



ABSORÇÃO LASER DE Nd:YAG PELO FERRO FUNDIDO CINZENTO

Edmara M. R. da Silva¹, Waldemar A. Monteiro², Wagner de Rossi³, Milton S. F. de Lima⁴

^{1, 2, 3}Departamento de Engenharia de Materiais (MMM),
Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN-CNEN/SP), São Paulo/SP, Brasil, 05422-970,
Fone: (0XX11)8169391, Fax (0XX11) 8169370

⁴Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, CTML C.P. 110 CH-1015, Lausanne, Switzerland
Fone ++41-21-693-4913, Fax ++41-21-693-4916

emsilva@net.ipen.br, wamonte@net.ipen.br, wderossi@net.ipen.br, milton.lima@epfl.ch

Resumo - Os lasers de alta potência estão sendo cada vez mais utilizados nas indústrias para tratamento térmico superficial, soldagem e usinagem de materiais. Vários parâmetros em relação ao material e ao laser estão envolvidos no processamento, mas a fração relativa da energia do feixe incidente absorvido pelo material é a variável de maior importância. A energia fornecida por essa fonte de calor é absorvida pelo metal e transferida da superfície para o seu interior com auxílio da condução térmica. Considerando que a absorção da radiação infravermelha depende fortemente da interação com os elétrons livres e que a absorptividade de um feixe laser de comprimento de onda definido pode ser calculada pelo conhecimento da resistividade elétrica do material, determinou-se, neste trabalho, a absorção média do feixe laser pelo ferro fundido cinzento por meio de ensaios calorimétricos, e por meio de uma relação empírica entre absorptividade e resistividade elétrica do substrato. Verificou-se que cerca de 32% da energia incidente sobre a superfície da amostra de ferro fundido foi absorvida em forma de calor, independentemente do número de pulsos aplicados. Esse resultado está de acordo com o valor estimado segundo a resistividade elétrica do material.

Palavras-chave: Absorção, Laser, Ferro Fundido Cinzento, Calorimetria.

Abstract - High power laser systems have been used more intensively in industries for surface treatment, welding and cutting of materials. Several parameters related to the material and to the laser are involved during the processing. However, the relative fraction of the absorbed beam by the material is the most important variable. This energy is absorbed by the metal surface, and transferred by thermal conduction to the bulk. Infrared radiation absorption depends on the interaction with the free electrons. The absorptivity of a laser beam with a defined wavelength can be evaluated by the knowledge of the electric resistivity of the material. In this work, the mean absorption of the laser beam for the gray cast iron was obtained by means of calorimetric methods and by an empiric relationship between absorptivity and electric resistivity of the substrate. It was verified that about 32% of the incident energy on the surface was absorbed, independently of the number of pulses applied. This result is in good agreement with the estimated value from the material electric resistivity.

Key-words: Absorption, Laser, Gray Cast Iron, Calorimetry

INTRODUÇÃO

Os lasers têm dispensado grande atenção de cientistas e engenheiros por possuírem largo potencial de aplicação devido a características singulares, como pequena zona afetada termicamente e as altas taxas de resfriamento. Lasers de alta potência, como CO₂ e Nd:YAG, são agora estabelecidos como ferramentas industriais para corte, soldagem e tratamentos superficiais de uma vasta gama de materiais [1].

O processamento a laser depende de um conjunto de variáveis tais como: comprimento de onda, modo de operação (contínuo e pulsado), intensidade do laser, microestrutura e geometria e propriedades físicas da peça e, em especial, da fração relativa do feixe incidente absorvida pelo material [2, 3].

A energia absorvida pelo metal é transformada muito rapidamente em vibrações de rede, isto é, em calor e transferida da superfície para o interior da peça através de condução térmica. Durante o processamento a laser, a temperatura da superfície pode variar largamente numa faixa onde fusão e evaporação podem ocorrer. Assim, a determinação dos mecanismos de transferência de calor no processamento a laser requerem o conhecimento da absorção do feixe .

Diferentes métodos têm sido desenvolvidos para uma determinação experimental usando elipsometria [4] ou calorimetria [5]. O método de medida da absorção por calorimetria consiste em registrar a curva de temperatura em função do tempo, obtida quando uma peça (suficientemente pequena para ser considerada isotérmica) é aquecida através de um pulso laser. Esse procedimento é possível devido a alta condutibilidade térmica dos metais. Assim, pouco após o laser ter passado sobre a amostra, a energia absorvida na zona influenciada pelo laser é distribuída para o volume do material, a fim de uniformizar a temperatura no espécimen. Se existe uma transformação de fase envolvida, por exemplo, a fusão, uma parte da energia absorvida é perdida em forma de calor latente.

Aproximações teóricas, como o modelo semi-empírico de Bramson [6], onde a absorção é inversamente proporcional à resistividade do substrato, também podem ser usadas para prever a absorção no estado sólido sem transição de fase

Considerando que a absorção da radiação infravermelha depende fortemente da interação com os elétrons livres e que a absorção do feixe laser pode ser calculada pelo conhecimento da resistividade elétrica do material, determinou-se, neste trabalho, a absorção do feixe laser pelo ferro fundido cinzento por meio de ensaios calorimétricos e por meio de uma relação empírica entre absorção e resistividade elétrica do substrato.

METODOLOGIA

Os experimentos de calorimetria foram realizados em amostras de ferro fundido cinzento cuja composição química está contida na tabela 1.

Tabela 1. Composição química do ferro fundido cinzento.

Elemento (% em peso)						
C	Si	P	Mn	Cu	Cr	Fe
3,45	2,4	0,65	0,75	0,66	0,38	Restante

Para reproduzir a mesma rugosidade em todas as amostras, a superfície foi lixada com papel de SiC, granulometria 1000-mesh, e limpada ultrasonicamente em etanol puro. A rugosidade medida foi de aproximadamente $1\mu\text{m Ra}$ (rugosidade máxima). O máximo valor de absorção é observado quando a rugosidade da superfície é da ordem do comprimento de onda do laser [7]

Nestes ensaios, utilizou-se um laser de Nd:YAG ($\lambda = 1,06\mu\text{m}$) operando em modo pulsado. Os parâmetros do processo estão apresentados na tabela 2. Nessas condições, conseguiu-se concentrar maior quantidade de energia na superfície sem formação de fase líquida ou plasma.

Tabela 2. Parâmetros do processamento a laser

Parâmetros	Valor
Energia de pulso [J]	4,55
Diâmetro do feixe [mm]	0,74
Taxa de repetição na amostra [Hz]	1,2
Largura temporal do pulso [ms]	10

As amostras ($5 \times 5 \times 0,5\text{mm}$) foram isoladas termicamente de forma que somente uma superfície ficasse exposta ao ambiente. O registro da temperatura foi realizado por um termopar tipo-K de 0,5 mm de diâmetro, fixado à superfície oposta àquela a ser tratada, conforme ilustrado na figura 1. A variação de temperatura foi armazenada por um sistema composto por um amplificador, um lock-in e um computador.

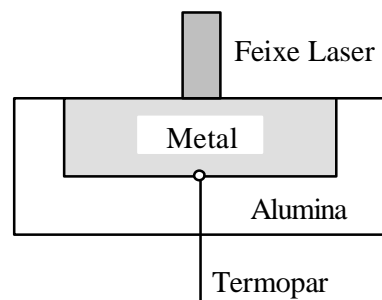


Figura 1. Dispositivo para medição da energia laser absorvida por uma amostra.

O aparato é considerado como um calorímetro, e a absorção média $\bar{\beta}$ é calculada pela equação a seguir:

$$\bar{\beta} = \sum_i \frac{m \times c_p^{T_{i(\max)}} \times (T_{i(\max)} - T_i)}{E_i} \quad (1)$$

onde m é a massa da amostra em g, $c_p^{T_{i(\max)}}$ é o calor específico em J/kg.K, $T_{i(\max)}$ é a temperatura máxima, em K, atingida pela amostra após aplicação de “i” pulsos ($1 \leq i \leq 5$), T_i é a temperatura do substrato antes da aplicação do pulso “i” e E_i é a energia em J fornecida por um pulso “i”.

Para os cálculos de $\bar{\beta}$, o valor do $c_p^{T_{i(\max)}}$ em função da temperatura, pode ser assim obtido na base de dados Thermocalc [8]:

$$c_p^{T_{i(\max)}} = 650,06 - 0,21014 \times T_{i(\max)} \quad (2)$$

A resistividade elétrica de um material varia com a temperatura. Desta forma, a absorptividade de um material também pode ser estimada através dessa propriedade, de acordo com um relação empírica proposta por Bramson [6]:

$$\beta = 0,365 \times \sqrt{\frac{\rho}{\lambda}} - 0,0667 \times \frac{\rho}{\lambda} + 0,006 \times \sqrt[3]{\frac{\rho}{\lambda}} \quad (3)$$

onde β é a absorptividade do metal, ρ é a resistividade elétrica do substrato em $\Omega.m$ e λ é o comprimento de onda do feixe laser em m.

Mediu-se a resistência elétrica através de um microohmímetro digital (MPK-250) que utiliza o sistema de ponte de Kelvin, indicada para medir baixos valores de resistência.

A variação da resistividade em função da temperatura pode ser equacionada como a seguir [9]:

$$\rho_T = \rho_0 \times [1 + \alpha \times \Delta T] \quad (4)$$

onde ρ_T é a resistividade elétrica do substrato a uma temperatura T, ρ_0 é a resistividade elétrica na temperatura de referência, α é o coeficiente de temperatura do material condutor [10], e ΔT é o intervalo entre a temperatura de referência e a temperatura do substrato.

RESULTADOS

Na Figura 2, apresenta-se o aumento de temperatura com a aplicação de 5 pulsos. A cada pulso, existe um resfriamento devido ao intervalo de pulsação, que por ser muito pequeno não influencia no processo de absorção laser.

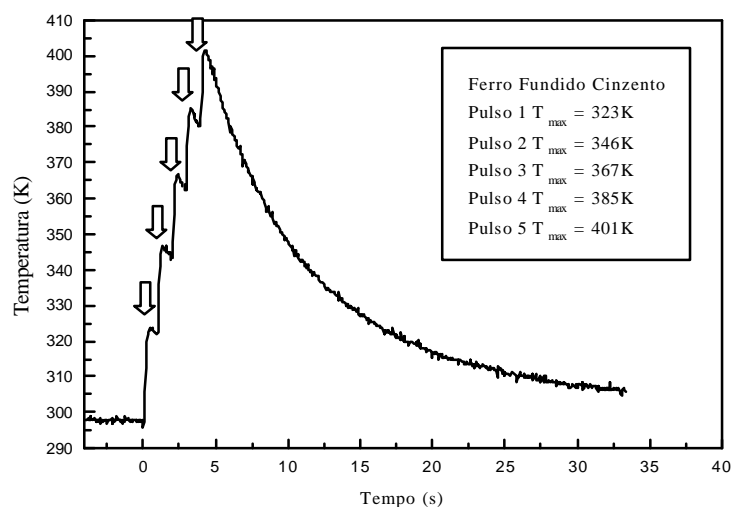


Figura 2. Curva experimental temperatura versus tempo obtida após aplicação de cinco pulsos (setas).

Verificou-se que após a aplicação de 5 pulsos, a temperatura máxima atingida foi suficiente para a transformação de fase. Além disso, com a aplicação de mais pulsos, a temperatura máxima variou muito pouco, podendo-se fazer a extrapolação da curva experimental. O valor de $\bar{\beta}$ medido após a aplicação de 1 a 5 pulsos foi $32,3 \pm 2,0\%$. Os dados estão ilustrados na figura 3. Observa-se uma pequena diminuição da absorção à medida que o número de pulsos e a temperatura aumentam. Isso porque, de acordo com a equação 1, a absorção média é inversamente proporcional à energia fornecida por cada pulso.

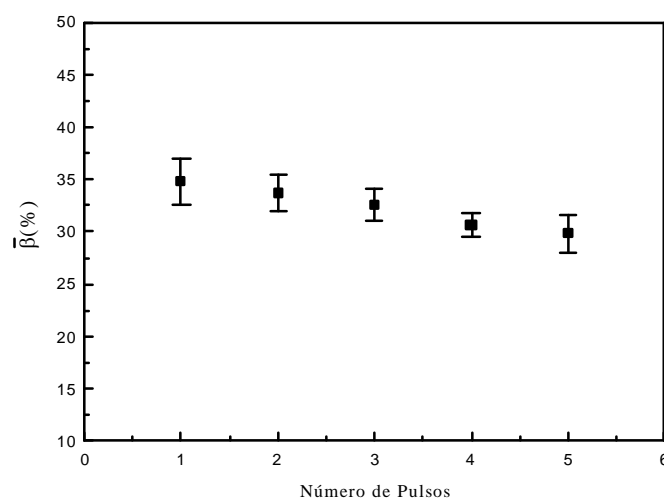


Figura 3. Absorção média do laser de Nd:YAG pelo ferro fundido cinzento durante aplicação de “i” pulsos ($1 \leq i \leq 5$).

O valor de resistividade elétrica do substrato encontrado à temperatura ambiente foi $10,2 \times 10^{-7} \Omega \cdot m$. Tal valor foi utilizado como referência nos cálculos dos valores de resistividade até 401K. Considerando os valores de resistividade encontrados e o comprimento de onda do laser, o valor médio de β calculado pela equação de Bramson foi $33,9 \pm 2,7\%$. Esse valor está de acordo com o obtido por calorimetria.

CONCLUSÃO

A absorção do laser de Nd:YAG pelo ferro fundido cinzento obtida por método de calorimetria está de acordo com o valor teórico estimado através da resistividade elétrica do metal. A absorção média do ferro fundido encontrada foi 32% da energia incidente.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à COFAP por fornecer o ferro fundido, à Dra. D. M. Zzell e ao M.Sc. L. Bachmann pelo apoio na parte experimental e ao CNPq pelo suporte financeiro.

REFERÊNCIAS

- [1] MAZUMDER, J. Laser heat treatment: the state of the art. *J. Met.*, v.35, p.18, May, 1983.
- [2] KOVALENCO, V.S.; VERKHOTUROV, A.D.; GOLOVKO, L.F.; PODCHERNYAEVA, I.A. Laser surface hardening and electric-park surface hardening. *J. Sov. Laser Res.*, v.9, n.1, p.46-58, 1988.
- [3] PROKHOVROV, A.M.; KONOV, V.I.; URSU, I.; MIKÁILESCU, I.N. *Laser heating of metals*. New York: Adam Hilger, 1990, p.29-34.
- [4] BRÜCKNER, M.; SCHÄGFER, J.H.; UHLENBUSCH, J. Ellipsometric measurement of the optical constants of solid and molten aluminum and copper at $\lambda = 10.6\mu\text{m}$. *J. Appl. Phys.*, v.66, n.3, p.1326-1332, Aug., 1989.
- [5] FRENK, A.; HOADLEY, A.F.A.; WAGNIERE, J.D. In situ technique for measurement the absorption during laser surface remelting. *Metall. Trans.*, v.22B, p.1239-141, 1989.
- [6] BRAMSON, M. Infrared radiation: a handbook for applications. New York: Plenum Press, 1968, p.127.
- [7] MAGNIN, P. Traitment de surface par laser: reveu critique de da littérature”, Documento interno, Centre de traitement des Matériaux par laser, 1993.
- [8] THERMOCALC Thermodynamic Data Base, *J. Royal Institute of Technology*, Sweden, 1994.
- [9] SMITHELLS METALS REFERENCE HANDBOOK, 6.ed., edited by E.A. Brandes, England, 1983, p.19-1.
- [10] SCHMIDT, W. Tabelas de Eletricidade, São Paulo: Acropole Editora, 1972, p.90.