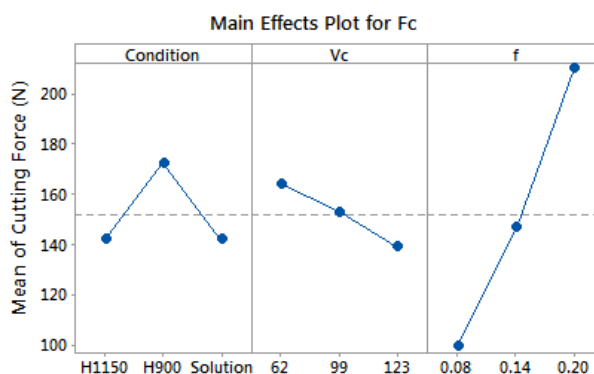


Fig. 7 Main effects plot for cutting force (F_c)

شکل 7 نمودار اثرات اصلی برای نیروی تراش (F_c)

در جدول 3 خلاصه ای از نتیجه آنالیز واریانس درج شده است. مقدار S و P Value به ترتیب بیانگر انحراف استاندارد و

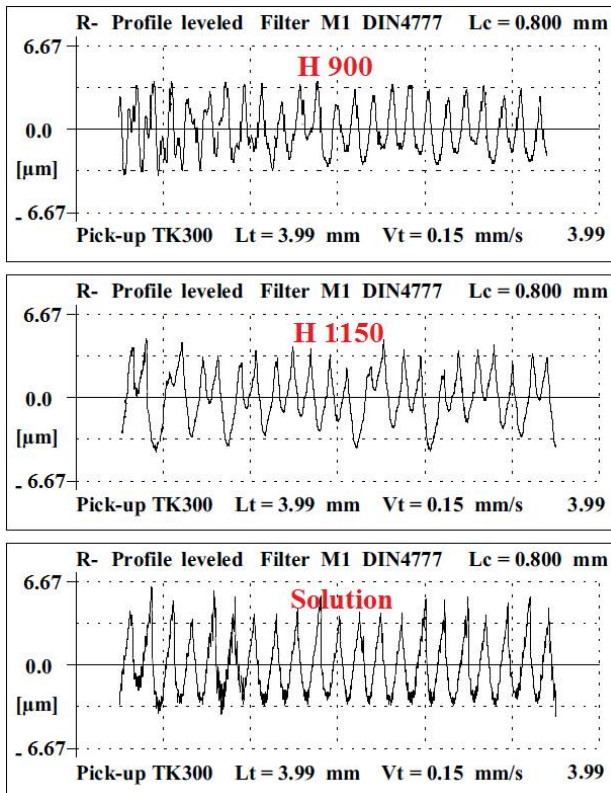


Fig. 10 The effect of Heat treatment on workpiece surface roughness profile ($V_c=62$ m/min, $f=0.14$ mm/rev, $a_p=0.4$ mm)

شکل 10 تأثیر عملیات حرارتی بر پروفیل زبری سطح قطعه کار ($V_c=62$ m/min, $f=0.14$ mm/rev, $a_p=0.4$ mm)

در شکل 11 بخشی از سطح قطعه کار پس از انجام عملیات تراش کاری بر روی دو قطعه در حالت H900 و محلول جامد نشان داده شده است. مشاهده سطح تراش کاری شده قطعه کار با میکروسکوپ الکترونی نشان می‌دهد که نوع عملیات حرارتی فولاد تأثیر به‌سزایی در مکانیسم براده برداری از سطح قطعه دارد. همانطور که از این شکل پیداست، انجام تراش کاری در حالت H900 سبب می‌شود که عیوبی مانند لغزش جانبی⁶ سطح قطعه کار و شخم زنی⁷ توسط ابزار، در مقایسه با تراش کاری در حالت محلول جامد کاهش یابد. به علاوه در تراش کاری این فولاد در حالت محلول جامد، براده‌های ریز مجدداً به سطح قطعه کار می‌چسبند و در اثر فشار بین ابزار و قطعه کار، به سطح تراشیده شده جوش داده می‌شوند (شکل 11). در حالی که در سطح قطعاتی که در حالت H900 تراش کاری شدند این پدیده مشاهده نشد. یک دلیل این امر نرم تر بودن این فولاد در حالت محلول جامد در مقایسه با حالت H900 می‌باشد. در حالت H900 این فولاد ترد تر است و براده‌ها به سرعت از روی سطح ابزار بلند شده و به‌واسطه براده شکن

نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که کمترین زبری پس از تراش کاری در حالت H900 حاصل شده است.

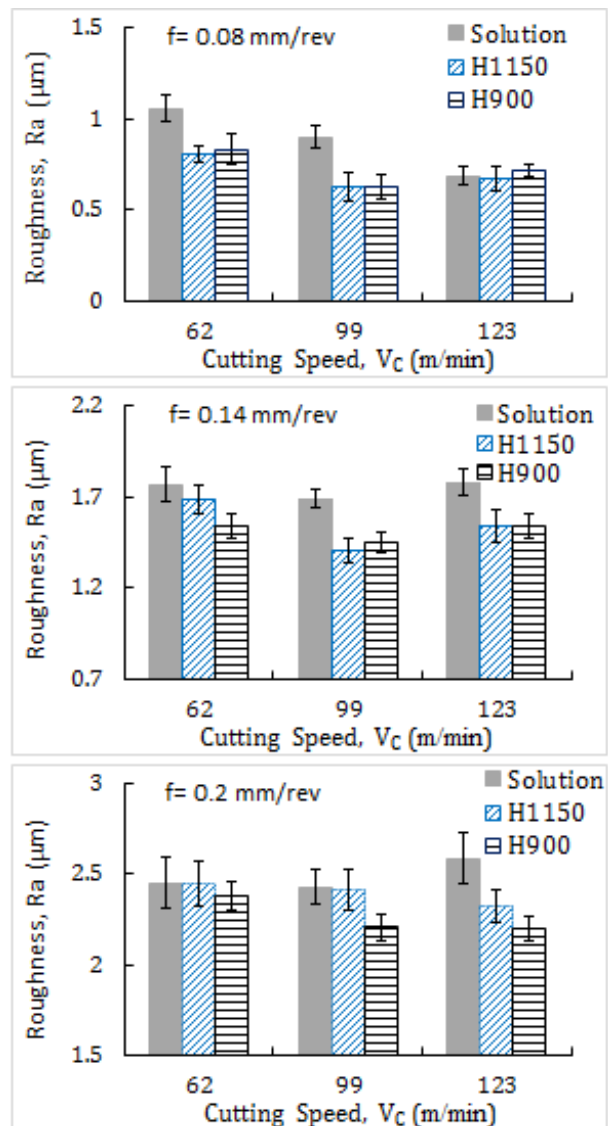


Fig. 8 The effect of feed rate and cutting speed on surface roughness

شکل 8 تأثیر پیشروی و سرعت برشی بر زبری سطح

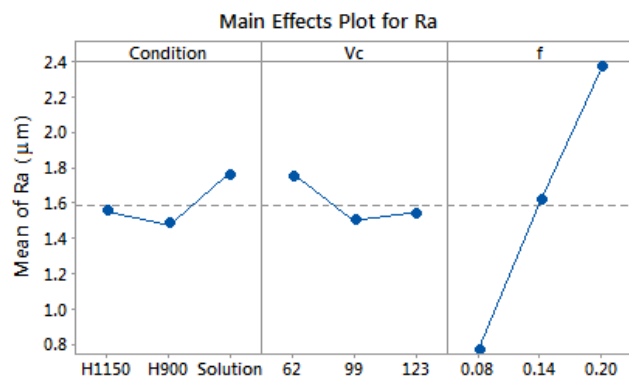


Fig. 9 Main effects plot for workpiece surface roughness (Ra)

شکل 9 نمودار اثرات اصلی برای زبری سطح قطعه کار (Ra)

⁶ Side Flow

⁷ Plowing (Ploughing)

تراش کاری در آن شرایط سبب می شود که خروجی ها از مطلوبیت بیشتری برخوردار باشند. مطابق شکل 12، در تراش کاری فولاد 5-5 PH عملیات حرارتی، سرعت برشی و نرخ پیشروی که منجر به مینیمم شدن همزمان زبری سطح و نیروی تراش می شوند، به ترتیب H1150، 123 m/min و 0/08 mm/rev هستند.

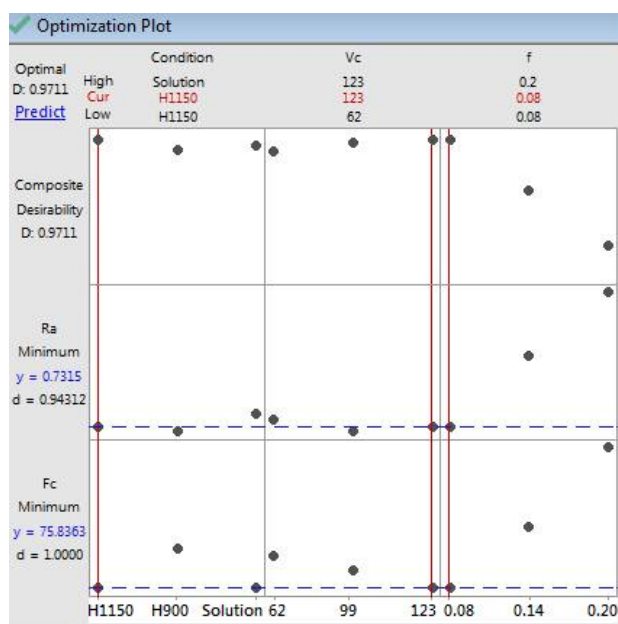


Fig. 12 Optimization plot for tuning of 15-5 PH steel

شکل 12 نمودار بهینه سازی برای تراش کاری فولاد 15-5 PH

با توجه به شکل 12 مقدار Desirability در تراش کاری این فولاد در حالت H1150، 0/9711 می باشد و متغیرهای خروجی شامل زبری سطح و نیروی تراش در مقایسه با تراش کاری در حالت H900 به ترتیب 7% و 22% کمتر هستند. اگرچه طبق شکل 8 و شکل 9 کمترین زبری سطح در تراش کاری با حالت H900 حاصل می شود، اما در حالت H900 مقدار نیروی تراش بیشتر از تراش کاری در حالت H1150 می باشد. در نتیجه، ترکیب نیروی تراش و زبری سطح منجر به این می شود که شرایط بهینه در تراش کاری فولاد 15-5 PH در حالت H1150 حاصل گردد.

بنابراین برای قطعاتی که سختی آنها توسط طراح تا 32 راکول C در نظر گرفته شده است، بهتر است که عملیات ماشین کاری پس از انجام عملیات حرارتی H1150 صورت پذیرد تا زبری سطح بهتری حاصل شود.

اکنون می توان برای مقایسه بین تراش کاری حالت محلول جامد و H900 مجدداً آنالیز واریانس را انجام داد و شرایط بهتر از

روی ابزار می شکنند و از روی سطح قطعه کار دور می شوند [23].

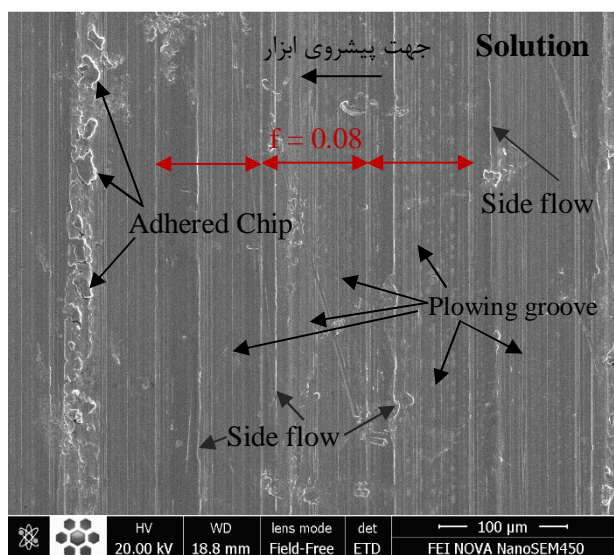
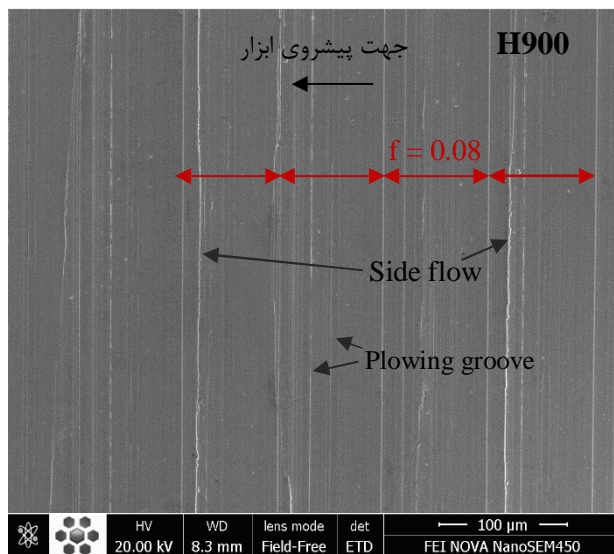


Fig. 11 SEM micrographs of machined surface under $V_c = 99$ m/min and $f = 0.08$ mm/rev

شکل 11 تصویر SEM از سطح ماشین کاری شده با سرعت 99 m/min و پیشروی 0/08 mm/rev

4- یافتن شرایط بهینه

برای یافتن شرایط بهینه نوع عملیات حرارتی، سرعت برشی و نرخ پیشروی از نرم افزار مینی تب استفاده شد. بدین منظور هر دو خروجی نیرو و زبری سطح با ضریب وزنی 1 و درجه اهمیت یکسان، در نظر گرفته شدند. سپس مقدار «شرایط مطلوب» یا Desirability با هدف مینیمم کردن نیرو و زبری سطح، محاسبه شد. مقدار Desirability عددی بین صفر و 1 است و نزدیک بودن به عدد 1 در یک شرایط خاص به این معنی است که انجام

تراش کاری این فولاد در حالت H900 می‌تواند به عنوان یک موضوع تحقیق برای کارهای آتی باشد.

5- نتیجه‌گیری

در این تحقیق فرآیند تراش کاری فولاد 5-PH 15 در سرعت برشی 62 تا 123 متر بر دقیقه و در پیشروی 0/08 تا 0/20 میلی‌متر بر دور و در سه حالت محلول جامد، H1150 و H900 انجام شد. نیروی تراش در حین فرآیند اندازه‌گیری شد و زبری سطح قطعه کار پس از تراش کاری با دستگاه زبری سنج، سنجیده شد. مهم ترین نتایج به دست آمده از این تحقیق عبارتند از:

- نیروی تراش در تراش کاری این فولاد در حالت H900 در مقایسه با تراش کاری در حالات محلول جامد و H1150 حداکثر 33% و 31/5% بیشتر است.

- در سرعت‌ها و پیشروی‌های قید شده در این تحقیق، میانگین نیروی تراش در وضعیت H900 تقریباً 22 درصد بیشتر از حالت محلول جامد و H1150 می‌باشد.

- در پیشروی 0/08 میلی‌متر بر دور کمترین زبری سطح در تراش کاری با حالت H1150 و بیشترین زبری در حالت حاصل محلول جامد حاصل شده است. در حالیکه در پیشروی‌های 0/14 و 0/20 میلی‌متر بر دور، کمترین زبری در شرایط H900 حاصل می‌شود.

- متوسط زبری سطح در سرعت‌های برشی و پیشروی‌های مختلف، در حالت محلول جامد 17 درصد بیشتر از حالت H900 است.

- انجام تراش کاری در حالت H900 سبب می‌شود که عیوبی مانند «لغزش جانبی» سطح قطعه کار و «شخم زنی» توسط ابزار، در مقایسه با تراش کاری در حالت محلول جامد کاهش یابد.

- در تراش کاری فولاد 5-PH 15 عملیات حرارتی، سرعت برشی و نرخ پیشروی که منجر به بهینه شدن همزمان زبری سطح و نیروی تراش می‌شوند، به ترتیب H1150، 123 m/min و 0/08 mm/rev هستند.

- در مقایسه بین تراش کاری حالت محلول جامد و H900، انجام تراش کاری در حالت محلول جامد با سرعت برشی 99 متر بر دقیقه و با پیشروی 0/08 منجر به شرایط بهتری از منظر کم شدن نیروی تراش و زبری سطح در مقایسه با تراش کاری در حالت H900 می‌شود.

- برای قطعاتی که سختی آنها می‌بایست در محدوده 40 تا 47

بین این دو حالت عملیات حرارتی را نیز به دست آورد. در شکل 13 این مقایسه نشان داده شده است. مقدار Desirability در تراش کاری این فولاد در حالت محلول جامد، 0/9419 می‌باشد. با توجه به این شکل، انجام تراش کاری در حالت محلول جامد با سرعت برشی 99 متر بر دقیقه و با پیشروی 0/08 منجر به شرایط بهتری از منظر کم شدن نیروی تراش و زبری سطح در مقایسه با تراش کاری در حالت H900 دارد.

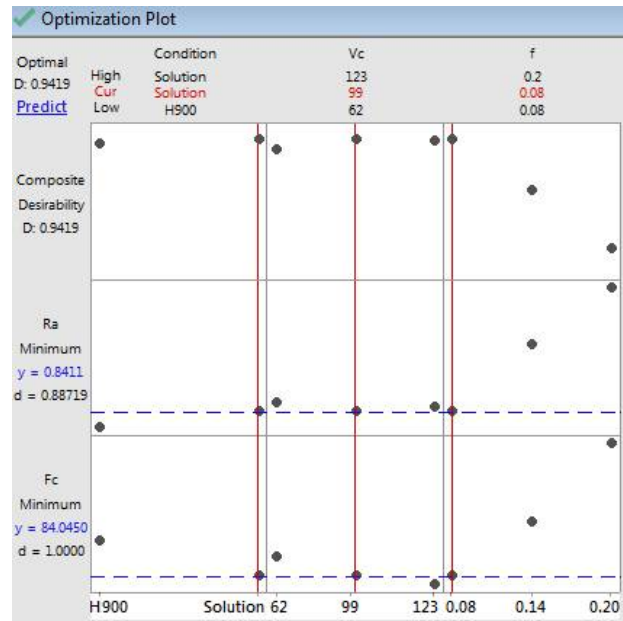


Fig. 13 Optimization plot for tuning of 15-5 PH steel at H900 and Solution conditions

شکل 13 نمودار بهینه سازی برای تراش کاری فولاد 5-PH 15 در شرایط H900 و محلول جامد

برای قطعاتی که سختی آنها توسط طراح در محدوده 40 تا 47 راکول C در نظر گرفته شده است، بهتر است که ابتدا عملیات ماشین کاری در حالت محلول جامد بر روی قطعه انجام شود و سپس عملیات حرارتی H900 بر روی قطعه انجام شود تا نیروی تراش و در نتیجه سایش ابزار [21، 22] کمینه شود.

اما همان‌گونه که در مقدمه اشاره شد انجام ماشین کاری در حالت محلول جامد و سپس انجام عملیات حرارتی پیرسختی H900 می‌تواند سبب تابیدگی قطعه کار و از بین رفتن دقت ابعادی شود و مستلزم اینست که یک فرآیند تکمیلی مانند سنگ‌زنی و پرداخت نهایی بر روی قطعه کار انجام شود. لذا در برخی موارد که قطعه نهایی دارای ابعاد دقیق و تolerانس ابعادی بسته می‌باشد، لازم است تا ابتدا قطعه کار تحت عملیات حرارتی H900 قرار گیرد و سپس فرآیند ماشین کاری بر روی آن انجام شود. بنابراین بهینه کردن سرعت برشی و نرخ پیشروی در

- Performance Cutting, *Procedia CIRP* 2012; 1:336-341.
- [13] M.J. Bermingham, S. Palanisamy, M.S. Dargusch, Understanding the tool wear mechanism during thermally assisted machining Ti-6Al-4V. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 2012; 62(1): 76-87
- [14] M.J. Bermingham, W.M. Sim, D. Kent, S. Gardiner, M.S. Dargusch, (2015) Tool life and wear mechanisms in laser assisted milling Ti-6Al-4V. *Wear* 2015; 322-323:151-163.
- [15] A. Junior, A. Diniz, F. Filho, (2009) Tool wear and tool life in end milling of 15-5 PH stainless steel under different cooling and lubrication condition, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 43: 756-764
- [16] S. Cetin, T. Kivak, (2017) Optimization of the machining parameters for the turning of 15-5 PH stainless steel using the Taguchi method. *Materials and Technology*, 51: 133-140.
- [17] Palanisamy D., Senthil P. (2018) A comparative study on machinability of cryo-treated and peak aged 15Cr-5Ni precipitation hardened stainless steel. *Measurement* 116 (2018) 162-169
- [18] Ganta V., Chakradhar D. (2014) Multi objective optimization of hot machining of 15-5PH stainless steel using grey relation analysis, *Procedia Materials Science* 5:1810 -1818
- [19] N. Khanna, P. Shah, R.W. Maruda, G.M. Krolczyk, H. Hegab, (2020) Experimental investigation and sustainability assessment to evaluate environmentally clean machining of 15-5 PH stainless steel. *Journal of Manufacturing Processes*. 2020; 56:1027-1038.
- [20] F. Clavier, F. Valiorgue, C. Courbon, J. Rech, A. VanRobaey, U. Masciantonio, A. Brosse, T. Dorlin, (2021) Numerical analysis of the tribological and geometrical impacts of tool wear on the thermomechanical loadings induced by 15-5PH steel turning. *Procedia CIRP*. 2021; 102:411-416.
- [21] S.M. Ebrahimi, M.J. Hadad, A.R. Araee, S.H. Ebrahimi, Experimental investigation of the effects of hot turning parameters on the cutting tool wear and surface roughness of AISI630 hardened stainless steel (in Persian). *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2021; 8(2):52-64.
- [22] S.M. Ebrahimi, M.J. Hadad, A.R. Araee, S.H. Ebrahimi, Influence of machining conditions on tool wear and surface characteristics in hot turning of AISI630 steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2021; 114:3515-3535.
- [23] H. Soleimanimehr, (2021) Analysis of the cutting ratio and investigating its influence on the workpiece's diametrical error in ultrasonic-vibration assisted turning. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2021; 235(4): 640-649.
- راکول C باشد، بهتر است که ابتدا عملیات ماشین‌کاری در حالت محلول جامد بر روی قطعه انجام شود و سپس عملیات حرارتی H900 بر روی قطعه انجام شود تا نیروی تراش کمینه شود.

6- مراجع

- [1] W.F. Brown, H. Mindlin, C.Y. Ho, (editors), (1997) *Aerospace Structural Metals Handbook*. Vol. 2: Stainless Steels, Purdue University.
- [2] N. Khanna, P. Sha, Chetan, (2020) Comparative analysis of dry, flood, MQL and cryogenic CO₂ techniques during the machining of 15-5-PH SS alloy. *Tribology International* 2020; 146:106196.
- [3] F. Biniyazan, H. Soleimanimehr, (2021) Improving both Strength and Ductility of Al-7075 by combining Dual Equal Channel Lateral Extrusion with Aging Heat Treatment. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering* 2021; 45:727-739.
- [4] S. Belhadi, T. Mabrouki, JF Rigal, Boulanouar L (2005) Experimental and numerical study of chip formation during straight turning of hardened AISI 4340 steel. *Proc. IMechE Part B: J. Engineering Manufacture* 219 (7): 515-524.
- [5] G. Liu, C. Huang, B. Zou, X. Wang, Z. Liu, (2016) Surface integrity and fatigue performance of 17-4PH stainless steel after cutting operations. *Surface & Coatings Technology*.
- [6] W. Chien, C. Tsai, (2003) The investigation on the prediction of tool wear and the determination of optimum cutting conditions in machining 17-4PH stainless steel, *Journal of Materials Processing Technology* 140: 340-345.
- [7] A. Mohanty, S. Gangopadhyay, A. Thakur, (2015) On Applicability of Multilayer Coated Tool in Dry Machining of Aerospace Grade Stainless Steel. *Materials and Manufacturing Processes* 2015; 31(7): 869-879.
- [8] P. Sivaiah, D. Chakradhar, (2017) Experimental investigation on feasibility of cryogenic, MQL, wet and dry machining environments in turning of 17-4 PH stainless steel., *Materials and Manufacturing Processes*, 32(15): 1775-1788.
- [9] S.M. Ebrahimi, A.R. Araee, M.J. Hadad, (2019) Investigation of the effects of constitutive law on numerical analysis of turning processes to predict the chip morphology, tool temperature and cutting force. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019; 105: 4245-4264.
- [10] G. Dong, L. Qiang, L. JinGuo, L. Yin, S. Yao, (2018) Tool wear performance and surface integrity studies for milling DD5 Ni-based single crystal superalloy, 61 (4) 522-534.
- [11] S. Zhang, J. Li1, X. Zhu, H, Lv, (2013) Saw-Tooth Chip Formation and Its Effect on Cutting Force Fluctuation in Turning of Inconel 718, 14 (6) 957-963.
- [12] R. Muhammad, A. Maurotto, A. Roy, V. Silberschmidt, (2012) Hot ultrasonically assisted turning of β -Ti alloy. 5th CIRP Conference on High