

## ПРОЧНОСТЬ И ПЛАСТИЧНОСТЬ

УДК 669.27:539.4

### УДАРНО-ВОЛНОВОЕ НАГРУЖЕНИЕ И ОТКОЛЬНОЕ РАЗРУШЕНИЕ ТЕКСТУРИРОВАННЫХ ВОЛЬФРАМОВЫХ ОБРАЗЦОВ: ЭКСПЕРИМЕНТ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

© 2022 г. А. М. Молодец<sup>а</sup>\*, А. С. Савиных<sup>а</sup>, А. А. Гольшев<sup>а</sup>, Г. В. Гаркушин<sup>а</sup>,  
Г. В. Шилов<sup>а</sup>, А. Н. Некрасов<sup>б</sup>

<sup>а</sup>Институт проблем химической физики РАН, пр. академика Семенова, 1, Черноголовка, 1142432 Россия

<sup>б</sup>Институт экспериментальной минералогии РАН, ул. академика Осипьяна, 4, Черноголовка, 142432 Россия

\*e-mail: molodets@icp.ac.ru

Поступила в редакцию 28.07.2021 г.

После доработки 22.11.2021 г.

Принята к публикации 24.11.2021 г.

Проведена аттестация микроструктурных характеристик исходных текстурированных образцов вольфрама. Выполнены ударно-волновые эксперименты по измерению скорости свободной поверхности образцов. Определены значения динамического предела текучести и откольной прочности образцов различной толщины. Проведено математическое моделирование выполненных экспериментов в рамках гидрокода, использующего авторские уравнения состояния, упругопластическую модель и приближение мгновенного откола. Обсуждена достоверность и прогностические возможности расчетов физико-механического поведения текстурированного вольфрама при ударно-волновом сжатии и высокоскоростном растяжении.

*Ключевые слова:* вольфрам, текстура, динамический предел текучести, откольное разрушение, ударные волны, математическое моделирование, гидрокод

DOI: 10.31857/S0015323022050096

#### ВВЕДЕНИЕ

Среди металлических материалов вольфрам обладает рядом экстремальных физико-механических свойств, таких как наивысшая температура плавления, высокая плотность, малая сжимаемость (см. [1]). Эти свойства обусловили применение вольфрама и его сплавов в ряде важных отраслей промышленности, в частности, военной (см. [2]), атомной (см. [3]) и др.

При исследовании реологических и прочностных свойств вольфрама в условиях высокоскоростного нагружения обычно предпочитают гомогенные образцы этого металла, как, например, в [2]. Вместе с этим функциональные вольфрамовые детали зачастую имеют заранее заданную неоднородную микроструктуру, например, преимущественную ориентацию зерен поликристаллического вольфрама для дивертора токамака [3].

Хорошо известно, что физико-механические свойства гомогенных образцов могут отличаться от свойств анизотропных образцов как в статических, так и в динамических условиях нагружения. Это положение детально проиллюстрировано в [4], где исследовано поведение ударно-сжатых образцов вольфрама в деформированном состоянии и

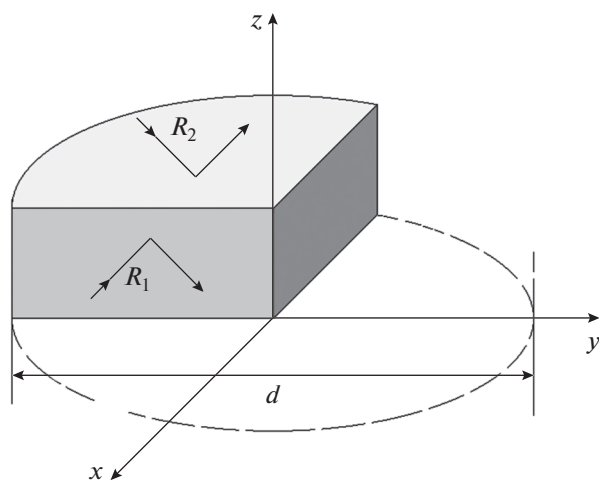
после высокотемпературного отжига. Цель данной работы заключалась в определении пластических и прочностных свойств образцов вольфрама с заданной текстурой в условиях динамического нагружения ударными волнами амплитудой в диапазоне 10–16 ГПа и последующего моделирования результатов проведенных экспериментов.

#### МИКРОСТРУКТУРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИССЛЕДУЕМЫХ ОБРАЗЦОВ

Исследуемые образцы вольфрама в состоянии поставки представляли собой диски толщиной  $h_0 = 1.45 \pm 0.05$  мм и диаметром  $d = 24.10 \pm 0.05$  мм.

Начальные микроструктурные характеристики образцов были определены на произвольно выбранном диске. Из этого диска на электроискровом станке был вырезан сегмент с тремя плоскими гранями  $z_y$ ,  $z_x$ ,  $z_u$  (см. рис. 1).

Грани сегмента после полировки были протравлены 3%-ной перекисью водорода в течение 15 ч, и затем участки этих граней были исследованы с помощью оптического микроскопа, рентгеноструктурного дифрактометра ARL X'TRA с твердотельным детектором, в  $\theta$ – $\theta$ -геометрии, с



**Рис. 1.** Сегмент (затушеванная область) образца для анализов:  $x, y, z$  – координатные оси для идентификации исследуемых граней сегмента,  $d$  – диаметр диска,  $R_1$  – зондирующий рентгеновский луч грани сегмента  $zy$ ,  $R_2$  – зондирующий рентгеновский луч грани сегмента  $xz$ .

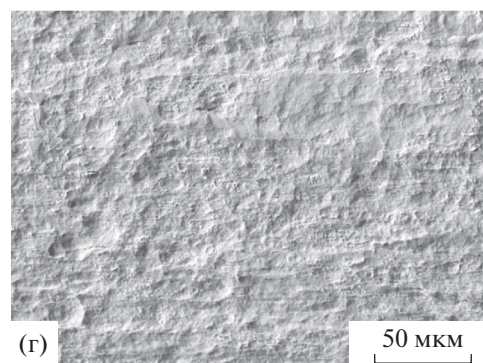
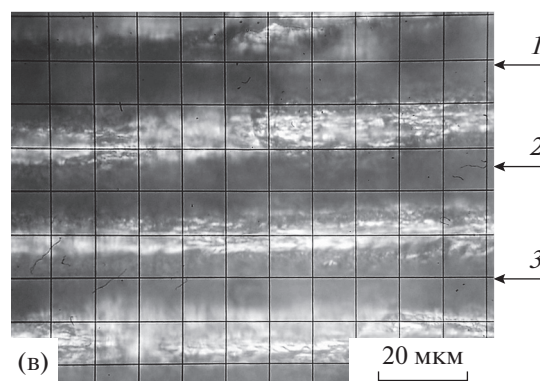
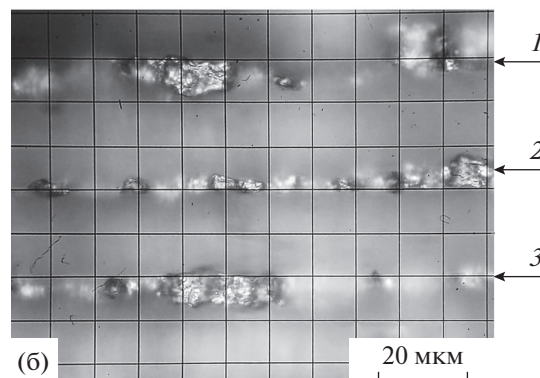
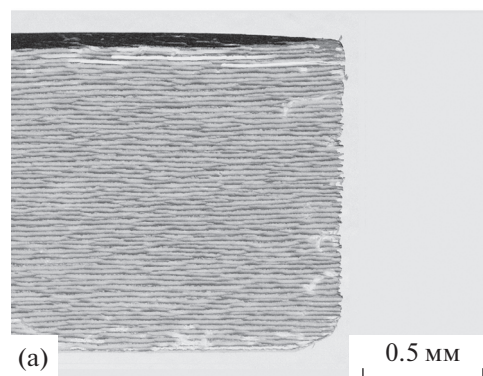
использованием  $\text{CuK}\alpha$ -излучения, цифрового сканирующего электронного микроскопа TESCAN Vega II XMU, оборудованного энергодисперсионным спектрометром INCA Energy 450 с полупроводниковым Si (Li) детектором INCA x-sight.

Травление образца приводит к образованию рельефа на грани  $zy$  в виде протяженных гребней и впадин одинаковой глубины и, тем самым, выявляет на грани  $zy$  слоистую неоднородность металла. Так, на рис. 2а показан микрошлиф грани  $zy$  вместе с ребром  $z00$  при небольшом увеличении.

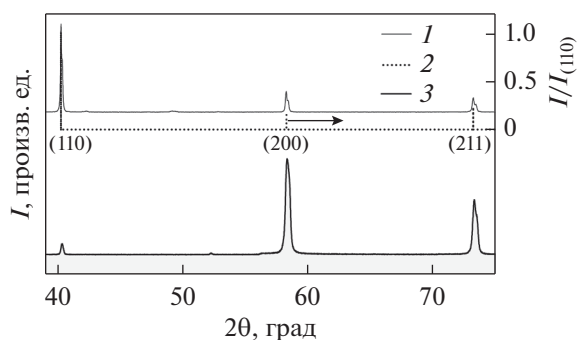
Отметим особенности этого микрошлифа. Белые участки соответствуют микротрещинам. Видно, что микротрещины сосредоточены вблизи поверхностей диска. Однако основное поле микрошлифа оказывается свободным от микротрещин и на микрометровом масштабном уровне демонстрирует слоистую рельефную структуру. Оценка глубины впадин, сделанная по неровностям ребра  $z00$  на рис. 2, находится на уровне 25 мкм.

Этот вывод подтверждается фотографией при большем увеличении. Так, на рис. 2б представлена фотография участка грани  $zy$ , когда в фокусе оптического микроскопа находятся вершины гребней. Как видно, гребни чередуются через 25 мкм. Рисунок 2в представляет фотографию этого же участка микрошлифа, но при наведении фокуса микроскопа на дно впадин. Как видно, донные поверхности впадин представляют собой квазиплоские поверхности шириной 10 мкм. Аналогичный результат получен и для грани  $xz$ .

Таким образом, дискообразный вольфрамовый образец в направлении нормали к плоскости диска имеет регулярную слоистую микроструктуру.



**Рис. 2.** Рельефы граней  $zy$  и  $xz$ . а – Рельеф грани  $zy$  вместе с ребром  $z00$ ; б – микрошлиф грани  $zy$  при фокусировке микроскопа на гребни; в – микрошлиф грани  $zy$  при фокусировке микроскопа на впадины (пронумерованными стрелками на рис. (б) и (в) отмечены одни и те же участки); г – грань  $xz$ .



**Рис. 3.** Дифрактограммы с граней сегмента (см. рис. 1) после травления в перекиси водорода; 1 – дифрактограмма с грани  $z\eta$  при направлении зондирующего рентгеновского луча  $R_1$ , 2 – дифрактограмма вольфрама из базы данных ICDD (PDF2 card № 040806), 3 – дифрактограмма с грани  $x\eta$  при направлении зондирующего рентгеновского луча  $R_2$ . В скобках указаны справочные индексы плоскостей вольфрама с объемно-центрированной кубической решеткой.

ру с периодом  $\sim 25$  мкм. В отличие от граней  $z\eta$  и  $z\chi$  на грани  $x\eta$  выявляется иной рельеф (см. рис. 2г). На этом рисунке видно, что травление грани  $x\eta$  выявляет хаотический (не регулярный) рельеф поверхности.

Рассмотрим теперь результаты рентгеноструктурного анализа плоскостей  $z\eta$  и  $x\eta$ , представленные на рис. 3 в виде дифрактограмм. При зондировании грани  $z\eta$  рентгеновским лучом  $R_1$  (см. рис. 1), были получены две дифрактограммы. Первая соответствовала случаю, когда падающий и отраженный рентгеновские лучи лежали в плоскости параллельной плоскости  $x\eta$ . Во втором случае падающий и отраженный рентгеновские лучи лежали в плоскости параллельной плоскости  $z\chi$ . Полученные дифрактограммы практически не отличались друг от друга. Одна из этих дифрактограмм приведена на рис. 3 и обозначена цифрой 1. На этом же рисунке приведена справочная дифрактограмма 2 вольфрама из базы данных ICDD (PDF2 card № 040806). Как видно, для обеих дифрактограмм 1 и 2 местоположение рефлексов на оси  $2\theta$  и соотношение их интенсивностей оказываются одинаковыми. Предполагая, что 2 характеризует не текстурированный образец вольфрама, можно сделать вывод об отсутствии текстуры и на грани  $z\eta$  исследуемого вольфрамового сегмента.

С использованием аналогичного приема проведено зондирование грани  $x\eta$  рентгеновским лучом  $R_2$  (см. рис. 1). Были получены две совпадающие дифрактограммы, одна из которых приведена на рис. 3 и обозначена цифрой 3. Как видно, местоположение рефлексов одинаково для всех трех дифрактограмм 1, 2, 3. Однако соотношение интенсивностей рефлексов дифрактограммы 3 карди-

нально отличается от такового для дифрактограмм 1 и 2, что означает текстурированность образца.

Отметим, что anomalously большая амплитуда рефлекса (200) дифрактограммы 3 сохраняется по всей толщине образца. Это свидетельствует о такой текстуре образца, при которой кристаллографические плоскости (200) большинства кристаллитов дискообразного вольфрамового образца расположены параллельно его плоской поверхности.

Отметим, как факт, что размер области когерентного рассеяния, рассчитанный по формуле Селякова–Шерера для рефлекса (200), составил 43 нм. Отметим также, что электронно-зондовый микроанализ граней, микрошлифы которых были рассмотрены выше, показывает, что пластинчатые образцы не содержат посторонних примесей и на 100% состоят из вольфрама.

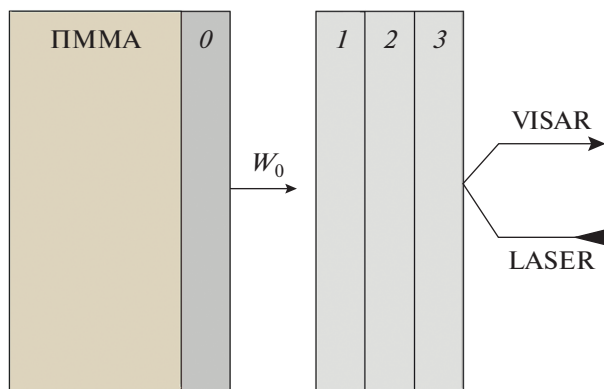
Таким образом, рассмотренные характеристики образца позволяют заключить, что вольфрамовые диски состоят из чистого поликристаллического вольфрама, обладающего регулярной слоистой структурой с периодом  $\sim 25$  мкм и текстурой, при которой кристаллические плоскости (200) большинства кристаллитов в объеме дискообразного вольфрамового образца расположены параллельно его плоским поверхностям.

#### СХЕМА УДАРНО-ВОЛНОВОГО НАГРУЖЕНИЯ ОБРАЗЦОВ

Прочностные свойства образцов текстурированного вольфрама при ударно-волновом нагружении изучали с использованием типичной (см. [4, 5]) схемы ударно-волновых экспериментов по регистрации скорости свободной поверхности образца.

Эксперименты выполнены с применением пневматической пушки в качестве генератора импульсов ударного сжатия. Перед экспериментом давление воздуха в стволе пушки и в пространстве, окружающем образец, понижали до 2 кПа. Непосредственно перед ударно-волновым нагружением температура образцов примерно равнялась комнатной температуре  $T_0 \approx 300$  К.

Во время эксперимента сжатый воздух разогнал снаряд, состоящий из пустотелого алюминиевого цилиндра и наклеенных на его фронтальную плоскую поверхность диска толщиной 5 мм из полиметилметакрилата (ПММА) и металлического (медного или вольфрамового) диска-ударника  $\theta$  (см. рис. 4). Скорость  $W_0$  составного ударника ПММА –  $\theta$  в момент удара по образцу составляла  $W_0 = 365 \pm 7$  м/с. Были проведены эксперименты с составными образцами, состоящими из одного, двух и трех вольфрамовых дисков толщиной  $h_{01}$ ,  $h_{02}$ ,  $h_{03}$  соответственно. Поверхности контакта дисков 1–2 и 2–3 шлифовали



**Рис. 4.** Схема ударно-волнового нагружения вольфрамового образца и регистрации скорости его свободной поверхности. ПММА – диск из полиметилметакрилата толщиной 5 мм;  $O$  – металлический диск-ударник толщиной  $H_0$ ;  $W_0$  – скорость ударника; 1, 2, 3 – образец, состоящий из текстурированных вольфрамовых дисков толщиной  $h_{01}$ ,  $h_{02}$ ,  $h_{03}$  соответственно

так, что воздушный зазор между дисками был меньше одного микрометра.

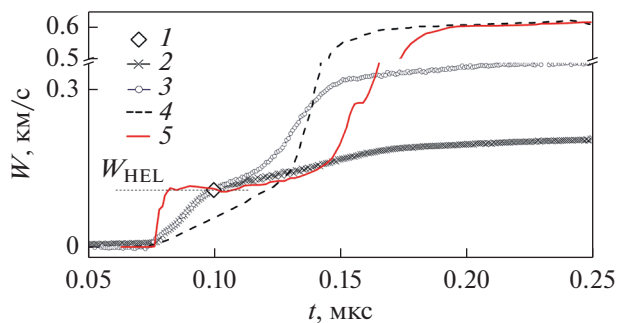
Максимальное напряжение сжатия в вольфрамовом образце при скорости удара  $W_0$  составляло в зависимости от металла ударника  $\approx 10$  ГПа или  $\approx 16$  ГПа.

В каждом эксперименте регистрировали зависимость скорости  $W$  тыльной поверхности составного образца от времени  $t$  (профиль  $W(t)$ ). Измерения  $W(t)$  проводили с помощью лазерного Допплеровского интерферометра VISAR [5]. Используемый интерферометрический комплекс позволял регистрировать профили  $W(t)$  с точностью 2% с временным разрешением около 1 нс. Соотношение диаметра и толщин образцов и ударников обеспечивало одноосное напряженное состояние образца в течение полезного времени регистрации  $W(t)$ .

В табл. 1 приведены значения толщин ударников  $H_0$  и суммарной толщины образцов  $h_0 = h_{01} + h_{02} + h_{03}$  в экспериментах, выполненных по схеме рис. 4.

**Таблица 1.** Толщины ударников, образцов, а также параметры  $W_{HEL}$  и  $Y_0$  упругопластического перехода текстурированного вольфрама в опытах №№ 1–4

| № опыта | Ударник/Образец | $H_0$ , мм | $h_0$ , мм | $W_{HEL}$ , м/с | $Y_0$ , ГПа     |
|---------|-----------------|------------|------------|-----------------|-----------------|
| 1       | Cu/W            | 0.8        | 1.463      | $112 \pm 5$     | $3.43 \pm 0.15$ |
| 2       | W/W             | 1.468      | 1.474      | $106 \pm 5$     | $3.26 \pm 0.15$ |
| 3       | W/2W            | 1.464      | 2.867      | $87 \pm 3$      | $2.70 \pm 0.10$ |
| 4       | W/3W            | 1.449      | 4.338      | $90 \pm 3$      | $2.75 \pm 0.10$ |



**Рис. 5.** Фронтальная часть профилей  $W(t)$ , полученных в данной работе в сравнении с профилями из [4]. 1 – точка резкого уменьшения производной  $W(t)$ , ассоциируемая с динамическим пределом упругости  $\sigma_{HEL}$ ; 2 – опыт № 1, толщина вольфрамового образца  $h_0 = h_{01} \approx 1.463$  мм, 3 – опыт № 2 толщина вольфрамового образца  $h_0 = h_{01} \approx 1.474$  мм, 4 – образец вольфрама толщиной 2 мм в состоянии поставки [4], 5 – отожженный образец вольфрама толщиной 2 мм [4].

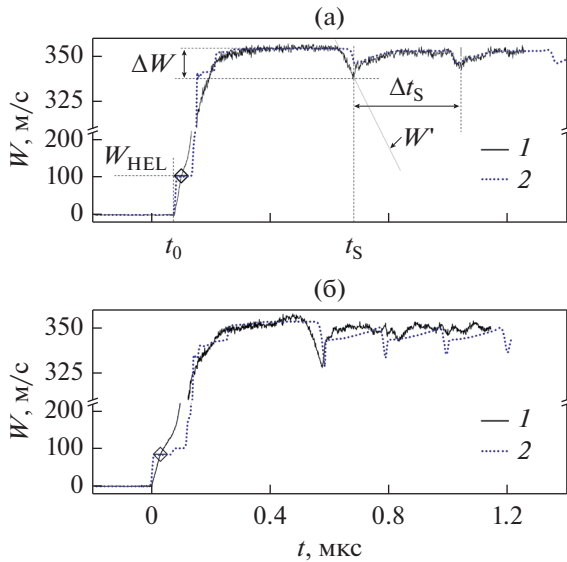
Некоторые экспериментальные профили  $W(t)$ , показаны на рис. 5 и 6.

Отметим, что при подготовке эксперимента плоские поверхности дисков шлифовали с использованием мелкозернистой (10М–5М) наждачной бумаги. Поэтому там, где в контексте статьи необходимо указать точный замер толщины подготовленных к эксперименту дисков (например, в табл. 1), приводятся значения с точностью до тысячных мм. В иных случаях толщины указываются с меньшей точностью.

Отметим также, что смысл содержащихся в таблице параметров  $Y_0$  и  $W_{HEL}$  детально поясняется в следующем разделе статьи.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Как известно, форма профилей  $W(t)$  и значения скорости в особых точках этих профилей используются для характеристики реологических и прочностных свойств материала. Так, значение



**Рис. 6.** Профили  $W(t)$  образцов вольфрама различной толщины  $h_0$ . (а) 1 – опыт № 2, толщина ударника  $H_0 = 1.468 \pm 0.003$  мм, толщина образца  $h_0 = h_{01} = 1.474 \pm 0.003$  мм,  $\Delta W$  – разница между максимальным и минимальным значениями  $W(t)$ ,  $t_0$  – момент выхода упругой волны сжатия,  $t_s$  – момент выхода откольного импульса,  $\Delta t_s$  – период циркуляции откольного импульса в откольной пластине, 2 – модельный профиль  $W(t)$ ; (б) 1 – опыт № 3, толщина ударника  $H_0 = 1.464 \pm 0.003$  мм, толщина образца  $h_0 = h_{01} + h_{02}$ ,  $h_{01} = 1.483 \pm 0.003$  мм,  $h_{02} = 1.384 \pm 0.003$  мм, 2 – модельный профиль  $W(t)$ .

$W_{\text{HEL}}$  используется для расчета динамического предела упругости  $\sigma_{\text{HEL}}$  и динамического предела текучести  $Y_0$  по формулам (1) и (2) соответственно:

$$\sigma_{\text{HEL}} = \frac{1}{2} W_{\text{HEL}} \rho_0 C_{0l}, \quad (1)$$

$$Y_0 = 2\sigma_{\text{HEL}} \left( \frac{C_{0s}}{C_{0l}} \right)^2. \quad (2)$$

При анализе экспериментальных профилей, полученных в данной работе, в качестве значения  $W_{\text{HEL}}$  принимали точку резкого уменьшения производной  $W'(t)$  (см. точку 1 на рис. 5). Вычисления по формулам (1) и (2) проводили с использованием значений плотности вольфрама  $\rho_0$ , продольной скорости звука  $C_{0l}$ , сдвиговой скорости звука  $C_{0s}$  в вольфраме из [4]. Здесь и далее нулевой индекс означает свойство при атмосферном давлении и комнатной температуре.

Результаты расчета для четырех экспериментов, приведенные в табл. 1, свидетельствуют об уменьшении динамического предела текучести исследуемых образцов текстурированного вольфрама с увеличением толщины образца. Эта закономерность в качественном отношении согласуется с аналогичным эффектом, обнаруженным в [4].

На рис. 5 представлены фронтальные участки профилей  $W(t)$ , полученных в опытах, соответствующих нумерации табл. 1. Для сравнения здесь же приведены результаты работы [4] для образцов толщиной  $\sim 2$  мм.

Как видно, “упругая” часть профилей текстурированного вольфрама (2 и 3) до значений  $W_{\text{HEL}}$  располагается между профилями [4] образцов в состоянии поставки (4) и отожженного образцов вольфрама (5) [4]. При этом форма начального участка профилей 2 и 3 ближе к ступенчатой форме профиля 5, характерного для упругопластического материала с динамическим пределом текучести  $Y_0$ .

Обсудим теперь оценки прочностных характеристик исследуемого материала с учетом особенностей профилей  $W(t)$  (см. рис. 6а).

Как известно, набор таких характеристик как величина  $\Delta W$  (разница между максимальным и минимальным значениями  $W(t)$ ), производная по времени  $W'$  и время  $\Delta t_s$  используется (см. [4, 6]) для расчета максимального растягивающего напряжения (откольной прочности)  $\sigma_{\text{sp}}$  исследуемого упругопластического материала. Согласно [6] величина  $\sigma_{\text{sp}}$  определяется соотношением:

$$\sigma_{\text{sp}} = 0.5\rho_0 C_{0b} (\Delta W + W' \Delta \tau), \quad (3)$$

где  $C_{0b}$  – объемная скорость звука,  $\Delta \tau = h_s(1/C_{0b} - 1/C_{0l})$ ,  $h_s = 0.5C_{0l}\Delta t_s$  – толщина откольной пластины.

Применение соотношений (3) для профилей, полученных в опыте № 2, дает значение  $\sigma_{\text{sp}} = -1.3 \pm 0.1$  ГПа. Для опыта № 3 с составным образцом расчет по (3) дает  $\sigma_{\text{sp}} = -1.5 \pm 0.1$  ГПа.

Заметим, что значения  $\Delta W$ ,  $W'$ ,  $\Delta t_s$  для профилей, полученных в опытах №№ 2 и 3, существенно различны. Так  $\Delta W$  и времена  $\Delta t_s$  различаются в полтора раза, а производные  $W'$  различаются почти в 5 раз.

Таким образом, текстурированный вольфрам при ударно-волновом нагружении проявляет упругопластическое поведение с уменьшением динамического предела текучести по мере увеличением толщины образца. В терминах [6] согласно (3) откольная прочность текстурированного вольфрама находится на уровне  $-1.4 \pm 0.1$  ГПа.

Отметим, что полученные базовые экспериментальные результаты в форме профилей  $W(t)$  могут быть истолкованы в рамках модели упругопластического твердого тела, испытывающего мгновенное откольное разрушение (см. следующий раздел).

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Математическое моделирование выполненных экспериментов осуществляли в рамках программы

**Таблица 2.** Параметры упругопластической модели и мгновенного откола, а также скорости ударника, используемые при моделировании опытов №№ 2 и 3

| № опыта | № слоя | $Y_0$ , ГПа | $G$ , ГПа | $\sigma_{xS}$ , ГПа | $W_0$ , м/с |
|---------|--------|-------------|-----------|---------------------|-------------|
| 2       | 1      | 3.26        | 172.5     | -3.16               | 369.0       |
| 3       | 1      | 3.26        | 172.5     | -3.16               | 364.0       |
|         | 2      | 2.7         | 172.5     | -3.16               | 364.0       |

СТАГ для ЭВМ [7]. Эта программа позволяет рассчитывать волновые взаимодействия и термодинамические состояния для ударника и каждого слоя многослойных мишеней при одномерном ударном нагружении с использованием модели упругопластической деформации в терминах [8] и модели мгновенного откольного разрушения материалов. При моделировании экспериментов, описанных в предыдущем разделе, предполагали, что в качестве полуэмпирических уравнений состояния текстурированного вольфрама могут быть использованы уравнения состояния изотропного вольфрама из [9]. Предполагали также, что специфика текстурированного вольфрама может быть отражена посредством определенных выше параметров упругопластического перехода этого материала. Для полиметилметакрилата использовали гидродинамическое приближение с уравнением состояния из [10].

Параметры упругопластической модели  $Y_0$  (предел текучести) и  $G$  (модуль сдвига) для каждой пластины вольфрама на схеме рис. 1 в обозначениях [8] приведены в табл. 2. В качестве  $Y_0$  для каждого слоя принято значение динамического предела текучести из табл. 1.

Модель мгновенного откола в программе СТАГ функционирует следующим образом. В процессе счета в каждой лагранжевой частице при растяжении производится сравнение текущего значения напряжения  $\sigma_x = P + (2/3)Y_0$ , где  $P$  давление, с заранее заданным постоянным числом  $\sigma_{xS}$ . Когда в

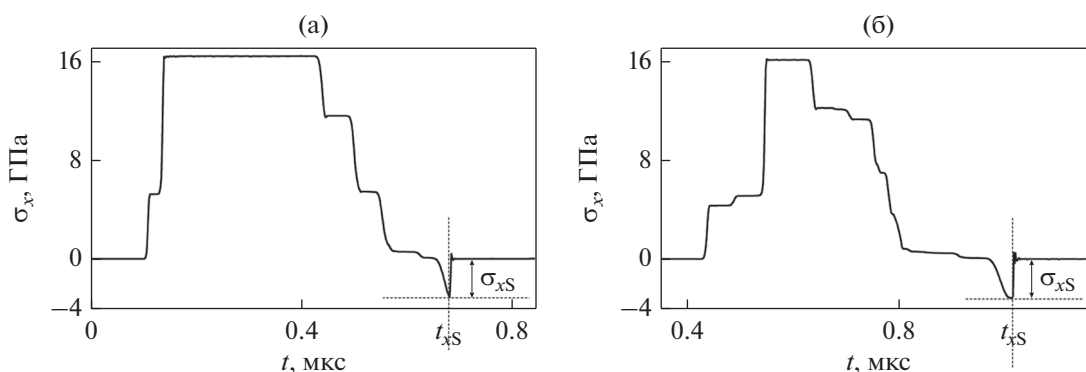
некоторый момент времени  $t_{xS}$  абсолютная величина  $\sigma_x$  становится равной абсолютной величине  $\sigma_{xS}$ , в отслеживаемой лагранжевой частице образуются две свободные поверхности, напряжение  $\sigma_x$  на которых скачком достигает нулевого значения. На рис. 7 показана расчетная история напряжения в лагранжевой частице, испытавшей мгновенное разрушение.

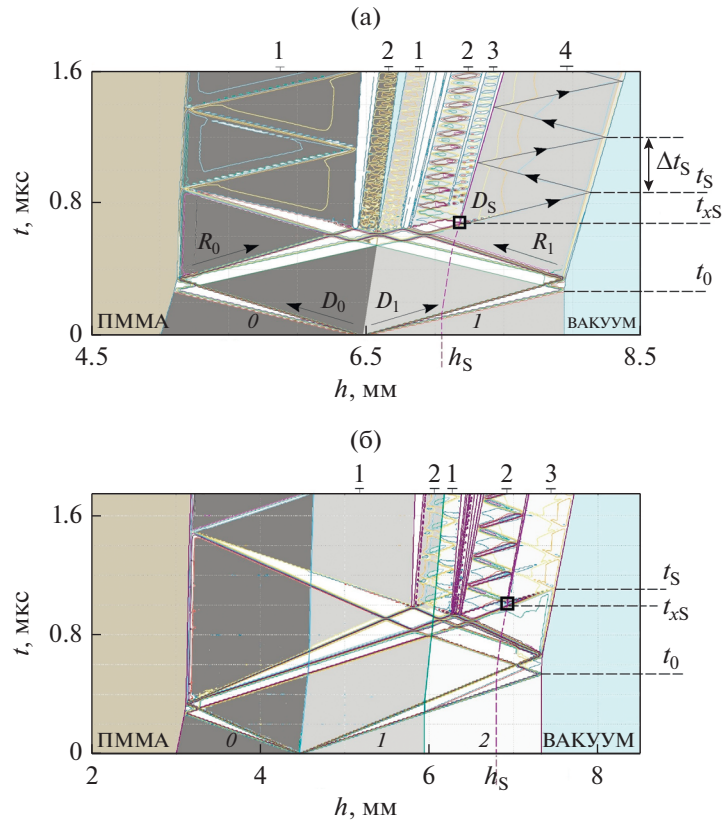
Фактически значение  $\sigma_{xS}$  является подгоночным параметром обсуждаемой математической модели. Оптимальной величиной  $\sigma_{xS}$  принято значение  $\sigma_{xS} = -3.16$  ГПа, при котором расчетная скорость свободной поверхности вольфрамовой пластины (см. штриховые профили на рис. 6) становится максимально близкой к экспериментальной.

Представляется, что соответствие расчетных и экспериментальных профилей  $W(t)$  на рис. 6 можно признать удовлетворительным как в качественном, так и в количественном отношении. Отметим, что значение  $\sigma_{xS} = -3.16$  ГПа согласуется с величиной откольной прочности поликристаллического вольфрама  $-2.7 \pm 0.2 \dots -3.1 \pm 0.3$  ГПа из [2].

Таким образом, разработанная математическая модель позволяет детально реконструировать “упругопластическую” и “откольную” части экспериментальных профилей  $W(t)$  с помощью трех определяющих параметров:  $Y_0$ ,  $G$  и  $\sigma_{xS}$ .

Сопутствующим результатом реконструкции  $W(t)$  является прогноз развития и распределения поврежденности в образцах. Этот прогноз пред-

**Рис. 7.** Расчетная история напряжения в лагранжевой частице  $h_S$ , испытавшей мгновенное разрушение в момент  $t_{xS}$  при достижении напряжением критерия  $\sigma_{xS}$ . а – Моделирование опыта № 2; б – моделирование опыта № 3.



**Рис. 8.** Моделирование волновых взаимодействий и откольного разрушения текстурированного вольфрама в опытах № 2 – (а) и № 3 – (б). Обозначения, их смысл расшифрованы в тексте и являются одинаковыми для обоих рисунков.

ставлен на рис. 8 в виде расчетных диаграмм расстояние( $h$ )–время( $t$ ) для моделируемых экспериментов. Здесь наклонными линиям изображены расчетные уровни равной плотности, которые позволяют анализировать траектории волн сжатия и разгрузки, их взаимодействие, а также откольное разрушение. Обсудим полученный прогноз и развитие откольной поврежденности. На рис. 8а нулевой момент времени соответствует моменту соударения составного ударника ПММА- $\theta$  с вольфрамовой пластиной  $I$ . Затем от поверхностей соударения по ударнику  $\theta$  и пластине  $I$  распространяются упругопластические волны сжатия  $D_0$  и  $D_1$  соответственно. Эти волны сжатия отражаются от ПММА и свободной поверхности образца  $I$  волнами упругопластических разгрузок  $R_0$  и  $R_1$ . Момент отражения  $D_1$  соответствует моменту  $t_0$  на расчетных профилях  $W(t)$  рис. 6.

В дальнейшем взаимодействии  $R_0$  и  $R_1$  приводит к образованию многочисленных отколов в ударнике и образце. Так, на рис. 8а вольфрамовый ударник  $\theta$  раскалывается на две пластины 1 и 2, а вольфрамовый образец  $I$  раскалывается на четыре пластины 1, 2, 3 и 4 (см. верхнюю часть рисунка). Ближайший к свободной поверхности откол

происходит в точке, отмеченной квадратом, т.е. на координате  $h_S$  в момент  $t_{XS}$ .

Из точки  $(h_S; t_{XS})$  к свободной поверхности образца распространяется откольный импульс  $D_S$ , который выходит на свободную поверхность образца  $I$  в момент  $t_S$  и в дальнейшем циркулирует в откольной пластине 4 с периодом  $\Delta t_S$ . Расчетные значения скорости свободной поверхности вольфрамовых образцов в моменты  $t_S$  и  $t_S + \Delta t_S$  лежат на пунктирных линиях  $W(t)$  на рис. 6. Таким образом, согласно расчету, на свободную поверхность выходит информация только о ближайшем к свободной поверхности отколе. Информация об остальных четырех отколах экранируется образующимися пространствами между пластинами 1, 2, 3 и 4.

Отметим, что в программе предусмотрено отсутствие сопротивления растяжению на границе контакта ударника  $\theta$  и образца  $I$ . Поэтому при появлении растягивающих напряжений контактирующие поверхности ударника и образца удаляются друг от друга, а пространство между ними “заполняется” вакуумом. Что же касается внутренних слоев образца  $I$ , то согласно расчету, возможно выполнение критерия откола одновременно в протяженной области. Поэтому, напри-

мер, “дно” пространства между пластинами 1 и 2 выглядит квазиплоским, а само пространство оказывается заполненным смесью пустот и частиц разгруженного образца.

Таким образом, расчеты прогнозируют обширное разрушение образцов. В пользу этого прогноза отчасти свидетельствует тот факт, что сохранить после ударно-волнового нагружения крупные фрагменты текстурированных образцов вольфрама приемлемых размеров для исследования внутренней поврежденности не удается.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены ударно-волновые эксперименты с дискообразными образцами чистого поликристаллического вольфрама, обладающими регулярной слоистой структурой и текстурой, при которой кристаллические плоскости (200) большинства кристаллитов в объеме дискообразного образца расположены параллельно его плоским поверхностям.

Ударно-волновое нагружение составных образцов текстурированного вольфрама толщиной 1.4–4.3 мм осуществляли плоскими металлическими ударниками толщиной 0.8–1.4 мм, генерирующими в образцах ударные волны амплитудой 10–16 ГПа. Измерены профили скорости свободной поверхности образцов в течение времени выхода на нее упругопластических волн сжатия и разгрузки. Путем стандартной обработки профилей определены величины динамического предела текучести от 2.7 до 3.26 ГПа и откольной прочности от  $-1.3 \pm 0.1$  до  $-1.5 \pm 0.1$  ГПа образцов в зависимости от их толщины.

Выполнено математическое моделирование проведенных экспериментов в рамках гидродинамики, использующего полученные результаты, авторские уравнения состояния и общепринятые модели упругопластического твердого тела и мгновенного откола. Показаны достоверность и прогностические возможности выполненных расчетов физико-механического поведения тек-

стированного вольфрама при ударно-волновом сжатии и высокоскоростном растяжении.

Работа выполнена по теме Госзадания № АААА-А19-119071190040-5 и № АААА-А19-119092390076-7 с использованием оборудования АЦКП ИПХФ РАН.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Савицкий Е.М., Поваров К.Б., Макаров П.В.* Металловедение вольфрама. М.: Металлургия, 1978. 223 с.
2. *Hu L., Miller P., Wang J.* High strain-rate spallation and fracture of tungsten by laser-induced stress waves // *Mater. Sci. Eng. A.* 2009. V. 504. P. 73–80.
3. *Будаев В.П.* Результаты испытаний вольфрамовых мишеней дивертора при мощных плазменно-тепловых нагрузках, ожидаемых в итер и токамаках реакторного масштаба // *ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез.* 2015. Т. 38. Вып. 4. С. 5–33.
4. *Zaretsky R., Kanel G.I.* The high temperature impact response of tungsten and chromium // *J. Appl. Phys.* 2017. V. 122. P. 115901-1–115901-11.
5. *Barker L.M., Hollenbach R.E.* Laser interferometer for measuring high velocities of any reflecting surface // *J. Appl. Phys.* 1972. V. 43. № 11. P. 4669–4675.
6. *Романченко В.И., Степанов Г.В.* Зависимость критических напряжений от временных параметров нагрузки при отколе в меди, алюминии и стали // *ПМТФ.* 1980. № 4. С. 141–147.
7. *Ким В.В., Молодец А.М.* Программа для расчета волновых взаимодействий и термодинамического состояния многослойных мишеней при одномерном ударном нагружении СТАГ. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016616914. 22 июня 2016.
8. *Уилкинс М.Л.* Вычислительные методы в гидродинамике М.: Мир, 1967. С. 212–263.
9. *Гольшев А.А., Ким В.В., Емельянов А.Н., Молодец А.М.* Модель для расчета параметров ударного сжатия пластинчатой градиентной смеси // *ПМТФ.* 2015. Т. 56. № 4. С. 92–100.
10. *Молодец А.М., Гольшев А.А.* Откольная прочность ударно-разогретого гафния и уравнения состояния его полиморфных модификаций // *ФТТ.* 2019. Т. 61. Вып. 8. С. 1492–1498.