

Особенности разрушения металлов при импульсном лазерном и пучково-плазменном воздействии

**В. А. Грибков, С. В. Латышев, В. Н. Пименов, С. А. Масляев,
Е. В. Демина, А. С. Демин, Е. В. Морозов, Н. А. Епифанов,
Е. Е. Казилин, И. П. Сасиновская**

Исследованы особенности разрушающего воздействия на металлические материалы высоких давлений, генерируемых в сопоставляемых условиях — при облучении образцов-мишеней импульсным лазерным излучением и пучково-плазменными потоками, создаваемыми в установках Плазменный фокус (ПФ). В обоих случаях были заданы близкие параметры радиационно-термической обработки — плотность потока энергии $q \sim 10^{10} - 10^{11}$ Вт/см² и длительность импульса $\sim 10 - 100$ нс. Показано, что двукратное воздействие лазерного излучения на тонкие образцы ванадия и молибдена толщиной соответственно 0,3 и 0,1 мм приводит к образованию в материалах расплавленных зон, внутри которых имеются глубокие кратеры. Глубина кратеров простирается на всю толщину образцов, на обратной стороне которых углубления заканчиваются отверстиями размером $\sim 0,1$ мм для V и 0,2 мм для Mo. В образце вольфрама толщиной 0,2 мм глубина кратеров в расплавленной зоне меньше его толщины, а на обратной стороне образца имеются микротрещины. На основе численных оценок исследуемого процесса сделано предположение, что наблюдаемые эффекты связаны с созданием в облучаемых мишенях зон высокого давления величиной $\sim 1 - 10$ ГПа, локализованных в микрообластях радиусом $r \sim 0,1$ мм. В этих зонах поведение твердой фазы материалов мишеней, для которых предел прочности $\sigma_B \leq 1$ ГПа (V, Mo, W), под действием высокого давления становится близким к поведению жидкости. Псевдожидкая фаза материала вытесняется из центра кратера, где давление максимальное, к его периферии в область пониженного давления с последующим выбросом вещества из мишени через облучаемую поверхность со скоростью $\sim 10^3$ м/с. В экспериментах с использованием ПФ механизм, отвечающий за образование кратеров при воздействии на мишень мощного импульсного лазерного излучения, не реализуется вследствие иного характера распределения плотности поглощенной энергии в поверхностном слое облучаемого образца. Область, в которой сосредоточена энергия, поглощенная в момент импульсной имплантации частиц в материал, определяется, главным образом, средней энергией и диаметром ионного пучка ($E_i \approx 100$ кэВ, $d \sim 2 - 10$ мм) и на один-два порядка величины превышает соответствующий объем при лазерном облучении.

Ключевые слова: импульсное лазерное излучение, плазменный фокус, импульсные потоки ионов и плазмы, образование кратеров

DOI: 10.30791/1028-978X-2020-10-34-47

Введение

При воздействии на твердотельные мишени сфокусированного лазерного излучения с плотностью потока энергии $q \sim 10^{10} - 10^{11}$ Вт/см² происходит испарение внешних слоев мишени и возникновение вторичной плазмы из вещества мишени, давление которой составляет $P \sim 1 - 10$ ГПа.

Такое давление превышает предел прочности на разрыв (временное сопротивление) многих веществ (Al, Cu, Ni, Ti и др.) [1] и может приводить к повреждаемости и разрушению поверхности — образованию пор, кратеров, микротрещин и т.п. С другой стороны, давление лазерной плазмы порождает ударные волны (УВ) в объеме материала мишени, что приводит к изменению структуры и

свойств глубоких слоев мишени и проявляется как на микро-, так и на макроуровне. В первом случае на фронте УВ генерируются различные типы точечных и линейных дефектов (вакансии, каскады вакансий, пары Френкеля, дислокации, скопления дислокаций и т.п.), происходят полиморфные превращения [2 – 6]. Во втором случае наблюдаются специфические “макро-эффекты дальнего действия” [7 – 9]. К ним относятся аномально высокий массоперенос компонентов в направлении вектора падающего потока энергии, образование центров динамического разрушения материала, разрушение задней стенки мишени посредством откола и др.

Создание высоких давлений и УВ с помощью лазерного излучения может осуществляться при воздействии на поверхность мишени интенсивных ионных и электронных пучков, а также лайнеров, разогнанных при взрывах [10, 11]. Так, в установках плазменный фокус (ПФ) при обрыве тока генерируются мощные пучки высокоэнергичных ионов со средней энергией $E_i \sim 100$ кэВ, длительностью импульса $\tau \sim 10 - 100$ нс и высокой плотностью потока энергии в интервале $q \sim 10^{10} - 10^{12}$ Вт/см² [12 – 14].

Генерация высоких давлений и УВ с помощью интенсивного лазерного излучения (ЛИ) реализуется различными способами. Основным является воздействие сфокусированного лазерного излучения с плотностью потока $q > 10^{10}$ Вт/см² и длительностью импульса $\tau < 100$ нс на свободную поверхность образца. Так, в работе [15] на йодном лазере с энергией излучения 100 Дж, длительностью импульса 0,4 нс и плотностью потока энергии $q \sim 10^{14} - 10^{16}$ Вт/см² в алюминиевой мишени были получены УВ с амплитудами давления до $P \sim 1000$ ГПа. Такие УВ вносили в вещество мишени энергию, превышающую энергию испарения, и приводили к образованию кратеров, заметно превосходящих по размеру пятно фокусировки лазерного излучения.

В материаловедческих исследованиях, когда речь идет о модифицировании свойств материала, нужны УВ, как правило, с небольшими амплитудами $P \sim 1 - 10$ ГПа. В работах [16, 17] был применен метод генерации УВ лазерами при облучении мишеней, помещенных в конденсированную оптически прозрачную среду (жидкий азот, вода). При плотностях потока $q \sim 10^8$ Вт/см² и длительности импульса $\tau \sim 10$ нс в исследованных образцах были получены УВ с амплитудами $P \sim 1 - 2$ ГПа. Для генерации УВ таких амплитуд при облучении свободной поверхности мишени, например, на воздухе потребовалось бы излучение с плотностью потока

энергии $q \sim 10^{10}$ Вт/см². К сожалению, этот метод имеет очевидное ограничение, связанное с пробоем оптически прозрачных сред ($q_{\text{пробоя}} \sim 10^8 - 10^{10}$ Вт/см² в зависимости от материала среды, длительности и длины волны лазерного излучения), и не годится для генерации УВ с амплитудами $P \sim 10$ ГПа.

Цель данной работы — исследование особенностей разрушающего воздействия на металлические материалы импульсного лазерного излучения с плотностью потока энергии $q \sim 10^{10} - 10^{11}$ Вт/см² и длительностью импульса $\tau \sim 100$ нс с последующим сравнением с результатами воздействия на металлические образцы мощных пучково-плазменных потоков, создаваемых в установках ПФ с близкими параметрами облучения.

Методика облучения образцов

Эксперименты по воздействию ЛИ на мишени выполнены с использованием лазера ГОС 1001 в режиме модулированной добротности с параметрами облучения: энергия в импульсе $E \approx 10$ Дж, длительность импульса $\tau \approx 80$ нс, длина волны $\lambda = 1,06$ мкм. Излучение лазера фокусировали на мишени линзой с фокусным расстоянием $F = 50$ см. При типичной расходимости излучения лазера ГОС 1001 $\gamma \approx 10^{-3}$ диаметр пятна фокусировки составлял $d \approx \gamma F \approx 0,5$ мм, что обеспечивало плотность потока энергии $q \approx 10^{10} - 10^{11}$ Вт/см².

В качестве исследуемых образцов были выбраны чистые металлы — ванадий, молибден и вольфрам. Облучаемые мишени представляли собой тонкие пластинки размерами $1,5 \times 2$ см и толщиной $L = 0,3$ мм для V, $L = 0,2$ мм для W и $L = 0,1$ мм для Mo. Мишени помещались в вакуумную камеру, которая откачивалась до давления $P \sim 1$ Торр. Каждая мишень облучалась двумя лазерными импульсами.

После облучения образцы исследовали методом оптической микроскопии (ОМ) на микроскопе НЕОРНОТ-3. Воздействие ЛИ на материалы анализировали с использованием метода численного моделирования рассматриваемого процесса.

Результаты экспериментов

В результате двукратного лазерного воздействия на облученной поверхности всех образцов наблюдали оплавленное пятно эллиптической формы размером $\sim 2 \times 3$ мм. Размер пятна на всех мишенях примерно одинаковый.

Ниже представлены микрофотографии обработанной ЛИ поверхности образцов и необлученной

“задней стенки”. Со стороны облучения снимки сделаны с помощью оптической микроскопии в двух режимах: А — в отражённом свете, Б — комбинированный режим, при котором свет поступает с двух сторон образца. Комбинированный режим позволял судить о наличии сквозных отверстий по световому потоку на просвет.

Ванадий

На рис. 1а представлена общая картина зоны воздействия двух лазерных импульсов на ванадий. В нижней правой четверти снимка виден кратер правильной круглой формы с внешним диаметром примерно 0,4 мм. В кратере имеется сквозное отверстие (рис. 1б). Отверстие имеет неправильную форму с размером на выходе менее 0,1 мм. Невороженным глазом отверстие с обратной сто-

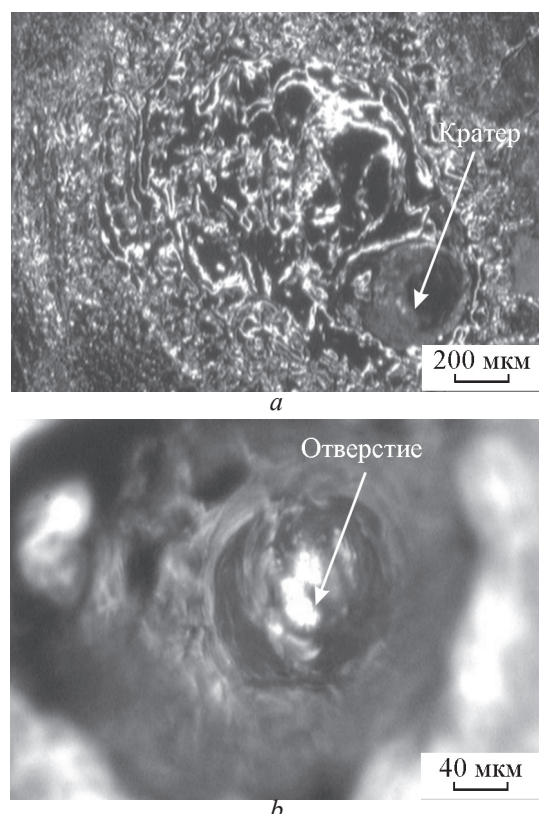


Рис. 1. Микрофотографии поверхности ванадия после воздействия ЛИ: а — зона плавления и образования кратера; б — внутренняя полость кратера со сквозным отверстием, подсвеченным с обратной стороны образца

Fig. 1. Vanadium surface after exposure to laser radiation: а — melting and crater formation zone; б — internal cavity of the crater with a through hole illuminated from the back side of the sample.

роны пластины практически незаметно. Не исключено, что в фотографии на просвет (рис. 1б) мы имеем дело не с прямым светом, а с отраженным несколько раз от стенок канала.

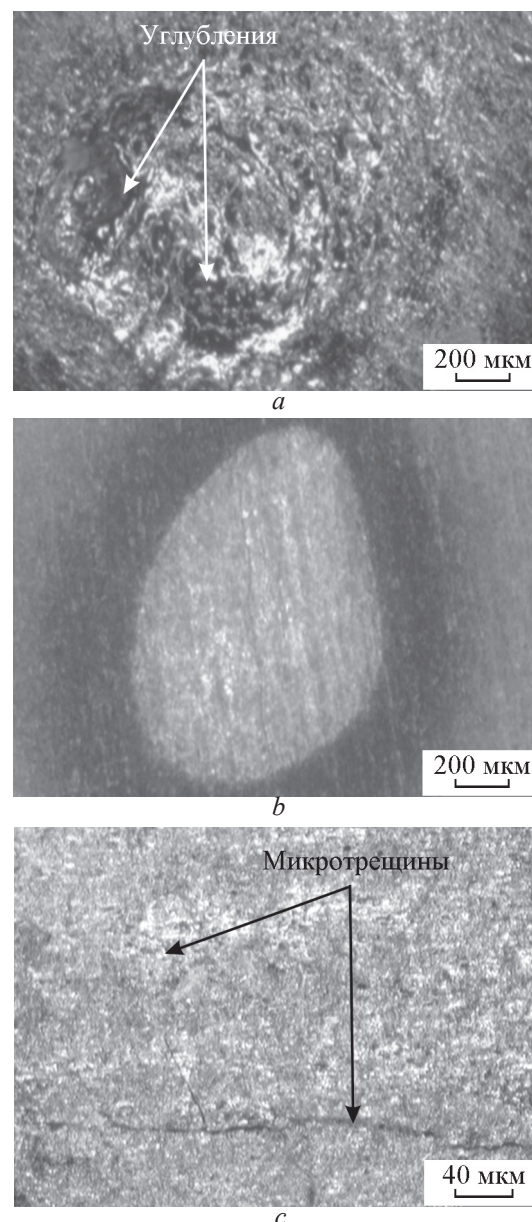


Рис. 2. Микрофотографии поверхности вольфрама после воздействия ЛИ: а — зона плавления материала на облученной поверхности с двумя углублениями, б — зона термического влияния на необлученной “задней стенке” образца, с — область микротрещин на “задней стенке” образца.

Fig. 2. Tungsten sample surface after exposure to laser radiation: а — zone of melting of the material on the irradiated surface with two recesses, б — zone of thermal influence on the unirradiated back side of the sample, с — microcracks on the back side of the specimen.

Следует отметить, что внешний размер кратера соответствует оценке пятна фокусировки по расходимости лазерного излучения. Что касается всей зоны, где наблюдается плавление, то она включает область лазерного излучения с плотностью потока энергии на 2 – 3 порядка меньше, чем в фокусе.

Вольфрам

На рис. 2а представлена картина воздействия ЛИ на вольфрам. На облученной поверхности видна зона оплавления и в ней углубления в виде кратеров. На необлученной обратной стороне образца (рис. 2б) наблюдается зона термического влияния. Сквозного отверстия обнаружено не было, но на обратной стороне вольфрамовой мишени имеются микротрещины (рис. 2с).

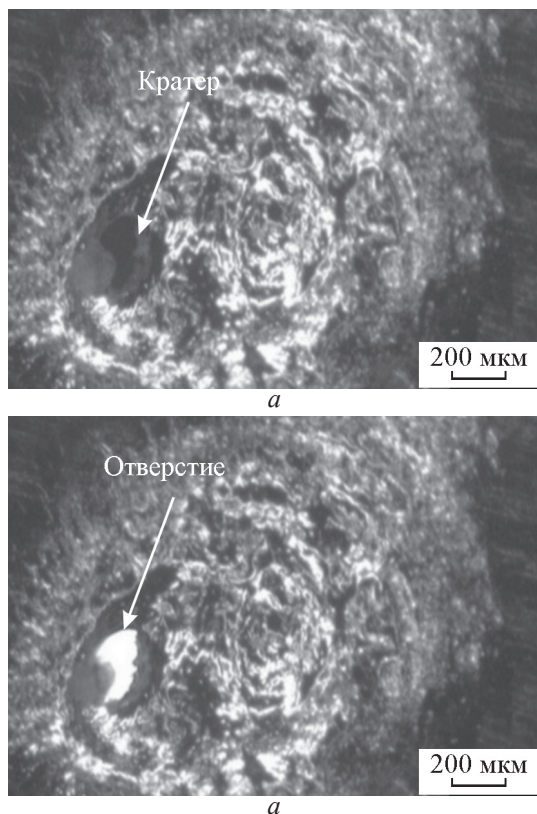


Рис. 3. Микрофотографии поверхности молибдена после воздействия ЛИ: а — зона плавления материала с входным отверстием кратера, б — зона плавления с полостью кратера и отверстием, подсвеченным с обратной стороны образца.

Fig. 3. Area of irradiated molybdenum surface after exposure to laser: а — the melted zone of the material with the crater inlet, б — the melted zone with the backlight on the crater through hole.

Молибден

На рис. 3 представлены изображения ОМ зоны облучения после воздействия ЛИ на молибден. Материал пластины был проплавлен насквозь: на облученной стороне невооруженным глазом видно “входное отверстие” кратера (рис. 3а). Полость кратера и “выходное отверстие” размером ~ 0,2 мм, которое имеет неправильную форму и расположено на обратной стороне Мо образца, представлены на рис. 3б.

Не ясен механизм образования наблюдаемых отверстий. Отсутствие сильного оплавления и зон термического влияния вокруг выходного отверстия на необлученной поверхности образцов из ванадия и молибдена может свидетельствовать о том, что теплопроводность в рассматриваемом механизме не играла доминирующей роли. Картина повреждения металлов больше напоминает последствия от воздействия ударных волн или кумулятивных эффектов.

Численное моделирование воздействия ЛИ на мишени

Для выяснения механизма появления кратеров на облучаемой поверхности было выполнено численное моделирование воздействия ЛИ на материал мишени. Был использован метод численного квазидвумерного моделирования процесса образования вторичной плазмы у поверхности облучаемой мишени и возникновения УВ в ее объеме с помощью дисков, развитый в работах [12, 18, 19], в которых моделировали материаловедческие эксперименты, реализуемые на установках ПФ и лазерах.

Также как в работах [12, 19], в качестве уравнения состояния в холодном веществе использовали ударную адиабату [20]:

$$P = \frac{A^2 \rho \left(\frac{\rho}{\rho_0 - 1} \right)}{(B - 1)^2 \left(\frac{B}{B - 1} - \frac{\rho}{\rho_0} \right)^2}, \quad (1)$$

где ρ и ρ_0 — плотности вещества в состоянии сжатия ударной волной и в нормальном состоянии соответственно. Коэффициенты A и B , связывающие скорость фронта УВ D с массовой скоростью вещества u за фронтом соотношением $D = A + Bu$, брали из работы [21]. Форму лазерного импульса аппроксимировали полу-синусоидой $q(t) = q_0 \sin(\pi t / \tau)$ при $0 < t < \tau$.

Поскольку в материаловедческих исследованиях обычно используют ЛИ с длиной волны $\lambda \sim 0,5 -$

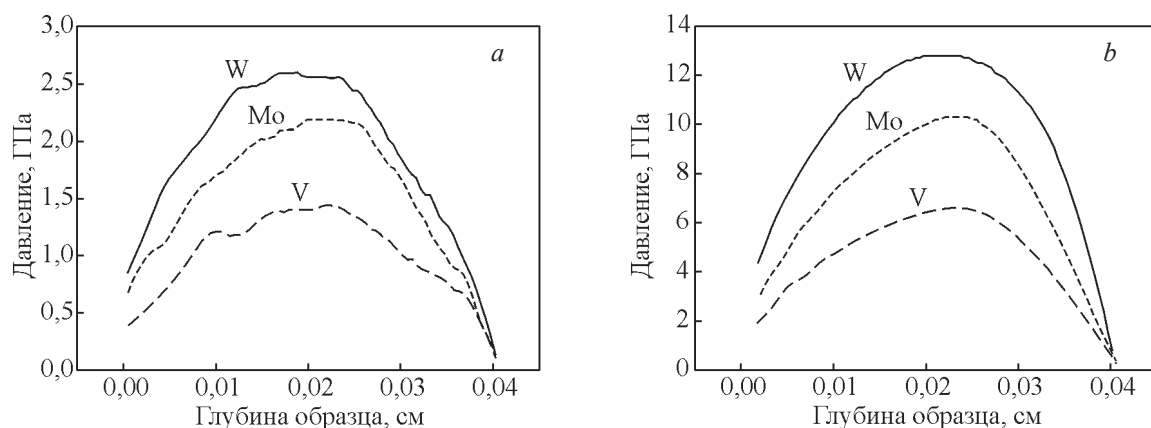


Рис. 4. Распределение давления по глубине образца мишени из W, Mo и V к концу действия импульса ЛИ для двух значений плотности потока энергии, Вт/см²: а — 10¹⁰, б — 10¹¹.

Fig. 4. Pressure distribution over the depth of a target sample of W, Mo, and V at the end of the laser pulse for two values of the energy flux density, W/cm²: а — 10¹⁰, б — 10¹¹.

1 мкм и умеренными плотностями потока энергии в интервале $q \sim 10^8 - 10^{12}$ Вт/см², учитывали только обратное тормозное поглощение лазерного излучения, как в работе [19]. Коэффициент обратного тормозного поглощения k равен:

$$k = \frac{n_e v_{ei}}{n_{cr} c \left(1 - \frac{n_e}{n_{cr}}\right)^{1/2}}, \quad (2)$$

где c — скорость света, n_e — плотность электронов, $n_{cr} = 10^{21}/\lambda^2$ см⁻³ — критическая плотность, $v_{ei} = 3 \cdot 10^{-6} \frac{n_e Z \Lambda}{T^{3/2}}$ — частота электрон-ионных столкновений, Z — средняя зарядность ионов, $\Lambda \sim 5 - 10$ — кулоновский логарифм, T — температура в эВ.

Проведены расчеты для двух плотностей потока ЛИ $q = 10^{10}$ и 10^{11} Вт/см², форму импульса брали в виде половины синусоиды с длительностью по основанию $\tau = 100$ нс, радиус пятна фокусировки $r = 0,2$ мм, величина энергии импульсов составляла соответственно $E_{имп} = 0,8$ и 8 Дж.

На рис. 4 приведены распределения давлений в V, Mo и W к концу действия ЛИ без учета ограничений на толщину мишеней. Из рисунков видно, что область высокого давления во всех вариантах распространяется к концу лазерного импульса на глубину до $\sim 0,4$ мм, но фронт ударной волны не успевает сформироваться. При плотности потока энергии $q = 10^{10}$ Вт/см² максимальные давления составляют $P \approx 1 - 2,5$ ГПа, при $q = 10^{11}$ Вт/см² $P \approx 6 - 12$ ГПа.

Основные результаты численных расчетов приведены в табл. 1.

Скорость вытекания вещества v оценивали из уравнения Бернулли $\rho v^2/2 + p = \text{const}$ по формуле

$$v \approx \left(\frac{2p}{\rho_0}\right)^{1/2},$$

где ρ_0 — плотность вещества мишени, p — давление в веществе мишени. При этом учитывали, что при давлениях свыше 1 ГПа большинство твердых веществ перестают быть твердыми и начинают вести себя подобно жидкости при температурах далеких от температуры плавления [20, 22 – 26]. В нашем случае, как показали расчеты (рис. 4), величина максимального давления в мишени была $P > 1$ ГПа, в то время как для молибдена значение предела прочности (временное сопротивление) составляет $\sigma_B(\text{Mo}) \approx 0,67$ ГПа, для ванадия $\sigma_B(\text{V}) \approx 0,22$ ГПа, для вольфрама $\sigma_B(\text{W}) \approx 1$ ГПа [1].

При расчете толщин испарения и плавления $L_{исп}$, $L_{пл}$ учитывали возврат тепла из плазмы в мишень. Эти величины достигали максимальных значений через 1 – 3 мкс после окончания действия лазерного излучения.

Следует отметить, что приведенные в табл. 1 значения массовой скорости u хорошо согласуются (расхождение меньше 5%) с массовыми скоростями, полученными по формуле

$$u \approx \frac{P}{\rho_0 A},$$

где A — скорость фронта ударной волны при малых амплитудах давления. Эта оценка является

Таблица 1

Параметры взаимодействия лазерного излучения с материалами

Table 1

Parameters of interaction of laser radiation with materials

	V		Mo		W	
Плотность потока энергии, q Вт/см ²	10 ¹⁰	10 ¹¹	10 ¹⁰	10 ¹¹	10 ¹⁰	10 ¹¹
Температура, T , эВ	24	65	32	81	32	90
Толщина испаренного слоя, $L_{\text{исп}}$, мкм	0,7	1,7	0,8	1,8	0,7	1,8
Толщина расплавленного слоя, $L_{\text{пл}}$, мкм	2	3	2	4	2	5
Амплитуда давления в глубине мишени к концу действия ЛИ, P , ГПа	1,4	6,5	2,2	10,2	2,6	12,8
Скорость вещества мишени в области максимального давления (массовая скорость), u , км/с	0,045	0,21	0,042	0,19	0,033	0,16
Гидродинамическая скорость вытекания холодного вещества мишени из области с высоким давлением, v , км/с	0,7	1,5	0,7	1,4	0,7	1,15

следствием точной формулы $P = \rho_0 Du$, где D — скорость фронта ударной волны. Параметр A брали из экспериментальной зависимости $D = A + Bu$ [21], который составляет $A = 5,2$ км/с для V, Mo и $A = 4,2$ км/с для W.

Из полученных результатов следует, что ни испарение, ни плавление, ни массоперенос за фронтом УВ не могут объяснить образование сквозных отверстий, наблюдаемых в молибдене и ванадии после воздействия на них импульсного ЛИ (рис. 1 и 3). Наиболее вероятным объяснением представляется вытекание холодного вещества мишени подобно жидкости из центра кратера, где давление максимальное — по стенкам кратера к периферии навстречу лазерному излучению, где давление меньше — с последующим выбросом части вещества из мишени. Так, при $q = 10^{11}$ Вт/см² расстояние, на которое может перетечь вещество в мишени Mo за время действия лазерного излучения составляет $L \approx vt \approx 0,14$ мм, что вполне может объяснить наличие отверстия в молибденовой пластине толщиной 0,1 мм. Аналогичные оценки для ванадия и вольфрама показывают, что для образования сквозного отверстия времени одного импульсного воздействия оказывается недостаточным. Но учитывая возникновение кратера на поверхности V после однократного воздействия ЛИ, повторный импульс лазерного облучения вполне мог привести к отколу микрочастицы материала с противоположной стороны мишени с образованием сквозного отверстия.

Необходимо отметить, что характерный размер области высокого давления r в объеме материала должен быть достаточно малым, таким чтобы вещество успевало уйти из этой области за время дей-

ствия лазерного излучения: $r/v \sim \tau$. Этот критерий выполняется, если в качестве размера области высокого давления брать радиус отверстия в молибденовой и ванадиевой пластинах $r \approx 0,05 - 0,1$ мм.

К сожалению, квазидвумерная модель не позволяет моделировать вытекание вещества по стенкам кратера из центра на периферию. Для расчета таких весьма сложных течений требуется полноценная двумерная модель, разработка которой представляет интерес в свете дальнейших исследований.

Заметим, что течение холодного вещества подобно жидкости при высоких давлениях лежит в основе принципа действия кумулятивных снарядов, в которых кумулятивная струя создает давление свыше 10 ГПа и вещество брони вытекает по стенкам канала навстречу кумулятивной струе [22 – 24].

Обсуждение результатов

Сравнение с результатами экспериментов на установках ПФ

В экспериментах с использованием установок ПФ, где высокие давления $P \sim 10 - 30$ ГПа создавали ионным пучком дейтерия с плотностью потока энергии $q \sim 10^{11}$ Вт/см², длительностью $\tau \sim 10 - 50$ нс и радиусом $r \sim 1 - 5$ мм [12 – 14], разрушения образцов-мишеней носили иной характер. В облученном поверхностном слое происходили процессы имплантации в материал ионов рабочего газа, плавления и эрозии с формированием волнообразного рельефа поверхности, образованием каплеобразных фрагментов, пор, пузырей,

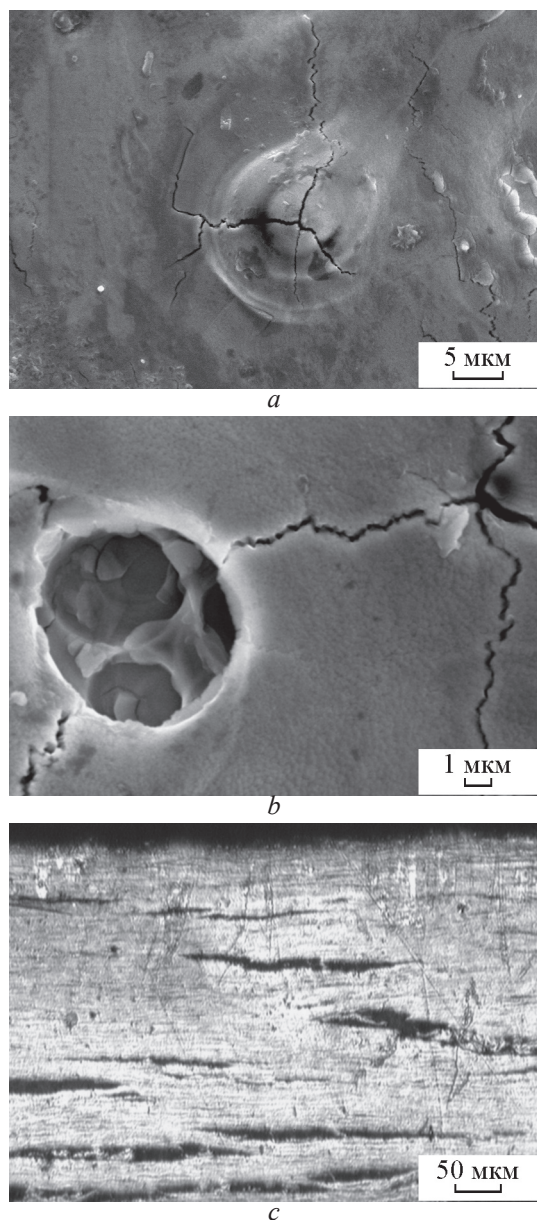


Рис. 5. Микроструктура участков поверхности молибденовой пластины (a, b) и поперечного шлифа (c) в зоне облучения после воздействия потоков быстрых ионов дейтерия и дейтериевой плазмы в установке ПФ при максимальной интенсивности облучения ($q_{pl} \approx 10^9 - 10^{10}$ Вт/см², $\tau_{pl} \approx 50 - 100$ нс, $q_i \approx 10^{11} - 10^{12}$ Вт/см², $\tau_i \approx 10 - 50$ нс) [14].

Fig. 5. Surface areas of molybdenum plate (a, b) and cross-section (c) in the irradiation zone after exposure to fast deuterium ions and deuterium plasma in the PF device with the maximum irradiation intensity ($q_{pl} \approx 10^9 - 10^{10}$ W/cm², $\tau_{pl} \approx 50 - 100$ ns, $q_i \approx 10^{11} - 10^{12}$ W/cm², $\tau_i \approx 10 - 50$ ns) [14].

микротрещин. Кратеры на облученной поверхности, как правило, отсутствовали, а содержащиеся

на ней пузыри иногда встречались с частично или полностью разрушенными крышками-куполами. В глубине мишеней возникали трещины и полости, ориентированные параллельно облучаемой поверхности.

На рис. 5 из работы [14], приведены микрофотографии участков облученной поверхности и поперечного шлифа молибденовой пластины толщиной 0,4 мм после облучения потоками дейтериевой плазмы (ДП) и быстрых ионов дейтерия (ИД). Параметры потока дейтериевой плазмы составляли $q_{pl} \approx 10^9 - 10^{10}$ Вт/см², $\tau_{pl} \approx 50 - 100$ нс, пучка ионов дейтерия — $q_i \approx 10^{11} - 10^{12}$ Вт/см², $\tau_i \approx 10 - 50$ нс.

Видно, что на облученной поверхности присутствуют пузыри с треснувшей оболочкой (рис. 5a) и разрушенным куполом (рис. 5b), а также микротрещины. Под вскрытым куполом оболочки пузыря видны более мелкие пузыри со следами их разрушения — осколками оболочек. В приповерхностном слое толщиной $\sim 200 - 250$ мкм, расположенном на расстоянии свыше 50 мкм от поверхности, присутствуют микротрещины, ориентированные примерно параллельно облученной поверхности (рис. 5c). Как показано в [14], возможной причиной рассматриваемых эффектов, наряду с действием термических напряжений, является воздействие УВ на материал в процессе ее прохождения от облученной поверхности к необлученной и в обратном направлении (волна разгрузки) после отражения УВ от “задней стенки” пластины.

Следует также заметить, что на материал мишени, расположенной в катодной части камеры ПФ, действует также “газовая” УВ_г, которая создается плазмой рабочего газа разлетающейся из зоны максимального сжатия (пинча). Действие такой УВ_г может приводить к наблюдаемому разрушению пузырей (рис. 5b), возникших на поверхности ПС в момент предыдущего импульсного воздействия потоков энергии [27].

В работе [11] внутри молибденовой мишени толщиной 0,1 мм на глубине от облученной поверхности свыше 30 мкм после облучения образовалась протяженная полость параллельная облученной поверхности, длина которой соответствовала диаметру ионного пучка ~ 2 мм.

Механизм расслоения вещества мишени на глубине свыше 30 – 50 мкм от облученной поверхности связан с ударно-волновым воздействием на структурные дефекты технологического происхождения, которые были созданы в материале мишени в процессе его изготовления [11, 12]. Основную роль в расслоении играла не сама УВ, а волна разгрузки с отрицательными разрывающими давле-

ниями, величины которых близки к амплитудным значениям УВ.

В результате выполненных в данной работе исследований показано существенное различие в разрушениях мишеней под действием сфокусированного лазерного излучения и пучков быстрых ионов в установках ПФ. При одинаковых плотностях потока энергии $q \sim 10^{11}$ Вт/см² и близких давлениях вторичной плазмы $P \sim 10 - 30$ ГПа, возникающей из вещества материала мишени под действием этих потоков энергии, на одинаковых образцах-мишенях разрушения материала происходили по-разному. При воздействии на мишень ЛИ в облучаемом материале возникали оплавленные зоны, содержащие кратеры радиусом $r \sim 0,1$ мм и глубиной $L \sim 0,1 - 0,3$ мм, сравнимой с толщиной облучаемых материалов. В ряде случаев (для V и Mo) глубина кратеров занимала всю толщину образца-мишени, что приводило к образованию сквозных отверстий. В случае воздействия быстрых ионов дейтерия на те же материалы в установках ПФ кратеры, как правило, отсутствовали, но на облученной поверхности наблюдали повреждаемость иного характера — пузыри с треснувшей или разрушенной оболочкой и микротрещины, уходящие вглубь материала. В глубине мишени, в приповерхностном слое, возникали трещины и полости параллельные поверхности облучения [14].

Механизм образования кратеров в образцах-мишенях под действием импульсного ЛИ при давлениях $P \sim 10$ ГПа связан, по-видимому, с вытеканием холодного вещества из области высокого давления на периферию по стенкам кратера в зону пониженного давления с последующим выбросом части вещества из мишени через облученную поверхность. Оценка скорости вытекания вещества с использованием уравнения Бернулли дает величину

$$v \sim \left(\frac{2P}{\rho_0} \right)^{1/2} \sim 10^3 \text{ м/с.}$$

Другими словами, высокое давление, созданное в локальной области радиусом $r \sim 0,1$ мм, приводит к выбросу вещества с очень высокой скоростью. В случае экспериментов на ПФ область, в которой сосредоточена энергия, поглощенная в момент импульсной имплантации частиц в материал, определяется, главным образом, средней энергией и радиусом ионного пучка ($E_i \approx 100$ кэВ, $r \sim 1 - 5$ мм) и на один-два порядка величины превышает соответствующую область при лазерном облучении. Вследствие этого, в экспериментах на ПФ не хватает времени для вытекания вещества из области воздействия ионного пучка на перифе-

рию $r/v \sim 1 - 5$ мкс, так как длительность импульса ионных пучков $\tau \sim 10 - 50$ нс на один-два порядка меньше. Поэтому в экспериментах с использованием ПФ механизм, отвечающий за образование кратеров при воздействии на мишень мощного импульсного ЛИ, не реализуется из-за иного характера распределения плотности энергии в поверхностном слое облучаемого образца. Образование в объеме образца-мишени структурных дефектов другого типа (пор, микротрещин и т.п.) связано с возможностью формирования акустических и ударных волн вследствие реакции отдачи при взрывном испарении материала поверхностного слоя, вызванном воздействием мощных импульсных потоков энергии [12 - 14].

В то же время кратеры в зоне облучаемой поверхности металлических материалов при воздействии на них импульсных потоков ионов и плазмы в установках ПФ образуются, как правило, по иному механизму — в процессе выхода газовой фазы из поверхностного слоя, расплавленного излучением, с последующей быстрой кристаллизацией расплава [28]. Следует также заметить, что в ряде материаловедческих экспериментов с использованием ПФ, в которых облучаемые образцы были взяты в виде фольг из W, Ti и V, обнаружен выброс микрочастиц размером $1 - 10$ мкм со стороны необлученной задней поверхности мишеней под действием УВ, генерируемых в их объеме [29].

Выводы

Исследованы особенности разрушающего воздействия на металлические материалы высоких давлений, генерируемых в сопоставляемых условиях — при облучении образцов-мишеней импульсным лазерным излучением и пучково-плазменными потоками, создаваемыми на установках ПФ, с близкими параметрами радиационно-термической обработки — плотностью потока энергии $q \sim 10^{10} - 10^{11}$ Вт/см² и длительностью импульса $\tau \sim 10 - 100$ нс.

Показано, что двукратное воздействие лазерного излучения на тонкие образцы ванадия, молибдена и вольфрама (толщиной соответственно 0,3, 0,1 и 0,2 мм) приводит к образованию в материалах расплавленных зон, внутри которых имеются достаточно глубокие кратеры. Наибольшая глубина кратеров, наблюдаемая в V и Mo, простирается на всю толщину образцов, на обратной стороне которых углубления заканчиваются отверстиями размером $\sim 0,1$ мм для V и 0,2 мм для Mo. В образце W глубина кратеров в расплавленной зоне меньше его

толщины, но на обратной стороне образца имеются микротрещины.

Выполненные численные оценки рассматриваемого процесса позволяют предполагать, что эффекты, наблюдаемые при воздействии лазерного излучения на материалы, связаны с созданием в облучаемых мишенях зон высокого давления величиной $\sim 1 - 10$ ГПа, локализованных в областях размером $r \sim 0,1$ мм. В этих зонах поведение твердой фазы материалов мишеней, для которых предел прочности $\sigma_B \leq 1$ ГПа (V, Mo, W), под действием высокого давления становилось близким к поведению жидкости. При этом псевдожидкая фаза материала мишени вытеснялась из центра кратера, где давление максимальное, по его стенкам к периферии в область пониженного давления с последующим выбросом вещества из мишени через облучаемую поверхность с высокой скоростью $\sim 10^3$ м/с.

При пучково-плазменном воздействии на материал мишени в установках ПФ с близкими параметрами облучения повреждаемость и разрушение мишени происходят по другим механизмам. В материале со стороны облучения реализуются радиационно-термические процессы: имплантация ионов рабочего газа, плавление и эрозия с выходом из материала газовой фазы и возможностью образования пузырей, пор, кратеров, микротрещин. Происходящая при этом генерация в объеме материалов ударных волн в случае небольших толщин образцов-мишеней (типа фольг) способствует наблюдаемому в ряде работ выбросу микрочастиц размером $\sim 1 - 10$ мкм через необлученную поверхность. В более толстых образцах ударно-волновое воздействие может при возникновении волн разгрузки приводить к образованию в приповерхностных слоях микротрещин параллельных облучаемой поверхности, к разрушению возникающих на ней пузырей, а также к расслоению материала.

Следует также учитывать возможность влияния на образец-мишень “внешних” ударных волн, которые при каждом импульсном разряде в установках ПФ в рассматриваемом и более жестком режиме облучения создаются струей плазмы рабочего газа, разлетающейся из зоны максимального сжатия (пинча).

Работа выполнена по государственному заданию № 075-00947-20-00.

Литература

1. Физические величины. Справочник под редакцией Григорьева И.С., Мейлихова Е.З. М.: Энергоатомиздат, 1991, 1232 с.
2. Бондаренко Г.Г., Иванов Л.И., Янушкевич В.А. Воздействие гигантских импульсов лазера на микроструктуру алюминия. Физика и химия обработки материалов, 1973, № 4, с. 19 – 21.
3. Лариков Л.Н., Фальченко В.М., Мазанко В.Ф.. Аномальное ускорение диффузии при импульсном нагружении металлов. Докл. АН СССР Серия математика и физика, 1975, т. 221, № 5, с. 1073 – 1075.
4. Иванов Л.И., Литвинова Н.А., Янушкевич В.А.. Аномальное распределение плотности точечных дефектов, образующихся в поглощающем материале при лазерном облучении. Физика и химия обработки материалов, 1976, № 2, с. 3 – 6.
5. Иванов Л.И., Литвинова Н.А., Янушкевич В.А. Глубина образования ударных волн при воздействии лазерного излучения на поверхность монокристалла молибдена. Квантовая электроника, 1977, т. 4, № 1, с. 204 – 206.
6. Канель Г.И., Разорёнов С.В., Уткин А.В., Фортков В.Е. Ударно-волновые явления в конденсированных средах. М.: “Янус-К”, 1996, 408 с.
7. Бонюшкин Е.К., Завада Н.И., Новиков С.А., Учайев А.Я. Кинетика динамического разрушения металлов в режиме импульсного объемного разогрева. Саров, РФЯЦ ВНИИЭФ, Труды ученых ядерных центров России, 1998, № 3, 275 с.
8. Диденко А.Н., Шаркеев Ю.П., Козлов Э.В., Рябчиков А.И. Эффекты дальнего действия в ионно-имплантированных металлических материалах. Томск: Изд-во НТЛ, 2004, 328 с.
9. Боровицкая И.В., Иванов Л.И., Дедюрин А.И., Крохин О.Н., Никулин В.Я., Тихомиров А.А. Воздействие высокотемпературной импульсной дейтериевой плазмы на ванадий. Перспективные материалы, 2003, № 2, с. 24 – 28.
10. Фортков В.Е. Мощные ударные волны и экстремальные состояния вещества. УФН, 2007, т. 177, № 4, с. 347 – 368.
11. Antoun T., Seaman L., Curran D.R., Kanel G.I., Razorenov S.V., Utkin A.V. Spall Fracture. New York: Springer, 2003, 404 p.
12. Латышев С.В., Грибков В.А., Масляев С.А., Пименов В.Н., Падух М., Зелиньска Э., Генерация ударных волн в материаловедческих экспериментах на установках плазменный фокус. Перспективные материалы, 2014, № 8, с. 5 – 12.
13. Cicuttin A., Crespo M.L., Gribkov V.A., Niemela J., Tuniz C., Zanolli C., Chernysheva M., Demina E.V., Latyshev S.V., Pimenov V.N., Talab A.A. Experimental results on the irradiation of nuclear fusion relevant materials at the dense plasma focus “Bora” device. Nuclear Fusion, 2015, 55 (6) 063037 (7pp). DOI:10.1088/0029-5515/55/6/063037
14. Демин А.С., Масляев С.А., Пименов В.Н., Грибков В.А., Демина Е.В., Латышев С.В., Ляховицкий М.М., Сасиновская И.П., Бондаренко Г.Г., Гайдар А.И., М.Падух. Воздействие мощных импульсных потоков ионов дейтерия и дейтериевой

- плазмы на молибденовую пластину. Физика и химия обработки материалов, 2017, № 6, с. 5 – 17.
15. Гуськов С.Ю., Борознюк С., Калал М., Касперчик А., Краликова Б., Кроусски Е., Лимпоух И., Мшек К., Писарчик Т., Писарчик П., Пфейфер М., Рохлена К., Скала Й., Улшмид Й. Генерация ударных волн и образование кратеров в твердом веществе при кратковременном воздействии лазерного импульса. Квантовая электроника, 2004, т. 34, № 11, с. 989 – 1003.
 16. Иванов Л.И., Никифоров Ю.Н., Янушкевич В.А. Эффект изменения электропроводности полупроводниковых кристаллов при прохождении ударной волны от импульсного излучения ОКГ. ЖЭТФ, 1975, т. 67, № 1, с. 147 – 149.
 17. Янушкевич В.А. Закономерности образования точечных дефектов в ударной волне малой амплитуды. Физика и химия обработки материалов, 1979, № 2, с. 47 – 51.
 18. Грибков В.А., Латышев С.В., Масляев С.А., Пименов В.Н. Численное моделирование взаимодействия импульсных потоков энергии с материалом в установках Плазменный фокус. Физика и химия обработки материалов, 2011, № 6, с. 16 – 22.
 19. Epifanov N.A., Bondarenko G.G., Gribov V.A., Latshev S.V., Nikitushkina O.N., Pimenov V.N. Action of shocks generated in solid targets by dense plasma focus devices and at pulsed laser irradiation. Procedia Manufacturing, 2019, vol. 37, pp. 500 – 507.
 20. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука, 1966, 688 с.
 21. Трунин Р.Ф. Исследование экстремальных состояний конденсированных веществ методом ударных волн, Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2006, 286 с.
 22. Лаврентьев М.А., Шабат Б.В. Проблемы гидродинамики и их математические модели. М.: Наука, 1973, 416 с.
 23. Тришин Ю.А. Физика кумулятивных процессов. Новосибирск: ИГД им. М.А. Лаврентьева СО РАН, 2005, 324 с.
 24. Савенков Г.Г., Мещеряков Ю.И., Барахтин Б.К. Влияние скоростной неоднородности среды на проникание кумулятивных струй и удлинённых ударников. Журнал технической физики, 2010, т. 80, вып. 10, с. 136 – 141.
 25. Канель Г.И. Ударные волны в физике твёрдого тела. М.: Физматлит. 2018. 203 с.
 26. Мещеряков Ю.И. Многомасштабные ударно-волновые процессы в твёрдых телах. Санкт-Петербург: Нестор-История, 2018, 476 с.
 27. Боровицкая И.В., Грибков В.А., Демин А.С., Епифанов Н.А., Латышев С.В., Масляев С.А., Морозов Е.В., Пименов В.Н., Сасиновская И.П., Бондаренко Г.Г., Гайдар А.И., Шольц М. Повреждаемость и деформационные эффекты в поверхностных слоях меди и сплава системы медь – галлий при импульсном облучении в установке Плазменный фокус. Перспективные материалы, 2020, № 5, с. 23 – 36.
 28. Pimenov V.N., Gribov V.A., Doubrovsky A.V., Mezzetti F., Scholz M., Ugaste Y.E., Dyomina E.V., Ivanov L.I., Maslyayev S.A., Miklaszewski R., Borowetski M., DeChiara P., Pizzo L., Szydowski A., Volobuev I.V. Influence of powerful pulses of hydrogen plasma upon materials in PF – 1000 device. Nukleonika, 2002, v. 47(4), pp. 155 – 162.
 29. Колокольников В.Н., Масляев С.А., Боровицкая И.В., Кобелева Л.И., Дегтярев В.Ф., Силин П.В., Никулин В.Я., Гайдар А.И. Выброс частиц тугоплавких металлов с поверхности фольг под воздействием ударных волн, генерируемых на установке плазменный фокус. Труды XXIX Международной конференции “Радиационная физика твёрдого тела” (Севастополь, 08 – 13 июля 2019 г.), под редакцией засл. деятеля науки РФ, д.ф.-м.н., проф. Бондаренко Г.Г., М.: ФГБНУ “НИИ ПИТ”, 2019, с. 407 – 418.

References

1. Grigorev I.S., Meylikhov E.Z. *Fizicheskie velichiny. Spravochnik* [Physical values. Reference book]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1991, 1232 p.
2. Bondarenko G.G., Ivanov L.I., Yanushkevich V.A. Vozdeystvie gigantskikh impulsov lazera na mikrostrukturu alyuminiya [The effect of giant laser pulses on the microstructure of aluminum.]. *Fizika i khimiya obrabotki materialov — Physics and chemistry of materials treatment* (in Russ), 1973, no. 4, pp. 19 – 21.
3. Larikov L.N., Falchenko V.M., Mazanko V.F. Anomalnoe uskorenie diffuzii pri impulsnom nagruzenii metallov [Anomalous acceleration of diffusion under pulsed loading of metals.]. *Dokl. AN SSSR, Seriya matematika i fizika — Report of USSR Academy of sciences. Mathematics and physics series*, 1975, vol. 221, no. 5, pp. 1073 – 1075.
4. Ivanov L.I., Litvinova N.A., Yanushkevich V.A. Anomalnoe raspredelenie plotnosti tochechnykh defektov, obrazuyushchikhsya v pogloshchayushchem materiale pri lazernom obluchenii [Anomalous density distribution of point defects formed in the absorbing material under laser irradiation.]. *Fizika i khimiya obrabotki materialov — Physics and chemistry of materials treatment* (in Russ), 1976, no. 2, pp. 3 – 6.
5. Ivanov L.I., Litvinova N.A., Yanushkevich V.A. Depth of formation of a shock wave due to interaction of laser radiation with the surface of a molybdenum single crystal. *Soviet Journal of Quantum Electronics*, 1977, vol 7, pp. 121-122. DOI:10.1070/QE1977v007n01ABEH008843.
6. Kanel G.I., Razoryonov S.V., Utkin A.V., Fortov V.E. *Udarno-volnovye yavleniya v kondensirovannykh sredakh* [Shock-wave phenomena in condensed media]. Moscow, Yanus-K Publ., 1996. – 408 p.
7. Bonyushkin E.K., Zavada N.I., Novikov S.A., Uchaev A.Ya. *Kinetika dinamicheskogo razrusheniya*

- metallov v rezhime impulsnogo obyomnogo razogreva* [The kinetics of dynamic fracture of metals in the mode of pulse volume heat-up]. Sarov, Russian Federal Nuclear Center All-Russian Research Institute of Experimental Physics, 1998, no 3, 275 p.
8. Didenko A.N., SHarkeev Yu.P., Kozlov E.V., Ryabchikov A.I. *Effekty dalnodeystviya v ionno-implantirovannykh metallicheskih materialakh* [Long-range effects in ion-implanted metal materials.]. Tomsk, NTL Publ., 2004, 328 p.
 9. Borovickaya I.V., Ivanov L.I., Dedyurin A.I., Krokhin O.N., Nikulin V.YA., Tikhomirov A.A. Vozdeystvie vysokotemperaturnoy impulsnoy deuterioy plazmy na vanadiy [Change of vanadium volume properties under effect of high-temperature dense pulse deuterium plasma]. *Perspektivnye Materialy — Advanced Materials* (in Russ), 2003, no. 2, pp. 24 – 28.
 10. Fortov V.E. Intense shock waves and extreme states of matter. *Physics Uspekhi*, 2007, vol. 50, iss. 4, pp. 353 – 337. DOI:10.1070/PU2007v050n04ABEH006234.
 11. Antoun T., Seaman L., Curran D.R., Kanel G.I., Razorenov S.V., Utkin A.V. *Spall Fracture*. New York, Springer, 2003, 404 p.
 12. Latyshev S.V., Gribkov V.A., Maslyaev S.A., Pimenov V.N., Padukh M., Zelinska E. Generation of shock waves in materials science experiments with dense plasma focus device. *Inorganic Materials: Applied Research*, 2015, vol 6, issue 2, pp. 91 – 95.
 13. Cicuttin A., Crespo M.L., Gribkov V.A., Niemela J., Tuniz C., Zanolli C., Chernysheva M., Demina E.V., Latyshev S.V., Pimenov V.N., Talab A.A. Experimental results on the irradiation of nuclear fusion relevant materials at the dense plasma focus “Bora” device. *Nuclear Fusion*, 2015, vol. 55 (6), art. 063037 (7 pp). DOI:10.1088/0029-5515/55/6/063037.
 14. Demin A.S., Maslyaev S.A., Pimenov V.N., Gribkov V.A., Demina E.V., Latyshev S.V., Lyakhovitskiy M.M., Sasinovskaya I.P., Bondarenko G.G., Gaydar A.I., Padukh M. Vozdeystvie moshchnykh impulsnykh potokov ionov deuteriya i deuterioy plazmy na molibdenovuyu plastinu [Effect of power pulsed flows of deuterium ions and deuterium plasma on molybdenum plate]. *Fizika i khimiya obrabotki materialov — Physics and chemistry of materials treatment*, 2017, no 6, pp. 5 – 17.
 15. Guskov S.Yu., Borodzyuk S., Kalal M., Kasperchik A., Kralikova B., Krousski E., Limpoukh I., Mshek K., Pisarchik T., Pisarchik P., Pfeyfer M., Rokhlina K., Skala Y., Ulshmid Y. Generation of shock waves and formation of craters in a solid material irradiated by a short laser pulse. *Quantum Electronics*, 2004, vol. 34, no. 11, pp. 989 – 1003.
 16. Ivanov L.I., Nikiforov Yu.N., Yanushkevich V.A. Change of electric conductivity of semiconductor crystals by passage of a shock wave from a laser pulse. *JETP*, 1975, vol. 40, no. 1, p. 75.
 17. Yanushkevich V.A. Zakonomernosti obrazovaniya tochechnykh defektov v udarnoy volne maloy amplitudy [Regularities of formation of point defects in a small-amplitude shock wave.]. *Fizika i khimiya obrabotki materialov — Physics and chemistry of materials treatment*, 1979, no 2, pp. 47 – 51.
 18. Gribkov V.A., Latyshev S.V., Maslyaev S.A., Pimenov V.N. Chislennoe modelirovanie vzaimodeystviya impulsnykh potokov energii s materialom v ustanovkakh Plazmennyy fokus [Numerical simulation of the pulsed energy flows interaction with material in the Plasma Focus devices]. *Fizika i khimiya obrabotki materialov — Physics and chemistry of materials treatment*, 2011, no. 6, pp. 16 – 22.
 19. Epifanov N.A., Bondarenko G.G., Gribkov V.A., Latyshev S.V., Nikitushkina O.N., Pimenov V.N. Action of shocks generated in solid targets by dense plasma focus devices and at pulsed laser irradiation. *Procedia Manufacturing*, 2019, vol. 37, pp. 500 – 507.
 20. Zeldovich Ya.B., Rayzer Yu.P. *Fizika udarnykh voln i vysokotemperaturnykh gidrodinamicheskikh yavleniy* [Physics of shock waves and high-temperature hydrodynamic phenomena]. Moscow, Nauka Publ., 1966, 688 p.
 21. Trunin R.F. Issledovanie ekstremalnykh sostoyaniy kondensirovannykh veshchestv metodom udarnykh voln [Research of extreme States of condensed substances by the shock wave method], Sarov: The Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Scientific Research Institute of Experimental Physics (RFNC-VNIIEF) Publ., 2006, 286 p.
 22. Lavrentev M.A., SHabat B.V.. Problemy gidrodinamiki i ikh matematicheskie modeli [Problems of hydrodynamics and their mathematical models]. Moscow: Nauka Publ., 1973, 416 p.
 23. Trishin Yu.A. *Fizika kumulyativnykh processov* [Physics of cumulative processes]. Novosibirsk, M.A. Lavrentev IGD SO RAN Publ., 2005, 324 p.
 24. Savenkov G.G., Meshcheryakov YU.I., Barakhtin B.K. Influence of velocity nonuniformity in a medium on the penetration of cumulative jets and extended flyer plates. *Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics*, 2010, vol. 55, no 10, pp. 1524 – 1529.
 25. Kanel G.I. *Udarnye volny v fizike tvyordogo tela* [Shock waves in solid state physics]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2018, 203 p.
 26. Meshcheryakov Yu.I. *Mnogomasshtabnye udarno-volnovye processy v tvyordykh telakh* [Multiscale shock wave processes in solids]. St-Petersburg, Nestor-Istoriya Publ., 2018, 476 p.
 27. Borovickaya I.V., Gribkov V.A., Demin A.S. et al. Povrezhdaemost i deformatsionnye efekty v poverkhnostnykh sloyakh medi i splava sistemy med – galliy pri impulsnom obluchenii v ustanovke Plazmennyy fokus [Damage and deformation effects in surface layers of copper and an alloy of the copper-gallium system under pulsed irradiation in the Plasma focus installation]. *Perspektivnye Materialy — Advanced Materials* (in Russ), 2020, no 5, pp. 23 – 36.
 28. Pimenov V.N., Gribkov V.A., Doubrovsky A.V. et al. Influence of powerful pulses of hydrogen plasma upon

- materials in PF – 1000 device. Nukleonika, 2002, vol. 47 (4), pp. 155 – 162.
29. Kolokolcev V.N., Maslyaev S.A., Borovickaya I.V. et al. *Výbros chastic tugoplavkikh metallov s poverkhnosti folg pod vozdeystviem udarnykh voln, generiruemyykh na ustanovke plazmennyy focus* [Release of particles of refractory metals from the surface of foils under the influence of shock waves generated at the plasma focus facility]. Proc. Int. Conference Radiation solid state physics, Moscow, FGBNU NII PMT Publ., 2019, pp. 407 – 418.

Статья поступила в редакцию — 16.03.2020 г.

после доработки — 23.06.2020 г.

принята к публикации — 24.06.2020 г.

Грибков Владимир Алексеевич — Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН (119334, Москва, Ленинский проспект, 49), главный научный сотрудник, профессор, доктор физико-математических наук, специалист в области экспериментальной физики плотной плазмы.

Латышев Сергей Владимирович — Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН (119334, Москва, Ленинский проспект, 49), старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, специалист в области физики плазмы и численного моделирования; Московский технический университет связи и информатики (111024, Москва, ул. Авиамоторная, 8а), доцент. E-mail: latyshevsv@rambler.ru.

Пименов Валерий Николаевич — Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН (119334, Москва, Ленинский проспект, 49), заведующий лабораторией, доктор физико-математических наук, специалист в области радиационного и космического материаловедения. E-mail: pimval@mail.ru.

Масляев Сергей Алексеевич — Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН (119334, Москва, Ленинский проспект, 49), старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, специалист в области радиационного и космического материаловедения. E-mail: maslyaev@mail.ru.

Демина Елена Викторовна — Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН (Москва, 119334, Москва, Ленинский пр., 49), ведущий научный сотрудник, кандидат технических наук, специалист в области радиационного и космического материаловедения. E-mail: elenadyom@mail.ru.

Дёмин Александр Сергеевич — Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН (119334, Москва, Ленинский проспект, 49), научный сотрудник, специалист в области радиационного материаловедения. E-mail: casha@bk.ru.

Морозов Евгений Вадимович — Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН (119334, Москва, Ленинский проспект, 49), научный сотрудник, специалист в области наноматериалов. E-mail: lieutenant@list.ru.

Епифанов Никита Андреевич — Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А.Байкова РАН (119334, Москва, Ленинский проспект, 49), младший научный сотрудник; Национальный исследовательский университет “Высшая школа экономики” (101000 Москва, Россия, ул. Мясницкая, 20), аспирант. E-mail: morphix94@gmail.com.

Казилин Евгений Евгеньевич — Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН (119334, Москва, Ленинский проспект, 49), старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, специалист в области радиационного материаловедения. E-mail: cash@bk.ru.

Сасиновская Ирина Порфирьевна — Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН (119334, Москва, Ленинский проспект, 49), научный сотрудник, специалист в области металлографии. E-mail: porfirievna@mail.ru.

Features of metal destruction under pulse laser and beam-plasma exposure

**V. A. Gribkov, S. V. Latyshev, V. N. Pimenov, S. A. Maslayev, E. V. Demina,
A. S. Demin, E. V. Morozov, N. A. Epifanov, E. E. Kazilin, I. P. Sasinovskaya**

The features of the destructive effect of high-pressure generated under comparable conditions, namely, upon irradiation of target samples with pulsed laser radiation and beam-plasma flows created in Plasma Focus (PF) devices, on metal materials were studied. In both cases, close parameters of radiation-heat treatment were provided: power density $q \sim 10^{10}\text{--}10^{11}$ W/cm² and pulse duration $\tau \sim 10\text{--}100$ ns. It has been shown that the double exposure of laser radiation to thin samples of vanadium and molybdenum with a thickness of 0.3 mm and 0.1 mm, respectively, leads to the formation of molten zones in the materials, inside which there were deep craters. The craters extended over the entire thickness of the samples, on the reverse side of which the recesses end with holes of ~ 0.1 mm for V and 0.2 mm for Mo. In a tungsten sample 0.2 mm thick, the depth of the craters in the molten zone was less than its thickness and there were microcracks on the back of the sample. Based on numerical estimates of the process under study, it was suggested that the observed effects are associated with the creation of high pressure zones of $\sim 1\text{--}10$ GPa in the irradiated targets, localized in microregions of radius $r \sim 0.1$ mm. In these zones, the behavior of the solid phase of the target materials, for which the tensile strength $\sigma_B \leq 1$ GPa (V, Mo, W), under high pressure became close to the behavior of the liquid. The pseudo-liquid phase of the material was displaced from the center of the crater, where the pressure was maximum, to its periphery to the region of low pressure with the subsequent release of matter from the target through the irradiated surface at a speed of $\sim 10^3$ m/s. In experiments using the PF, the mechanism responsible for the formation of craters when a powerful pulsed laser radiation is applied to the target is not realized due to the different nature of the distribution of the absorbed energy density in the surface layer of the irradiated sample. The region in which the energy absorbed during the of particles implantation into the material was determined mainly by the average energy and the diameter of the ion beam ($E_i \approx 100$ keV, $d \sim 2\text{--}10$ mm) and exceeds by one or two orders of magnitude the corresponding volume under laser irradiation.

Keywords: pulsed laser radiation, plasma focus, pulsed ion and plasma flows, crater formation.

Gribkov Vladimir — Baikov Institute of Metallurgy and Material Science RAS (49 Leninskii Prospect, Moscow 119334, Russia), DrSci (Phys-Math), prof., principal research worker.

Latyshev Sergei — Baikov Institute of Metallurgy and Material Science of RAS (49 Leninskii Prospect, Moscow 119334, Russia), PhD, senior research worker; Moscow Technical University of Communications and Informatics (8a Aviamotornaya Street, Moscow 111024, Russia), associate professor. E-mail: latyshevsv@rambler.ru.

Pimenov Valeriy — Baikov Institute of Metallurgy and Material Science RAS (49 Leninskii Prospect, Moscow 119334, Russia), Dr Sci (Phys-Math), head of laboratory. E-mail: pimval@mail.ru.

Maslyayev Sergey — Baikov Institute of Metallurgy and Material Science RAS (49 Leninskii Prospect, Moscow 119334, Russia), PhD, senior research worker. E-mail: maslyayev@mail.ru

Demina Elena — Baikov Institute of Metallurgy and Material Science RAS, (49 Leninskii Prospect, Moscow, 119334, Russia), PhD, leading research worker. E-mail: elenadyom@mail.ru.

Demin Aleksandr — Baikov Institute of Metallurgy and Material Science of RAS (49 Leninskii Prospect, Moscow 119334, Russia), research worker. E-mail: casha@bk.ru.

Morozov Evgenii — Baikov Institute of Metallurgy and Material Science of RAS (49 Leninskii Prospect, Moscow 119334, Russia), research worker. E-mail: lieutenant@list.ru.

Epifanov Nikita — Baikov Institute of Metallurgy and Material Science RAS (49 Leninskii Prospect, Moscow 119334, Russia), junior researcher; National Research University Higher School of Economics (20 Myasnitskaya, Moscow 101000, Russia), postgraduate student. E-mail: mophix94@gmail.com.

Kazilin Evgeniy — Baikov Institute of Metallurgy and Material Science RAS (49 Leninskii Prospect, Moscow 119334, Russia), PhD, senior research worker. E-mail address: casha@bk.ru.

Sasinovskaya Irina — Baikov Institute of Metallurgy and Material Science RAS (49 Leninskii Prospect, Moscow 119334, Russia), research worker. E-mail address: porfirievna@mail.ru.