

ОПТИМАЛЬНЫЙ НАГРЕВ МЕТАЛЛОВ В ОКИСЛИТЕЛЬНОЙ СРЕДЕ
НЕПРЕРЫВНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ CO_2 -ЛАЗЕРА

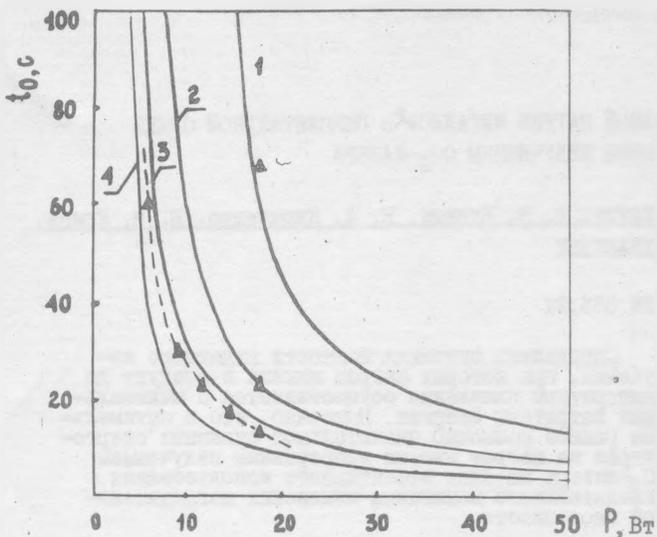
М. И. Арзуов, Ф. В. Булкин, Н. А. Кириченко, В. И. Конов,
Б. С. Лукьянчук

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 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 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 3×3 мм², толщину ≈ 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 $A_0 = 4\%$

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

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

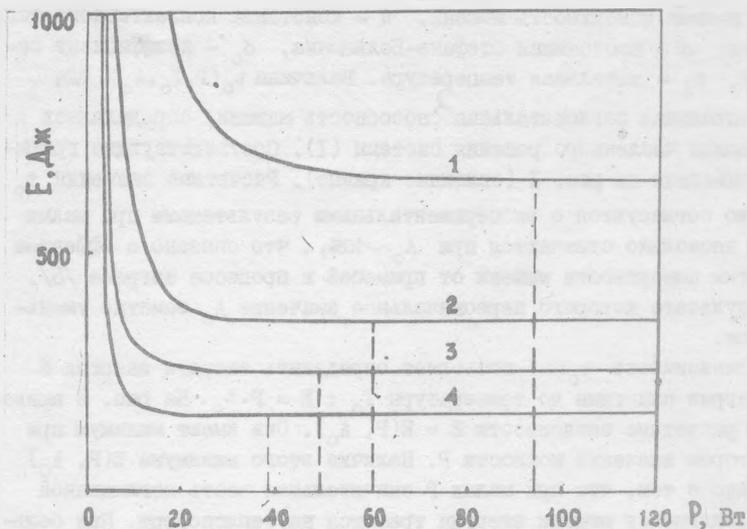
где c_0 - удельная теплоемкость металла, x - толщина окисной пленки, $\Delta(x)$ - поглотительная способность слоистой системы окисел + металл, d и T_D - константы параболического закона окисления, $P_1(T)$ - суммарная мощность излучательных и конвективных потерь,

S - полная поверхность мишени, η - константа конвективного теплообмена, σ - постоянная Стефана-Больцмана, δ_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

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

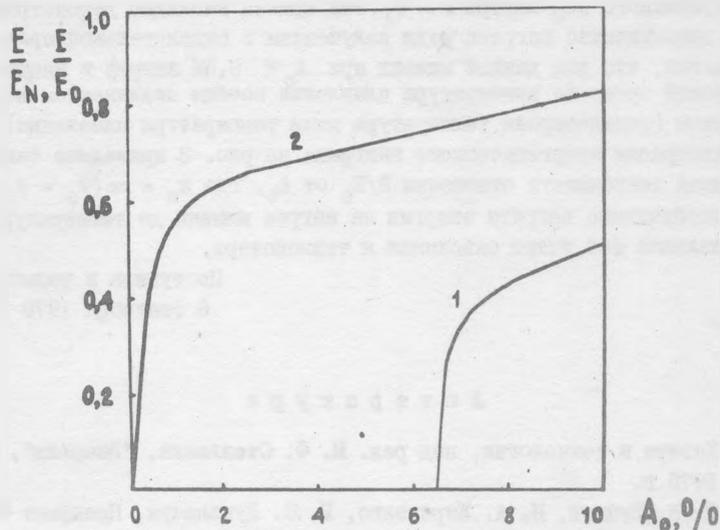
где $b = (n^2 - 1)A_0 4\pi^2/\lambda^2$, n - показатель преломления оксида, λ - длина волны излучения, величина T_0 определяется из уравнения $PA_0 = P_1(T_0)$. В случае, если существенны только конвективные теплопотери, из (2) получаем:

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

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 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 (стабионарная 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.