

ОПТИМАЛЬНЫЙ НАГРЕВ МЕТАЛЛОВ В ОКИСЛИТЕЛЬНОЙ СРЕДЕ  
НЕПРЕРЫВНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ  $\text{CO}_2$ -ЛАЗЕРА

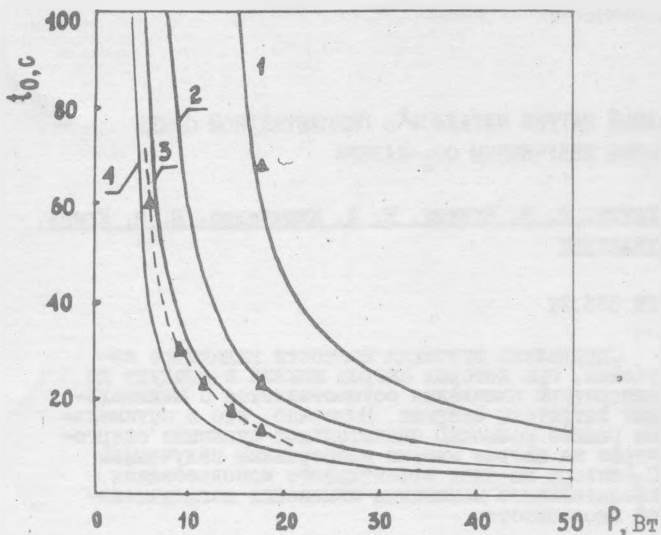
М. И. Арзуов, Ф. В. Буякин, Н. А. Кириченко, В. И. Конов,  
Б. С. Лукьянчук

УДК 535.21

Определены значения мощности падающего излучения, при которых нагрев мишени в воздухе до температуры плавления осуществляется с минимальными затратами энергии. Показано, что в оптимальном режиме возможно значительное снижение энергозатрат на нагрев мишени непрерывным излучением  $\text{CO}_2$ -лазера за счет эффективного использования окислительного механизма изменения поглощательной способности.

В ряде задач физики и технологии требуется выбор оптимальных параметров излучения (см., например, /1/), при которых нагрев вещества осуществляется с минимальными энергозатратами, или за минимальное время. Оптимизация энергозатрат на нагрев материала с постоянной поглощательной способностью исследована в /2/. Однако при облучении металлов в окислительной среде их поглощательная способность может сильно увеличиваться в процессе нагрева из-за роста окисных пленок /3-5/. Целью данной работы является определение параметров излучения непрерывного  $\text{CO}_2$ -лазера, при которых нагрев металлической пластины в воздухе до заданной температуры осуществляется с минимальными энергозатратами.

На рис. 1 приведена экспериментальная зависимость времени  $t_0$ , необходимого для нагрева медной мишени массой  $m = 50$  мг в воздухе до температуры плавления  $T = T_0$  от мощности излучения  $P$ . Мишени имели размер  $3 \times 3$  мм<sup>2</sup>, толщину  $\approx 1$  мм, что позволяло моделировать задачу о нагреве термически тонкой пластины /4/. Видно, что величина  $t_0$  убывает с ростом  $P$ . Нагрев термически тонкой пластины в окислительной атмосфере описывается системой уравнений /5/:



Р и с. 1. Зависимости времени достижения температуры плавления  $t_0$  от мощности падающего излучения  $P$  при различных значениях начальной поглотительной способности: 1 -  $A_0 = 2\%$ , 2 -  $A_0 = 4\%$ , 3 -  $A_0 = 6\%$ , 4 -  $A_0 = 10\%$ . Пунктир - экспериментальные данные при  $A_0 = 10\%$ . При  $P = 17,5$  Вт приведены две экспериментальные точки для  $A_0 = 2\%$  и  $A_0 = 4\%$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{P}{mc_0} [\Delta(x) - Q(T)]; \quad \frac{dx}{dt} = \frac{d}{k} \exp\left(-\frac{T}{T_D}\right); \quad Q(T) = \frac{P_1(T)}{P}; \quad (I)$$

$$P_1(T) = S [\eta(T - T_1) + \sigma \cdot \sigma_0 (T^4 - T_1^4)],$$

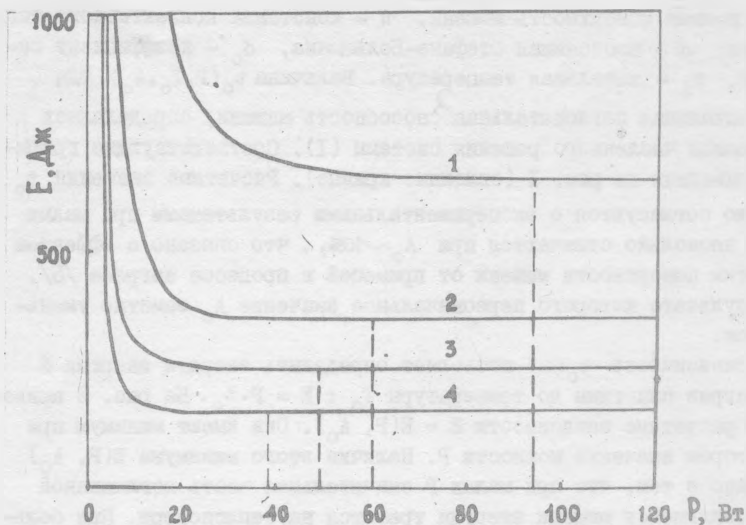
где  $c_0$  - удельная теплоемкость металла,  $x$  - толщина окисной пленки,  $\Delta(x)$  - поглотительная способность слоистой системы окисел + металл,  $d$  и  $T_D$  - константы параболического закона окисления,  $P_1(T)$  - суммарная мощность излучательных и конвективных потерь,

$S$  - полная поверхность мишени,  $\eta$  - константа конвективного теплообмена,  $\sigma$  - постоянная Стефана-Больцмана,  $\delta_0$  - коэффициент сепарации,  $T_1$  - начальная температура. Величина  $t_0(P, T_0, A_0)$ , где  $A_0$  - начальная поглотительная способность мишени, определялась с помощью численного решения системы (I). Соответствующие графики приведены на рис. 1 (сплошные кривые). Расчетные значения  $t_0$  хорошо согласуются с экспериментальными результатами при малых  $A_0$  и несколько отличаются при  $A_0 \sim 10\%$ , что связано с эффектом очистки поверхности мишени от примесей в процессе нагрева /5/, в результате которого первоначальное значение  $A_0$  заметно уменьшается.

Зависимость  $t_0(P)$  позволяет определить затраты энергии  $E$  на нагрев пластины до температуры  $T_0$ :  $E = P \cdot t_0$ . На рис. 2 приведены расчетные зависимости  $E = E(P, A_0)$ . Они имеют минимум при некотором значении мощности  $P$ . Наличие этого минимума  $E(P, A_0)$  связано с тем, что при малых  $P$  значительная часть поглощенной в окисляющейся мишени энергии тратится на теплопотери. При больших, для данных условий опыта, мощностях излучения окисная пленка не успевает заметно вырасти (как видно из (I)  $x \sim t_0^{1/2}$ ), так, что нагрев образца происходит при меньших значениях поглотительной способности  $A(x)$ . Таким образом, при  $P = P_1$  существует оптимум: достигается энергетически наиболее выгодное соотношение между ростом поглотительной способности образца за счет окисления и потерями на теплоотвод.

Полученные выше результаты численного счета можно качественно проиллюстрировать аналитически с помощью следующей простой модели. Учтем, что процесс нагрева мишеней происходит в две стадии: нагрев с малой поглотительной способностью  $A_0$  (порядка нескольких процентов) до момента  $t = t_a$  активации окислительных реакций, и нагрев с большой поглотительной способностью  $A(x)$  (порядка десятков процентов) после активации (рост поглотительной способности при окислении носит почти скачкообразный характер /4,5/). При таком подходе рассматриваемая задача сводится к задаче о минимизации энергии, необходимой для активации окислительной реакции.

В соответствии с результатами работы /5/ при малых  $A_0$  энергия активации  $E_a$  определяется как



Р и с. 2. Зависимости энергии, затраченной на нагрев мишени до температуры плавления, от мощности падающего излучения: 1 -  $A_0 = 2\%$ , 2 -  $A_0 = 4\%$ , 3 -  $A_0 = 6\%$ , 4 -  $A_0 = 10\%$ . Пунктиром отмечены точки минимума на кривых  $E(P)$ ;  $m = 50$  мг

$$E_a = P t_a = \frac{\pi T_0^3}{4\sigma b T_D} \frac{\exp(T_D/T_0)}{1 + T_D/2T_0} \left( 2 \frac{T_D}{T_0^2} \frac{dT}{dT} - \frac{dT_0^2}{dT^2} \right) \Big|_{T=T_0} \quad (2)$$

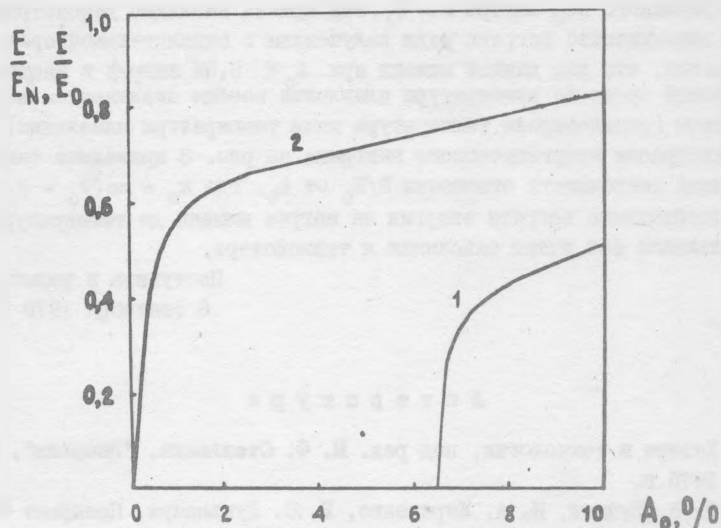
где  $b = (n^2 - 1)A_0 4\pi^2/\lambda^2$ ,  $n$  - показатель преломления оксида,  $\lambda$  - длина волны излучения, величина  $T_0$  определяется из уравнения  $PA_0 = F_1(T_0)$ . В случае, если существенны только конвективные теплопотери, из (2) получаем:

$$E_a = \frac{\eta S T_D}{b d} \Phi_c^2 \frac{\exp(1/\Phi_c)}{1 + 2\Phi_c}; \quad \Phi_c = \frac{T_c}{T_D} = \frac{1}{T_D} \left( \frac{PA_0}{\eta S} + T_H \right) \quad (3)$$

Из условия  $dE_a/dP = 0$  находим условия оптимума:

$$P_1 = \frac{\eta S}{A_0} \left( \frac{T_D}{2^{1/2}} + T_H \right); \quad E_{a \min} = \frac{\eta S T_D}{2 b d} \frac{\exp(2^{1/2})}{1 + 2^{1/2}} \quad (4)$$

Оценки сделанные по (3) и (4) находятся в хорошем качественном и неплохом количественном согласии с экспериментальными данными.



Р и с. 3. Величина энергетического выигрыша за счет окислительных реакций в зависимости от начальной поглощательной способности;  $E$  и  $E_N$  - затраты энергии на нагрев мишени при  $P = P_1$  до температуры плавления в окислительной и нейтральной среде соответственно;  $E_0$  - затраты энергии на нагрев мишени без учета окисления и теплопотерь: 1 -  $(E/E_N)$ , 2 -  $E/E_0$ .

Выше были рассмотрены оптимальные режимы нагрева металлической пластинки при ее окислении. Представляет также интерес оценить преимущества, которые дает с точки зрения скорости нагрева мишени лазерным излучением с заданной средней мощностью окислительная среда (воздух) по сравнению с нейтральной атмосферой, скажем с азотом или аргоном. В обоих случаях мощность тепловых потерь  $P_1(T)$  одинакова, однако в воздухе в процессе нагрева существенно увеличивается поглощательная способность образца. На рис. 3 приведена расчетная зависимость (кривая 1) от начальной поглощательной способности  $A_0$  отношения энергий  $E/E_N$ , необхо-

димых для нагрева медной мишени весом 50 мг до температуры плавления  $T_0$  соответственно в воздухе и азоте при мощности излучения непрерывного  $\text{CO}_2$ -лазера  $P = P_1$ . Эта кривая наглядно демонстрирует преимущество нагрева меди излучением в окислительной среде. Отметим, что для данной мишени при  $A_0 \leq 6,5\%$  нагрев в инертной газовой среде до температуры плавления вообще оказывается невозможным (стационарная температура ниже температуры плавления). Для иллюстрации энергетического выигрыша на рис. 3 приведена также кривая зависимости отношения  $E/E_0$  от  $A_0$ , где  $E_0 = mc(T_0 - T_1)/A_0$  - необходимые затраты энергии на нагрев мишени до температуры плавления без учета окисления и теплопотерь.

Поступила в редакцию  
6 сентября 1978 г.

#### Л и т е р а т у р а

1. Лазеры в технологии, под ред. М. Ф. Стельмаха, "Энергия", М., 1975 г.
2. Ф. В. Бункин, Н. А. Кириченко, Б. С. Лукьянчук, Препринт ФИАН № 146, М., 1978 г.
3. В. Л. Володькина, К. И. Крылов, М. Н. Либенсон, Физ. и хим. обработки материалов, № 5, 145 (1973).
4. М. И. Арзуов, В. И. Конов, В. В. Костин, С. М. Метев, А. С. Силенок, Н. И. Чаплиев, Препринт ФИАН № 152, М., 1977 г.
5. М. И. Арзуов, Ф. В. Бункин, Н. А. Кириченко, В. И. Конов, Б. С. Лукьянчук, Препринт ФИАН № 39, М., 1978 г.