

ANALISIS GAP DAN METODE OSILASI *FIBER LASER WELDING* PADA MATERIAL *FERRITIC STAINLESS STEEL* DIN 1.4003 TERHADAP SIFAT MEKANIK DAN STRUKTUR MIKRO

Mochamad Iqbal Ghifary¹, Mohammad Miftachul Munir², Imam Khoirul Rohmat³

Program Studi D4 Teknik Pengelasan, Jurusan Teknik Bangunan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya,
Surabaya 60111^{1*}

Email: iqbalghifary@outlook.com¹

Abstract – The transportation manufacturing industry, including PT X (Persero) as a train manufacturer in Indonesia, played a crucial role in the country's economic growth. Stainless steel were used as the primary material in their production, which is a corrosion-resistant type of steel with high durability. This study focuses on using laser beam welding in exchange with GMAW while considering the gap size and oscillation method to achieve optimal joints on Ferritic Stainless Steel DIN 1.4003. Large gap sizes made welding process difficult. The conducted tests in this research include tensile tests, hardness tests, metallography test, and SEM characterization tests. The highest hardness value has found in the weld metal region, specifically in specimen with 0.5 mm gap and triangular oscillation method with the value of 361.64 kgf/mm². The high hardness is attributed to the phase change into martensite. In the tensile tests, highest tensile strength produced in specimen with 0.5 mm gap and line oscillation method with average value of 402.175 MPa. This value was not accepted because it is less than the tensile strength value of the parent material. All specimens from different variations fractured at the weld metal region due to the incomplete penetration, which was also be observed in the macro test results. The welding penetration tended to be sideward, both to the left and right, because of the excessive width used. In the SEM characterization test that has been conducted, the surface texture of the specimens was observed, with the fusion line having a smoother texture than the weld metal region. The study's results did not show significant differences concerning the use of the triangular oscillation method or the line oscillation method.

Keyword : DIN 1.4003, Laser Beam Welding, Beam Oscillation, Gap

1. PENDAHULUAN

Industri manufaktur memiliki peran yang penting dalam laju perekonomian Indonesia, terlebih industri manufaktur moda transportasi dikarenakan kebutuhan yang masif akan transportasi umum untuk mengatasi permasalahan lingkungan dan energi secara global. PT X (Persero) merupakan perusahaan manufaktur kereta api yang menyediakan berbagai macam jenis produk dan telah mengeksport produknya ke berbagai negara. *Stainless steel* merupakan salah satu jenis material yang digunakan dalam rangkaian produksi.

Masalah yang seringkali terdapat di lapangan yaitu material yang akan dilakukan proses perakitan tidak sesuai secara dimensi. Disebabkan dari proses pemotongan material yang kurang presisi mengakibatkan saat proses *fit-up* menciptakan ukuran *gap* yang tidak sesuai. *Laser beam welding* cenderung sensitif terhadap ukuran *gap* saat melakukan pengelasan, sehingga salah satu metode yang dapat digunakan adalah dengan memvariasikan metode osilasi. Bentuk osilasi memiliki pengaruh terhadap penetrasi pengelasan [1]. Metode osilasi line memiliki penetrasi yang dalam sehingga konsentrasi energi pada material lebih baik [2]. Metode osilasi

triangular memiliki distribusi energi yang homogen pada bagian sisi dan tengah serta memastikan filler metal mencair dengan sempurna untuk mengisi *gap* yang ada [3].

Oleh sebab itu, maka dilakukan penelitian mengenai analisis variasi *gap* dan metode osilasi pada pengelasan *Laser Beam Welding* (LBW) tipe *fiber laser* dengan material *Ferritic Stainless Steel* DIN 1.4003 terhadap sifat mekanik dan struktur mikro. Pengujian yang akan dilakukan adalah uji kekerasan, uji tarik, uji makro-mikro, dan SEM (*Scanning Electron Microscope*).

2. METODOLOGI

Penelitian ini menggunakan material *stainless steel* DIN 1.4003 dengan dimensi 300x150x2 mm. Material tersebut dilas menggunakan *Laser Beam Welding* tipe *fiber laser* dengan daya laser 40% dan frekuensi laser 1000 Hz. *Test coupon* yang akan dibuat sejumlah 6 buah. Tabel 1 merupakan parameter pengelasan yang akan menjadi variable dalam penelitian ini.

Tabel 1 Parameter Pengelasan

Test piece identification	Oscillation Method	Gap Width	Time
V1	-	0 mm	11.56 s
V2		0.5 mm	12.11 s
V3		0.7 mm	12.81 s
V4	Δ	0 mm	12.22 s
V5		0.5 mm	13.31 s
V6		0.7 mm	13.69 s

Material disambung dengan tipe sambungan *square butt joint double side weld*. *Filler metal* yang digunakan adalah ER 308L dengan diameter 1 mm. Gas pelindung yang digunakan adalah Argon dengan kemurnian 97.5%. *Test coupon* selanjutnya dipotong untuk dilakukan pengujian. Pengujian yang dilakukan adalah pengujian kekerasan, pengujian tarik, pengujian struktur makro-mikro, dan pengujian karakterisasi SEM.

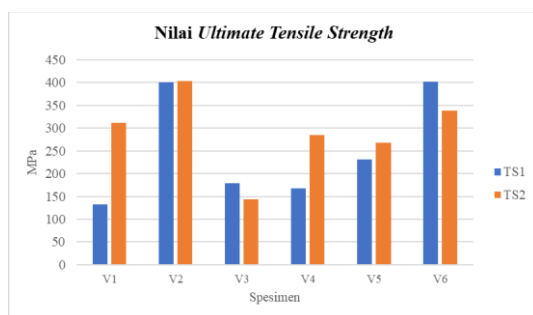
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil dan Pembahasan Pengujian Tarik

Pengujian tarik dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui nilai kekuatan tarik material. Pada pengujian ini spesimen tarik adalah sebanyak 2 spesimen pada setiap variasi. Hasil pengujian tarik yang telah dilakukan dapat dilihat pada Tabel 2. Grafik nilai ultimate tensile strength dapat dilihat pada Gambar 3.

Tabel 2 Hasil Pengujian Tarik

Mark of Material	Ultimate Tensile Strength (MPa)	Yield Strength (MPa)	Break on
V1	TS1	113,12	-
	TS2	311,48	-
V2	TS1	400,73	326,53
	TS2	403,62	316,44
V3	TS1	179,35	-
	TS2	143,17	-
V4	TS1	167,24	-
	TS2	285,45	-
V5	TS1	230,67	218,48
	TS2	267,50	-
V6	TS1	402,45	334,38
	TS2	338,65	311,68



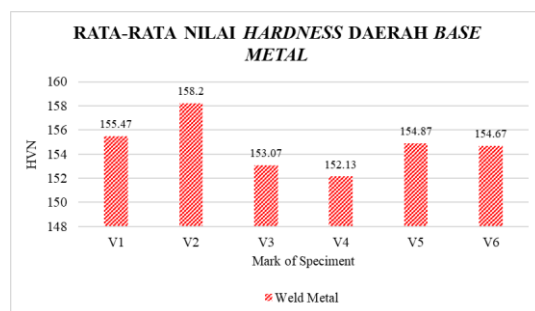
Gambar 3 Nilai Ultimate Tensile Strength

Gambar 3 menunjukkan nilai hasil *ultimate tensile strength* pada semua variasi spesimen. Seluruh spesimen mengalami patah pada daerah *weld metal*. Nilai maksimum kekuatan tarik pada tiap spesimen uji berada di bawah nilai minimum kekuatan tarik dari material induk. Disebabkan oleh penetrasi pengelasan yang dangkal akibat dari width yang terlalu besar yang dapat dilihat pada pengujian makro.

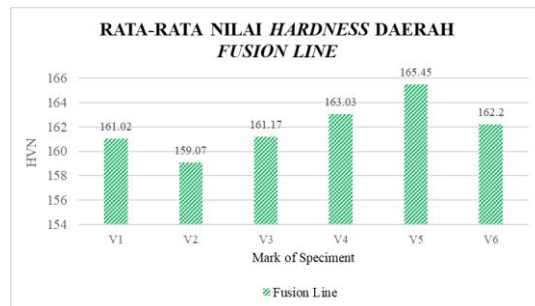
Sehingga hasil pengujian tarik pada keseluruhan variasi tidak mencapai *acceptance criteria*.

3.2 Hasil dan Pembahasan Pengujian Hardness Vickers

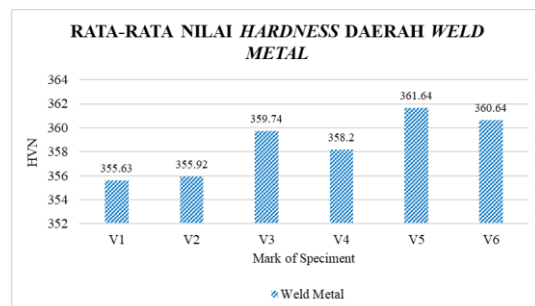
Pengujian kekerasan memiliki tujuan untuk mengetahui nilai kekerasan pada tiap masing-masing daerah pada proses pengelasan, mulai dari *base metal*, *fusion line*, dan *weld metal*. Pengujian kekerasan dilakukan dengan metode *Vickers*, indenter yang digunakan berbentuk *pyramid* dengan pemberian beban sebesar 0.5 kgf dengan lama waktu indentasi selama 15 detik. Pada setiap daerah dilakukan indentasi sebanyak 3 titik. Grafik nilai kekerasan dapat dilihat pada Gambar 4 sampai Gambar 6 berikut



Gambar 4 Nilai Pengujian Hardness pada Base Metal



Gambar 5 Nilai Pengujian Hardness pada Fusion Line



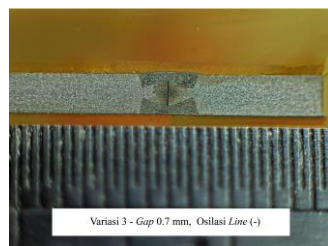
Gambar 6 Nilai Pengujian Hardness pada Weld Metal

Berdasarkan grafik tersebut, apabila nilai kekerasannya diurutkan dari yang terbesar hingga yang terkecil maka daerah yang paling tinggi nilai kekerasannya adalah *weld metal*, *fusion line* dan *base metal*. Nilai kekerasan spesimen dengan metode osilasi garis dan metode osilasi segitiga tidak memiliki nilai yang terpaut jauh.

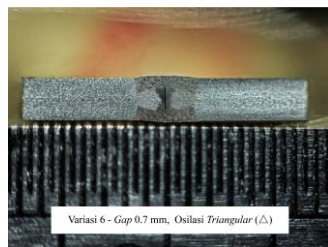
Hal tersebut juga dibuktikan pada gambar struktur mikro, Struktur mikro pada *weld metal* didominasi oleh *martensite* yang membuat daerah *weld metal* memiliki kekerasan lebih tinggi. Nilai kekerasan *fusion line* tidak terpaud jauh dengan nilai base metal dibandingkan dengan nilai kekerasan *weld metal* dikarenakan proses pengelasan laser yang cepat. Proses pengelasan laser yang cepat menimbulkan *fusion line* yang tipis [5]. Fasa *martensite* memiliki nilai kekerasan lebih tinggi dibandingkan dengan fasa *austenite* dan fasa *ferrite*.

3.3 Hasil dan Pembahasan Pengujian Struktur Makro

Pengambilan struktur makro dilakukan dengan mengambil sampel pada daerah pengelasan. Pengujian ini bertujuan untuk melihat fusi dari logam las dari hasil proses pengelasan dan juga untuk melihat cacat yang terdapat didalam logam pengelasan serta penetrasi yang terjadi. Sebelum dilakukan uji makro, material melalui tahapan pemolesan hingga rata menggunakan kertas gosok dengan grit kasar hingga grit halus. Lalu dilakukan proses *etching* pada permukaan logam yang telah diratakan dengan tujuan untuk menampilkan daerah *weld metal* dengan menggunakan larutan HCL dan HNO₃. Untuk hasil pengujian makro yang telah dilakukan dapat dilihat pada Gambar 7.



(a)



(b)

Gambar 7 Hasil pengujian Makro
(a) Variasi gap 0.7 mm, Osilasi Line (b) Variasi gap 0.7 mm, Osilasi Triangular

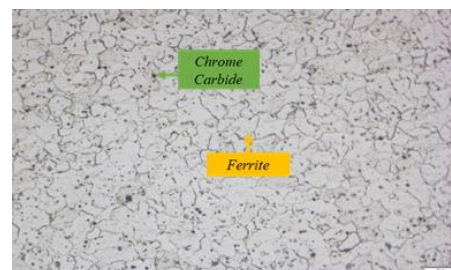
Dari Gambar 7 dapat dilihat pada variasi dengan ukuran *gap* terbesar yaitu 0.7 mm, baik penggunaan metode osilasi garis ataupun segitiga mengalami cacat las *Incomplete Penetration*. Hal ini disebabkan oleh penetrasi yang dangkal. *Width* yang lebar yakni 3 mm juga menjadi penyebab penetrasi yang dangkal. Kecepatan pengelasan

laser yang tinggi juga menyebabkan *weld pool* tidak dapat mengisi *gap* yang ada dikarenakan proses *solidification* yang cepat. Frekuensi laser juga mempunyai andil dalam kemampuan penetrasi pengelasan. Semakin besar frekuensi laser maka semakin dalam penetrasi pengelasan.

Bentuk penetrasi pengelasan yang dihasilkan kedua variasi metode osilasi juga memiliki perbedaan. Metode osilasi garis memiliki bentuk penetrasi yang dalam di bagian kiri dan kanan tetapi dangkal pada bagian tengah. Metode osilasi segitiga memiliki bentuk penetrasi yang lebih seragam baik di bagian kiri, tengah ataupun kanan.

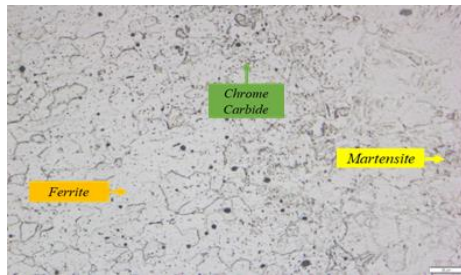
3.4 Hasil dan Pembahasan Pengujian Struktur Mikro

Pengujian mikro dilakukan untuk mengamati struktur mikro dengan menggunakan mikroskop optik. Hal ini dilakukan untuk melihat terjadinya perubahan struktur mikro pada objek penelitian sebagai akibat dari penggunaan variasi metode osilasi serta penggunaan *gap*. Struktur mikro yang diamati yaitu *base metal*, *fusion line*, dan *weld metal* dengan perbesaran 500x. Hasil struktur mikro setiap daerah dapat dilihat pada Gambar 8 sampai Gambar 10

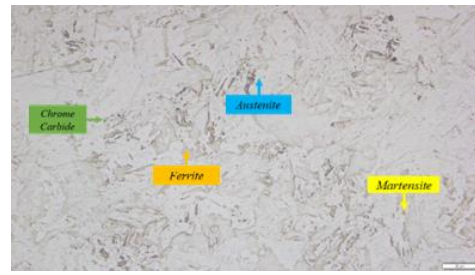


Gambar 8 Struktur Mikro Base Metal dengan perbesaran 500x

Di wilayah base metal, terdapat struktur *ferrite* dengan komposisi yang merata dan karbida krom. Struktur yang terjadi akibat pemrosesan material baik dari *raw material* hingga material siap pakai *Ferrite* merupakan struktur bawaan dari material sebelum dilakukan proses pengelasan. *Ferrite* adalah struktur kristal dengan susunan atom besi yang berbentuk *body-centered cubic* (BCC). Struktur ini relatif lunak dan memiliki kemampuan magnetisasi yang baik, terutama pada suhu rendah. Gambar struktur mikro daerah fusion line dapat dilihat pada Gambar 9

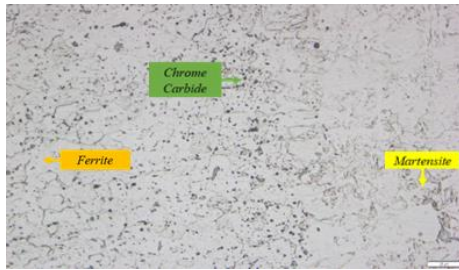


(a)



(b)

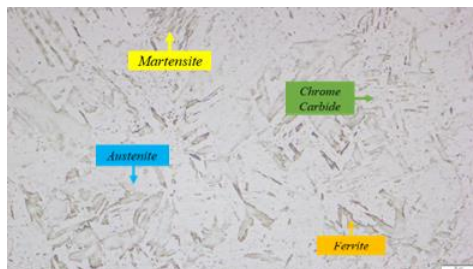
Gambar 10 Struktur Mikro Base Metal dengan perbesaran 500x (a) Osilasi *Triangular* (b) Osilasi *Line*



(b)

Gambar 9 Struktur Mikro Base Metal dengan perbesaran 500x (a) Osilasi *Line* (b) Osilasi *Triangular*

Daerah fusion line adalah daerah transisi yang memiliki struktur hampir sama seperti base metal, namun memiliki banyak titik-titik hitam yang dimana titik hitam tersebut merupakan karbida krom. Karbida krom ($Cr_{23}C_6$) merupakan senyawa yang terbentuk akibat temperature sensitisasi. Sensitisasi menyebabkan ketidaksempurnaan struktur mikro baja tahan karat dan menyebabkan resistansi terhadap *intergranular corrosion* [4]. Proses pembentukan karbida krom pada baja tahan karat terjadi pada temperatur sensitisasi ($450-850^{\circ}C$), reaksi kromium (Cr) dan karbon (C) yang ada di daerah batas butir. Pada daerah disekeliling atau didekat *fusion line* akan rawan terjadi korosi karena kandungan krom di daerah batas butir daerah tersebut berkurang. Struktur mikro *weld metal* dapat dilihat pada Gambar 10.



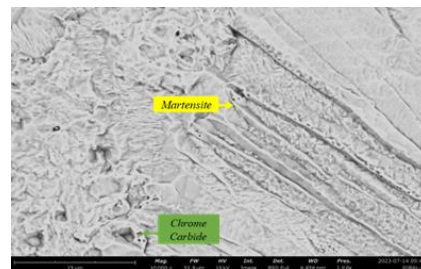
(a)

Daerah weld metal mengandung fasa *austenite*, fasa *ferrite*, fasa *martensite*, serta sedikit kandungan karbida krom. Fasa *martensite* terbentuk saat *austenite* didinginkan dengan cepat pada suhu sekitar $300^{\circ}C$ [4]. Pada penelitian ini, media pendinginan yang digunakan adalah udara dan material yang digunakan adalah plat dengan ketebalan 2 mm. Proses pendinginan yang cepat ini mencegah difusi *austenite* terjadi selama transformasi, sehingga menyebabkan terbentuknya struktur baru berupa *martensite*.

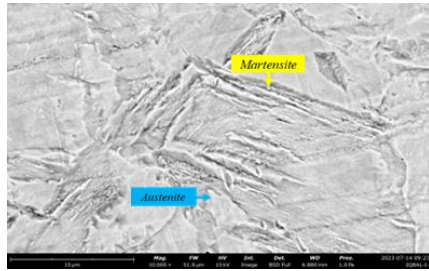
Akibatnya, daerah *weld metal* menunjukkan perbedaan tingkat kekerasan yang cukup signifikan dibandingkan dengan daerah *base metal* dan *fusion line*. Kondisi ini disebabkan oleh struktur yang berbeda dalam daerah-daerah tersebut.

3.4 Hasil dan Pembahasan Pengujian *Scanning Electron Microscope* (SEM)

Pengujian *Scanning Electron Microscope* (SEM) merupakan metode pengujian untuk melihat struktur mikro suatu material. Mikroskop SEM bekerja dengan cara menembakkan elektron ke permukaan benda uji dan memproses sinyal yang dipantulkan dari permukaan tersebut. Hasil pengujian kemudian akan tampil pada layer monitor. Pada penelitian ini, spesimen akan diamati dengan perbesaran 10.000x dengan daerah yang akan diobservasi yakni *fusion line* dan *weld metal*. Hasil pengujian SEM yang telah dilakukan dapat dilihat pada Gambar 11 dan Gambar 12.



Gambar 11 Hasil pengujian SEM daerah *Fusion Line* dengan perbesaran 10.000x



Gambar 12 Hasil pengujian SEM daerah *Weld Metal* dengan perbesaran 10.000x

Gambar yang dihasilkan dengan Mikroskop Elektron menghasilkan citra yang lebih dalam dibandingkan dengan Mikroskop Optik. Pada Gambar 11 menunjukkan daerah *fusion line*. Garis batas butir (*grain boundary*) antara *base metal* dan *weld metal* dapat terlihat di daerah *fusion line*. Karbida krom di daerah *fusion line* yang terjadi akibat peristiwa presipitasi juga terlihat dengan bentuk bulat berwarna hitam. Berbeda dengan daerah *fusion line* yang strukturnya lebih halus. Pada Gambar 12, daerah *weld metal* memiliki struktur yang lebih kasar. Fasa bainit dan martensit ditunjukkan dengan bentuk seperti lidi yang berwarna lebih hitam. Ukuran butir yang terbentuk juga lebih besar dibandingkan yang terjadi pada daerah *fusion line*.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan analisis data hasil pengujian dalam penelitian ini dapat didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

1. Berdasarkan pengujian tarik didapatkan nilai kuat tarik tertinggi berada pada spesimen dengan variasi gap 0.5 mm dan metode osilasi segitiga dengan rata-rata nilai kuat tarik 402.175 MPa. Spesimen patah pada daerah *weld metal*. Nilai kuat tarik yang didapatkan dibawah dari nilai minimum kuat tarik *base metal* disebabkan karena kurangnya penetrasi pengelasan akibat dari penyeteran *width* yang terlalu lebar. Kedua variasi osilasi garis maupun osilasi segitiga menunjukkan kegagalan yang sama yang dapat dilihat pada pengujian makro. *Acceptance criteria* dari pengujian tarik tidak dapat dicapai.
2. Berdasarkan pengujian *hardness*, penggunaan metode osilasi dan gap yang berbeda berpengaruh terhadap nilai kekerasan. Dikarenakan proses pengelasan yang berlangsung cepat mempunyai pengaruh terhadap masukan panas yang diterima material. Nilai kekerasan tertinggi berada pada wilayah *weld metal* spesimen dengan variasi gap 0.5 mm dan metode osilasi garis dengan rata-rata nilai kekerasan 361.64 kgf/mm².

3. Berdasarkan pengujian makro didapatkan hasil pengelasan yang tidak fusi akibat kurangnya penetrasi (*incomplete penetration*). Diketahui juga bentuk penetrasi cekung pada metode osilasi garis dan bentuk penetrasi datar pada metode osilasi segitiga. Lebar las yang terlalu lebar yakni sebesar 3 mm membuat penetrasi pengelasan cenderung dangkal. Pengujian mikro pada masing-masing spesimen, menampilkan perubahan fasa yang terjadi. Pada struktur mikro *base metal*, didominasi oleh fasa *ferrite*. Daerah *fusion line* menampilkan perpotongan daerah *base metal* dan *weld metal* yang dibatasi oleh *carbide chrome* yang relatif cukup banyak. Sedangkan pada daerah *weld metal* berupa *ferrite*, *austenite* dan *martensite* dengan sedikit *carbide chrome*. Perubahan fasa yang terjadi diakibatkan oleh proses pengelasan laser yang cepat

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada seluruh pihak yang telah membantu penulis dalam penyusunan artikel dari awal hingga selesai.

6. PUSTAKA

- [1] Li, S., Mi, G., & Wang, C. (2020). A study on laser beam oscillating welding characteristics for the 5083 aluminum alloy: Morphology, microstructure and mechanical properties. *Journal of Manufacturing Processes*, 53, 12–20. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.01.018>
- [2] Horník, P., Šebestová, H., Novotný, J., & Mrňa, L. (2022). Laser beam oscillation strategy for weld geometry variation. *Journal of Manufacturing Processes*, 84, 216–222. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.10.016>
- [3] Dewi, H. S., & Volpp, J. (2020). Impact of laser beam oscillation strategies on surface treatment of microalloyed steel. *Journal of Laser Applications*, 32(4), 042006. <https://doi.org/10.2351/7.0000196>
- [4] ASM International. (2004) *ASM Handbook Volume 9: Metallography and Microstructures*
- [5] Mosavi, Amir & Salehi, Fatemeh & László, Nádai & Széll, Károly & Gorji, Nima. (2019). Modeling the Temperature Distribution During Laser Hardening Process. *Results in Physics*.102883.10.1016/j.rinp.2019.102883.