

Акустический институт
им. Н. Н. Андреева
АН СССР, Москва

Поступило в Редакцию
6 июня 1988 г.

Письма в ЖТФ, том 14, вып. 17 12 сентября 1988 г.

ОБРАТИМЫЕ И НЕОБРАТИМЫЕ ПРОЦЕССЫ НА ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛОВ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ НАГРЕВЕ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Р. А. Л и у к о н е н, А. М. Т р о ф и м е н к о

В сообщении приведены результаты экспериментального исследования интегральной (за импульс) поглощательной способности металлической поверхности в связи с упругопластической деформацией, возникающей в ходе поглощения импульсного излучения. Измерение поглощательной способности проводилось калориметрическим методом [1]. Состояние поверхности образца, как во время импульса, так и после него, контролировалось теневым методом (нож Фуко, экспозиция 1.5 мкс), а изменения в процессе деформирования — оптоакустическим. Учитывая, что величина акустического сигнала определяется интенсивностью воздействия (вводимой энергией) и упругими свойствами вещества, переход в область пластической деформации, где механические напряжения нелинейно связаны с деформацией, отражается на характере изменения акустического сигнала. Обычно отклонение от линейности при оптоакустических измерениях приписывается началу оплавления (например, в [2]), хотя контроль поверхности при этом, как правило, не проводился. Однако, как показали проведенные нами эксперименты, первое отклонение от линейности (при измерениях с относительной погрешностью 2%) начинается задолго до достижения температуры плавления (не выше 100 °С) и совпадает с появлением пластической деформации.

В качестве испытуемых образцов были использованы медные диски диаметром 20 мм и толщиной 10 мм, отполированные по оптическому классу. К тыльной стороне образца приклеивался либо датчик температуры для измерения поглощенной энергии за весь импульс (поглощательная способность равна отношению поглощенной энергии к падающей), либо на акустическом контакте пьезоэлектрический преобразователь на основе ЦТС-19. В экспериментах использовался ЭИ СО₂-лазер с длительностью импульса по полувысоте 17–20 мкс, по основанию до 24 мкс. Диаметр пятна фокусировки составлял 2.5 мм. Неравномерность плотности энергии в пятне была не более 15 %. Теневая съемка

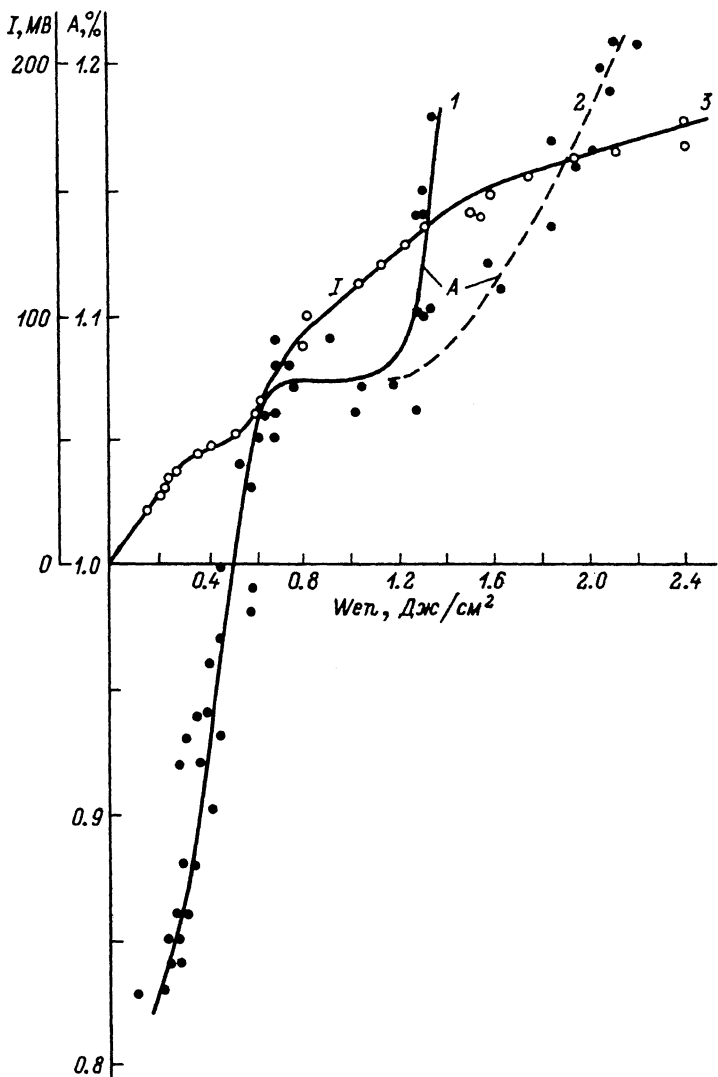


Рис. 1. Зависимость интегральной поглощательной способности - A (кривые 1 и 2) и амплитуды акустического сигнала (кривая 3) от плотности энергии, поглощенной поверхностью образца за импульс W_{en} .

проводилась под углом 45° к поверхности, поэтому на фотографиях область взаимодействия имеет вид эллипса. Энергия в импульсе, в ходе эксперимента, поднималась не хаотически, а постепенно.

Экспериментальные результаты приведены на рис. 1 и фотографиях поверхности (рис. 2). Полученные данные целесообразно было представить в зависимости от плотности поглощенной энергии. Во-первых, это позволило учесть температурную зависимость акустического сигнала, т. е. его величина в линейной области пропорциональна поглощенной энергии [2, 3] и, во-вторых, определить пороги качественных изменений процессов взаимодействия независимо от начального поглощения образцов. Это подтвердили эксперименты на образцах с различным состоянием поверхности. В частности, при недостаточной очистке, если не наступало пробоя, пороги возникновения остаточной деформации определялись именно плотностью поглощенной энергии и не отличались от чистой, хотя плотность падающей энергии была различна. Анализ экспериментальных кривых, проведенный в связи с упругопластическими характеристиками материала [4], показал, что на первой стадии при повышении импульсной плотности поглощенной энергии до $0.35-0.4$ Дж/см², механические напряжения, возникающие в материале вследствие импульсного нагрева, не превышают предела упругости. При этом акустический сигнал растет линейно, а поглощательная способность, как показывает расчет с учетом формы импульса, изменяется линейно с температурой поверхности [5]. Деформация в ходе взаимодействия имеет вид плоского „плато“ с ненарушенной поверхностью, приподнятое над общей плоскостью образца. После импульса поверхность полностью восстанавливает свою форму. Следующая стадия характерна тем, что в результате термодформации в материале возникают механические напряжения, превышающие предел упругости, и в наиболее напряженных структурных звеньях начинается накопление необратимых изменений, что микроскопически проявляется в нарушении свободной поверхности после снятия нагрузки (рис. 2, г). Пластическая деформация вызывает частичную „разгрузку“ во время импульса, момент возникновения которой с ростом интенсивности в импульсе смещается к его началу. Это, с одной стороны, является причиной перегиба на кривой акустического сигнала и появления остаточных деформаций, которые с повышением плотности поглощенной энергии до 0.8 Дж/см² охватывают всю поверхность взаимодействия (рис. 2, а). С другой стороны, на кривой поглощательной способности появляется перегиб, постепенно переходящий на третьем этапе в слабоменяющуюся величину. Перегиб на кривой акустического отклика показывает, что характер процессов на поверхности изменился, а рост амплитуды микро-рельефа свидетельствует об увеличении массы материала вовлекаемого в деформацию, т. е. процесс распространяется вглубь. Очередная особенность в развитии процессов появляется в об-

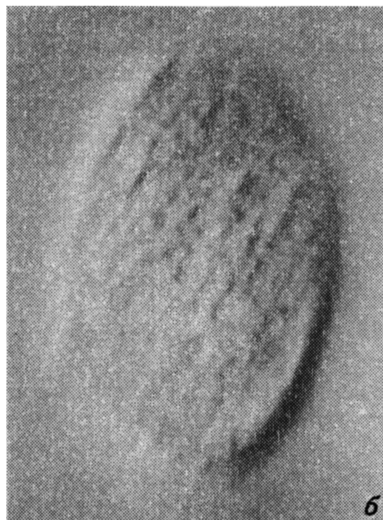
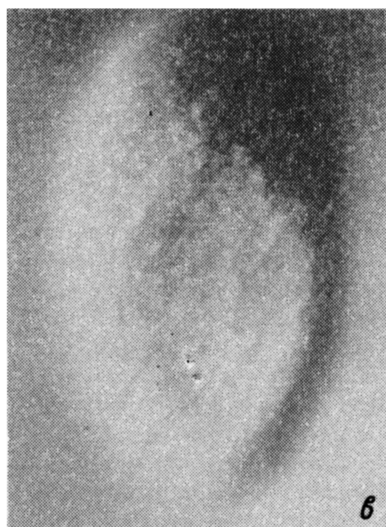
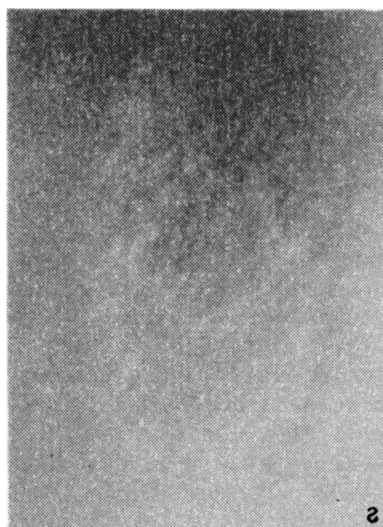
*a**б**в**г*

Рис. 2. Теневые фотографии деформируемой области на 20-й мкс (а, б, в) взаимодействия для плотности поглощенной энергии 0.7, 1.3, 1.5 Дж/см² соответственно и остаточная деформация поверхности (г).

ласти $1.3-1.4 \text{ Дж/см}^2$, когда пластической деформацией материал охвачен уже на всю характерную глубину прогрева за время импульса. Возобновляется рост поглощательной способности, но в этой же области появляется интенсивный и необратимый процесс — на кривой акустического сигнала появляется новый излом, а поглощательная способность претерпевает необратимый „сброс“ на штриховую линию. Если до этого момента ($1.3-1.4 \text{ Дж/см}^2$) повторные воздействия в ту же область мишени в той или иной мере повторяли ход кривой поглощения, то после этого перехода экспериментальные точки не „возвращаются“ на окончание кривой 1 (рис. 1). При этом вид динамической деформации (рис. 2, в) несколько изменяется: характерный размер неоднородности уменьшается и „обостряются“ вспучивания. После этого остаточная деформация имеет наибольшую интенсивность (рис. 2, г). Очевидно, это является следствием деформации поверхностного слоя. Общая поглощательная способность после этого несколько возрастает.

Увеличение площади пятна в 2.5 раза не привело к изменению порога пластической деформации. Очевидно, размерный эффект начнет сказываться при уменьшении области взаимодействия до размеров сравнимых с краевой зоной, которая в данном случае составляет 0.6 мм, а деформация примет форму, близкую к сферической. Этот случай был исследован в работе [6]. Переход к меньшей длительности импульса (1.65 мкс) привел к снижению порога пластической деформации в $(\frac{\tau_0}{\tau})^{1/2}$ раз (где τ — длительность импульса) и уменьшению интенсивности остаточных явлений. При многократном воздействии интенсивных импульсных потоков энергии было обнаружено явление наклёпа поверхностного слоя — увеличение зоны упругости, что выразилось при переходе от 1У зоны к 1 не только в увеличении поглощательной способности, но и в более высоком пороге пластической деформации (увеличение на 7 % для короткого импульса). Как видно из рис. 2, появление пластической деформации поверхности качественно меняет ее вид непосредственно в момент взаимодействия. Возникающие неоднородности, а их интенсивность в момент импульса значительно выше остаточных изменений, могут явиться причиной низкорогового оптического пробоя и одной из причин его снижения при переходе от „точечного“ воздействия к плоскому случаю.

В заключение отметим, что в результате комплексных исследований показана связь оптической характеристики металлической поверхности (поглощательной способности) не только с температурой, но и упругопластическими процессами деформирования материала. Определены пороги обратимых и необратимых процессов на поверхности металлов, приводящих к низкотемпературным структурным изменениям и старению поверхности при взаимодействии с импульсным лазерным излучением.

- [1] Барчуков А.И., Конюхов В.К. - ЖПС, 1968, т. 9, в. 4, с. 706-709.
- [2] Карабутов А.В., Платоненко В.Т., Чупрына В.А. - Квантовая электроника, 1985, 12, в. 10, с. 2126-2130.
- [3] Жаров В.П., Летохов В.С. Лазерная оптикоакустическая спектроскопия. М.: Наука, 1984. 320 с.
- [4] Хоникомб Р. Пластическая деформация. М.: Мир, 1972. 408 с.
- [5] Либенсон М.Н., Романов Г.С., Имас Я.А. ЖТФ, 1968, т. 3, в. 7, с. 1116-1119.
- [6] Бонч-Бруевич А.М., Имас Я.А., Либенсон М.Н., Шандыбина Г.Д. - Поверхность. Физика, химия, механика, 1985, в. 5, с. 102-105.

Поступило в Редакцию
14 июня 1988 г.

Письма в ЖТФ, том 14, вып. 17 12 сентября 1988 г.

СТИМУЛИРОВАННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ (3-3.3 мкм, 77 К)
ПРИ ИНЖЕКЦИИ ТОКА В ПЛАСТИЧЕСКИ
ДЕФОРМИРОВАННЫХ ДГС $JnAsSbP/JnAs$

М.Ш. Айдаралиев Н.В. Зотова,
С.А. Карандашев, Б.А. Матвеев,
Н.М. Стусь, Г.Н. Талалакин

Инжекционные лазеры, работающие в спектральном диапазоне 3-5 мкм и в области окон прозрачности атмосферы 8-12 мкм, играют важную роль в развитии таких направлений техники, как системы ВОЛС, газовый анализ и др. [1, 2].

Известен ряд полупроводниковых материалов, например, твердых растворов $Pb-Sn-Te$, $Cd-Hg-Te$, $Jn-As-Sb-P$, ширина запрещенной зоны которых соответствует данным спектральным областям, однако не все они одинаково перспективны для создания инжекционных лазеров с требуемыми характеристиками. Опубликованы сведения об инжекционных когерентных источниках света непрерывного действия на длины волн $\lambda \geq 3.5$ мкм (77 К), полученных, например, на основе $PbSnTe$ [3].

В области 3-4 мкм, где расположены полосы поглощения углеводородов и других промышленных газов, большой интерес представляют твердые растворы $JnAsSbP$. В работах [4, 5] сообщалось о получении стимулированного излучения при инжек-