

На правах рукописи

Богач Андрей Анатольевич

Влияние температуры и полиморфных превращений на откольное разрушение металлов

**Специальность 01.04.17 – химическая физика,
в том числе физика горения и взрыва**

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук**

Черноголовка 2000

Из фондов Российской национальной библиотеки

Работа выполнена в Институте проблем химической физики РАН

Научный руководитель доктор физико-математических наук,
Разорёнов С В.

Официальные оппоненты доктор физико-математических наук,
профессор Гордополов Ю А
кандидат физико-математических наук,
Ананий А В

Ведущая организация Институт химической физики РАН, г Москва

Защита состоится "25" апреля 2000 года
в 10.00 часов на заседании диссертационного совета Д 200 08 01 в
Институте проблем химической физики РАН по адресу 142432, п
Черноголовка Московской обл , ИПХФ РАН, корп 1/2, актовый зал

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИПХФ РАН
(142432, п Черноголовка Московской обл , ИПХФ РАН, корп 1/2)

Автореферат разослан "13" апреля 2000 года

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 200 08 01,
кандидат физико-математических наук

Юданов А А

392029

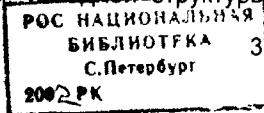
2002-4
16394

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.

Актуальность работы. Интенсивные импульсные воздействия на вещество - взрыв, высокоскоростной удар, мощные потоки лазерного и корпускулярного излучения, широко используются в последнее время как для решения прикладных задач, так и для изучения свойств вещества при высоких давлениях, температурах и скоростях деформирования. Одним из результатов импульсного воздействия на материала является его динамическое разрушение-откол. Исследования откольных явлений активно ведутся с 50-х годов и были главным образом направлены на решение прикладных задач оценки и прогнозирования ресурса конструкций при ударных нагрузках. В настоящее время информация о процессе и определяющих факторах динамического разрушения, которое происходит при кратковременных ($\sim 10^{-5}$ с и менее) воздействиях, находит применение в физике твердого тела, физике прочности и материаловедении, а также при численном моделировании импульсных воздействий.

Известно, что прочность материалов в статических условиях сильно зависит как от микроструктуры, так и от условий нагружения (температура, скорость деформирования и т.д.). В условиях интенсивных импульсных воздействий материал перед разрушением испытывает сжатие в ударной волне, которое сопровождается его необратимым разогревом и, в некоторых случаях, перестройкой кристаллической структуры. Следовательно, для прогнозирования динамического разрушения необходимо знать влияние этих факторов на прочность материала. Несмотря на то, что отколу посвящено достаточно много работ, имеется крайне мало надежных и систематических данных о влиянии свойств материала и условий нагружения на сопротивление динамическому разрушению. Таким образом, **актуальность исследований** сопротивления материалов высокоскоростному деформированию и разрушению при ударно-волновом нагружении определяется потребностью в экспериментальных сведениях о прочностных и упругопластических свойствах материалов.

Цель работы заключается в исследовании влияния начальной температуры, исходной структуры материала и его полиморфных



превращений в ударной волне на сопротивление динамическому деформированию и разрушению. Для решения поставленной задачи были проведены измерения откольной прочности поликристаллических образцов магния и алюминия и монокристалла цинка при различных начальных температурах в диапазоне от ~ 0 – $3 \cdot 10^5 T_n$ до ~ 0 – $99 T_n$. Уменьшение эффекта предшествующей деформации во фронте волне сжатия достигалось нагружением образцов импульсами небольшой амплитуды (~ 1 – 10 динамических пределов текучести металла). Влияние начальной структуры и полиморфного превращения на динамическую прочность исследовалось на образцах стали 40X в отожженном и закаленном исходных состояниях в диапазоне амплитуд импульса сжатия 7–80 ГПа.

Метод исследований основан на возбуждении в образцах одномерных импульсов сжатия и непрерывной регистрации скорости движения свободной поверхности образцов лазерным доплеровским интерферометром. Образцы перед нагружением подвергались нагреву или термообработке. Информация о динамике изучаемых явлений и количественные характеристики извлекалась из анализа волновых профилей.

На защиту выносятся следующие основные результаты:

1. Способ регистрации волновых профилей в предварительно нагретых образцах во взрывном эксперименте.
2. Результаты исследования влияния температуры на процесс откольного разрушения сплавов АД1, Мг95 и монокристалла цинка.
3. Результаты исследования влияния термообработки и полиморфного превращения на сопротивление откольному разрушению конструкционной стали 40X.
4. Механизм потери прочности вблизи плавления.
5. Определяющие кинетические соотношения для вязкого разрушения металлов в широком диапазоне начальных температур и длительностей воздействия.
6. Результаты одномерного моделирования откольного разрушения.

Новизна полученных результатов

Предложен способ регистрации профилей скорости свободной поверхности предварительно нагретых образцов во взрывных экспериментах. С использованием этого метода показано, что откольная прочность поликристаллических образцов алюминия, магния и монокристалла цинка различной ориентации практически не зависит от начальной температуры в широком диапазоне и уменьшается вблизи температуры плавления.

Получен немонотонный рост предела текучести поликристаллических алюминия и магния с ростом температуры.

Экспериментально подтверждено предположение о переходе механизма пластического деформирования от термофлуктуационного к атермическому.

Показано, что предварительная термообработка и полиморфное превращение материала в ударной волне могут оказывать заметное влияние на откольную прочность металлов.

Предложен механизм потери прочности металлов при высоких температурах, связанный с локальным разогревом и плавлением материала вблизи растущих несплошностей.

Предложены определяющие кинетические соотношения вязкого разрушения, описывающие экспериментальную зависимость откольной прочности материала от скорости деформирования в разгрузочной части импульса сжатия и температуры в широком диапазоне изменения параметров.

Практическая и теоретическая ценность работы. Полученные в работе экспериментальные данные по влиянию температуры, начальной структуры и полиморфного превращения в ударных волнах на сопротивление деформированию и откольному разрушению могут быть использованы при построении определяющих соотношений для расчета реакции материалов и реальных конструкций на импульсные воздействия, а также для оценки прочности деталей конструкций.

Экспериментальная информация о прочностных и упругопластических свойствах металлов сопротивлении металлов в широком диапазоне параметров нагрузки и начального состояния необходима

для развития физики твердого тела, физики прочности и пластичности в области высоких скоростей деформирования

Полученные на основе предложенного механизма потери прочности при высоких температурах определяющие кинетические соотношения для вязкого разрушения могут быть использованы при 2-х и 3-х мерном моделировании импульсного воздействия на конструкции в широком диапазоне начальных температур и длительностей нагрузки

Апробация работы Материалы диссертационной работы докладывались и обсуждались на Международной конференции «Новые модели и численное моделирование ударно-волновых процессов в конденсированных средах» (Санкт-Петербург, 1995 г), Международной конференции «Нестабильность материалов при механическом нагружении» (Санкт-Петербург, 1996 г), Международной конференции «Ударные волны в конденсированных средах» (Санкт-Петербург, 1996 г), XI Симпозиуме по горению и взрыву (Черноголовка, 1996 г), Международном симпозиуме «Ударные волны в конденсированных средах» (Амхерст, США, 1997г), 13 Международной конференции «Уравнения состояния вещества» (п Терскол, 1998 г), 15 Международной конференции «Уравнения состояния вещества» (г Эльбрус, 2000 г), а также на семинарах и конкурсах научных работ ИПХФ РАН,

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 9 печатных работах

Структура работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения, в котором приведены основные результаты и выводы, списка цитированной литературы. Общий объем диссертации составляет 156 страниц и включает 149 страниц текста, 33 рисунка, 4 таблицы, 172 ссылки

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

В первой главе диссертации приведены краткие сведения из механики сплошных сред, необходимые для понимания распространения волн сжатия и разрежения в твердых телах, описаны особенности формирования волн сжатия в упругопластических телах и ма-

териалах, претерпевающих полиморфные превращения в ударных волнах. Подробно проанализированы волновые взаимодействия при отколе и кратко описаны существующие методы определения динамической прочности твердых тел. Приведено обоснование применяемых в данной работе метода одномерного нагружения образцов, который является наиболее простым в интерпретации результатов, и метода измерения растягивающих напряжений, основанного на регистрации профилей скорости поверхности образцов. Описан и обоснован способ определения критических напряжений при отколе из профилей скорости свободной или контактной поверхности с учётом упругопластических свойств материалов.

Во второй главе диссертации описаны экспериментальные методы генерации импульсов сжатия различной амплитуды и длительности и метод непрерывной регистрации волновых профилей, используемые в данной работе. Одномерные импульсы сжатия возбуждались в образцах ударом пластин различной толщины, разогнанных с помощью взрывных устройств. В опытах с предварительным нагревом образцы нагружались алюминиевыми пластинами толщиной 0,2-2 мм, которые разгонялись до скоростей 450-1200 м/с плоской ударной волной через толстую пластину-ослабитель. В экспериментах по изучению влияния полиморфного превращения в ударных волнах применялись устройства высокоскоростного метания ударников. В такой постановке алюминиевые пластины разгонялись продуктами взрыва ВВ разной массы до скоростей 2-5 км/с напрямую, либо через слой парафина, что давало возможность варьировать амплитуду ударной нагрузки в диапазоне 7-80 ГПа.

Наиболее перспективными с точки зрения пространственного и временного разрешения и точности измерений являются лазерные интерферометрические методы регистрации движения свободных и контактных поверхностей. Для регистрации профилей скорости свободной поверхности образцов в работе использовался лазерный доплеровский интерферометрический измеритель скорости типа VISAR, подробное описание которого также приведено во второй главе.

В третьей главе диссертации описан способ регистрации профилей скорости интерферометрической системой VISAR предварительно нагретых образцов во взрывных экспериментах и приведены результаты измерения откольной прочности в зависимости от температуры для трех материалов. Схема экспериментальной сборки показана на рис 1. Образцы алюминия АД1 и магния Mg95 толщиной ~10 мм вырезались из одного прутка диаметром 70 мм и прямоугольной отливки размером ~70×150×400 соответственно и нагружались алюминиевыми ударниками толщиной 0,2-2 мм и диаметром 55-65 мм по низкоскоростной схеме метания. Образцы цинка размером ~0,5-2×10×15 мм вырезались из монокристаллов чистоты 99,999%, выращенных методом прямой кристаллизации из расплава и ориентированных параллельно базовой и призматической плоскостям, и подвергались электрохимическому травлению для удаления поверхностных дефектов.

Образцы металлов нагревались с тыльной стороны нихромовой спиралью, помещенной в керамический корпус. Время нагрева до температуры 700°C составляет 10 минут при максимальной мощности нихромового нагревателя 1,0 кВт. Температура образца контролировалась в одной точке на расстоянии 7-8 мм от оси хромель-алюмелевой термопарой толщиной 40 мкм, сигнал с которой непрерывно регистрировался самописцем. Термопара изолировалась слюдой толщиной 10 мкм и прижималась к образцу металлической пластинкой или приваривалась точечной сваркой.

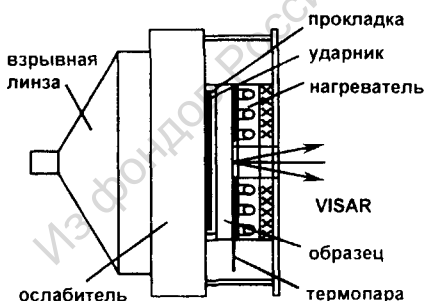


Рис. 1. Схема экспериментальной сборки

Термопара изолировалась слюдой толщиной 10 мкм и прижималась к образцу металлической пластинкой или приваривалась точечной сваркой.

В результате тестовых экспериментов были определены градиенты и точность измерения температуры. Осевой градиент температуры составил 1 град/мм, погрешность

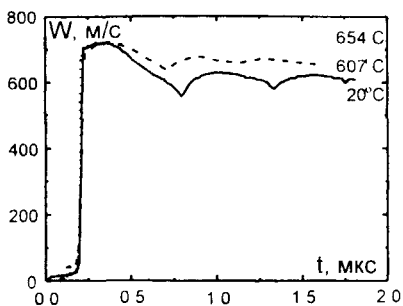


Рис.2. Профили скорости свободной поверхности алюминиевых образцов

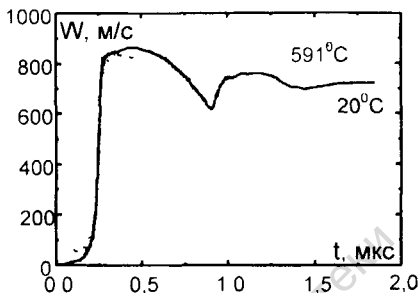


Рис.3. Профили скорости свободной поверхности магниевых образцов

измерения не превышала 10^0

На рис 2, 3, 4, 5 приведены результаты регистрации волновых профилей образцов алюминия АД1, магния Мг95, монокристаллов цинка при нагружении по плоскостям [0001] и [1010]. На профилях скорости регистрируется выход на поверхность упругопластической волны сжатия и следующей за ней волны разрежения. Откольная прочность определялась из профилей скорости свободной поверхности по известному соотношению $\sigma = 1/2\rho c(\Delta W + \delta W)$, где ρ - плотность материала, c - объёмная скорость звука, ΔW - разность максимальной скорости и скорости в первом минимуме, δW - поправка, учитывающая разницу скоростей распространения возмущений в упругой и пластической области.

На рис 5,6 показаны результаты обработки полученных волновых профилей в виде зависимости откольной прочности для алюминия АД1, магния Мг95, монокристаллов цинка от начальной температуры. Как видно из графиков изменение температуры в широком диапазоне не оказывало заметного влияния на откольную прочность данных металлов. Характерной особенностью для исследованных металлов является уменьшение откольной прочности в узком ~ 100 - 200°C диапазоне вблизи точки плавления. Прочность алюминия уменьшилась практически до 0 в диапазоне 530 - 654°C , тогда как мо-

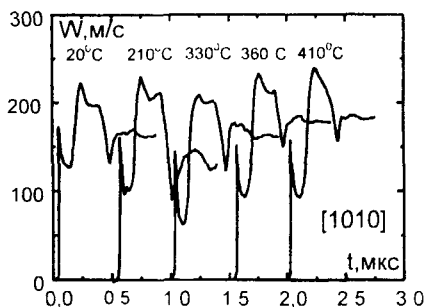


Рис.4. Профили скорости свободной поверхности монокристаллов цинка

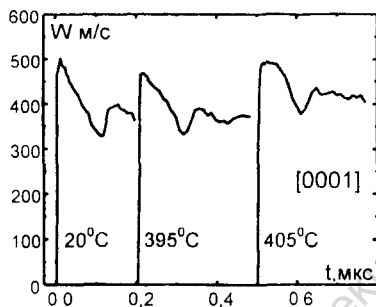


Рис.5. Профили скорости свободной поверхности монокристаллов цинка

нокристалл цинка сохранил 50-70% процентов начальной прочности при температуре 405-410⁰С Из рис 6 видно, что вблизи плавления прочность сильно зависит от амплитуды ударного сжатия, что связано с увеличением необратимого нагрева. Незначительное уменьшение прочности алюминия в области 200⁰С можно объяснить рекристаллизацией материала.

На профилях скорости свободной поверхности рис 2,3 алюминия и магния было зафиксировано увеличение амплитуды упругого предвестника вблизи температуры плавления, тогда как амплитуда

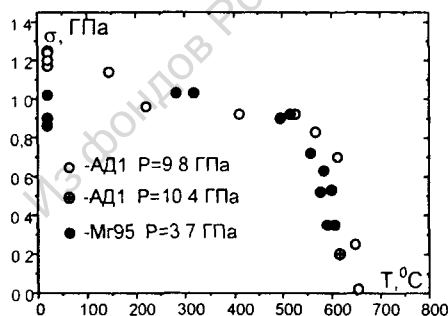


Рис.6. Зависимость откольной прочности алюминия и магния от температуры

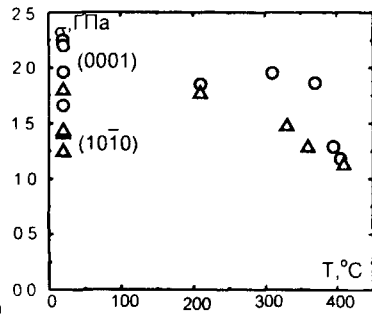


Рис.7. Зависимость откольной прочности монокристаллов цинка от температуры.

упругого предвестника в монокристалле цинка при нагружении по плоскости [1010] не менялась в пределах разброса экспериментальных значений рис 4

Экспериментальные зависимости откольной прочности и амплитуды упругого предвестника от температуры для трех металлов соответствуют теоретическим представлениям о безактивационном механизме пластической деформации при больших (более 10^4 с^{-1}) скоростях деформации. В то же время, эта теория не объясняет уменьшение откольной прочности вблизи температуры плавления. Для объяснения разупрочнения металлов вблизи плавления в работе была предложена модель локального разогрева. Согласно этой модели в результате пластической деформации в окрестности растущих пор происходит дополнительный разогрев и плавление материала. Если начальная температура образца достаточно высока, то локальное плавление и ускорение роста пор начнется на ранней стадии разрушения, что будет зафиксировано как уменьшение откольной прочности. При более низких температурах локальное плавление начнется на более поздних стадиях разрушения, что не отразится на измерении откольной прочности. Оценка и одномерное моделирование откольного разрушения показали, что из-за малых времен воздействия влияние локального плавления на откольную прочность проявляется при начальных температурах, отличающихся от точки плавления на величину $\sim 100^\circ$ в зависимости от вязкопластических и термодинамических свойств материала.

Различие в поведении упругого предвестника с ростом температуры для поликристаллических образцов алюминия, магния и монокристалла цинка, по видимому, связано с изменениями микроструктуры поликристалла такими, как изменение размера зерна и растворение примесей вблизи границ зерен.

В четвертой главе диссертации приводятся экспериментальные данные по исследованию влияния термообработки и полиморфного превращения в ударной волне на сопротивление динамическому разрушению стали 40X.

Образцы стали 40X вырезались из одного прутка диаметром

60 мм Часть образцов была термообработана до твердости 45-55 единиц по Роквеллу Образцы в состоянии поставки имели твердость 7-9 единиц Сталь 40X в состоянии поставки имела ферритоперлитную структуру Содержание феррита составляло 32% с размером зерен в диапазоне 5-40 мкм и типичным размером 20-30 мкм Закаленные образцы стали 40X имели мартенситную структуру с размером зерна мартенсита 0,5×15-20 мкм Размер зерна остаточного аустенита составлял 1,5-2,5 мкм Образцы стали 40X нагружались треугольными импульсами с амплитудой сжатия ниже и выше давления полиморфного превращения $\alpha-\epsilon$ в железе На профилях скорости при нагружении выше давления полиморфного превращения видно образование двух пластических волн сжатия из-за аномалии сжимаемости железа в области 13 ГПа рис 8 Результаты измерения откольной прочности представлены на рис 9 Из рисунка видно, что термообработка и полиморфное превращение упрочняют сталь 40X Быстрое твердофазное превращение железа и сталей в ударной волне перед разрушением приводит к уменьшению размеров зерен с образованием мартенситной структуры, тогда как закаленные образцы изначально имеют мелкозернистую мартенситную структуру Поэтому эффект упрочнения в большей степени проявляется на незакаленных образцах Непосредственно в области превращения результаты не однозначны, так как разрушение необработанной стали про-

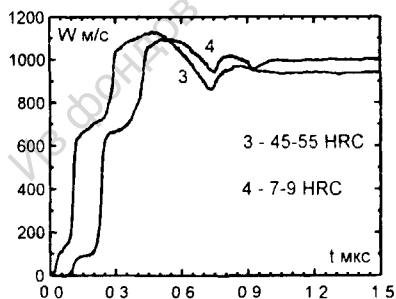


Рис.8. Профили скорости свободной поверхности образцов стали 40X

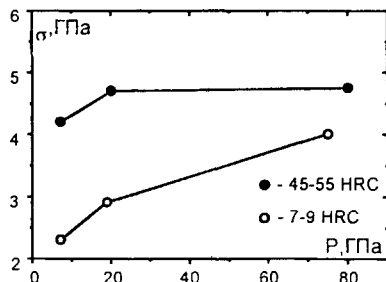


Рис.9. Зависимость откольной прочности стали 40X от давления ударного сжатия

исходило вблизи границы исходного и превращенного материала, что следует из совпадения периода циркуляции откольного импульса и интервала между первой и второй пластическими волнами но полученный результат не подтверждает уменьшение откольной прочности стали вблизи полиморфного превращения

В пятой главе сформулированы основные предположения модели разупрочнения металлов вблизи температуры плавления, получены определяющие соотношения кинетики разрушения до и после плавления в окрестности поры и приводятся результаты одномерного моделирования откольного разрушения

Для построения кинетики разрушения был применен классический подход Кэрола-Холта, рассматривающий среднюю пору, окружённую слоем материала В отличие от модели Кэрола-Холта материал считался нелинейно-вязкопластичным

$$\tau = \tau_1 + F\gamma^{1/m} \quad (1)$$

Из баланса мощностей внешних и внутренних сил была получена кинетика роста поры

$$\dot{a} = a \left[\left(\frac{P_m}{2} - Y \ln \frac{b}{a} \right) / \frac{m}{3} F_2 \left(1 - \left(\frac{a}{b} \right)^{3/m} \right) \right]^m \quad (2)$$

где a -радиус поры, b -внешняя граница пластической зоны, P_m -среднее микроскопическое напряжение на границе слоя, Y -предел текучести, F_2 -средний по объёму пластической зоны коэффициент сопротивления сдвигу

Увеличение плотности дислокаций при пластическом течении одновременно увеличивает вероятность неупругого столкновения дислокации с дислокациями других систем скольжения, аннигиляции или блокирования при столкновении с дислокацией противоположного знака В предположении, что дислокация при скольжении в каждом столкновении теряет в среднем некоторое количество кинетической энергии для коэффициента сопротивления F_2 в (2), был получен закон деформационного упрочнения

$$F_2 = F_0 \left(\frac{1 + D_2 \dot{\gamma}_a}{1 + \alpha_1 D_2 \dot{\gamma}_a} \right)^{2-1-m}, \quad (3)$$

где $\dot{\gamma}_a$ - деформация. Параметры кинетики разрушения F_0 , D_2 , α_1 , γ_a/b_0 , m подбирались так, чтобы расчёты описывали экспериментальные профили скорости и эмпирическую зависимость откольной прочности от скорости деформирования в разгрузочной части импульса сжатия $\sigma(\dot{\epsilon})$ при нормальной температуре.

Одновременно с ростом пористости считался разогрев поверхности поры в адиабатическом приближении

$$\dot{T}_a = \frac{D_3}{\rho c_v} \left(\dot{\gamma} + F_1 \dot{\gamma}_a^{1-m} \right) \dot{\gamma}_a, \quad (4)$$

где c_v - удельная теплоемкость материала, D_3 - коэффициент, учитывающий гетерогенность энерговыделения, T_a - скорость изменения температуры поры, F_1 - коэффициент сопротивления сдвигу на поверхности поры.

Зависимость кинетики разрушения от температуры была получена при следующих предположениях модели локального разогрева и плавления: 1) вязкое разрушение металлов в условиях откола обусловлено ростом пор, 2) вязкопластичная деформация в окрестности растущей поры приводит к локальному разогреву деформируемого объема, 3) температура ниже точки плавления не влияет на вязкопластичные свойства металла, 4) в точке плавления металл полностью теряет сдвиговую прочность.

Если пора прогрелась до плавления, то в следующие моменты времени от поверхности поры вглубь материала будет расширяться зона плавления, что приведёт к ускорению роста поры. Очевидно, что скорость релаксации напряжений и скорость разрушения в случае локального плавления определяются кинетикой расширения зоны плавления вокруг пор. Для скорости расширения зоны плавления было получено выражение

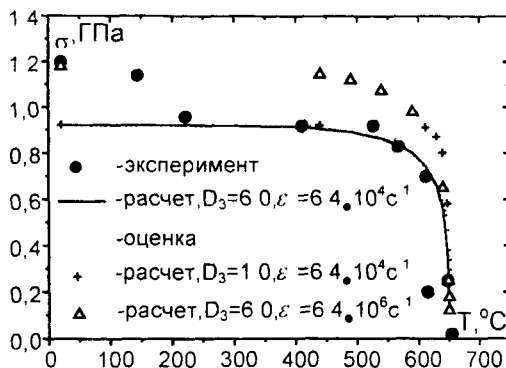


Рис.10. Экспериментальная и расчетные зависимости откольной прочности сплава АД1 от температуры

$$c_L = \left(1 + D_3 \frac{2\tau\beta_1}{3c_v\rho(T_m - T_0)} \right) \dot{\epsilon}, \quad (5)$$

где c и τ - массовая скорость материала и напряжение сдвига перед фронтом волны плавления, T_0 , T_m - начальная температура и температура плавления, β_1 - поправочный коэффициент, c_v - теплоемкость. Из (5) видно, что с приближением начальной температуры к точке плавления скорость расширения зоны плавления неограниченно возрастает.

Кинетические уравнения роста поры и расширения зоны плавления были преобразованы в кинетические соотношения для пористости и вставлены в одномерный гидродинамический Лагранжев код, так что разрушение описывалось увеличением удельного объема материала. На рис. 10 приводятся результаты расчета зависимости откольной прочности от температуры для алюминия АД1.

Из расчетов следует, что параметр m близок или равен обратному значению показателя степени 0.06 в экспериментальной зависимости $\sigma(\dot{\epsilon})$ откольной прочности от скорости деформирования в разгрузке. Расчетная зависимость $\sigma(T)$ для $D_3=1.0$ соответствует

идеальному случаю гомогенной деформации материала вблизи поры. Расчет для $D_3=60$ сделан в предположении о локализации пластической деформации в зонах, доля которых составляет $\sim 0,2$ объема приповерхностного слоя материала. Зонами локализации деформации могут быть полосы сдвига и границы зерен.

Расчеты зависимости $\sigma(T)$ при большей скорости деформирования в разгрузочной части импульса сжатия (рис. 10) показали расширение области разупрочнения, что является следствием модели и нуждается в экспериментальной проверке.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ.

1. Разработан способ регистрации волновых профилей лазерным интерферометром в предварительно нагретых образцах во взрывном эксперименте.

2. Экспериментально установлено, что откольная прочность алюминия АД1, магния Мг95 и монокристаллических образцов цинка двух ориентаций не зависит от температуры до $0,7-0,85T_n$. Вблизи температуры плавления прочность алюминия уменьшается до величины близкой к нулю, тогда как прочность монокристаллических образцов цинка уменьшается на 30%-50%.

3. Экспериментально установлено, что с увеличением температуры амплитуда упругой волны сжатия в цинке не меняется и увеличивается в алюминии и магнии вблизи плавления.

4. Предложен механизм разупрочнения металлов вблизи температуры плавления, в основе которого лежит предположение о локальном разогреве и плавлении материала. Численное моделирование показало, что эта модель описывает экспериментальные зависимости откольной прочности от температуры и скорости деформирования в широком диапазоне изменения параметров.

5. Экспериментально установлено, что вызванные твердофазными превращениями в результате термообработки или полиморфного перехода в ударной волне изменения микроструктуры увеличи-

вают откольную прочность стали 40Х

Таким образом на основании результатов работы следует вывод, что температура и микроструктура материала являются важными факторами влияющими на процесс динамического разрушения

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах

1 G I Kanel, S V Razorenov, A A Bogatch, A V Utkin, V E Fortov, D Grady, Spall fracture properties of aluminum and magnesium at high temperatures, J Appl Phys, 1996, V 79(11), p 8310

2 G I Kanel, S V Razorenov, A Bogach A V Utkin, and D D Grady Simulation of Spall Fracture of Aluminum and Magnesium over a Wide Range of the Load Duration and Temperature, Int J of Imp Eng, 1997, V 19, p 467

3 С В Разоренов, А А Богач, Г И Канель Влияние термообработки и полиморфных превращений на сопротивление динамическому разрушению стали 40Х, ФММ, 1997, N1, с 147

4 S V Razorenov, A A Bogatch, G I Kanel, A V Utkin and V E Fortov D E Grady Elastic-Plastic Deformation and Spall Fracture of Metals at High Temperatures Sh Comp of Cond Mat -1997, ed by Schmidt, Dandekar, Forbes, Amherst, USA, p 447

5 A A Bogach, Analysis of Temperature Influence on the Dynamic Fracture of Metals, Sh Comp of Cond Mat -1997, ed by Schmidt, Dandekar, Forbes, Amherst, USA, p 223

6 A V Utkin, G I Kanel, S V Razorenov, A A Bogatch, Elastic Modulus and Dynamic Yield Strength of Metals near the Melting Temperature, Sh Comp of Cond Mat -1997, ed by Schmidt, Dandekar, Forbes, Amherst, USA, p 443

7 С В Разоренов, А А Богач, Г И Канель, А В Уткин, С Г Протасова, В Г Сурсаева Сопротивление ударно-волновому деформированию и разрушению монокристаллов цинка при повышенных температурах, ФТТ, 1998, т 40, №10, с 1849

8 А А Богач, Влияние ударного нагрева на откольную прочность металлов, 13 Межд конф « Ур сост вещ », 1998, Терскол, с 105

9 А А Богач, Одномерное моделирование откола в металлах при

высоких температурах, 15 Межд конф « Ур сост вещ », 2000, Тер-
скол, с 141

Работа выполнена в лаборатории физической газодинамики
Отдела горения и взрыва ИПХФ РАН

Из фондов Российской национальной библиотеки

А.А. Богач

**Влияние температуры и полиморфных превращений
на откольное разрушение металлов**

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Редакционно-издательский отдел ИПХФ РАН
Лицензия №021071 от 22. 08. 1996г.

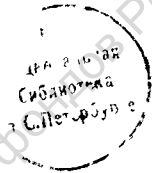
Отпечатано в типографии ИПХФ РАН
22.02.00 Зак. 69 Объем 1 п.л. Тир. 100

РНБ Русский фонд

2002-4

16394

Из фонда Российской национальной библиотеки



1
2
3
4