

05;07
©1995

РАЗМЕРНЫЙ ЭФФЕКТ И КРИТИЧЕСКИЕ СДВИГОВЫЕ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ЛОКАЛЬНОМ ИМПУЛЬСНОМ ЛАЗЕРНОМ ОБЛУЧЕНИИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

С.В.Винценц, С.Г.Дмитриев

При облучении поверхностей твердых тел серией коротких лазерных импульсов ($t \sim 0.1-1$ мкс) возможно возникновение неупругой деформации и разрушение поверхности задолго до плавления [1-3]. Пороговые интенсивности света $I \sim \omega$ при этом линейно зависят от радиуса луча ω в диапазоне $\omega \sim 10-100$ мкм (размерный эффект [1,4]) и регистрируются обычно с помощью микроскопа по видимому разрушению поверхности [1,5]. В настоящей работе будут исследованы критические деформации и механизм такого разрушения (на примере стальных — марка 40 и германиевых — n -тип, поверхность (111), $\rho \simeq 20-40$ Ом · см, образцов).

Углы наклона деформированной вследствие выделения тепла поверхности измерялись по углам отклонения зондирующего лазерного луча (подробнее см. [6]) с точностью $\Delta\varphi \sim 10^{-8}$ рад в различных точках r поверхности (r — расстояние от центра греющего луча) в различные моменты времени t . Зависимость интенсивности света в импульсе от r и t в настоящей работе аппроксимируется формулой [7,8]

$$I \simeq (E/\pi\omega^2) \exp(-r^2/\omega^2)(t/\tau^2) \exp(-t/\tau),$$

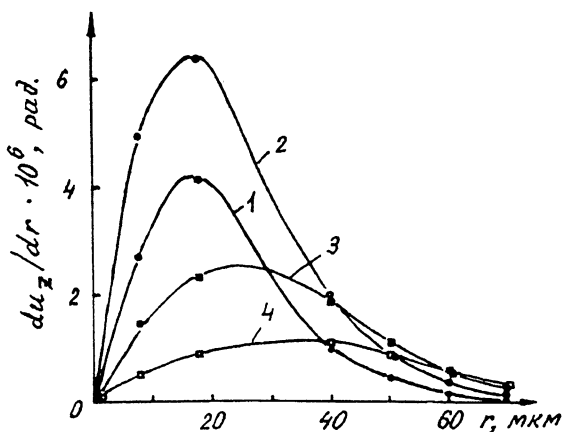


Рис. 1. Зависимости $u_{z,r}(r)$ для стального образца при $t = 1$ мкс (1), 2.4 мкс (2), 12 мкс (3), 25 мкс (4) и $2\omega \approx 50$ мкм, $E \approx 1.5 \cdot 10^{-7}$ Дж, $R \approx 0.6$.

где E — полная энергия импульса, а углы отклонения φ связаны очевидной формулой со смещением u_z поверхности по нормали [9]

$$\varphi/2 = du_z/dr = u_{z,r}.$$

Полученные из кинетик $\varphi(t)$ [6] зависимости $u_{z,r}(r)$ в различные моменты времени характеризуются наличием максимумов при $r \sim \omega$ (см. рис. 1). При этом максимальные (по t и r) значения $u_{z,r}$ линейно (и обратимо) зависели от W ($W = (I - R)E/\pi\omega^2$, коэффициент отражения света) вплоть до определяемых таким образом пороговых значений $W_{\text{п}}$, начиная с которых (при достаточном числе импульсов) поверхность разрушается, что регистрируется дополнительно резким (по W) уменьшением R [10]. Максимальные значения $u_{z,r}$ для пороговых величин $W_{\text{п}}$ и зависимости пороговой плотности энергии (падающей) от ω приведены на рис. 2 для обоих образцов. Кроме размерного эффекта ($W_{\text{п}} \sim \omega$) обращает на себя внимание отсутствие зависимости $u_{z,r}$ от ω .

Обычно наиболее опасны (по отношению к разрушению) сдвиговые деформации $u_{z,r}$ и напряжения σ_{rz} [11]. Естественно предположить поэтому, что разрушения связаны со сдвиговыми напряжениями на поверхности и что $\sigma_{rz} \sim u_{z,r}$, а величина $u_{r,z}$ мала в силу малости радиальных смещений [4]. К сожалению, это предположение несправедливо, так

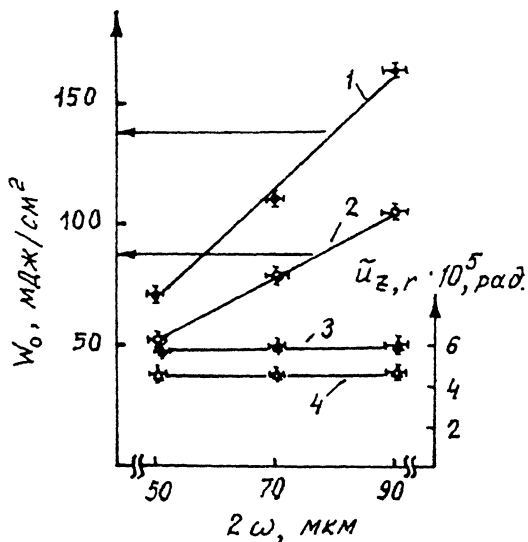


Рис. 2. Зависимости пороговой плотности энергии (падающей) $W_0 = E_0/\pi\omega^2$ (1, 2) и критических сдвиговых деформаций $\tilde{u}_{z,r}$ (3, 4) от размера греющего лазерного пятна 2ω для образцов из стали (1, 3) и германия (2, 4). В тексте $W_{II} = W_0/(1 - R)$.

как на свободной поверхности должно выполняться условие $\sigma_{rz} = 0$ (т. е. $u_{z,r} = -u_{r,z}$ при $z = 0$). Тем не менее σ_{rz} может достигать критических значений $\sigma_{кр}$ внутри тонкого разогретого слоя, и представленные результаты свидетельствуют в пользу этого предположения.

Действительно, в большинстве работ (в особенности для металлов) тепло выделяется на малых $\delta \sim 0.1$ мкм [12,13] расстояниях от поверхности, а характерные размеры разогретой области на временах облучения $t \sim \tau$ определяются тепловой длиной по z : $1 \simeq 2(\chi\tau)^{1/2} \gg \delta$ ($\chi \geq 0.1$ см²/с — температуропроводность, $\tau \sim 0.1-1$ мкс) и радиусом луча по r ($\omega \gg 1$). В этой области приращение температуры по порядку величины $\Delta T \sim W/\rho C l$ (C — удельная теплоемкость, ρ — плотность).

Обычно характерные времена распространения смещений $\sim \omega/v \ll \tau$ ($v \sim 10^5$ см/с — скорость звука) значительно меньше времени измерений, так что деформации можно считать квазистатическими. В таких (квазистатических) условиях термоупругие (т. е. индуцируемые тепловым расширением) деформации описываются известным уравнени-

$$(I - 2\nu)\Delta u + \text{grad div } \mathbf{u} = 2(1 + \nu)\alpha_T \text{grad } T, \quad (1)$$

где ν — коэффициент Пуассона, α_T — коэффициент линейного расширения, \mathbf{u} — вектор смещения.

Естественно предположить, что характерные длины изменений смещений в рассматриваемом слое ~ 1 (по z) и ω (по r). Тогда анализ (1) дает для средних в слое значений u_z и δ_{zr} соотношение (по порядку величины)

$$u_z \sim \alpha_T W / (C\rho), \quad \sigma_{zr} \sim (G\alpha_T / C\rho)(W/\omega) = \sigma_1, \quad (2)$$

где G — модуль сдвига. С другой стороны, можно оценить $\sigma_{кр}$ (в слое) с помощью измеренных (максимальных по t, r) величин $u_{z,r}(z=0) = \tilde{u}_{z,r}$ при W_n :

$$\sigma_{zr} \sim G\tilde{u}_{z,r} = \sigma_2. \quad (3)$$

Оценки по этим формулам вблизи порогов разрушения для стали (германия) при [10]: $G = 8.4 \cdot 10^{10}$ (4.1×10^{10}) Н/м², $\alpha_T = 1.1 \cdot 10^{-5}$ ($5.9 \cdot 10^{-6}$) град⁻¹, $R = 0.6(0.45)$, $C = 0.46(0.34)$ Дж·град, $\rho = 7.8(5.3)$ г/см³, $W_n(\omega = 35 \text{ мкм}) = 4.7 \cdot 10^{-2}$ ($4.3 \cdot 10^{-2}$) Дж/см², $\tilde{u}_{z,r} = 6.0 \cdot 10^{-5}$ ($4/7 \cdot 10^{-5}$) рад дают соответственно $\sigma_1 = 3.5 \cdot 10^6$ ($1.6 \cdot 10^6$) Н/м²; $\sigma_2 = 5.0 \times 10^6$ ($1.9 \cdot 10^6$) Н/м². Близость этих величин подтверждает справедливость рассуждений и дает возможность оценок $\sigma_{кр}$ по измеряемой величине сдвиговых деформаций. Полученные результаты согласуются с существующими в литературе представлениями о порядках реальных величин $\sigma_{кр}$ для металлов [11,16].

Размерный эффект теперь следует из (2). Действительно, для достижения критического значения σ_{zr} при различных ω требуется линейная зависимость W_n от ω (заметим, что такая зависимость связана именно со сдвиговой компонентой тензора напряжений). Этот вывод подтверждается также и отсутствием зависимости критических деформаций $\tilde{u}_{z,r}$ (а значит, и $\sigma_{кр}$) от ω (см. рис. 2 и формулу (3)).

В работе представлены результаты исследований радикальных зависимостей поверхностных сдвиговых деформаций (см. рис. 1, 2), возникающих при нагреве поверхностей стали и германия лазерным лучом диаметром ~ 10 – 100 мкм и длительностью импульсов ~ 1 мкс. Пороговые плотности энергии, соответствующие появлению неупругих деформаций, необратимо развивающихся под действием серии импульсов, линейно зависят от радиуса луча — размерный

эффект. Отмечено, что этот эффект может быть связан с достижением сдвиговой компонентой тензора напряжений критических значений внутри тонкого разогретого слоя (формула (2)) толщиной порядка нескольких мкм, хотя на самой поверхности эта величина должна зануляться.

Работа выполнена при финансовой поддержке Международного научного фонда, Российского фонда фундаментальных исследований и правительства РФ (единый грант № N KO 300).

Список литературы

- [1] *Lee C.S., Koumvakalis N., Bass M.* // Appl. Phys. Lett. 1982. V. 41. N 7. P. 625-627.
- [2] *Апполонов В.В., Барчуков А.И., Карлов Н.В., Проторов А.М., Шефтер Э.М.* // Квантовая электроника. 1975. Т. 2. N 2. С. 380-390.
- [3] *Борисенко В.Е., Юдин С.Г.* // Заруб. электр. техн. 1989. Т. 1. С. 67-82.
- [4] *Lee C.S., Koumvakalis N., Bass M.* // J. Appl. Phys. 1983. V. 54. N 10. P. 5727-5731.
- [5] *Young J., Becker M.F., Walser R.M.* // J. Opt. Soc. Am. 1988. V. 5. N 3. P. 648-659.
- [6] *Винценц С.В.* // Поверхность. 1991. № 7. С. 155-157.
- [7] *Рэди Дж.* Действие мощного лазерного излучения. М.: Мир, 1974. 468 с.
- [8] *McDonald F.A. et al.* // IEEE Ultrason. Symp. 1986. P. 403-406.
- [9] *Olmstead M.A., Amer N.M., Kohn S., Fournier D., Voccaro A.C.* // Appl. Phys. A. 1983. V. 32. P. 141-154.
- [10] *Барсков А.Г., Винценц С.В.* // ФТТ. 1994. Т. 36. № 9. С. 2590-2598.
- [11] *Фелтам П.* Деформация и прочность материалов. М.: Металлургия, 1968. 119 с.
- [12] *Анисимов С.И., Имас Я.А., Романов Г.С., Ходыко Ю.В.* Действие излучения большой мощности на металлы. М.: Наука, 1970. 272 с.
- [13] *Corcum P.V., Brunel F., Sherman N.K. et al.* // Phys. Rev. Lett. 1988. V. 61. N 25. P. 2886-2889.
- [14] *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* // Теория упругости. М.: Наука, 1987. 246 с.
- [15] *Новацкий В.* Вопросы термоупругости. М.: Изд-во АН СССР, 1962. 364 с.
- [16] *Никаноров С.А., Кардашев Б.К.* Упругость и дислокационная неупругость кристаллов. М.: Наука, 1985. 253 с.

Институт радиотехники
и электроники РАН
Фрязино

Поступило в Редакцию
19 мая 1995 г.