

Nd^{+3} LASER RODUNDA ISIL GERİLMELERİN VE OPTİK DİSTORSİYONLARIN İNCELENMESİ

Bekir Sami YILBAŞ, Ali KOÇ
E.Ü. Mühendislik Fakültesi, KAYSERİ

ÖZET

İnce metallerin delinmesinde, hem ekonomik ve hemde işlem hassasiyetlerinin büyük olmasından dolayı, darbe esaslı laserler kullanılmaktadır. En yaygın olarak kullanılanı ise Nd^{+3} cam esaslı katı laserdir. Laser ışını üretmek için optik olarak pompalanan laser rodunda, pompalanan ışının soğurulmasından dolayı, sıcaklık artışı meydana gelecektir. Bu ise laser rodunda ısı gerilmelerin ve kırılma indeksinin değişiminden dolayı optik yolda değişmelerin meydana gelmesine neden olmaktadır. Bu çalışmada laser rodunda sıcaklık artışından dolayı meydana gelen ısı gerilmeler ve optik yoldaki değişim incelenmiştir.

EXAMINATION OF THERMAL STRESSES AND OPTICAL DISTORSIONS IN Nd^{+3} LASER ROD

SUMMARY

Due to low cost and high performance in machining process, the solid lasers are used in sheet metal drilling. Nd^{+3} glass lasers are the most commonly used for this purpose. During the optical pumping of Nd^{+3} laser rod, the temperature rise occurs in the rod element due to the absorption of incident beam. This results in the thermal stresses to be developed and the variation in the refractive index of the rod causing optical distortions. In the present study thermal stresses and the optical distortions due to temperature rise in the rod were studied.

1- GİRİŞ

Elektronik, uçak ve tıpta laserin kullanılması çağımızın en büyük yeniliklerindendir. Laserin takım tezgahı olarak uygulanmasında; delik çapının, delik derinliğine oranları 1/1 ile 1/20 arasında değişen deliklerin en sert malzemelere dahi delindiği görülmektedir. Aynı zamanda mikro işleyicilerin (mikro chip) imalatında gerekli olan mikrometre mertebesindeki kaynağın yapılmasında mümkün olmaktadır. Bilgisayar kontrolü laser takım tezgahları hem ekonomik

oldukları için ve hemde işlem hassasiyetlerinin yüksek olması nedeniyle kullanımda öncelikle tercih edilen tezgahlar olmuşlardır. İnce metallerin delinmesinde çıkış enerjileri 5 ile 75 joule ve darbe uzunlukları 1.2 ile 3 ms arasında değişen katı laserler kullanılır. Bu laser ışınları bir kondenser mercekle bir malzeme yüzeyine odaklandığında, odak düzleminde büyük bir güç yoğunluğu meydana gelmektedir. Bu güç yoğunluğundan dolayı malzeme sırasıyla ısınmakta, erimekte ve buharlaşmaktadır. Böylece malzemenin ısıl olarak işlenmesi mümkün olmaktadır. Bu olayda malzemenin mekanik özellikleri önemli rol oynamaktadır [1] .

Katı laserde, laser kafasında, laser ışını üreten laser rodu mevcuttur. Bu cam esaslı Nd⁺³ veya kristal esaslı Ruby olabilir. Veriminin diğer laser rodlarına göre daha büyük olması nedeniyle Nd⁺³ laser rodu bu çalışmada esas esas alınmış ve ucuz olmaları nedeniyle cam esaslı laser rodu seçilmiştir. Nd⁺³ cam esaslı laser rodunu optik pompalama neticesinde üretilen ışınların bir kısmını soğurur ve rod sıcaklığı artar. Cam malzemesinin ısı iletim katsayısı küçük olduğu için peşpeşe gelen pompalama enerjisinin soğurulması ile bu sıcaklık artışı büyür. Bu ise laser rodunda ısıl gerilmelerin meydana gelmesine ve optik yolda(optical path length) değişimlerinin meydana gelmesine neden olur. Bu arzu edilmeyen bir durumdur. Zira laser çıkış gücü dağılımı düzensiz olmaktadır.

Bu çalışmada Nd⁺³ cam esaslı laser rodunu 0.5 ile 1 Hz optik pompalama frekansında sıcaklık artışından dolayı ısıl gerilmeler, birim ısıl uzamalar ve optik yoldaki (optical path length) değişimi incelenmiştir.

2- ISIL GERİLMELERİN HESABI

Laser rodu iki ucu tesbit edilmiş uzun bir silindir olarak kabul edilebilir. Bu takdirde laser rodundaki gerilmeler şematik olarak şekil-1 deki gibi gösterilebilir. Eksenel yöne bağlı olmadan asimetrik bir sıcaklık dağılımı mevcut olduğu kabul edilirse, laser rodunda meydana gelen gerilmeler aşağıdaki şekilde analiz edilebilir [2] ;

$$\sigma_r = \frac{\alpha \cdot E}{1-\nu} \left[\frac{1}{R^2} \int_0^R T \cdot r \cdot dr - \frac{1}{r^2} \int_0^r T \cdot r \cdot dr \right] \quad (1)$$

$$\sigma_{\theta} = \frac{\alpha \cdot E}{1-\nu} \left[\frac{1}{R^2} \int_0^R T \cdot r \cdot dr + \frac{1}{R^2} \int_0^r T \cdot r \cdot dr - T \right] \quad (2)$$

$$\sigma_z = \frac{\alpha \cdot E}{1-\nu} \left[\frac{2}{R^2} \int_0^R T \cdot r \cdot dr - T \right] \quad (3)$$

Serbest uçlarda gerilme sıfır kabul edilirse, eksenel yönde 2R den büyük mesafeler için St. Venant kuralı [1] uygulanır (şekil-2);

$$\sigma_z = - \frac{1}{\pi \cdot R^2} \int_0^R \sigma_z \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot dr \quad (4)$$

Eksenel yöndeki gerilmenin laser rodu son kısımdaki dağılımı şematik olarak şekil-2 de gösterilmiştir ve laser rodu son kısımlarında eksenel gerilme laser rodu çapı boyunca dağılımı;

$$\sigma_{zr} = \frac{\alpha \cdot E}{1-\nu} \left[\frac{2r}{R^2} \int_0^R T \cdot r \cdot dr - T \right] - \sigma_z \quad (5)$$

dır. Fakat gerçekte, laser rodu serbest uçlarında bir gerilme bileşeni meydana gelir. Bu gerilme bileşeni şematik olarak şekil-3 de gösterilmiştir ve;

$$\sigma_{z1} = \frac{\alpha \cdot E}{1-\nu} T(r) \quad (6)$$

dir. Bu ise laser rodu kenar yüzeylerinde distorsiyonların (uzamaların) meydana gelmesine neden olur.

3- OPTİK DİSTORSİYON

Radyal yöndeki sıcaklık dağılımı rod içerisinde gerilmeler meydana getirdiği gibi buna ilave olarakta optik uzamaların meydana gelmesine neden olur. Eksenel yönde ışılan laser ışın demeti radyal yönde (sıcaklık farklılıklarından dolayı optik yolda değişim meydana geldiği için) distorsiyona uğrar.

Herhangi bir gerilim altında bulunmayan homojen bir yapıda optik yol uzunluğu (optical path length) aşağıdaki formdadır.

$$P_0 = n \cdot L \quad (7)$$

Distorsiyona uğramış bölgedeki toplam optik yol uzunluğu ise [3] .

$$P = P_0 + \Delta P_0 = n \cdot L \left[1 + \frac{\Delta n}{n} - \epsilon_z \right] \quad (8)$$

dır.

Denklem (8) de, laser rodu kırılma indeksi değişiminin üç nedeni vardır. Bunlar;

- a) Atomların, etkileşmiş seviyedeki ters çoğalmalarının (yoğunluklarının) değişmesinden dolayı. Bu problem iyi bir rod malzemesi kompozisyonu seçimi ile yok edilebilmektedir [4] . Fakat bu, yukardaki analizde ihmal edilmiştir
- b) Sabit yoğunlukta $(\delta n / \delta t)_\rho$, sıcaklıkla kırılma indeksinin değişimi.
- c) Sıcaklıktan meydana gelen gerilmelerden dolayı, ilerleyen ışık demeti hızındaki değişim.

Snitzer [5] toplam optik yol uzunluğundaki değişimi laser rodu çapı bolunca incelenmiştir. Bu inceleme aşağıda gösterilmektedir. Radyal yönde polarize olan ışık demeti için optik yoldaki değişim;

$$P_r(r) = n \cdot L \left\{ 1 + \left[\alpha_n \cdot \Delta T(r) - \frac{P}{v} (\epsilon_z + \epsilon_\theta) - \frac{q}{v} \epsilon_r \right] + \epsilon_z \right\} \quad (9)$$

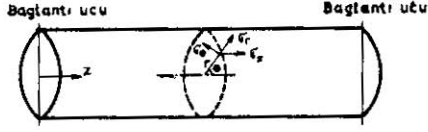
Tangant (dik) yönde polarize olan ışık demeti için optik yoldaki değişim;

$$P_\theta(r) = n \cdot L \left\{ 1 + \left[\alpha_n \cdot \Delta T(r) - \frac{P}{v} (\epsilon_z + \epsilon_r) - \frac{q}{v} \epsilon_\theta \right] + \epsilon_z \right\} \quad (10)$$

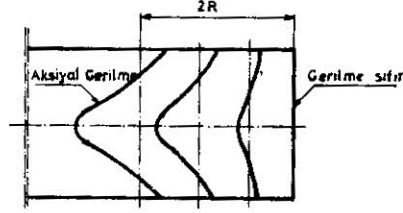
dir.

$\frac{P}{v}$ ve $\frac{q}{v}$ optik gerilme katsayıları olup gerilme ve kırılma indeksine bağlıdır. İzentropik bir ortamda gerilmelerle birim uzamalar arasındaki bağıntılar aşağıdaki şekildedir.

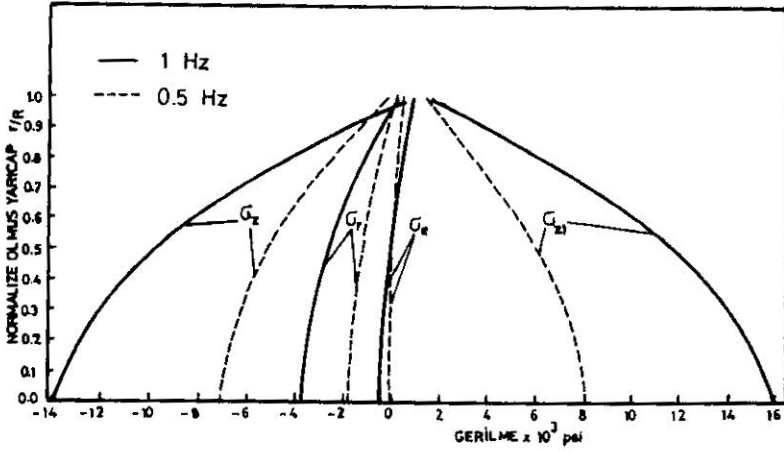
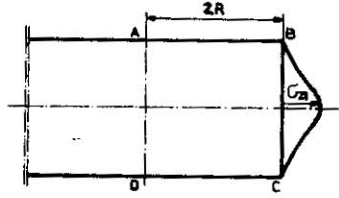
Şekil-1: Laser rodunda üç boyuttaki gerilmelerin gösterilmesi.



Şekil-2: Laser rod başlarındaki aksel gerilmenin görünümlü



Şekil-3: Laser rod uçlarındaki gerilme dağılımı



Şekil-4: Laser rodundaki ısı gerilmeler

$$\epsilon_r = \frac{1}{E} [\sigma_r - \nu (\sigma_\theta + \sigma_z)] \quad (11)$$

$$\epsilon_\theta = \frac{1}{E} [\sigma_\theta - \nu (\sigma_r + \sigma_z)] \quad (12)$$

$$\epsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu (\sigma_r + \sigma_\theta)]$$

Eğer;

$$R(r) = \frac{1}{r^2} \int_0^R T(r) \cdot r \cdot dr \quad (14)$$

denirse,

$$P_r(r) - P_\theta(r) = n \cdot L \cdot \alpha \left[\frac{1 + \nu}{1 - \nu} \right] \cdot \left[\frac{P}{\nu} - \frac{q}{\nu} \right] \cdot [T(r) - 2R(r)] \quad (15)$$

olur.

4- İRDELEME

4.1- Gerilmeler:

Radyal yöndeki sıcaklık değişiminden dolayı laser rodunda ısıl gerilmeler meydana gelmektedir. Şekil-4 de ısıl gerilmeler verilmiştir. 0.5 ve 1 Hz frekansındaki darbe ile pompalanan laser rodunun sıcaklık artışı tek bir darbeye göre daha büyük olduğu için, neticede ısıl gerilmelerde büyük olmaktadır. Radyal yöndeki gerilmenin normalize olmuş yarı çapla değişimi parabolik ve azalan türdedir. Bu laser rodu boyunca radyal yönde sıcaklık artışının laser rodu merkezinde maksimum olmasındandır. Tangant yöndeki gerilme, normalize olmuş yarı çap boyunca artar bir parabolik eğri meydana getirmektedir. Gerilme normalize olmuş yarı çap boyunca pozitif ve negatif değerlere sahip olmaktadır ve $r/R = 0.6$ civarında gerilme sıfır olmaktadır. Bu ise laser rodunda bir burulmanın meydana gelmesine neden olmaktadır. Ancak tangant yönündeki gerilme -4000 ile 6000 psi arasında olması, laser rodundaki burulmanın ciddi bir problem meydana getirmeyeceğini gösterir. Eksenel gerilmenin normalize olmuş yarı çap değişimi azalan parabolik bir türdedir. Eksenel gerilme diğer yönlerdeki

gerilmelerle kıyaslandığında daha büyük değerlere sahip olduğu görülür. Maksimum gerilme 13500 psi civarındadır. Laser rodu son kısımlarındaki eksenel gerilmenin normalize olmuş yarıçapla değişimi azalan bir parabolüdür. Bu şekil-4 de gösterilmiştir. Laser rodu merkezinde gerilme en büyüktür ve 1600 psi civarındadır. Fakat cam malzemenin emniyet gerilmesi 2000 psi civarındadır. Böylece 0.5 ve 1 Hz frekansında optik olarak pompalanan laser rodunda meydana gelen ısı gerilmeleri emniyet gerilmelerinden küçük olduğu görülür. Bu ise bu pompalama frekansında laser rodunun emniyetli bir şekilde çalışabileceğini göstermektedir. Şekilden görüldüğü gibi eksenel yönde sıcaklık değişimi küçük olduğu için ısı gerilmeleri eksenel yönde pek değişim göstermemektedir. Radyal yöndeki gerilmeler yüzeyde beklenildiği gibi sıfır değerine sahiptir.

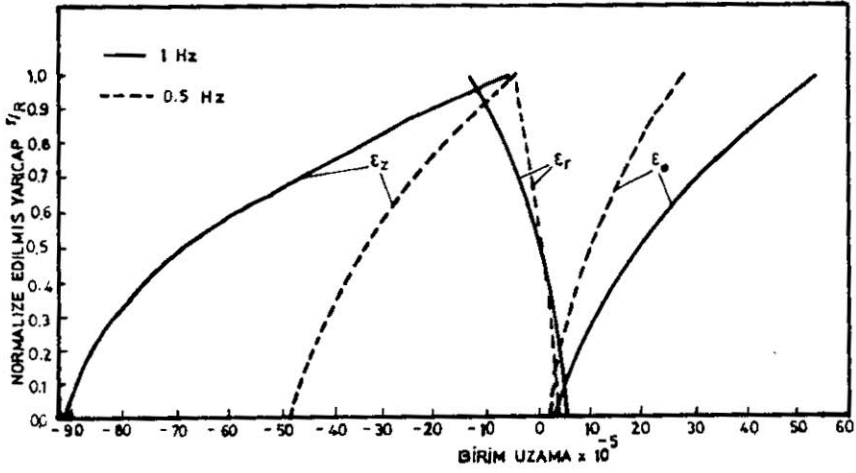
4.2- Birim Isıl Uzamalar:

Isıl gerilmelerin neticesi olarak laser rodunda ısı uzamaları meydana gelmektedir. Şekil-5 de radyal, eksenel ve yüzüye dik (tangant) yöndeki birim ısı uzamaları verilmiştir. Şekildende görüldüğü gibi radyal yöndeki ısı uzamaları, laser rodu yarı çapı boyunca pek değişim göstermemekle birlikte diğer yönlerdeki ısı uzamalara göre daha küçük değerlere sahiptir. Bu ise optik yol değişiminin küçük olacağını göstermektedir. Zira radyal yöndeki kırılma indeksi pek değişmemektedir. Maksimum ve minimum birim ısı uzama miktarı 4×10^{-5} ile -14×10^{-5} m/m civarındadır. Ancak radyal yöndeki maksimum değişim 1 Hz optik pompalama frekansında -14×10^{-5} m/m dir. Tangant yöndeki birim uzama rod merkezinde sıfıra yaklaşmakta ve laser rodu çevresinde maksimum olmaktadır ve birim uzama miktarı pozitifdir.

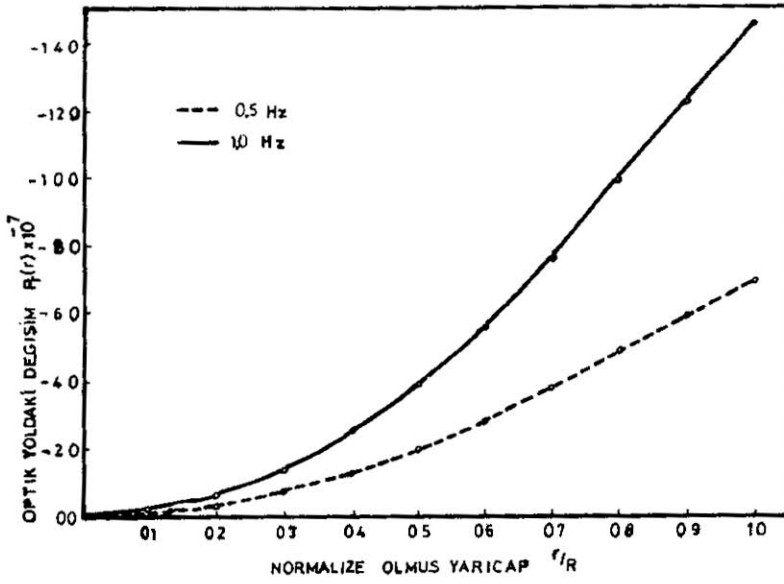
Eksenel yöndeki birim uzama miktarı laser rodu çevresinde maksimum ve laser rodu merkezinde minimumdur ve birim uzama negatiftir. Bu ise laser rodunun eksenel yönde çevreden merkeze doğru daralmaya çalıştığını göstermektedir.

4.3- Optik Yoldaki Değişim:

Laser rodunda meydana gelen optik yoldaki değişim, ısı uzamalarıyla çok yakın ilişkilidir. Bu şekil-6 da verilmiştir. Şekildende görüleceği gibi optik yoldaki değişim laser rodu merkezinde sıfıra yaklaşmakta fakat çevrede ise



Şekil-5: Laser rodundaki birim uzamalar



Şekil-6: Optik yolun radyal yöndeki değişimi

maksimum değerine erişmektedir. Çevredeki değeri 1 Hz optik pompalama frekansında 14×10^{-6} m civarındadır. Bu ise 1.06×10^{-6} m olan laser ışını dalga boyuna yakın bir değerdir. Böylece laser ışını, rod yarıçapı boyunca yaklaşık dalga boyu kadar bir dağılıma uğrayacaktır. Distorsiyon, rod yarı çapı boyunca homojen değil daha çok Gauss dağılımı gösterir.

5- SONUÇ

1- Nd⁺³ cam esaslı laser rodunun 0.5 ve 1 Hz optik pompalama frekansında sıcaklık artışlarından dolayı meydana gelen ısıl gerilmelerin emniyet gerilmelerinden daha küçük olduğu bulunmuştur. Radyal yöndeki ısıl gerilmelerin negatif ve pozitif değerlere sahip olması nedeniyle laser rodu çapı boyunca bir burulmanın meydana geldiği görülmüş ve bu gerilmelerin küçük olması nedeni ile burulmanın önemli bir sorun teşkil etmediği tesbit edilmiştir.

2- Laser rodu çapı boyunca ısıl uzamaların üniform olmaması nedeniyle yarıçap boyunca kırılma indekslerinde değişimler olmuştur. Bu ise optik yolda bir değişimin meydana gelmesinde neden olmuştur. Fakat bu optik yoldaki değişim, laser ışınının dalga boyu kadardır.

KAYNAKLAR

- 1- B.S. Yılbaş, "Heat Transfer Mechanisms Initiating the Laser Drilling of Metals", Ph.D thesis Mech. Eng. Dept. University of Birmingham 1982.
- 2- B.A. Bakewell, "Performance of Pulsed Laser Systems in Relation to Machining Mechanisms", Ph.D. thesis Mech. Eng. Dept. University of Birmingham 1973.
- 3- E. Snitzer, "Glass Lasers", Appl. Opt., 5, p.1487 1966.
- 4- C.G. Young, "Glass Lasers", Proc. IEEE, 57, p.1267 1969.
- 5- D. Ross, "Lasers-Light Amplifiers and Oscillators", Appl. Opt., 5, p. 1474 1966.
- 6- S. Timoshenko, J.N. Goodier, "Theory of Elasticity", Mcgraw Hill, N.Y. 1951.

S E M B O L L E R

E	: Young modülü	kgf/m ²
α	: Isıl genişleme katsayısı	m/°C
ν	: Poisson oranı	
R	: Laser rodu yarı çapı	m
T	: Sıcaklık	°K
σ_r	: Laser rodundaki yarı çap değişimi	m
σ_r	: Laser rodu, radyal yöndeki ısıl gerilme	psi
σ_θ	: Laser rodu, aksenel yöndeki ısıl gerilme	psi
σ_z	: Laser rodu teğetsel yöndeki ısıl gerilme	psi
σ_{zr}	: Laser rodu radyal yöndeki ısıl gerilmenin aksenel yöndeki dağılımı	psi
σ_{z1}	: Laser rodu serbest uçlarındaki ısıl gerilme	psi
P	: Laser rodundaki distorsiyon sonrası toplam optik yol uzunluğu	m
P_o	: Optik yol uzunluğu	m
n	: Laser rodu kırılma indeksi	
L	: Laser rodu uzunluğu	m
ΔP_o	: Optik yol uzunluğundaki değişim	m
Δn	: Laser rodu kırılma indeksindeki değişim	
$P_r(r)$: Radyal yöndeki kırılma indeksi değişiminden dolayı optik yoldaki değişim	m
$P_\theta(r)$: Teğetsel yöndeki kırılma indeksi değişiminden dolayı optik yoldaki değişim	m
n	: Kırılma indeksine bağlı ısıl uzama katsayısı	m/°C

- p/v : Kırılma indeksine bağlı fiziki bir katsayı (optik gerilme katsayısı)
- q/v : Kırılma indeksine bağlı fiziki bir katsayı (optik gerilme katsayısı)
- ϵ_r : Laser rodunun radyal yöndeki birim uzaması
- ϵ_θ : Laser rodunun aksenal yöndeki birim uzaması
- ϵ_z : Laser rodunun teğetsel yöndeki birim uzaması