

05

© 1991 г.

ХАРАКТЕР РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛОВ ПРИ ИХ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПОНДЕРОМОТОРНЫМИ СИЛАМИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

А. Л. Суворов, А. Ф. Бобков, О. С. Мнушкин,
Л. Д. Климиашвили

Описаны режимы анализов механических свойств и структуры поверхностей разрушения металлических острых образцов в автоионном микроскопе. Отмечена возможность генерирования в образцах при их высокоскоростной деформации ударных волн и выявлен порог их образования по амплитуде импульсного воздействия и длительности импульсов. Обнаружен эффект аморфизации поверхности разрушения и существование соответствующего ему порога скорости деформации. Изучено влияние предварительного облучения образцов низкоэнергетичными ионами газов на механические свойства и структуру поверхностей разрушения.

Детальные исследования процессов и механизмов высокоскоростной деформации металлов имеют, как известно, как чисто научный (физико-механический), так и важнейший практический (технологический) аспекты [1, 2]. В плане развития физики прочности и пластичности особое внимание следует, по-видимому, уделять изучению и рассмотрению указанных процессов на атомарном уровне, учету реальных атомных структур металлов, наличия разнообразных дефектов их кристаллического строения, анализу возникновения дефектов, их взаимодействия, эволюции (см., например, [3, 4]).

В экспериментальных исследованиях процессов высокоскоростной деформации металлов наряду с традиционными [1] весьма плодотворным, на наш взгляд, является использование методов автоионной и автоэлектронной микроскопии, дополненных микрозондовыми анализами состава и свойств поверхности [5, 6]. К сожалению, большие возможности этих методов в плане изучения процессов деформации и разрушения металлов до сих пор остаются в существенной степени лишь принципиальными, не реализованными в практических работах. Цель настоящей работы — рассмотреть эти возможности, обратить на них внимание и привести некоторые уже полученные результаты.

Наиболее существенное обстоятельство, обуславливающее применение автоионной микроскопии для исследования механических свойств металлов, состоит в том, что необходимое для формирования микроскопического изображения электрическое поле высокой напряженности F (на уровне 30—50 В/нм) вызывает действие на вершину иглообразного образца-острия пондеромоторных сил. При этом реализуется достаточно сложное напряженное состояние образца, при котором среднее значение развиваемых в нем механических напряжений приблизительно оценивается как $\sigma \simeq F^2/8\pi$ и по порядку величины составляет $1-2 \cdot 10^9$ кг/мм². Тот факт, что многие металлические материалы выдерживают столь высокие нагрузки, объясняется малостью размеров образцов, большим «удельным весом» их поверхности, закреплением ею дислокаций. В то же время практически любой образец в автоионном микроскопе может быть разрушен пондеромоторными силами в процессе повышения F (т. е. пропорционального ему потенциала острия V_0). Как было установлено в ряде работ, в острых металлических образцах реализуется теоретическая прочность [7].

Зная потенциал V_p , при котором произошло разрушение острия, и оценив по полученному после разрушения автоионному изображению площадь (сечение) разрыва S_p , легко рассчитать реальную прочность $\sigma_{пр}$ острия. Подобные работы были выполнены ранее для вольфрама [8] и урана [9]. Соответствующие значения $\sigma_{пр}$ составили 1950 и 1200 кг/мм². В [10] была предпринята попытка проанализировать зависимость $\sigma_{пр}$ от S_p , в результате установлено существование порога S_p , ниже которого зависимость $\sigma_{пр}$ от S_p отсутствовала.

Рабочий режим указанных анализов $\sigma_{пр}$ условно иллюстрирует рис. 1, а, где V_2 — потенциал образца, при котором осуществляют подготовку поверхности, — испарение полем поверхностных атомов, тогда как V_1 — потенциал, соответствующий условиям наилучшего отображения поверхности ($V_1 = V_{нп}$). Стрелки 1 и 1' на диаграммах указывают осуществленные процедуры испарения полем, стрелки 2 и 2' — фото- либо кинематографическую регистрацию микроскопических изображений.

После получения и регистрации изображений нескольких следующих друг за другом атомных слоев образца (они позволяют оценить исходную степень

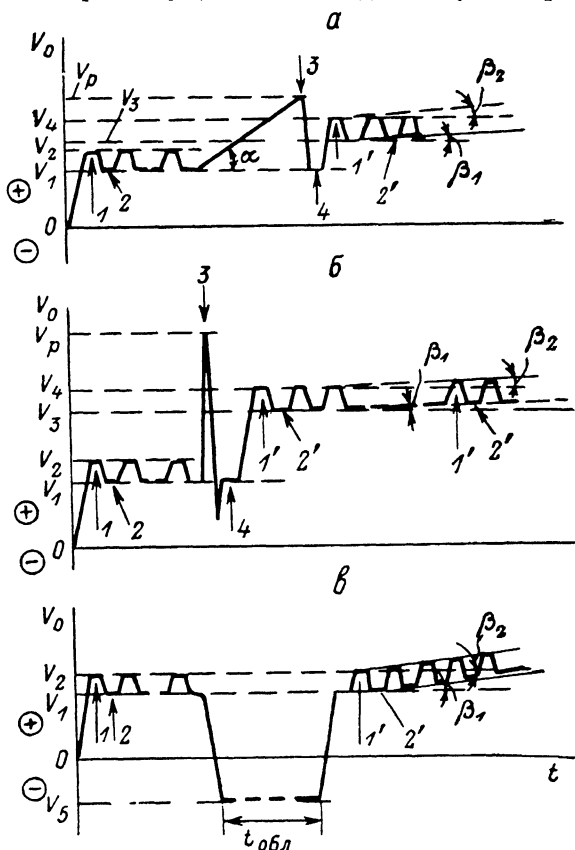
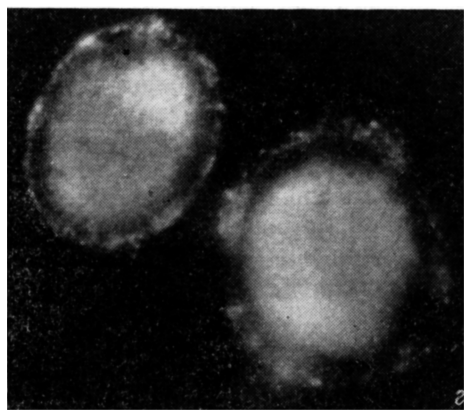
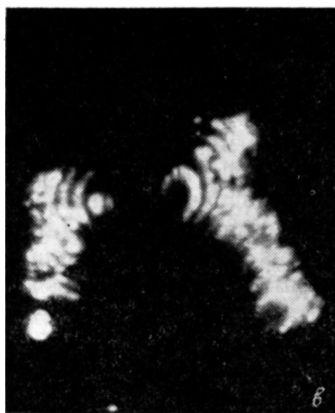
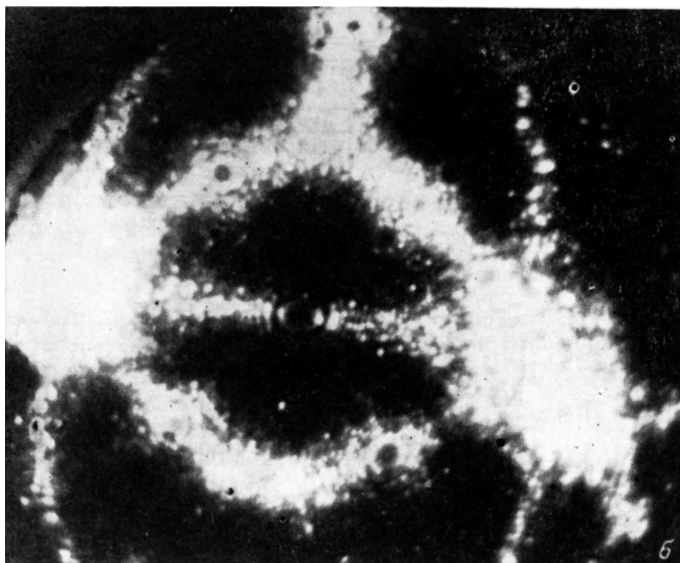
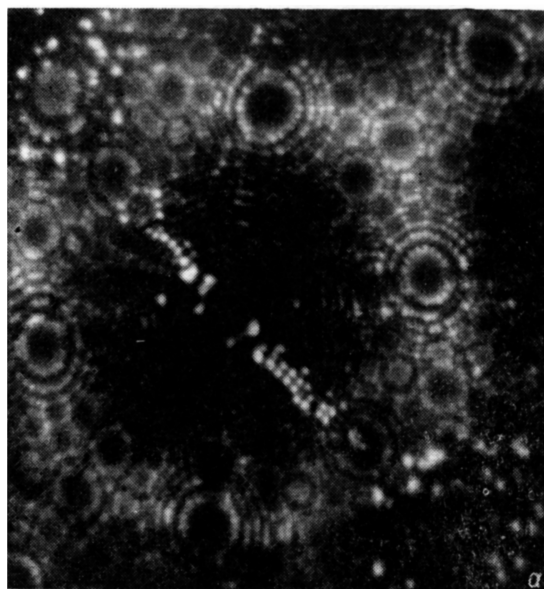


Рис. 1. Диаграммы изменения потенциала образца V_0 при автоионно-микроскопических исследованиях механических и радиационных воздействий на металлы.

а — режим анализа предельной прочности и структуры поверхности разрушения, б — режим анализа действия высокоскоростной деформации и ударных волн, в — режим исследования влияния облучения низкоэнергетичными ионами газов.

совершенства структуры) (пример на рис. 2а) осуществляется плавный (со скоростью α на уровне 50—200 В/с) подъем V_0 вплоть до легко фиксируемого визуально момента разрушения (обрыва) вершины острия. На рис. 1, а он указан стрелкой 3. Затем предпринимается попытка получить изображение при исходном потенциале $V_0 = V_1$ (стрелка 4) и, если это не удастся (как правило, так и бывает), V_0 повышают до наблюдения на экране микроскопа процесса испарения полем ($V_0 = V_4$), снижают его до V_3 — напряжения наилучшего отображения поверхности и проводят обычный автоионно-микроскопический анализ структуры поверхности разрушения и примыкающих к ней многих приповерхностных атомных слоев. При этом потенциал периодически предпринимаемого испарения полем, так же как потенциал отображения сформированной поверхности, постепенно повышают (со скоростями β_2 и β_1 соответственно, в общем случае $\beta_1 \neq \beta_2$), что отражает затупление вершины образца.

Поверхность разрушения при анализах в таком режиме представляет собой, как правило, либо искаженную, но отображаемую в атомных деталях и проявляющую хотя бы на нескольких локальных участках кристаллическую структуру (рис. 2, б), либо содержит несколько острых бугорков (рис. 2, в, г). Причем в случаях, когда скорость α подъема V_0 (т. е. скорость механического



нагружения) невысока, указанные бугорки сразу же на первом автоионном изображении проявляют внутреннюю кристаллическую структуру (рис. 2, а). В случае же более высоких α либо сопровождения обрыва острия разрядом в пространстве образец—экран микроскопа образованные бугорки не имеют внутренней структуры, т. е. являются, насколько можно судить по изображениям, аморфными (рис. 2, в). При этом предпринимаемое испарение полем не позволяет выявить кристаллическую структуру бугорков вплоть до их основания [11]. Статистическое распределение количества бугорков на поверхности разрушения одного острия приведено в [12], его максимум приходится на три.

Иной режим деформации реализуется в случае подачи в автоионном микроскопе на образцы-острия чрезвычайно коротких высоковольтных импульсов (соответствующий режим иллюстрирует рис. 1, б). Здесь существенным оказывается установленная в настоящей работе возможность имитации (генерирования) путем такого воздействия ударных волн в объеме острия. При этом критерием образования ударных волн следует, по-видимому, считать ситуацию, когда в объеме материала вдали от места разрушения (на расстояниях, превышающих \bar{R}_0) генерируются точечные дефекты. Из ранних исследований известно, что образование точечных дефектов на указанных расстояниях от места разрушения образцов при деформации электрическим полем с малыми скоростями (плавный подъем V_0) не происходит [13]. В то же время многими авторами (см., например, [14]) показано, что в ударных волнах малых амплитуд образуются точечные дефекты.

Наконец, отметим еще одну весьма интересную возможность автоэмиссионного микроскопа — проведение в нем интенсивного облучения заранее изготовленных и предварительно проанализированных в автоионно-микроскопическом режиме образцов низкоэнергетическими ионами газов [15]. Осуществляется она при отрицательной полярности высокого напряжения на образце (диаграмма рабочего режима на рис. 1, в) в присутствии газа. При $V_0 = V_s$ образец эмиттирует автоэлектроны, которые и ионизируют (по механизму электронного удара) газ, образованные ионы ускоряются в поле и бомбардируют поверхность образца. Вопросы, связанные с расчетом флюенса облучения и энергетического распределения ионов, обсуждаются в [16, 17]. Здесь лишь отметим, что при давлении газа в приборе на уровне 10^{-3} Па буквально за несколько минут удается набрать такие высокие флюенсы облучения, как 10^{20} ион/м² и выше.

В плане изучения механических свойств металлов было бы чрезвычайно интересно установить связь этих свойств и структуры поверхностей разрушения с формируемой в процессе облучения дефектной структурой металлов (детальная информация о последней получена к настоящему времени в ряде работ [18–20]).

Режимы автоионно-микроскопических анализов влияния предварительного облучения на предельную прочность σ_{np} и структуру металлов иллюстрируют рис. 3, а, б соответственно.

Диаграмма рис. 3, а отражает последовательность операций при автоионно-микроскопическом анализе изменения механических свойств облученных металлов. Как видно, она сочетает в себе исследования в режимах рис. 1, а и в.

Влияние предварительного облучения на прочностные и структурные характеристики при высокоскоростной деформации металлов может быть изучено в эксперименте в режиме, показанном на рис. 3, б. На нем, так же как и на рис. 1, б, возникновение «обратного» импульса (указан стрелкой 5) обусловлено свойствами электронных схем и особенностями создания нагружающего импульса (стрелка 3) в реальных условиях эксперимента.

Исследования в настоящей работе проводились на установке, условно показанной на рис. 4. Использовался типичный автоионный микроскоп с усилителем яркости изображений на основе сборок микроканальных пластин [21].

Рис. 2. Автоионные изображения вольфрамовых образцов-острий.

а — поверхность недеформированного (эталонного) образца; б — результат пластической деформации без разрушения образца; в — поверхность разрушения при деформации с низкой скоростью нагружения; г — то же, что и в, но при деформации с высокой скоростью нагружения.

Эти сборки позволяли измерять величину импульсов тока при обрыве острий, оценивая, в виде каких «кусков» произойдет обрыв острия. Для создания импульсов был изготовлен разрядник с падающим контактом 20, сбрасываемым

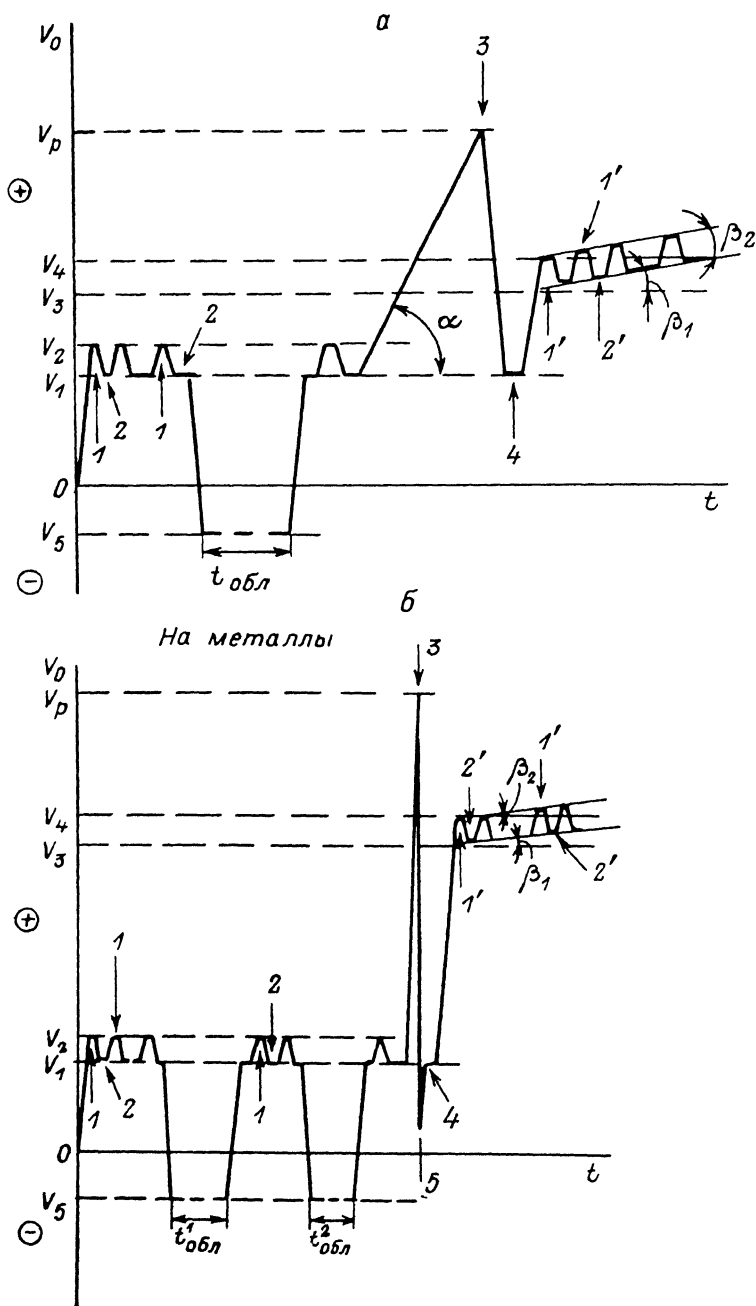


Рис. 3. Диаграммы изменения потенциала образца V_0 при автономно-микроскопических исследованиях механических свойств предварительно облученных металлов.

а — режим облучения и последующего анализа механической (пределной) прочности материала, б — режим облучения и последующего анализа действия высокоскоростной деформации и ударных волн.

толкателем 21 в пролетный промежуток между изолирующими направляющими 19. Скользящий пружинный контакт 23 мог устанавливаться в любом месте изолирующей направляющей, что позволяло регулировать длительность $t_{обл}$ высоковольтных импульсов (чем больше L , тем $t_{обл}$ меньше). Амплитуда и дли-

тельность подаваемых на образец (острие) высоковольтных импульсов измерялись с помощью осциллографа 26.

Первым этапом экспериментальной процедуры являлось изготовление (путем электрохимического травления) острия из исследуемого материала. Затем это острие на проволоочной дужке 2 (рис. 4) с помощью цапг 3 крепилось на металлических вводах 4 в вакуумной камере автоионного микроскопа. После вакуумной откачки и напуска изображающего газа осуществлялся предварительный автоионно-микроскопический анализ структуры образца, получался набор автоионных изображений нескольких следующих друг за другом поверхностных атомных слоев.

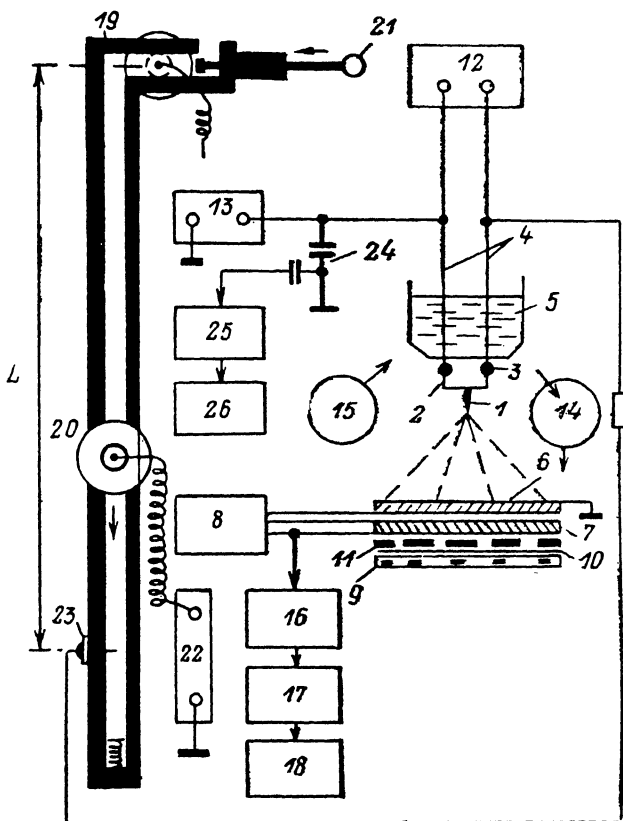


Рис. 4. Установка для исследования действия высокоскоростной деформации и ударных волн на металлы.

1 — образец-острие; 2 — дужка; 3 — цапги; 4 — вводы; 5 — сосуд Дьюара с охлаждающей жидкостью; 6, 7 — микроканальные пластины (МКП); 8 — источник питания сборки двух МКП; 9 — стеклянный экран; 10 — прозрачное проводящее покрытие; 11 — люминофор; 12 — источник нагрева дужки с острием; 13 — источник высоковольтного питания образца; 14 — система вакуумной откачки; 15 — система очистки и напуска изображающего газа; 16 — предусилитель; 17 — усилитель; 18, 26 — осциллографы; 19 — изолятор-толкатель; 20 — подающий контакт (замыкатель); 21 — изолятор-толкатель; 22 — высоковольтный источник питания разрядника; 23 — скользящий контакт разрядника; 24 — делитель; 25 — формирователь.

Затем образец подвергался выбранному дефектообразующему воздействию (например, облучению или закалке) с целью изучения, как влияют на характер взаимодействия ударных волн с металлами те или иные дефекты, присутствовавшие в образцах ранее. После этого следовал повторный автоионно-микроскопический анализ структуры образца.

Следующий этап — собственно ударное воздействие — подача на образец импульса высокого напряжения $V_{\text{выс}}$. Предварительно изображающий газ из вакуумного объема микроскопа удаляли с тем, чтобы предотвратить возможный газовый пробой в промежутке острие—микроканальная пластина.

После этого изображающий газ снова напускался в микроскоп и предпринималась попытка получить автоионное изображение поверхности разрыва.

Как правило, эта поверхность представляла собой либо сильно деформированный, неоднородный по геометрии слой, содержащий несколько микробугорков (рис. 2, *в*), либо тонкий оплавленный слой (рис. 5, *а*, *б*).

Далее образец вынимали из микроскопа, проводили его электрохимическое заострение (дотравливание), снова помещали в автоионный микроскоп и проводили стандартный анализ его структуры в режиме последовательного испарения полем многих поверхностных атомных слоев.

Описанным исследованиям предшествовало определение условного порога образования ударной волны (K^*). Его осуществляли для каждого исследуемого

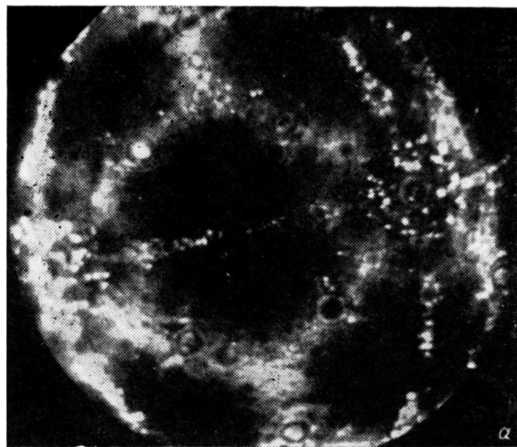


Рис. 5. Автоионные изображения поверхностей разрыва трех вольфрамовых образцов-острий.

P , ГПа: *а* — 21,6, *б* — 43,15, *в* — 69,0; K : *а* — 2,5, *б* — 5,0, *в* — 8,0. Обрыв во всех случаях при температуре 77 К и давлении газов в приборе 10^{-8} Па. Длительность нагружающих импульсов — 0,1 мкс.

материала. При этом стандартная процедура автоионно-микроскопического анализа последовательно повторялась для нескольких образцов, причем предварительная дефектообразующая обработка не производилась. Для первого образца амплитуда высоковольтного импульса составляла $1.5 V_{\text{ннн}}$ (т. е. коэффициент K , равен 1,5), для второго — $2.0 V_{\text{ннн}}$, для третьего — $2.5 V_{\text{ннн}}$, и т. п. до тех пор, пока автоионные изображения объема анализируемого материала не покажут образование точечных дефектов; соответствующее значение K и выбирается пороговым K^* . Подчеркнем, что установленный таким образом порог образования в металле ударной волны является условным, а точнее, завышенным, поскольку он показывает, что в данных условиях вдали от места образования действует затухающая ударная волна, способная генерировать в материале образца точечные дефекты.

Помимо отмеченных выше достоинств (проведение анализов с атомарным разрешением при криогенных либо высоких температурах, изучение влияния исходной дефектной структуры на характер взаимодействия ударных волн с металлами) реализованная экспериментальная процедура позволяла создавать причем достаточно простым образом огромные исходные давления (имитирующие пико-

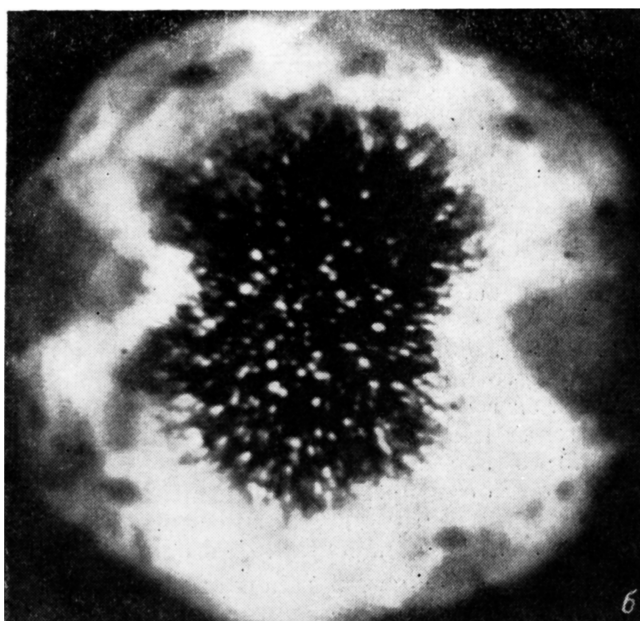
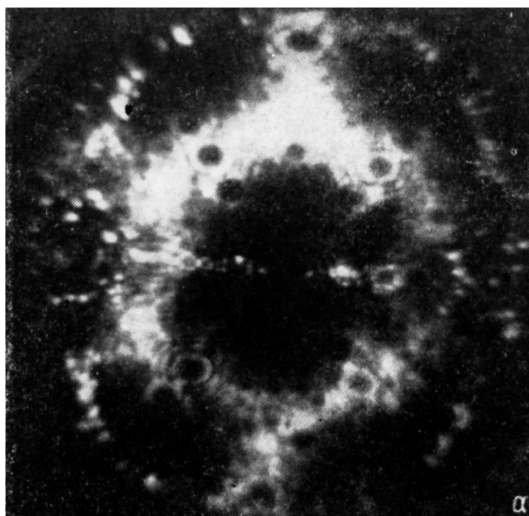


Рис. 6. Автоионные изображения поверхностей вольфрамового острия, подвергнутого раздельному радиационному и механическому воздействиям.

а — после облучения при обратной полярности высокого напряжения (на образце «минус»), *б* — после последовавшей за ним деформации (импульсное воздействие).

вые давления ударных волн) — сотни ГПа. Положительным обстоятельством является и предоставляемая здесь возможность определения скорости распространения ударной волны в материале путем измерения интервала времени между подачей высоковольтного импульса на образец (по осциллографу 26 на рис. 4) и обрывом острия (импульс на осциллографе 18), а также установление (с помощью автоионного микроскопа) удаленности сечения обрыва от исходной поверхности острия. Ясно, что реализация такого определения скорости требует

электронного согласования используемых приборов, а также учета констант приборов, времен запаздывания и т. п.

Некоторые иллюстрации полученных в настоящей работе результатов приведены на рис. 2, 5 и 6. Частично они уже упоминались выше.

Рис. 2, *а* соответствует структуре недеформированного острия из вольфрама, рис. 2, *б* отражает результат прошедшей пластической деформации острия, не приведшей к разрушению (обрыву) его вершины. Как видно, деформация привела к заметному искажению структуры, появлению (выходу на поверхность) дислокаций и т. п. Рис. 2, *в* иллюстрирует результат обрыва вершины острия при деформации со скоростью $\alpha \leq 100$ кг/мм²·с (рабочий режим на рис. 1, *а*). Образовавшиеся на поверхности обрыва бугорки имеют кристаллическую структуру. Иная ситуация имеет место при существенно больших скоростях деформации: α порядка 10^4 кг/мм²·с и выше. В этом случае бугорки (если они образуются), как уже отмечалось, не обнаруживают наличие в своем объеме кристаллической структуры (рис. 2, *г*). По-видимому, такой результат связан с тем, что в процессе быстрого нагружения образца его разрушение сопровождается расплавлением материала в области границы разрушения, тогда как действующее при этом сильное электрическое поле обуславливает формирование острых бугорков. Отсутствие у этих бугорков кристаллической структуры свидетельствует о быстрой закалке составляющего их материала.

На рис. 5 приведены автоионные изображения трех различных острий из вольфрама, разрушенных пондеромоторными силами электрического поля в режиме импульсного нагружения (рис. 1, *б*) с разными скоростями α . На рис. 5, *а* хорошо видно образование межзельных атомов. Однако их существование не указывает на то, что материал образца подвергся действию ударной волны, поскольку в объеме острия уже на глубине порядка пяти атомных слоев от исходной поверхности разрушения межзельных атомов не обнаружено. В случае рис. 5, *а* деформация не привела к оплавлению поверхности разрушения и последующей аморфизации, как это, по-видимому, произошло в образцах на рис. 5, *б* и особенно рис. 5, *в*.

Определенное в настоящей работе значение K^* для вольфрама составило ~ 4.0 . Однако разброс результатов был весьма большим, что требует набора существенно большей статистики.

Можно также предположить, что при больших скоростях деформации два протекающих совместно процесса — испарение полем и разрушение обуславливают эффект, в основе своей подобный явлению взрывной электронной эмиссии [22].

Наконец, автоионные изображения рис. 6 иллюстрируют результат последовательного радиационного (рис. 6, *а*) и механического (рис. 6, *б*) воздействий. Эксперимент проводился в режиме, соответствующем рис. 3, *б*. Облучение производилось ионами гелия (изображающего газа), скорость деформации приблизительно составляла $3.5 \cdot 10^8$ ГПа/с. Как видно, в результате разрушения образца образовалась частично аморфизированная поверхность. Отметим, что полученные в настоящей работе результаты позволяют сделать качественное заключение о неизменности $\sigma_{\text{д}}$ для вольфрама в результате его предварительного облучения ионами гелия. Значение же скорости деформации, при которой наблюдается аморфизация поверхности разрушения, имеет тенденцию к уменьшению.

В заключение подчеркнем, что описанные эксперименты следует продолжить с тем, чтобы получить надежную количественную информацию. Однако уже и сейчас, имея описанные результаты, можно сделать ряд выводов.

1. Структура поверхности разрушения острий зависит от скорости деформации.

2. При разрушении острий возможно расплавление материала в области поверхности разрушения.

3. Импульсное нагружение острий пондеромоторными силами электрического поля может генерировать в их материале ударные волны.

4. Существует (обнаружен) порог генерации ударных волн по амплитуде нагружения и длительности импульсов.

5. Эффект плавления металлов при высокоскоростной деформации наблю-

дался ранее для сжимающих напряжений. В настоящей работе он обнаружен для напряжений растягивающих.

6. Ввиду малости размеров острий и хорошего теплоотвода расплавленный при разрушении острий поверхностный слой материала может аморфизироваться.

7. Предварительное облучение острий низкоэнергетичными ионами газов не изменяет (в пределах ошибки) механической прочности вольфрамовых острий (режим на рис. 1, а).

8. Предварительное облучение острий низкоэнергетичными ионами газов снижает значение скорости деформации α , при которой происходит аморфизация слоя разрушения.

Список литературы

- [1] Ударные волны и явления высокоскоростной деформации металлов / Под ред. М. А. Мейерса, Л. Е. Мурра. М.: Металлургия, 1984. 512 с.
- [2] Элиштейн Г. Н. Строение металлов, деформированных взрывом. М.: Металлургия, 1988. 280 с.
- [3] Физика прочности и пластичности / Под ред. С. Н. Журкова. Л.: Наука, 1986. 152 с.
- [4] Макклинтон Ф., Аргон А. Деформация и разрушение материалов. М.: Мир, 1970. 439 с.
- [5] Мюллер Э. В., Цонь Т. Т. Автоионная микроскопия. М.: Металлургия, 1972. 360 с.
- [6] Мюллер Э. В. Методы анализа поверхностей / Под ред. А. Зандерны. М.: Мир, 1979. Гл. 8. С. 401—463.
- [7] Френкель Я. И. Введение в теорию металлов. Л.: Наука, 1972. 424 с.
- [8] Гарбер Р. И., Дранова Ж. И., Михайловский И. М. // ДАН СССР. 1967. Т. 174. № 5. С. 1044—1047.
- [9] Суворов А. Л., Кукавадзе Г. М., Скоров Д. М. и др. // Атомная энергия. 1975. Т. 38. С. 412—413.
- [10] Гарбер Р. И., Дранова Ж. И., Михайловский И. М. // Физ. металлов и металловедение. 1970. Т. 30. Вып. 2. С. 445—447.
- [11] Суворов А. Л., Бобков А. Ф., Соколов А. Г. // Структура и свойства монокристаллов тугоплавких металлов. М.: Наука, 1973. С. 63—74.
- [12] Зайцев С. В., Суворов А. Л. Препринт ИТЭФ. № 154. М., 1987. 16 с.
- [13] Суворов А. Л., Кукавадзе Г. М. // Физ. металлов и металловедение. 1969. Т. 27. С. 345—346.
- [14] Янушкевич В. А. // Физика и химия обработки материалов. 1979. № 2. С. 47—51.
- [15] Суворов А. Л. Автоионная микроскопия радиационных дефектов в металлах. М.: Энергоиздат, 1982. 167 с.
- [16] Березняк П. А., Слезов В. В. // РИЭ. 1972. Т. 17. С. 354—358.
- [17] Аладжиков Т. В., Бобков А. Ф., Карпихин И. Л. и др. // ПТЭ. 1988. № 3. С. 215—220.
- [18] Суворов А. Л. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. Харьков, 1980. № 1 (12). С. 18—27.
- [19] Зайцев С. В., Суворов А. Л. // Поверхность. 1985. № 9. С. 104—108.
- [20] Суворов А. Л., Квинтрадзе В. И. // Радиационные дефекты в металлах. Алма-Ата: Наука, 1988. С. 59—63.
- [21] Айбунд М. Р. // ПТЭ. 1976. № 5. С. 202—205.
- [22] Месяц Г. А., Проскуровский Д. И. // Письма в ЖЭТФ. 1974. Т. 13. Вып. 1. С. 7—10.

Поступило в Редакцию
3 июля 1989 г.