УДК 538.97-405+53.072;53:004

# ВЛИЯНИЕ МЕХАНИЗМОВ ГЕНЕРАЦИИ НА ПРОФИЛЬ ИМПУЛЬСА МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ МИШЕНИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ МОЩНЫХ ИОННЫХ ПУЧКОВ

В.И. Бойко, Ю.В. Данейкин, А.В. Хадкевич, К.В. Юшицин

Томский политехнический университет E-mail: daneykin@phtd.tpu.ru

Предложена модель системы «Мощный ионный пучок – металл». Рассмотрены закономерности формирования импульсов механической нагрузки в объеме металлической мишени, испытывающей воздействие ионных пучков различного компонентного состава в диапазоне плотностей мощности 10<sup>7</sup>...10<sup>10</sup> Вт/см<sup>2</sup>. Исследовано влияние механизмов генерации на профиль и амплитудно-временные параметры ударно-волнового возмущения.

### Введение

Современные системы генерации импульсных пучков заряженных частиц позволяют получать концентрированные потоки энергии в широком диапазоне интенсивностей  $W=10^5...10^{13}$  Вт/см<sup>2</sup>, при длительности импульса  $10^{-8}...10^{-6}$  с. Такой широкий диапазон энергетического воздействия определяет возможность возбуждения в объеме мишени разнородных физических явлений и, как следствие, многообразие результирующих эффектов, возникающих как при протекании отдельных процессов, так и при их суперпозиции. Эти процессы могут использоваться для решения широкого круга научных и технологических задач.

Промежуточный диапазон плотностей мощности 10<sup>7</sup>...10<sup>10</sup> Вт/см<sup>2</sup>, характеризуется большим количеством возбуждаемых процессов (высокоскоростной нагрев, фазовые переходы, плазмообразование, абляция, генерация акустических и ударных волн и другие), параллельное протекание которых определяет множество технологических возможностей использования мощных ионных пучков (МИП). Микро- и наносекундная длительность воздействия и нелинейность относительно условий облучения, делает труднодоступным экспериментальное исследование быстропротекающих фазовых превращений. Существующие экспериментальные исследования [1] дают интегральную картину системы «МИП – металл» и, как следствие, ориентированы на конечный результат воздействия. Детальное исследование динамики реальной физической системы в целом возможно только в рамках численного эксперимента.

Вопросам генерации ударно-волнового возмущения в металлах при воздействии МИП посвящен ряд работ [1–5]. В диапазоне интенсивностей 10<sup>7</sup>...10<sup>10</sup> Вт/см<sup>2</sup> в системе «МИП – металл» термоупругие и взрывные механизмы нагружения протекают параллельно. Обособленное рассмотрение каждого из механизмов пригодно только при качественном исследовании. Установление детальных причинно-следственных связей (между параметрами МИП воздействующего на металл и результатом этого воздействия, выражающегося в процессах деформации, диссипации и т. д.) требует исследования процессов диссипации ударно-волнового возмущения и закономерностей его вырождения в акустическое. Эволюция импульса механических напряжений во многом определяется закономерностями формирования его амплитудных и пространственно-временных характеристик на этапе взаимодействия МИП с мишенью. Следовательно, определение особенностей топографии ударноволнового возмущения и его максимальных амплитудных параметров на момент окончания воздействия МИП а также установление их взаимосвязей с параметрами пучка является актуальной задачей.

# 1. Модель упруго-пластической среды

Решение поставленной задачи проводилось с использованием авторских гидродинамических кодов, реализующих обобщенную модель упругопластической среды, испытывающей мощное импульсное воздействие [6]. Модель основана на лагранжевом формализме описания поведения сплошной среды. При использовании не зависящих от времени лагранжевых координат для описания движения среды, субстанциональные производные совпадают с частными. Частные производные определяются для каждой лагранжевой частицы, для чего необходимо знать их текущие эйлеровы координаты.

Законы сохранения, кинематические и физические соотношения для сжимаемой упругопластической среды в лагранжевой форме для цилиндрической системы координат r, z,  $\theta$  могут быть представлены как:

Уравнения движения

$$a_{z} = \frac{\partial \upsilon_{z}}{\partial t} = V \left[ \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + \frac{\partial \sigma_{zr}}{\partial r} + \frac{\alpha}{r} \sigma_{zr} \right],$$
$$a_{r} = \frac{\partial \upsilon_{r}}{\partial t} = V \left[ \frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_{zr}}{\partial z} + \frac{\alpha}{r} (\sigma_{rr} - \sigma_{\theta\theta}) \right],$$

где  $\sigma_{zz} = S_{zz} - p$ ;  $\sigma_n = S_n - p$ ;  $\sigma_{\theta\theta} = S_{\theta\theta} - p$  – полные напряжения, выраженные через составляющие тензора гидростатического давления и составляющие девиатора тензора напряжений;  $\sigma_{zz} = S_{zz}$  – касательное напряжение;  $\upsilon_z$ ,  $\upsilon_r$  – компоненты вектора скорости в осевом и радиальном направлениях соответственно;  $V = \rho_0 / \rho$  – удельный объем лагранжевой

частицы;  $\rho_0$ ,  $\rho$  – начальная и текущие плотности материала среды; p – гидростатическое давление;  $\alpha$  – коэффициент симметрии задачи ( $\alpha$ =0 в плоском,  $\alpha$ =1 в цилиндрическом случае) [12].

Уравнение неразрывности

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\partial V}{\partial t} = V \left[ \frac{\partial \upsilon_r}{\partial r} + \frac{\partial \upsilon_z}{\partial z} + \frac{\alpha}{r} \upsilon_r \right].$$

Уравнение энергии

$$\begin{aligned} \frac{dE}{dt} &= \frac{\partial E}{\partial t} = \\ &= -p \frac{\partial V}{\partial t} + V[S_{zz}\dot{\varepsilon}_{zz} + S_{rr}\dot{\varepsilon}_{rr} + S_{\theta\theta}\dot{\varepsilon}_{\theta\theta} + S_{zr}\dot{\varepsilon}_{zr}] + QV, \end{aligned}$$

где E – удельная внутренняя энергия, отнесенная к единице начального объема; Q – функция источника энергии;  $\dot{\varepsilon}_{ij}$  – составляющие тензора скоростей деформации:

$$\dot{\varepsilon}_{zz} = \frac{\partial \upsilon_z}{\partial z},$$
  
$$\dot{\varepsilon}_{rr} = \frac{\partial \upsilon_r}{\partial r},$$
  
$$\dot{\varepsilon}_{\theta\theta} = \alpha \, \frac{\upsilon_r}{r} = \left[ \frac{\dot{V}}{V} - (\dot{\varepsilon}_{zz} + \dot{\varepsilon}_{rr}) \right],$$
  
$$\dot{\varepsilon}_{zr} = \frac{\partial \upsilon_z}{\partial r} + \frac{\partial \upsilon_r}{\partial z}.$$

Функция источника энергии

$$Q = q_{V}(z,r) + \operatorname{div}\left(\lambda \left[\frac{\partial T}{\partial z} + \frac{\partial T}{\partial r} + \alpha \frac{T}{r}\right]\right),$$

где  $q_v$  – объемная мощность поглощения энергии,  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности.

Компоненты девиатора тензора напряжений

$$\begin{split} &\frac{\partial S_{zz}}{\partial t} = 2G\left(\dot{\varepsilon}_{zz} - \frac{1}{3}\frac{\dot{V}}{V}\right) + \delta_{zz}, \\ &\frac{\partial S_{rr}}{\partial t} = 2G\left(\dot{\varepsilon}_{rr} - \frac{1}{3}\frac{\dot{V}}{V}\right) + \delta_{rr}, \\ &\frac{\partial S_{\theta\theta}}{\partial t} = 2G\left(\dot{\varepsilon}_{\theta\theta} - \frac{1}{3}\frac{\dot{V}}{V}\right), \\ &\frac{\partial S_{zr}}{\partial t} = G(\dot{\varepsilon}_{zr}) + \delta_{zr}, \end{split}$$

где G=G(p,T) — модуль сдвига,  $\delta_{ij}$  — поправка, учитывающая возрастание напряжений при повороте элемента среды как единого целого.

$$\delta_{zz} = -\delta_{rr} = S_{zr} \left( \frac{\partial \upsilon_z}{\partial r} - \frac{\partial \upsilon_r}{\partial z} \right),$$
  
$$\delta_{zr} = \frac{1}{2} (S_{zz} - S_{rr}) \left( \frac{\partial \upsilon_r}{\partial z} - \frac{\partial \upsilon_z}{\partial r} \right).$$

Условие пластического течения Мизеса

В выбранной системе координат справедливо равенство

$$S_1^2 + S_2^2 + S_3^2 = S_{zz}^2 + S_{rr}^2 + S_{\theta\theta}^2 + 2S_{zr}^2$$

где *S*<sub>1</sub>, *S*<sub>2</sub>, *S*<sub>3</sub> – главные девиаторные напряжения. Следовательно, условие текучести Мизеса имеет вид:

$$f = S_{zz}^{2} + S_{rr}^{2} + S_{\theta\theta}^{2} + 2S_{zr}^{2} \le \frac{2}{3\sigma_{T}^{2}}$$

здесь  $\sigma_{T}(p,T)$  – динамический предел текучести ма-

териала мишени. Если  $f > \frac{2}{3\sigma_T^2}$ , необходимо скор-

ректировать значения девиаторных компонент путем приведения напряжений на круг текучести. Для этого каждый из них умножается на коэффициент

$$S_{ij}' = \sqrt{\frac{2}{3f}} \sigma_T S_{ij}.$$

Скорректированные таким образом значения  $S'_{ij}$ используются при интегрировании исходной системы уравнений. Такое приведение напряжений влияет только на пластическую часть напряжений и эквивалентно использованию полных соотношений теории пластического течения Прандтля-Рейсса при  $\sigma_i = \sigma_T [7]$ .

Уравнение состояния

$$p = p(\rho, E)$$

Гидростатическое давление p, а также удельная внутренняя энергия  $\varepsilon$  подразделяются на упругие и тепловые составляющие. Первые  $p_s$ ,  $\varepsilon_s$  связаны исключительно с силами межатомного взаимодействия и не зависят от температуры. Вторые  $p_T$ ,  $\varepsilon_T$  обусловлены тепловым движением атомов и являются функциями температуры T и плотности  $\rho$ :

$$p(\rho,T) = p_s(\rho) + p_T(\rho,T),$$

$$\varepsilon(\rho, I) = \varepsilon_s(\rho) + \varepsilon_T(\rho, I).$$

Такой подход позволяет учитывать преодоление сил межатомного взаимодействия при расширении вещества и фазовых переходах. Упругие и тепловые составляющие определялись по широкодиапазонному уравнению состояния [8].

### Начальные и граничные условия

При нормальных условиях сплошная среда находится в невозмущенном стационарном состоянии, и должен выполняться энергетический критерий устойчивого равновесного состояния — потенциальная энергия минимальна. Этот принцип положен в основу задания начальных и граничных условий в нашей модели. В начальный момент времени вещество поглотителя находится в невозмущенном состоянии. Индивидуальные лагранжевы частицы мишени покоятся, т. е.  $\upsilon_z = \upsilon_r = 0$ . Деформации и напряжения отсутствуют, компоненты девиатора тензора напряжений и тензора деформаций равны нулю ( $\varepsilon_{i} = S_{i} = 0$ ). Начальное термодинамическое состояние однозначно определяется начальной температурой. При внесении в систему энергии вещество испытывает тепловое расширение и стремится к новому стационарному состоянию. Подведенная энергия переходит в кинетическую энергию расширяющегося вещества, в тепловую и упругую составляющие внутренней энергии. В рамках нашей модели новое стационарное состояние соответствует минимуму полной внутренней энергии, а параметры в точке минимума определяют граничные условия (граница раздела «вещество – вакуум»). При этом полное давление на границе равно нулю, а плотность, температура, внутренняя энергия и скорость движения границы определялись из условия адиабатического расширения вещества. Такой подход позволяет более корректно определять все параметры состояния в фиктивной ячейке.

# 2. Результаты численного моделирования и их обсуждение

В сериях численных экспериментов исследованы процессы формирования импульсов механического возмущения, генерируемых при воздействии МИП, в металлической пластине при плотностях мощности  $10^7...10^9$  Вт/см<sup>2</sup>. Последняя варьировалась изменением плотности ионного тока при фиксированных амплитудных значениях ускоряющего напряжения U=660 кВ и длительности пучка  $\tau=120$  нс. Формы импульсов ускоряющего напряжения и плотности тока задавались в соответствии с реальными параметрами, полученными на ускорителе «BEPA» (рис. 1) [9]. Рассматривались пучки различного компонентного состава (парциальных долей ионов углерода и протонов).



**Рис. 1.** Амплитудно-временная развертка импульса ускоряющего напряжения и плотности ионного тока на выходе из узла генерации

На рис. 2 приведен характерный импульс механического возмущения, возбуждаемый в объеме алюминиевой мишени протонно-углеродным пучком (60 % – протоны, 40 % – ионы углерода) плотностью мощности 8,43·10<sup>8</sup> Вт/см<sup>2</sup>. В упруго-пластической среде импульс полного давления имеет сложную структуру. При амплитудах, превышающих предел текучести металла σ<sub>ε</sub>, формируется устойчивая последовательность упругой и пластической волны [10]. В области разгрузки также наблюдается проявление упруго-пластических свойств, чередование упругой и пластической волн разгрузки, распространяющихся с различными скоростями (при амплитудных значениях импульса полного давления превышающих  $2\sigma_s$ ) [11]. Передний фронт упруго-пластического импульса является ударным. Разгрузка вещества подчиняется законам адиабатического расширения. Кроме того, в переднем фронте наблюдается выпуклый участок, который обусловлен импульсом отдачи от тяжелой (углеродной) компоненты пучка.

В исследованиях механизмов генерации импульсов механических напряжений (например [1]) в качестве основных выделяются два: термоупругий, обусловленный интенсивным тепловым расширением области энерговыделения и абляционный (при наличии взрывного испарения поверхности вследствие интенсивного разогрева). На рис. 2 наблюдается четко выраженное формирование термоупругого возмущения, предшествующее упруго-пластической волне. Последняя обусловлена реализацией абляционного механизма.



нс. 2. Импульс механических возмущении, возоуждаемых МИП плотностью мощности 8,45:10<sup>8</sup> BT/см<sup>2</sup> в алюминиевой мишени к моменту окончания импульса тока



**Рис. 3.** Эволюция импульса механических возмущений (рис. 2) в алюминиевой мишени после окончания воздействия пучка ускорителя «BEPA»

При распространении вглубь мишени амплитуда импульса механических возмущений интенсивно уменьшается (рис. 3), что в большей степени связано с негидродинамическим характером затухания, когда упругая волна разгрузки «догоняет» пластический ударный фронт [12]. При исследовании влияния плотности мощности пучка на закономерности реализации механизмов генерации рассматривались максимальные амплитудные значения полного давления в импульсе механической нагрузки, достигаемые, как правило, на момент окончания импульса тока.

# 2.1. Термоупругий механизм генерации

На рис. 4 представлены зависимости максимальной амплитуды в импульсе механического возмущения от плотности ионного тока для различного компонентного состава пучка. При значениях плотностей тока 1,35·10<sup>8</sup> Вт/см<sup>2</sup> для протонного и 6,75·10<sup>7</sup> Вт/см<sup>2</sup> для протонно-углеродного пучка ускорителя «ВЕРА» наблюдается «включение» абляционного механизма генерации импульса. Соответственно до указанных плотностей мощности реализуется только термоупругий механизм.



**Рис. 4.** Зависимость максимальной амплитуды в импульсе механических возмущений от плотности ионного тока при воздействии МИП различного компонентного состава на алюминиевую мишень

При реализации термоупругого механизма генерации зависимость амплитуды возмущения от плотности ионного тока линейна [1]. Импульсы, формирующиеся термоупругим механизмом, по амплитуде не превышают пределов текучести металлов. Здесь основными процессами определяюшими модификацию свойств металлов на глубинах превышающих область энерговылеления являются процессы релаксации температурного поля. Присутствие в пучке углеродной компоненты приводит к изменению амплитудных параметров термоупругого возмущения. Волновое механическое возмущение формируется вблизи облучаемой поверхности в основном за счет градиента давления на границе области энерговыделения. Наличие углеродной компоненты изменяет профиль энерговыделения (рис. 5) и, соответственно, градиенты полного давления в данной области. Перераспределение

поглощенной энергии в менее глубокие поверхностные слои мишени определяет более раннее (по плотности ионного тока) формирование плазменного факела и, следовательно, более раннее «включение» абляционного механизма.



Рис. 5. Поля удельной поглощенной за длительность пучка энергии от 1) протонного; 2) протонно-углеродного пучка ускорителя «BEPA»



**Рис. 6.** Динамика осевой составляющей напряжения (с обратным знаком) на оси МИП на начальном этапе взаимодействия



ратным знаком) на оси МИП до момента окончания импульса тока

На рис. 6, 7 представлена динамика поля механических напряжений, формирующегося у облучаемой поверхности за время действия МИП с плотностью тока 1·10<sup>8</sup> Вт/см<sup>2</sup>. Поглощенная энергия пучка увеличивает тепловую составляющую внутренней энергии вещества  $\varepsilon_{T}$ , что неотъемлемо сопровождается локальным ростом тепловой компоненты давления  $p_{T}$ . В процессе теплового расширения вещества мишени удельный объем увеличивается, что обуславливает рост отрицательной по знаку упругой компоненты давления  $p_s$ . При этом тепловая внутренняя энергии переходит в кинетическую энергию расширяющегося вещества и упругую составляющую внутренней энергии. Скорости подвода энергии и расширения вещества таковы, что рост тепловой компоненты давления *p*<sub>T</sub> не компенсируется ростом отрицательной упругой компоненты  $p_s$ . В одной из наших работ [6] теоретически обоснован механизм формирования импульса разгрузки, распространяющегося вглубь мишени. Это обосновывалось более быстрым ростом (по сравнению с тепловой составляющей давления) осевой компоненты девиатора напряжений. В данном случае этот механизм не реализуется, что связано с дополнительным учетом температурной зависимости упругих свойств металла. Таким образом, на границе области энерговыделения формируется импульс сжатия.

При выходе импульса из зоны взаимодействия происходит релаксация сдвиговых напряжений и формируется «двугорбая» волна сжатия. Данный эффект является следствием упруго-пластических свойств вещества и проявляется в том случае, когда в результате нагрева вещества в зоне энерговклада происходит достижение предела текучести материала, при этом скачкообразно меняется скорость звука для волн разрежения, что приводит к повторной релаксации напряжений и формированию второго импульса сжатия. В [13] в ходе математического моделирования воздействия на алюминиевую пластину МИП прямоугольной формы (плотностью мощности (3...4)·10<sup>7</sup> Вт/см<sup>2</sup>) установлена возможность формирования такой двухволновой конфигурации. Обнаруженный эффект имеет устойчивую тенденцию к появлению и наблюдался в численных экспериментах при варьировании сорта и энергии ионов, а также плотности тока пучка. Однако, при значительном отклонении от указанного диапазона плотностей суммарного энерговклада двухволновая структура не возникала. В наших численных экспериментах данный эффект присутствует даже тогда, когда абляционный механизм генерации становиться основным. Такой результат получен при моделировании воздействия реального пучка, в развертках импульсов ускоряющего напряжения и тока которого наблюдается длительная фаза нарастания параметров. Процессы релаксации напряжений, связанные с текучестью металла, происходят на начальном этапе взаимодействия, когда максимальные амплитудные параметры пучка еще не достигнуты, а абляционный механизм пока не «включился».

К моменту времени 25 нс от начала взаимодействия на границе области локального энерговыделения достигается температура плавления. Энергетические затраты на протекание фазового перехода «твердое тело – расплав» приводят к снижению скорости роста тепловой составляющей давления за фронтом импульса, сформированного на начальном этапе взаимодействия. Релаксация сдвиговых напряжений в жидкой фазе, а также увеличение абсолютного значения упругой составляющей давления  $p_s$  вследствие объемного расширения обуславливает формирование отрицательной фазы в импульсе механических напряжений. К моменту окончания импульса тока сформированный импульс имеет биполярную структуру. Длительность сгенерированного биполярного импульса составляет т≈120 нс, что соответствует длительности воздействия МИП на мишень. Данный факт подтверждает слабое влияние процессов теплопроводности на генерацию возмущений импульсными МИП [14].

После окончания импульса тока сформировавшийся импульс механических напряжений двигается вглубь мишени с продольной скоростью звука. Дальнейшие процессы характеризуются релаксацией температурного поля.

## 2.2. Абляционный механизм генерации

На рис. 4 видно, что увеличение плотности ионного тока приводит к скачкообразному изменению зависимости амплитуды импульса механических напряжений от плотности ионного тока. В случае больших плотностей поглощенной энергии, когда возникают процессы испарения вещества мишени, изменяются и процессы, ответственные за возбуждение импульсного возмущения. При увеличении плотности тока наблюдается насыщение амплитудных значений импульса механических напряжений. Данный факт обусловлен влиянием процессов экранировки частиц пучка плазменным факелом [15]. Интенсивная наработка плазмы приводит к тому, что часть подводимой пучком энергии поглощается газоплазменным факелом.

На рис. 8 представлены изменения максимальных значений полного давления в импульсе механических возмущений во времени для протонного и протонно-углеродного пучка ускорителя «BEPA». Из анализа полученных результатов следует, что независимо от плотности ионного тока (в рассматриваемом диапазоне плотностей мощности) реализация термоупругого механизма (область 1 на рис. 8) всегда предшествует абляционному, причем механизмы генерации разделены во времени. Абляционный механизм «включается» скачком при возникновении на поверхности мишени плазменного факела, что характеризуется резким ростом амплитудных значений импульса давления.

В результате численных экспериментов установлено формирование двух последовательных им-



**Рис. 8.** Динамика изменения максимальных амплитудных значений полного давления в импульсе механических возмущений во времени для а) протонного и б) протонно-углеродного (60 % – протоны, 40 % – ионы углерода) пучка ускорителя «BEPA»

пульсов отдачи при наличии в пучке углеродной компоненты. Наработка плазмы начинается при достижении энергии сублимации на поверхности в области термализации углеродной компоненты. Формирование газоплазменной фазы в области термализации протонной компоненты МИП приводит к формированию второго, большего по амплитуде, импульса отдачи. Такая последовательность процессов наработки плазмы в облучаемом объеме приводит к появлению двух фронтов в пластическом импульсе сжатия (рис. 2). Различие амплитудных параметров импульсов отдачи от различных компонент обусловлено тем, что формирование плазменной короны на поверхности препятствует разлету плазмы, образованной в глубинных слоях мишени.

Процесс наработки плазмы приводит к экранировке глубинных слоев мишени, двигающимся навстречу пучку газоплазменным облаком. Основная часть энергии пучка поглощается факелом, что обуславливает насыщение параметров импульса отдачи. Таким образом, амплитуда генерируемого импульса отдачи ограничена процессами экранировки. Например, при плотности ионного тока 2500 А/см<sup>2</sup> максимальная амплитуда импульса механических напряжений достигается через 40 нс после начала воздействия. Остальной энергозапас пучка расходуется на «подогрев» газоплазменного факела.

На рис. 9 представлена зависимость длительности импульса механических возмущений от плотности ионного тока. «Включение» абляционного механизма нагружения, определяет рост длительности импульса. Область наработки плазмы испытывает расширение по всему объему. На границе «плазма-расплав» выполняется условие равенства давлений. Медленная релаксация давления за фронтом формирующегося импульса сжатия на границе «плазма-расплав» приводит к увеличению длительности импульса. При термоупругом механизме длительность импульса равна длительности пучка. Реализация абляционного механизма генерации приводит к существенному (на порядок) возрастанию длительности импульса и переходу в микросекундный диапазон. При этом зависимость длительности импульса механических возмущений от плотности мощности воздействия имеет асимптотический характер и стремится к насыщению. Во фронте факела на границе «плазма-вакуум» давление стремиться к нулю, поэтому формирующийся импульс сжатия имеет однополярную структуру.



**Рис. 9.** Зависимость длительности импульса механических возмущений от плотности ионного тока

### Заключение

 При воздействии мощного ионного пучка на металлическую мишень линейный рост амплитуды импульса механических возмущений (термоупругий механизм) ограничен «включением» абляционного механизма генерации. Такие импульсы по амплитуде не превышают пределов текучести металлов. Следовательно в этом диапазоне плотностей мощности основными процессами, определяющими модификацию свойств металлов на глубинах, превышающих область энерговыделения, являются процессы релаксации температурного поля.

- Присутствие в пучке тяжелой компоненты (ионов углерода) приводит к уменьшению амплитудных параметров импульса механических возмущений, а также определяет более раннее (по плотности ионного тока) «включение» абляционного механизма генерации.
- В импульсе сжатия наблюдается разделение фронтов возмущений, сформированных различными механизмами. При движении импульса вглубь мишени фронт упругого предвестника абляционной ударной волны медленно догоняет фронт термоупругого возмущения.
- При воздействии протонно-углеродного пучка в мишени формируются две области наработки

# СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бойко В.И., Скворцов В.А., Фортов В.Е., Шаманин И.В. Взаимодействие импульсных пучков заряженных частиц с веществом. – М.: Физматлит, 2003. – 288 с.
- Валяев А.Н., Погребняк А.Д., Плотников С.В. Радиационномеханические эффекты в твердых телах при облучении интенсивными импульсными электронными и ионными пучками. – Усть-Каменогорск: ВКТУ, 1998. – 226 с.
- Бойко В.И., Евстигенеев В.В. Введение в физику взаимодействия сильноточных пучков заряженных частиц с веществом. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 136 с.
- Бойко В.И., Валяев А.Н., Погребняк А.Д. Модификация металлических материалов импульсными мощными пучками частиц // Успехи физических наук. – 1999. – Т. 169. – № 11. – С. 1243–1271.
- Алтухов Д.Е., Бойко В.И., Тихомиров И.А., Шаманин И.В., Юшицин К.В. Описание ударного нагружения металла импульсным ионным пучком в совмещенной упруго-гидродинамической модели // Физика и химия обработки материалов. – 1997. – № 2. – С. 5–11.
- Бойко В.И., Данейкин Ю.В., Юшицин К.В. Численное описание процессов генерации волнового возмущения, обусловленного воздействием на металлическую мишень импульсного энергетического потока // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. 2003. Т. 83. № 3. С. 133–137.
- Глушак Б.Л., Куропатенко В.Ф., Новиков С.А. Исследование прочности материалов при динамических нагрузках. – Новосибирск: Наука, 1992. – 295 с.

плазмы. Это приводит к пространственной неоднородности формирующегося плазменного факела и к генерации двух последовательных во времени импульсов отдачи с формированием характерного профиля в пластическом импульсе.

- 5. При термоупругом механизме длительность импульса равна длительности пучка. Реализация абляционного механизма генерации приводит к существенному возрастанию длительности импульса, которая переходит из субмикросекундного в микросекундный диапазон. Зависимость длительности импульса механических возмущений от плотности мощности воздействия имеет асимптотический характер и стремится к насыщению.
- Бойко В.И., Данейкин Ю.В., Юшицин К.В. Описание параметров состояния вещества в задачах моделирования динамики системы «МИП металл» // Известия Томского политехнического университета. 2004. Т. 307. № 7. С. 16–21.
- Бойко В.И., Быстрицкий В.М., Волков С.Н. и др. Генерация и фокусировка мощного ионного пучка в магнитоизолированном диоде // Физика плазмы. – 1989. – Т. 15. – Вып. 11. – С. 1337–1341.
- Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и выскотемпературных гидродинамических явлений. – М.: Наука, 1968. – 686 с.
- Кянель Г.И., Разоренов С.В., Уткин А.В., Фортов В.Е. Ударноволновые явления в конденсированных средах. – М.: Янус-К, 1996. – 408 с.
- Уилкинс М.Л. Расчет упруго-пластических течений / В сб.: Вычислительные методы в гидродинамике / Под ред. С.С. Григоряна и Ю.Д. Шмыглевского – М.: Мир, 1964. – С. 212–263.
- Барсуков А.В., Мороз А.В., Скворцов В.А. Численное исследование волн сжатия в упругопластических средах импульсным пучком ионов // В сб.: Исследования свойств вещества в экстремальных условиях. – М.: ИВТАН, 1990. – С. 175–181.
- Залюбовский Н.И., Калиниченко А.И., Лазурик В.Т. Введение в радиационную акустику. – Харьков: Вища школа, 1986. – 167 с.
- Алтухов Д.Е., Бойко В.И., Шаманин И.В. Динамика формирования, параметры и структура газоплазменного факела, образующегося при воздействии на металл мощного импульсного ионного пучка // Теплофизика высоких температур. – 1996. – Т. 34. – № 3. – С. 341–348.

Поступила 14.12.2006 г.