

07; 11

© 1991 г.

## ДИНАМИКА МЕЛКОМАСШТАБНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ЗЕРКАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛООПТИКИ ПРИ ИМПУЛЬСНОЙ СВЕТОВОЙ НАГРУЗКЕ

*Р. А. Лиуконен, А. М. Трофименко*

Исследована динамика мелкомасштабных изменений рельефа и поглощательной способности зеркальной поверхности металлов при взаимодействии с импульсным ИК излучением. Обнаружен ряд особенностей, которые возникают вследствие импульсного характера взаимодействия и которые нельзя объяснить только изменением температуры поверхности. Во-первых, это мелкомасштабные деформации, возникающие даже при равномерном распределении интенсивности падающего излучения. Во-вторых, более значительный, чем определяемый только нагревом, рост деформации. В-третьих, значительно превышающее теоретическое изменение поглощательной способности металлических зеркал. В работе показано, что остаточные явления при одноимпульсном взаимодействии оказывают более слабое влияние на оптические характеристики, чем динамика воздействия.

### Введение

Одна из основных проблем лазерной оптики — это качество поверхности зеркальных элементов, что во многом определяет специфические характеристики лазерного излучения. Шероховатость поверхности, точность изготовления, поглощательная способность обуславливают использование элемента в конкретной схеме, а порог пробоя (разрушения) и возникающие при световой нагрузке изменения оптических характеристик определяют энергетический диапазон применимости. Повышение требований к излучению при высоком уровне выходной энергии приводит к необходимости исследования ряда явлений, влияние которых на работоспособность лазерных систем ранее не изучалось, хотя и были проведены отдельные исследования. Одной из таких малоизученных проблем является динамика мелкомасштабных изменений зеркальной поверхности металлов при импульсной световой нагрузке в результате упругопластической деформации, которые носят как обратимый, так и необратимый характер. Пластическая деформация из-за термомеханических напряжений, возникающая во время лазерного импульса, впервые как механизм разрушения была рассмотрена в работах [1-3]. Основное внимание в дальнейшем было сосредоточено на исследовании разрушения как накопления пластических деформаций при многократном воздействии [4, 5]. При исследовании поверхностных разрушений наблюдались различные остаточные изменения: лазерная очистка, линии скольжения, рябь, поверхностное плавление и испарение материала [6-9]. В [10] теоретически были определены критерии стабильности зеркальной поверхности. Однако практически не обращено внимание при экспериментальных исследованиях на сам процесс деформирования, его динамику в ходе взаимодействия и обратимые изменения оптических характеристик, которые полностью или частично восстанавливаются после релаксации термонапряжений. Экспериментальные исследования, которые были проведены в этой области, в основном касались стационарных (квазистационарных) температурных режимов [11, 12] при небольших пятнах взаимодействия, в результате которых образовывалась общая сферическая выпуклость с местными дефектами от алмазного точения. Падение зеркальной составляющей отражен-

ного излучения объяснялось, как правило, появлением диффузного отражения [13, 14] или увеличением поглощательной способности материала при его нагреве [15, 16] без привлечения деформационных процессов.

Целью проведенных экспериментальных исследований, результаты которых представлены в данной работе, были изучение поведения поверхности в течение лазерного импульса при больших пятнах взаимодействия (плоский случай), определение параметров деформируемого участка зеркала, исследование динамики мелкомасштабной деформации и поглощательной способности в ходе взаимодействия.

### Экспериментальная установка

Для проведения экспериментальных исследований была создана установка, схема которой представлена на рис. 1. Облучение поверхности образца осуществлялось излучением импульсного электроионизационного  $\text{CO}_2$  лазера ( $\tau_n = 20-25$  мкс). Неоднородность распределения в пятне облучения диаметром 2.5 мм достигала 15%. Глубина прогрева за импульс  $\sqrt{a^2 \tau_n} = 50$  мкм ( $a^2$  — температуропроводность), что давало основание считать все процессы характерными для плоского случая. Эксперименты проводились в широком диапазоне

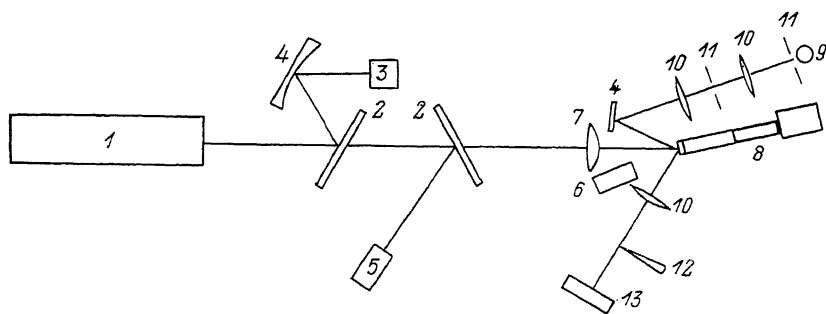


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

1 —  $\text{CO}_2$  лазеры; 2 — пластины из ФБИ; 3 — калориметр; 4 — зеркала; 5 — приемник излучения; 6 — ФЭУ-53; 7, 10 — линзы; 8 — оптоакустический преобразователь или зеркальный калориметр; 9 — лампа ИСП-100-2; 11 — диафрагма; 12 — нож Фуко; 13 — фотокамера.

плотностей энергии без плазмообразования на поверхности зеркала, что достигалось использованием импульса излучения  $\text{CO}_2$  лазера с плавно нарастающим фронтом [17]. В качестве образцов зеркал использовались медные диски диаметром 20 мм и толщиной 10 мм, поверхность которых первоначально обрабатывалась алмазным точением с последующей полировкой методом свободного абразива ( $\sigma \approx 40 \text{ \AA}$ ). В ходе эксперимента осуществлялся контроль оптической поверхности и измерялась поглощательная способность образцов. Для наблюдения за поверхностью чаще применяют интерферометрический метод, однако в том виде, в котором он обычно применяется, его чувствительность часто оказывается недостаточной, поэтому в данных экспериментах был использован один из теневых методов — метод ножа Фуко. Из литературы известно, что расчетная и подтвержденная экспериментально максимальная чувствительность этого метода достигает  $\lambda/1000$  [18]. Это относится к продольному направлению, в поперечном направлении вследствие дифракции чувствительность ограничена длиной волны излучения [19]. Основной недостаток теневых методов — сложность количественной интерпретации результатов, калибровка метода [20]. Для решения этой проблемы на отражающей поверхности в области наблюдения, но вне зоны взаимодействия предварительно наносился эталонный дефект в виде вмятины от стального шарика диаметром 4 мм. По известным параметрам эталонной неоднородности строилась градуировочная кривая. При этом одновременно решалась проблема калибровки светопропускания ножа Фуко и градуировочной функции фотослоя. Кроме того, поскольку в наблюдаемой области эталонный дефект поверхности и исследуемая неоднород-

родность фиксируются на одном кадре, то любая нестабильность установки (механическая, температурная) одинаково сказывается на изображении эталона и объекта, что приводит к ее компенсации при количественной обработке. Более подробно методика описана в [21].

Чувствительность и погрешность измерений, определяемые конкретными параметрами использованной схемы, рассчитывались по методике работ [19, 20]. Реализованная чувствительность метода по углу составляла  $10^{-5}$  рад. Суммарная погрешность, включающая ошибки измерения, сравнения эталона и расчета в области упругого и упругопластического деформирования не превышает 20 %. В области деструкции материала происходит значительное измельчение линейных размеров неоднородностей поверхности ( $\Delta l \leq 0.05$  мм) и в этом случае дифракция увеличивает ошибку (в сторону уменьшения измеряемой величины) до двух раз и более. Неоднородности поверхности размером менее  $\approx 3$  мкм перестают различаться схемой и поверхность воспринимается как зеркальная.

Схемная реализация метода проста (рис. 1): коллимированный пучок от точечного источника 9 с длительностью импульса 1.65 мкс направляется на контролируемую поверхность образца. После отражения лучи проходят через оптическую систему 10, в фокальную область которой вводится нож Фуко 12, и попадают на экран (фотопленку) 13. После эксперимента проводятся фотометрирование фотоматериала и численный расчет рельефа поверхности. При этом одновременно с теневой съемкой проводилось измерение поглощательной способности зеркал или амплитуды оптоакустического сигнала, образующегося при взаимодействии. Для измерения поглощательной способности применялся калориметрический метод [22, 23]. Этот же метод при использовании вакуумной камеры с подогревом образца от стороннего источника позволил провести эксперименты по измерению температурного коэффициента поглощательной способности. Определение калориметрическим методом поглощенной энергии не зависит от характера отражения (зеркальное или рассеянное), что очень важно при изменяющейся геометрии поверхности в ходе взаимодействия. При измерениях импульсного нагрева образца использовался датчик температуры 8 чувствительностью 3.7 мВ/К, который приклеивался к обратной стороне зеркала. Поглощенная энергия вычислялась по приросту температуры образца за каждый импульс. Отношение поглощенной энергии  $E_{\text{пл}}$  к падающей  $E_{\text{п}}$  определяет среднюю поглощательную способность  $A$ .

Представляло интерес изучить влияние импульсного характера нагрева поверхности на температурный коэффициент поглощательной способности  $B$ . Зависимость поглощательной способности от температуры можно представить следующим образом:  $A = A_{20} + B \cdot \Delta T$ , где  $A_{20}$  — поглощательная способность до нагрева (при комнатной температуре),  $\Delta T$  — приращение температуры образца в результате нагрева до взаимодействия. В эксперименте измерения поглощательной способности  $A$  в зависимости от падающей лазерной энергии проводились при двух значениях начальной температуры. Вначале измерение проводилось при комнатной температуре, затем образец нагревался на  $\Delta T$  и проводилось новое измерение  $A$ . Нагрев осуществлялся в атмосфере азота на  $\Delta T = 35$  К, производились откачка до  $10^{-3}$  мм рт. ст. и термостатирование образца. В этих опытах площадь пятна облучения была увеличена до  $0.44$  см<sup>2</sup>, что позволило провести измерения при минимально возможной для данных условий плотности падающей энергии (6—14 Дж/см<sup>2</sup>). Этот опыт позволил определить усредненный за длительность импульса температурный коэффициент поглощательной способности и сравнить его с теоретическим значением. Погрешность абсолютных измерений калориметрического метода не превышала 30 %, относительных — 6 %.

Наряду с калориметрическим определением поглощательной способности применялась и оптоакустическая методика, которая позволила проследить и уточнить границы проявления и развитие процессов, происходящих в поверхностных слоях материала при взаимодействии с излучением [23]. Величина акустического сигнала в области упругого деформирования пропорциональна поглощенной энергии [24]. Переход в область пластической деформации, деструкции материала, оказывает влияние на оптоакустический отклик в образце,

что отражается на характере поведения зависимости величины сигнала от поглощенной энергии. В экспериментах использовался пьезоэлектрический датчик на основе ЦТС-19 с линией задержки. Датчик на акустическом контакте пристыковывался к тыльной стороне образца, обработанной соответствующим образом для предотвращения переотражений от стыка. Измерялась амплитуда первого сигнала на цифровом осциллографе (погрешность не более 2 %).

Все перечисленные методы применялись одновременно или в идентичных условиях при неизменной оптической схеме, что позволило с хорошей точностью сопоставлять результаты.

### Динамика зеркальной поверхности

На основании экспериментальных исследований весь процесс поверхностных изменений можно условно разделить на три стадии, выделив при этом три уровня деформации зеркала. Переход от одной стадии к другой связан с возрастанием поглощенной энергии и определяется качественными изменениями самого процесса деформирования, т. е. переход от упругой деформации к пластической и далее к разрушению поверхности. Причем это определяется видом деформации в данный момент времени, если процесс рассматривается в течение одного импульса, или деформацией в момент максимальных поверхностных напряжений за импульс (как правило в конце), если исследуется динамика поверхности в зависимости от поглощенной импульсной энергии. Каждой стадии присущ свой диапазон текущих и интегральных за импульс (или средних) характеристик: диапазон поглощательной способности, линейный диапазон изменений первоначальной геометрии поверхности (во время импульса и остаточные), изменение структуры материала. Говоря об уровне деформации, мы имеем в виду качественно-количественную характеристику рельефа поверхности — его характерный вид и диапазон измеряемых отклонений. Необходимо отметить, что при взаимодействии с высокоинтенсивным импульсным излучением, приводящим к деструкции поверхности, процесс проходит все упомянутые стадии. На рис. 2 приведены места взаимодействия, характерные для различных видов деформации, возникающих при взаимодействии с импульсным излучением. Подсветка осуществлялась под углом  $45^\circ$ , поэтому круглое пятно взаимодействия имеет вид эллипса. Здесь же показаны остаточные деформации зеркальной поверхности (съемка проведена на микроинтерферометре с введением ножа Фуко в фокус объектива). На рис. 3 приведено сечение области взаимодействия, полученное теневым методом для лазерных импульсов с различной плотностью энергии на 18—20 мкс от начала генерации. На всех видах присутствует первый уровень деформации — общее «вспучивание» всего пятна взаимодействия (характеризуемое средней высотой  $H$ ) для чисто упругой стадии (рис. 3, кривая 1), упругопластической (кривые 2, 3) и для стадии резкого нарастания сдвиговых процессов в поверхностных слоях (кривая 4). С появлением пластической деформации возникает второй уровень (средний по диапазону измеряемых отклонений, определяемый  $h$ ) с непериодическим, но определенным средним размером колебаний рельефа как в плоскости, так и перпендикулярно зеркальной поверхности образца. Третий уровень (самый мелкий)  $\Delta h$  связан со сдвигом частиц материала. Характерный вид мелкомасштабной деформации поверхности приведен на рис. 3 (кривая 4), где и обозначены измеряемые параметры.

При плотностях поглощенной энергии, не превышающих  $0.35\text{--}0.4$  Дж/см<sup>2</sup> (первая стадия), как показывают наблюдения поверхности и оптоакустические измерения [23], возникает только термоупругая деформация, а после релаксации градиентов температуры поверхность восстанавливает свою форму. Непосредственно в процессе поглощения энергии имеет место общий подъем области взаимодействия относительно не засвечиваемой части зеркала. Зависимость этой величины в конце лазерного импульса для различной плотности поглощенной энергии показана на рис. 4, а. Чисто температурное расширение материала  $H_T$ , полученное аналитически, пропорционально поглощенной энергии, однако из графика видно, что реальный подъем происходит значительно интенсивнее. Это вклад упругой деформации — растягивающие усилия

в направлении перпендикулярно поверхности, обусловленные сжатием в плоскости зеркала. Микрорельеф в данном случае не образуется и поверхность в приподнятой области при равномерном распределении падающего излучения подобна первоначальной. Однако в реальных лазерных системах практически всегда имеется неравномерное распределение интенсивности, обусловленное дифракционной структурой поля в резонаторе, неоднородностями активной

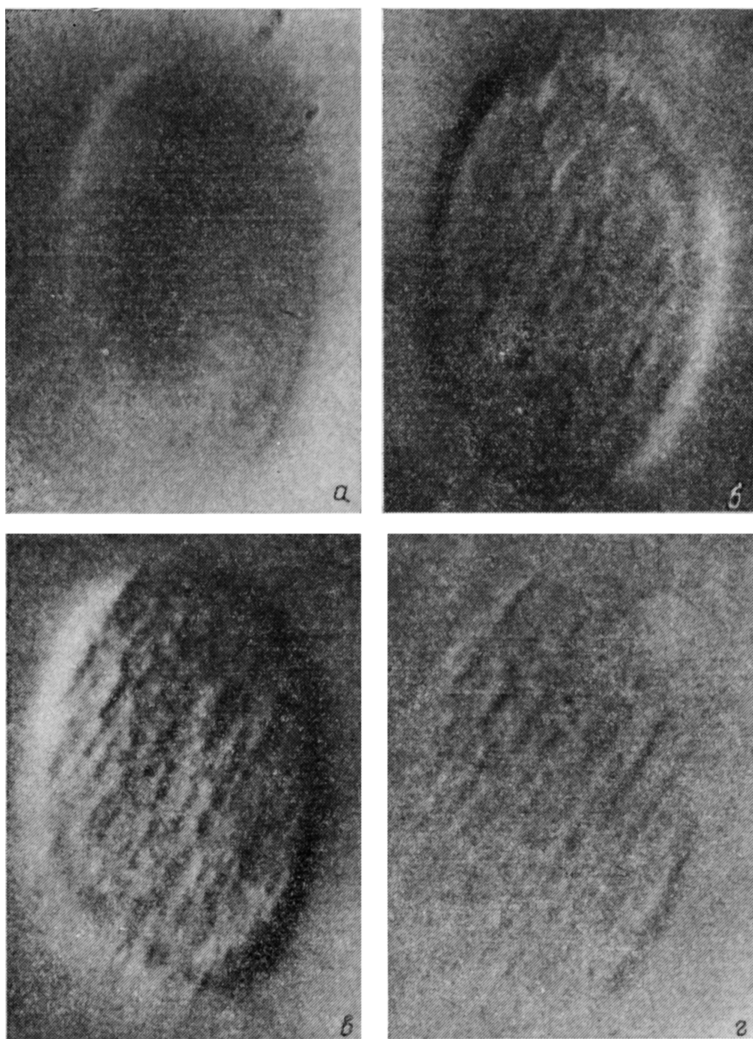


Рис. 2. Теневые фотографии области взаимодействия.

а, б, в — в конце импульса (на 20-й мкс); а — поверхность испытывает только упругую деформацию (плотность поглощенной энергии  $W_{ЭП}=0,35$  Дж/см<sup>2</sup>); б — упругопластическое деформирование ( $W_{ЭП}=0,7$  Дж/см<sup>2</sup>); в — деструкция поверхности ( $W_{ЭП}=1,34$  Дж/см<sup>2</sup>); г — остаточные деформации после импульса ( $W_{ЭП}=1,34$  Дж/см<sup>2</sup>).

среды и т. п. Это приводит к возникновению деформационной структуры на зеркальной поверхности, которая определяется механическими свойствами материала и распределением интенсивности. При ступенчатом распределении интенсивности на поверхности образцов из меди (МРО) возникает переходная область порядка 0.6 мм. Если модуляция интенсивности будет иметь в плоскости зеркала более мелкий масштаб, то деформация не сможет повторить распределение и произойдет «замывание» неоднородностей.

Вторая стадия. При более высокой плотности поглощенной энергии ( $W_{ЭП}=0,35-1,1$  Дж/см<sup>2</sup>) механические напряжения превышают предел текучести

и возникает пластическая деформация. Характерный признак этого процесса — появление мелкомасштабной структуры на поверхности. Она возникает даже при равномерном распределении интенсивности на поверхности. При этом можно выделить по величине второй и третий уровни деформации. Они появляются одновременно. Самая мелкая структура — третий уровень определяется процессами межзеренного и внутриверенного скольжения. Поэтому диапазон характерных смещений лежит в пределах десятка нанометров ( $\Delta h$ ) (рис. 4, а). Следует отметить, что наблюдение за поверхностью при повышении плотности энергии от импульса к импульсу проводилось без смещения области взаимодействия, поэтому на формирование структуры повлиял и процесс накопления, обусловленный предшествующим воздействием. При перемещении области для каждой новой точки, как показали сравнительные эксперименты, возрастает разброс данных из-за незначительных различий начальных условий, но общая картина не меняется. Изменение деформации этого уровня ( $\Delta h$ ), показано на рис. 4, а, и характерно для наиболее равномерного распределения интенсивности в центральной области пятна взаимодействия. Здесь же представлено

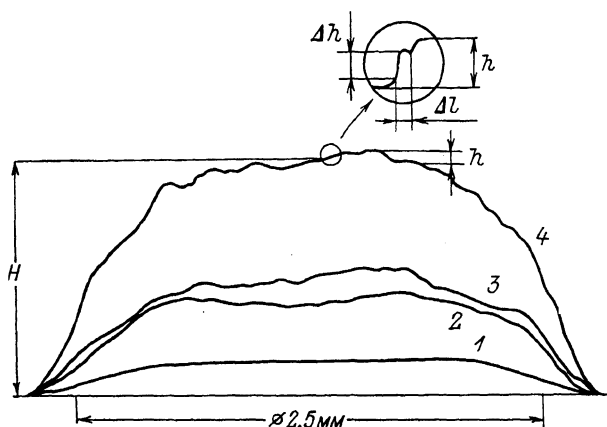


Рис. 3. Форма поверхности области взаимодействия.

$W_{ЭП}$ , Дж/см<sup>2</sup>: 1 — 0,35, 2 — 0,7, 3 — 1,12, 4 — 1,34.

и изменение характерного линейного размера неоднородностей в плоскости поверхности, которые связаны со смещением частиц материала ( $\Delta l$ ). Как видно из графика, с развитием пластической деформации происходит дальнейшее измельчение масштаба как по высоте  $\Delta h$ , так и по размеру  $\Delta l$ , т. е. происходит более полный охват и «проработка» поверхности дефектами.

В конце второй стадии ( $W_{ЭП}=1.1$  Дж/см<sup>2</sup>) происходит качественное изменение развития всего процесса: наблюдается быстрый рост общего подъема всей области взаимодействия  $H$ , резкое уменьшение линейного размера  $\Delta l$  и повторный скачкообразный рост мелкомасштабной структуры  $\Delta h$ . Это третья стадия развития процесса, которая завершается пробоем зеркала. Второй уровень деформации, существующий на второй и третьей стадиях процесса, имеет промежуточное по величине значение, характеризуемое высотой  $h$  (рис. 3, кривая 4). Его возникновение связано с появлением пластической деформации и является следствием остаточных напряжений от механической обработки и предыдущих воздействий. Величина неровностей, характерных для этого уровня деформации зеркальной поверхности, после возникновения достигает 6—8 % от общего подъема  $H$  и пропорционально увеличивается вплоть до разрушения. С появлением мелкомасштабных деформаций во время импульса связаны и остаточные изменения поверхности. Если общий подъем пятна взаимодействия после снятия световой нагрузки исчезает полностью, то мелкомасштабные искажения релаксируют частично, определяя остаточный рельеф. Его величина и развитие самого процесса при однократном и многократном воздействии несколько различны, но по порядку величины и по виду они близки (рис. 5,  $\Delta h_{ост}$ ).

На рис. 3 можно проследить, как изменяется форма поверхности медного зеркала к концу импульса при воздействии на него лазерного излучения. На рис. 3 кривая 1 соответствует начальному этапу — термоупругой деформации, если возникающие напряжения не превышают предела текучести материала. При более высоких энергиях эта форма поверхности существует до момента образования пластической деформации. После этого поверхность начинает приобретать форму, представленную на рис. 3, характерную для

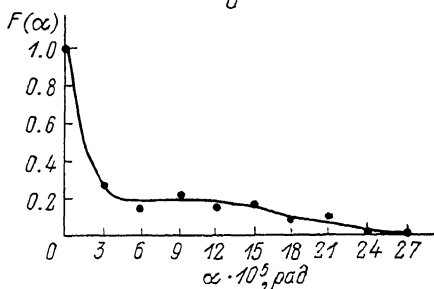
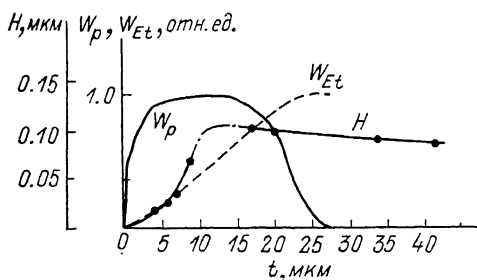
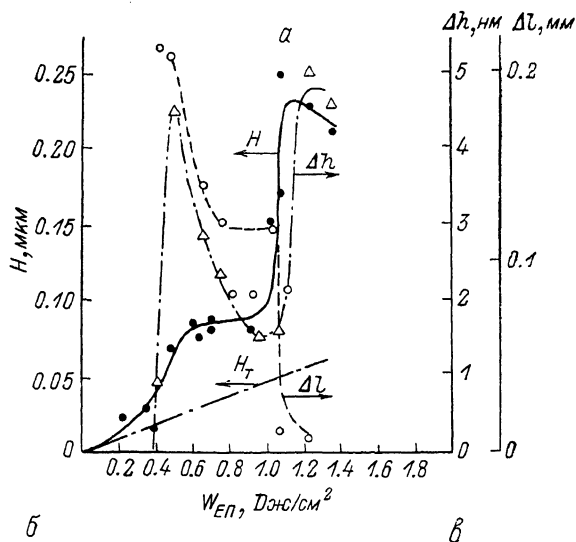


Рис. 4. Динамика поверхности зеркала в области взаимодействия.

$a$  — средняя высота подъема поверхности над плоскостью зеркала ( $H$ ), высота микронеровностей ( $\Delta h$ ) и их средний размер ( $\Delta L$ ) в конце импульса взаимодействия (на 20-й мкс,  $\tau_{и} = 25$  мкс) в зависимости от плотности энергии поглощенной поверхностью ( $W_{EП}$ ),  $H_T$  — расчетная высота  $H$ , обусловленная только температурным расширением ортогонально поверхности;  $b$  — изменение  $H$  в течение импульса,  $W_p$  — относительная интенсивность излучения и относительная плотность энергии  $W_E$  на поверхности к моменту времени  $t$  ( $W_{Eт} =$

$\int_0^t W_p dt / W_E$ );  $c$  — функция  $F(\alpha)$  — распределение наклонов микрограней, наблюдаемых теньвым методом на 20-й мкс для  $W_{EП} = 1.12$  Дж/см<sup>2</sup>.

интенсивностей начальной (кривая 2) и конечной (кривая 3) частей «полочки» на кривой  $H$  (рис. 4,  $a$ ). Развитие процесса в этом диапазоне плотности поглощенной энергии ( $W_{EП} = 0.75 - 1.1$  Дж/см<sup>2</sup>) можно проследить на рис. 4,  $b$ , где представлена величина деформации  $H$  (общий подъем) во время импульса. Скорость вклада энергии в поверхность (наклон кривой  $W_{Eт}$ ) сохраняется приблизительно одинаковой, однако с определенного момента рост  $H$  прекращается. Этот момент связан с возникновением пластической деформации и определяется интенсивностью излучения, сдвигаясь к началу импульса с ее возрастанием. Одновременно происходит образование среднего и мелкомасштабного рельефа с появлением остаточных изменений поверхности. На рис. 4,  $b$

видно, что после окончания облучения идет медленная релаксация обратимых деформаций поверхности (порядка 1 мс). На рис. 3 кривой 4 представлена стадия деструкции поверхности. Основное ее отличие проявляется в интенсивности деформации третьего уровня (характеризуемого  $\Delta H$ ) (рис. 4, а).

Дополняет представление о геометрии поверхности в момент развитого пластического деформирования нормированная функция распределения наклонов микрограней  $F(\alpha)$  [25], представленная на рис. 4, в (для  $W_{\text{ЭП}} = 1.1$  Дж/см на рис. 3, кривая 3). Распределение построено для плоскости, проходящей через центр пятна взаимодействия.  $S(\alpha) = \sum_i \Delta l_i$  — суммарная

длина участков  $\Delta l = 2.5 \cdot 10^{-2}$  мм,  $\alpha$  — угол между микрогранью и плоскостью зеркала при шаге суммирования по  $\alpha$   $3 \times 10^{-5}$  рад. Тогда  $F(\alpha) = S(\alpha)/S(\alpha_0)$ , где  $\alpha_0 = 3 \cdot 10^{-5}$  рад. Из этого графика видно, что характерный наклон элементарных участков лежит в пределах  $2-3 \cdot 10^{-4}$  рад.

Остаточные изменения зеркальной поверхности, показанные на рис. 2, г, являются следствием низкотемпературной пластической деформации [26] (нагрев поверхности не превышает по расчетам 150 К). Образующийся рельеф зависит от импульсной поглощенной энергии. Его вид определяется в основном мелкомасштабной деформацией, связанной с межзерненным и внутризерненным скольжением [27]. Характерные размеры неоднородностей, которые наблюдаются через оптические приборы (микроскоп, микроинтерферометр, теневая схема), составляют в плоскости зеркала 0.05—0.2 мм, а по высоте до 12 нм (рис. 5, а). Это подтверждается и измерениями на профилографе. На рис. 5, б

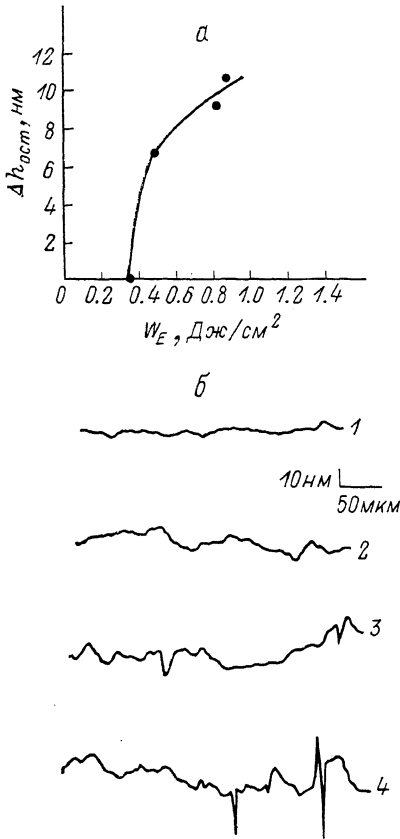


Рис. 5. Остаточные деформации при однократном воздействии.

а — средняя высота микронеровностей ( $\Delta h_{\text{ост}}$ ) в зависимости от импульсной плотности поглощенной энергии ( $W_{\text{ЭП}}$ ), б — профилограммы зеркальной поверхности: 1 — до взаимодействия; 2—4 — после взаимодействия при  $W_{\text{ЭП}} = 0.48, 0.81, 0.87$  Дж/см<sup>2</sup>.

видно, что на фоне первоначальной шероховатости ( $W_{\text{ЭП}} = 0$ ) (кривая 1) появляются более крупномасштабные искажения поверхности (кривые 2—4), которые и регистрируются оптическими приборами. Видно, что с увеличением энергии в импульсе при однократном воздействии на поверхность средняя высота остаточных микронеровностей  $\Delta h_{\text{ост}}$  растет (рис. 5, а). При многократном воздействии аналогичная картина наблюдается только для начальных импульсов, а затем размер начинает уменьшаться ( $\Delta h$ ) (рис. 4, а). Это, очевидно, связано с остаточным наклепом поверхности от предыдущих воздействий [23]. При деструкции поверхностного слоя вследствие многократного воздействия линейный размер элементов остаточного рельефа уменьшается до 0.01 мм, а  $\Delta h_{\text{ост}}$  растет до 40—60 нм (профилограф).

Остаточные деформации, которые возникают без видимого глазом разрушения поверхности и без образования плазмы, вызывают пятнистое, характерное для микрограней рассеяние излучения He—Ne лазера. Это явилось основой одной из методик контроля за появлением пластической деформации поверхности [28], хотя более точным оказался оптоакустический метод. С его помощью были уточнены границы обратимости взаимодействия.



## Поглощательная способность в импульсном режиме

Экспериментальные исследования показали, что при импульсном взаимодействии имеется тесная корреляция поглощательной способности с появлением структурных изменений поверхности зеркала. Было установлено, что зависимость изменения поглощения с увеличением  $W_{\text{ЭП}}$  отличается от той, которая должна была бы следовать из чисто температурной обусловленности при импульсном нагреве (до момента плавления). На рис. 6, а приведены результаты калориметрических исследований поглощательной способности образцов зеркал для импульсного излучения  $\text{CO}_2$  лазера ( $\lambda = 10.6$  мкм,  $\tau_n = 25$  мкс)

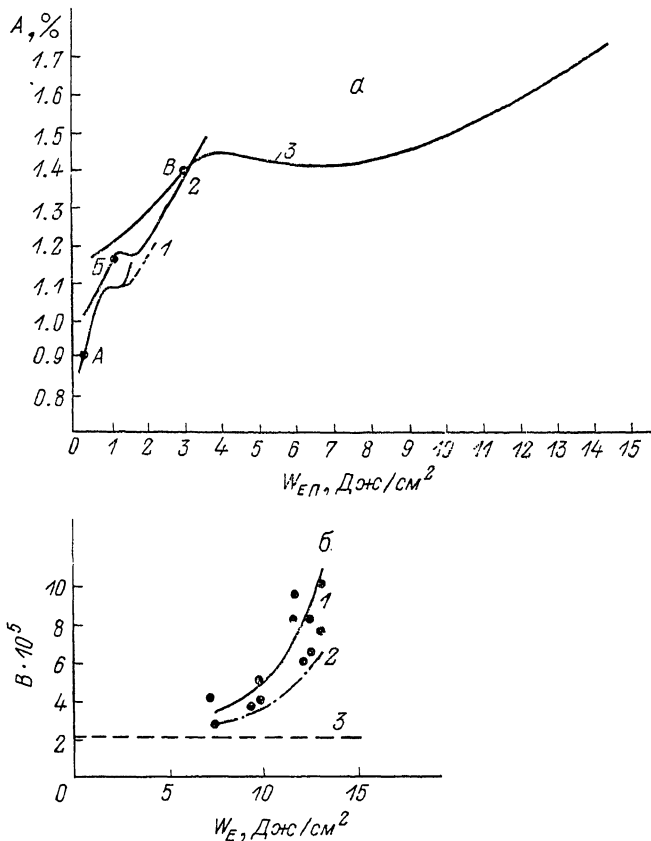


Рис. 6. Динамика поглощательной способности в зависимости от интенсивности импульсного взаимодействия.

$A$  — поглощательная способность ( $A$ ) для образцов из М1РО (1) и БРЦР (2, 3) в импульсном излучении  $\text{CO}_2$  (1, 2) и СО (3) лазеров; штриховая часть кривой 1 характерна для многократного взаимодействия; точками  $A, B, B$  отмечен момент появления остаточных деформаций.  $B$  — изменение обобщенного температурного коэффициента поглощательной способности ( $B, 1, 2$ ) в зависимости от плотности падающей энергии ( $W_E$ ) в сравнении с теоретическим (3) [16].

и СО лазера ( $\lambda = 5.5$  мкм,  $\tau_n = 140$  мкс) [28]; для образцов из меди М1РО ( $\text{CO}_2$  лазер) кривой 1, для образцов из БРЦР ( $\text{CO}_2$  лазер) кривыми 2 и (СО лазер) 3. Точками  $A, B$  и  $B$  обозначена нижняя граница  $W_{\text{ЭП}}$ , при которой оптическими и оптоакустическим методами регистрируется появление остаточных деформаций поверхности. До этого момента все возникающие деформации обратимы, поверхность после диссипации локального нагрева приобретает первоначальный вид и восстанавливается начальная поглощательная способность. Вид кривой изменения  $A$  (рис. 6, а) на этом отрезке можно было бы объяснить чисто температурными процессами, если предположить, что температурный коэффициент поглощательной способности меди  $B$  меняется и значительно больше расчетного [15, 16, 29]. Для оценки этого расхождения были поставлены эксперименты в вакуумной камере при дополнительном нагреве образца. Было об-

наружено сильное влияние импульсного характера взаимодействия на поглощательную способность. Поэтому измерения проводились при незначительных плотностях энергии ( $W_E = 6-13$  Дж/см<sup>2</sup>). Измерения при меньших значениях  $W_E$  осуществить не удалось из-за снижения чувствительности и точности метода. Учитывая характер изменения поглощательной способности при увеличении импульсной плотности падающей энергии (рис. 6, а, кривая 1) и экстраполируя к  $W_E = 0$ , можно получить начальную величину  $A_{20} \approx 0.75-0.8$  %. Аналогичная экстраполяция для образца, нагретого на 30 К, не противоречит значению  $A = 0.77 + 2.16 \cdot 10^{-5} \cdot \Delta T$ . Увеличение энергии зондирующего импульса лазерного излучения приводит к резкому увеличению  $B$  (рис. 6, б, кривая 1). Попытка учесть влияние импульсного характера взаимодействия, считая начальную поглощательную способность  $A_{20}$  для всей кривой не при  $W_E = 0$ , а отдельно для каждой плотности падающей энергии при комнатной температуре, т. е.  $B \cdot \Delta T = A - A_{20}$  (при  $W_E$ ), привело лишь к некоторому, но не полному снижению  $B$ , сохраняя сам характер изменения (кривая 2 на рис. 6, б). Это говорит о наличии интенсивных процессов, сопутствующих импульсному характеру взаимодействия и влияющих на внутренние характеристики материала. Аналогичные явления были обнаружены в работе [30] при исследовании изменения электрического сопротивления металлических пленок при импульсном нагреве излучением рубинового лазера. Было показано, что в этом случае рост сопротивления имеет обратимый характер и также не может быть объяснен только температурными процессами.

Заканчивается упругая стадия развития процесса деформирования, когда возникающие механические напряжения превысят предел текучести материала. Появляется пластическая деформация поверхности и одновременно кривая интегральной (средней) поглощательной способности претерпевает перегиб, что свидетельствует о замедлении, а в дальнейшем и прекращении роста импульсной поглощательной способности при росте удельной поглощенной энергии. Образуется своеобразная «полочка» на графике  $A$  (рис. 6, а). Аналогичная «полочка» наблюдается и на деформационном графике  $H$  (рис. 4, а) в зависимости от плотности поглощенной энергии, поэтому ее нельзя объяснить пропорциональным изменением поглощательной способности. Это две стороны одного явления. На «полочке» идет более полный охват микрорельефом площади взаимодействия и формируется наклепанная структура поверхности. Эта деформационная проработка слоя, прогреваемого за импульс, и определяет величину «полочки». Как видно из графиков, ее длина определяется длительностью импульса, а не различием в свойствах меди и БРЦР или длиной волны излучения. Эксперименты, проведенные с длительностью импульса  $\text{CO}_2$  лазера  $\tau_n = 1.65$  мкс, показали, что порог возникновения пластической деформации (в сравнении с длительностью импульса 25 и 140 мкс) пропорционален  $\tau_n^{1/2}$ .

На смену процессам пластического деформирования приходит более интенсивный процесс, в результате которого более резко меняется структура поверхностного рельефа и начинает быстро расти поглощательная способность. До этого момента при повторном взаимодействии поглощательная способность обратима (в пределах погрешности). С началом этой стадии для образцов из МІРО обнаруживается необратимый переход на штриховую кривую 1 на рис. 6, а. Причем начальное поглощение мало меняется, что свидетельствует об определяющем влиянии динамических процессов в этом случае. Завершается стадия достижением порога пробоя.

### Заключение

Таким образом, в результате экспериментальных исследований оптических характеристик металлооптических зеркал был установлен целый ряд особенностей, являющихся следствием импульсного характера взаимодействия. При незначительных средних мощностях мгновенная интенсивность может быть значительна, что приводит к образованию больших температурных градиентов и термомеханических напряжений в поверхностных слоях. Вследствие этих процессов даже при равномерном распределении интенсивности на поверхности может возникать мелкомасштабный рельеф при одноимпульсном взаимо-

действия. Это результат низкотемпературной пластической деформации. Однако в ходе самого взаимодействия отклонения от первоначального состояния более значительны и носят динамический характер, релаксируя вместе с градиентом температуры в течение 1 мс после окончания импульса. Во всем диапазоне плотностей энергии были выделены три стадии процесса. Первая — термоупругое взаимодействие, когда за все время импульса возникающие механические напряжения не достигают предела текучести материала и поверхность полностью «забывает» деформации. Следующая стадия — упругопластическое деформирование начинается, когда возникает низкотемпературная пластическая деформация — причина остаточных явлений. Третья стадия — появление значительных смещений микрочастиц материала, после (или в результате) которой наступает пробой зеркальной поверхности.

Другая сторона процессов, происходящих в поверхностных слоях зеркал, — это динамика поглощательной способности. Обобщенный температурный коэффициент, учитывающий суммарное влияние динамических процессов, меняется более чем на порядок, а интегральная поглощательная способность увеличивается в 1.5—2 раза для плотностей энергии, близких к пробую зеркала. Сам ход изменения поглощательной способности, точки перегиба графика, «полочка» хорошо коррелируют с изменением типа деформации, перехода от одной стадии к другой и с величиной отклонения поверхности от первоначальной во время импульса (рис. 4, а и б, а). Остаточные явления, их накопление, связанное с поглощением импульсного излучения, оказывают значительно более слабое влияние на оптические характеристики, чем динамичность воздействия. Таким образом, изменения, которые претерпевает металлическое зеркало в ходе импульсного взаимодействия, в основном обратимы и являются следствием термомеханических напряжений и физических процессов в поверхностных слоях — внутренней и внешней причин изменения оптических свойств зеркал, которые отсутствуют в стационарных условиях.

#### Список литературы

- [1] Wang V., Braunstein A. I., Braunstein M., Wada J. Y. // Laser Induced Damage to Optical Materials. NBS. Spec. Publ. 1972. N 372. P. 183—196.
- [2] Аполлонов В. В., Барчуков А. И., Карлов Н. В. и др. // Квантовая электрон. 1975. Т. 2. № 2. С. 380—389.
- [3] Musal H. M., Jr. // Laser Induced Damage to Optical Materials. NBS. Spec. Publ. 1980. N 568. P. 159—172.
- [4] Lee C. S., Koumvakadis N., Bass M. // Appl. Phys. Lett. 1982. Vol. 41. N 7. P. 625—627.
- [5] Figueira J. F., Thomas S. J., Harrison R. F. // IEEE. J. Quantum Electron. 1982. Vol. QE-18. N 9. P. 1384—1386.
- [6] Thomas S. J., Harrison R. F., Figueira J. F. // Appl. Phys. Lett. 1982. Vol. 40. N 3. P. 200—202.
- [7] Marrs C. D., Faith W. N., Dancy J. H., Porteus J. O. // Appl. Opt. 1982. Vol. 21. N 22. P. 4063—4066.
- [8] Jee Y., Becker M. F., Walser R. H. // Laser Induced Damage to Optical Materials. NIST. Spec. Publ. 1988. Vol. 752. P. 575—593.
- [9] Конов В. И., Пименов С. М., Прохоров А. М., Чаплиев Н. И. // Поверхность. Физика, химия, механика. 1987. № 12. С. 98—105.
- [10] Аполлонов В. В., Прохоров А. М., Хомич В. Ю., Четкин С. А. // Квантовая электрон. 1981. Т. 8. № 10. С. 2208—2210.
- [11] Бонч-Бруевич А. М., Имас Я. А., Либенсон М. Н., Шандыбина Г. Д. // Поверхность. Физика, химия, механика. 1985. № 5. С. 102—105.
- [12] Аполлонов В. В., Барчуков А. И., Конюхов В. К., Прохоров А. М. // Письма в ЖЭТФ. 1972. Т. 15. Вып. 15. С. 248—250.
- [13] Бонч-Бруевич А. М., Имас Я. А., Либенсон М. Н., Шандыбина Г. Д. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1985. Т. 49. № 6. С. 1166—1170.
- [14] Walter W. T., Solimene N., Park K. et al. / Proc. of the Intern. Conf. «Lasers'81». STS Press, 1981. P. 510—524.
- [15] Либенсон М. Н., Романов Г. С., Имас Я. А. // ЖТФ. 1968. Т. 38. Вып. 7. С. 1116—1119.
- [16] Sparks M., Loh E., Jr. // J. Opt. Soc. Amer. 1979. Vol. 69. № 6. P. 847—868.
- [17] Лукуonen Р. А., Трофименко А. М. // Тез. докл. Всесоюз. конф. «Оптика лазеров-90». Л., 1990. С. 140.
- [18] Оптический производственный контроль / Под ред. Д. Малакары. М.: Машиностроение, 1985. 400 с.
- [19] Васильев Л. А., Скотников М. М. // ДАН СССР. 1962. Т. 143. № 3. С. 578—581.
- [20] Васильев Л. А. Теневые методы. М.: Наука, 1968. 400с.
- [21] Лукуonen Р. А., Трофименко А. М. // ЖТФ. 1989. Т. 59. Вып. 10. С. 197—199.

- [22] Барчуков А. П., Конюхов В. К. // ЖПС. 1968. Т. 9. № 4. С. 706—709.
- [23] Лууконен Р. А., Трофименко А. М. // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. Вып. 17. С. 1612—1617.
- [24] Жаров В. П., Летохов В. С. Лазерная оптоакустическая спектроскопия. М.: Наука, 1984. 320 с.
- [25] Топорец А. С. Оптика шероховатой поверхности. Л.: Машиностроение, 1988. 190 с.
- [26] Новиков И. И. Теория термической обработки металлов. М.: Металлургия, 1986. 480 с.
- [27] Хоникомб Р. Пластическая деформация. М.: Мир, 1972. 408 с.
- [28] Лууконен Р. А., Трофименко А. М. // ЖТФ. 1988. Т. 58. Вып. 8. С. 1602—1604.
- [29] Warren R. E., Sparks M. // J. Appl. Phys. 1979. Vol. 50. N 12. Т. 7952—7957.
- [30] Сулакшин С. С., Пушкарев А. И., Нечаев Б. А. // Тез. докл. Всесоюз. конф. «Взаимодействие оптического излучения с веществом». 1990. Т. 1. С. 109.

Государственный оптический институт  
им. С. И. Вавилова  
Санкт-Петербург

Поступило в Редакцию  
29 октября 1990 гг.  
В окончательной редакции  
11 января 1991 г.