

MHD SIMULATIONS OF FAST ELECTRICALLY EXPLODING WIRES

S.E. ROSENTHAL, K.W. STRUVE, D.H. MCDANIEL
Sandia National Laboratories, Albuquerque, N M, USA

G.S. SARKISOV, K. COCHRANE
Ktech Corporation, Albuquerque, N M, USA

Before attempting to learn how exploding wire evolution affects z-pinch behavior it is crucial to establish the ability to accurately model a single exploding wire. We have done simulations of a single-exploding wire (either Aluminum, or Tungsten) with Sandia's new MHD code ALEGRA. We have so far limited our study to the radial evolution. Our standard configuration corresponds to well-diagnosed exploding wire experiments. Accurate equation of state and electron conductivities are crucial and ours are based on data and molecular dynamics simulations [1]. There are parameter regimes where electron emission does not play a significant role in the explosion process and where the wire material remains reasonably continuous and the MHD approximation provides a valid description. In these regimes (fast pulse: 150 A/ns, and close to the cathode side of the wire), we have achieved excellent agreement with experimentally measured voltage and detailed atomic density radial profiles (reconstructed from 2-wavelength interferometry). We have achieved only partial success in simulating slow-pulse explosions (20 A/ns), and hypothesize that the always-present hydrocarbon coating (not included in present simulations) needs to be taken into account in cases of slower energy deposition. A key feature that occurs for wires exploding into vacuum, as observed in experiments, is the rapid transition to a coronal state coinciding with a voltage collapse. Features of the corona formation process will be presented. Expansion velocities of the core and corona depend on how much energy gets deposited into the core prior to corona formation, and our simulation results agree well with measured velocities for fast explosion of Aluminum, but simulation of exploding Tungsten gives twice the measured velocity. Understanding this important discrepancy should suggest possible improvements in our model. Simulations show that the path in phase space that an exploding wire takes in its evolution from solid metal to high-temperature plasma is quite sensitive to the EOS and conductivity models used. A novel phase-space view of exploding wires allows us to see graphically the mutual relations between the EOS and the electrical conductivity during the exploding wire's evolution. Phase-transition issues will be discussed.

References

1. Desjarlais M.P., *Contrib.Plasma.Phys.* — 2001. — 41. — P. 267.



ЭВОЛЮЦИЯ АЛЮМИНИДОВ ЦИРКОНИЯ ПРИ ВЫСОКО ИНТЕНСИВНОМ УДАРНО-ВОЛНОВОМ НАГРУЖЕНИИ

Д.В. БАШЛЫКОВ, И.Г. БРОДОВА, Т.И. ЯБЛОНСКИХ
Институт физики металлов УрО РАН,
Екатеринбург, Россия

Е.А. КОЗЛОВ, С.А. БРИЧИКОВ, В.И. БУЗАНОВ

Российский федеральный ядерный центр —
Всероссийский НИИ технической физики
им. акад. Е.И. Забабахина, Снежинск, Россия

Ранее исследованы особенности ударно — волнового плавления двухфазных Al- сплавов с переходными металлами Ti, Zr и Hf и определены условия плавления Al матрицы [1, 2]. В данной работе реализованы более интенсивные режимы взрывного нагружения, позволившие обеспечить фазовые и структурные превращения в тугоплавких интерметаллидах.

Целью работы является анализ изменения морфологии, размеров и кристаллической структуры алюминидов Zr в двухфазном сплаве Al-2,5% Zr.

Комплексное исследование структуры, фазового состава и микротвердости H_{μ} (r , θ , φ) материала в обжатых и сохранных образцах показало наличие развитых зон плавления, в которых при последующей высокоскоростной кристаллизации происходит зарождение и рост отличных по форме и кристаллическому строению метастабильных алюминидов с кубической решеткой типа L1₂. Последние инициируют формирование микроструктурной структуры алюминидовой матрицы с высокой твердостью.

Работа выполнена при поддержке комплексной программы Президиума Российской академии наук «Теплофизика и механика интенсивных и энергетических воздействий».

Ссылки

1. Kozlov E.A., Brodova I.G., Bashlykov D.V. et al. *Phys. Met. Metallography.* — 1999. — V. 87. — № 3. — P. 34—45.
2. Kozlov E.A., Brodova I.G., Bashlykov D.V. et al. // *J. Phys. IV France.* — 2000. — V.10. — P. 761—767.

EVOLUTION OF ZIRCONIUM ALUMINIDES UNDER INTENSIVE SHOCK-WAVE LOADING

D.V. BASHLYKOV, I.G. BRODOVA, T.I. YABLONSKIKH

Institute of Metal Physics, Ural Branch of RAS,
Yekatherinburg, Russia

E.A. KOZLOV, S.A. BRICHKOV, V.I. BUZANOV

Российский федеральный ядерный центр —
Всероссийский НИИ технической физики
им. акад. Е.И. Забахина, Снежинск, Россия

Features of shock-wave melting for two-phase Al-alloys with transition metals Ti, Zr and Hf were previously investigated and melting conditions for Al-matrix were identified [1, 2]. This work realized more intensive modes of explosion loading. These modes allowed ensured phase and structural transitions in high-melting intermetallic compounds.

The purpose of this investigation is to analyze changes in morphology, sizes and crystal structure of zirconium aluminide in the two-phase alloy Al-2.5% Zr.

Comprehensive studies of the structure, phase composition and microhardness $H_{\mu}(r, \theta, \varphi)$ of material in the compressed and recovered samples demonstrated presence of developed melting-zones, in which metastable aluminides, having different form and crystalline structure, including a $L1_2$ -type cubic lattice, appear and grow in the process of the follow-on high-rate crystallization.

This work was supported by the complex program of the Presidium of the Russian Academy of Sciences «Thermal Physics and Mechanics of Intensive and Energetics Impacts».

References

1. Kozlov E.A., Brodova I.G., Bashlykov D.V. et. al. // Phys. Met. Metallography. — 1999. — V. 87. — № 3. — P. 34—45.
2. Kozlov E.A., Brodova I.G., Bashlykov D.V. et. al. // J. Phys. IV France. — 2000. — V. 10. — P. 761—767.



ЭВОЛЮЦИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ МЕТАЛЛА ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ НАГРУЖЕНИИ

М.П. БОНДАРЬ, Л.А. МЕРЖИЕВСКИЙ

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН,
Новосибирск, Россия

Проведено исследование эволюции микроструктуры после высокоскоростного нагружения по методу полого толстостенного цилиндра. Структурные особенности деформированных материалов изучались с помощью электронного сканирующего микроскопа.

Характерной особенностью, сопровождающей взрывной коллапс толстостенных цилиндров, является образование полос локализованной пластической деформации [1—3]. Для ряда материалов установлена зависимость величины деформации ϵ_r , при которой происходит зарождение и распространение полос локализации пластической деформации, от размера зерен. В этой связи особое внимание в работе уделялось изучению закономерностей процессов локализации деформации в мелкозернистых материалах ($d < 50$ мкм). В процессе высокоскоростной деформации происходит изменение микроструктуры: возрастает плотность дислокаций, образуются диссипативные структуры (ячеистая структура, двойники, микророзерна), наблюдается фрагментация структуры на всех масштабных уровнях.

Механизм фрагментации элементов структуры и свойства при последующей деформации определяются исходным состоянием материала. В мелкозернистой структуре степень развития субзеренной микроструктуры, определенная перестройкой дислокационного ансамбля, обеспечивает однородность пластического течения до больших значений ϵ_r . Проведено сопоставление формируемых микроструктур с соответствующими им величинами деформации, в том числе и в полосе локализации деформации.

Установленные закономерности фрагментации структуры в процессе динамической деформации дают базу для понимания механизмов формирования микро- и нанокристаллических структур.

Ссылки

1. Нестеренко В.Ф., Бондарь М.П. Локализация деформации при схлопывании толстостенного цилиндра. // ФГВ. — 1994. — 30, 4. — С. 99—111.
2. Nesterenko V.F., Meyers M.A., LaSalvia J.C., Bondar M.P., Chen Y.J., Lukyanov Y.L. Investigation Of High-Strain, High-Strain-Rate Behavior of Tantalum Using The Collapse Of A Thick-Walled Cylinder. // Material Science and Engineering. — 1997. — A229. — P. 23—41.

3. Бондарь М.П., Первухина О.Л. Зависимость структуры титана, формирующейся при высокоскоростном нагружении, от его исходного состояния // ФГВ. — 2000. — Т. 36. — № 2. — С. 110—121.



ВЛИЯНИЕ НА МЕХАНИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ АРМКО–ЖЕЛЕЗА ТЕМПЕРАТУРЫ, СКОРОСТИ ДЕФОРМАЦИИ И ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО УДАРНОГО НАГРУЖЕНИЯ В ОБЛАСТЬ α – ϵ ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА

А.М. БРАГОВ, А.К. ЛОМУНОВ, И.В. СЕРГЕИЧЕВ

Научно-исследовательский институт механики
Нижегородского государственного университета
(НИИМ—ННГУ), Н. Новгород, Россия

С.А. БРИЧИКОВ, Е.А. КОЗЛОВ, А.В. ПЕТРОВЦЕВ

Российский федеральный ядерный центр —
Всероссийский НИИ технической физики
им. акад. Е.И. Забабахина, Снежинск, Россия

G. T. GRAY III

Los Alamos National Laboratory (LANL),
Los Alamos, New Mexico, USA

Проведены взрывные эксперименты по сохранению с заготовкой из армко–железа. В результате проведенных исследований получены новые данные по динамическим свойствам армко–железа в исходном состоянии и после предварительного ударно–волнового деформирования, сопровождавшегося протекающим обратимого б– ϵ превращения.

Показано, что предварительная высокоскоростная деформация железа в области исходной б–фазы приводит к примерно такому же влиянию на диаграмму деформирования, как и квазистатическая деформация до того же уровня. Это отражает слабую чувствительность железа к истории изменения скорости деформации. Этот факт подтвержден результатами испытаний, в которых осуществлялось скачкообразное изменение скорости деформации непосредственно при сжатии.

Предварительная высокоскоростная ударно–волновая деформация железа в области протекания полиморфного б– ϵ превращения приводит к существенному изменению зависимостей напряжения от

уровня деформации. Существенно изменяется наклон этих зависимостей. Величина относительного повышения напряжений соответствует величине изменения микротвердости материалов при протекании в них превращения. На полученных диаграммах деформирования отмечено появление «зуба текучести». Воспроизводимые экспериментальные результаты были получены независимо в России и США.

Отмеченные эффекты связаны с качественными и количественными изменениями микроструктуры материалов после взрывного нагружения. Таким образом, полученные в результате комплексных исследований, данные по изменению макроскопических свойств, при квазистатических и динамических испытаниях, измерению твердости сохраненных образцов железа и микроструктурных изменений, дают необходимую основу для проверки и совершенствования физически–обоснованных моделей поведения материалов в волнах напряжений.

THE INFLUENCE OF TEMPERATURE, STRAIN RATE HISTORY AND SHOCK PRELOADING IN THE REGION OF α – ϵ – PHASE TRANSITION ON THE MECHANICAL BEHAVIOR OF ARMCO–IRON

A.M. BRAGOV, A.K. LOMUNOV, I.V. SERGEICHEV

Research Institute of Mechanics, State University of Nizhny
Novgorod (RIM—NNSU), Nizhny Novgorod, Russia

S.A. BRICHIKOV, E.A. KOZLOV, A.V. PETROVTSEV

Russian Federal Nuclear Center —
All-Russian Scientific Research
Institute of Experimental Physics, Sarov, Russia

G. T. GRAY III

Los Alamos National Laboratory (LANL),
Los Alamos, New Mexico, USA

Explosive shock–wave recovery experiments have been conducted on Armco–iron. New data on the dynamic properties of Armco–iron both in its as–received annealed condition and following shock–wave prestraining above the α – ϵ transition were obtained.

It is shown that shock–wave prestraining of iron in the α –phase results in approximately the same evolution in the constitutive of Fe as that observed following quasistatic deformation to an equivalent plastic strain. This observation demonstrates a weak sensitivity of iron to strain–rate loading history. This fact was further

confirmed using results of compressive strain–rate jump SHPB tests.

Shock–wave prestraining of iron above the α – ε phase transition is seen to result in significant changes in the stress–strain response of iron. In addition the post–shock prestrain strain–hardening behavior is seen to change significantly. The relative increase in the flow stress is seen to correspond to hardness evolution in accordance with the α – ε phase transition in iron. A substantial yield drop was observed on as–received deformation curves. Reproducible experimental results were independently obtained in Russia and the USA.

The observed shock hardening effects in Fe reflect qualitative and quantitative microstructure evolution changes in iron after explosive loading. The data obtained from quasi–static and SHPB tests, hardness measurements of iron specimens, and microstructure evolution after shock–wave prestraining experiments provide a critical foundation for the validation of physical–based predictive models of the constitutive behavior of materials.



ОСОБЕННОСТИ ПРОТЕКАНИЯ ХИМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ В ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ АМПУЛАХ СОХРАНЕНИЯ

С.С. БАЦАНОВ, Ю.А. ГОРДОПОЛОВ

Институт структурной макрокинетики
и проблем материаловедения РАН, Россия

С.Н. БУРАВОВА, С.М. ГАВРИЛКИН

Всесоюзный научно–исследовательский институт физико–
технических и радиометрических измерений, Россия

Экспериментальное изучение фазового превращения оксида свинца, различные модификации которого имеют разную окраску, позволили обнаружить в ампулах сохранения три характерные области. Вблизи стенки имеет место полное превращение исходной ромбоэдрической модификации в тетрагональную. В центральной зоне исходный оксид свинца присутствует только в виде вкраплений. Области с новыми фазами разделены широкой прослойкой исходной фазы. Граница между фазами чёткая, волнообразная, что свидетельствует о периодически протекающих процессах.

Расчет методом характеристик с использованием малого параметра показал, что вблизи оси возникает

область высокого давления, в 7–10 раз превышающая начальное. Разгрузка этой области сопровождается появлением поперечных ударных волн. Вокруг центральной зоны формируется барьерный слой, который препятствует продвижению косых волн к центру. Вещество, вовлеченное поперечными волнами, перемещается от центра к стенкам ампулы. Однако увеличение поверхности фронта приводит к затуханию волны, и на некотором расстоянии косые волны получают возможность повернуться к центру.

Разгрузка осевой зоны высокого давления происходит существенно быстрее, чем в случае плоской симметрии. Нулевое давление достигается в падающей волне разгрузки. Низкое давление и возникающая в центре полость заставляют часть вещества, двигающегося за поперечной волной, изменить свое направление и устремиться к центру. Барьерный слой создает новую зону высокого давления. Давление в ней ниже начального на 10–15 %.

Таким образом, газодинамические особенности течения в цилиндрических ампулах сохранения объясняют образования трех характерных областей. Центральная осевая зона характеризуется наиболее сильным перепадом давления от высоких до отрицательных, сопровождаемых разрушением материала и образованием канальной продольной трещины. Специфической особенностью этой зоны является пульсация в продольном направлении. Примыкающая к зоне высокого давления область характеризуется поперечной пульсацией. Материал здесь подвержен по крайней мере двукратным динамическим нагрузкам. Периферийные слои, прилегающие к стенкам ампулы, испытывают действие только косых ударных волн.



МЕХАНИЗМ РАЗРУШЕНИЯ ПРЕГРАДЫ ПРИ КАВИТАЦИОННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

С.Н. БУРАВОВА

Институт структурной макрокинетики
и проблем материаловедения РАН, Россия

Предложенный откольный механизм базируется на анализе характера повреждаемости при динамических нагрузках в широком диапазоне амплитуд воздействия [1]. Экспериментальное изучение разрушения под действием схлопывания пузырьков [2] обнаруживает на поверхности кратеры с глубокими раковинами в центре, от которых вглубь распространяются продольные

микротрещины. Увеличение числа циклов приводит к возникновению крупных выбоин, унос материала при этом происходит вследствие разрушения кромок таких язвенных образований [3]. Ни один из известных механизмов не способен объяснить совокупность экспериментальных данных.

В данной работе кавитационная повреждаемость рассматривается как результат периодического воздействия сферических волн, идущих из зоны схлопывания кавитационных пузырьков. Давление в таких волнах оценивается в пределах 50—1000 МПа [2]. При соударении сферической волны с поверхностью в преграде возникает ударная волна. Центрированная волна разгрузки появляется, когда скорость границы контактной поверхности становится ниже скорости звука в металлической преграде. Фокусировка создает канальную область растягивающих напряжений в продольном направлении. Если упруго-пластический гистерезис материала и откольная прочность известны, то можно оценить критическое число циклов, необходимых для разрушения материала [3]. Образование канальной трещины меняет характер последующего нагружения, т. к. трещина сама становится источником волн разрежения. В результате интерференции волн разгрузок вокруг канальной трещины генерируется сначала одна, а потом система кольцевых трещин. Разрушение материала из зоны множественного продольного откола является причиной образования раковин в кратерах, возникающих под контактной поверхностью. Физическая модель откольной кавитационной повреждаемости преграды способна объяснить совокупность известных экспериментальных фактов.

Ссылки

1. Buravova S.N., Goncharov A.A., Kiselev Ju.N., *Tribology International*. — 1996. — V. 29. — № 5. — С. 359.
2. Preece C.M., *Erosion*, Ed. C.M. Preece, Ney York, Academic Press. — 1979. — P. 269.
3. Буравова С.Н., Повреждаемость поверхности при кавитационной эрозии // *ЖТФ*. — 1998. — Т. 68. — № 9. — С. 110—114.



ВЛИЯНИЕ СФЕРИЧЕСКИХ УДАРНЫХ ВОЛН НА КРИСТАЛЛИЧЕСКУЮ СТРУКТУРУ, ФАЗОВЫЙ СОСТАВ И ДЕФЕКТНОСТЬ ОКСИДОВ МЕДИ И МАРГАНЦА

Е.А. КОЗЛОВ

Российский федеральный ядерный центр —
Всероссийский НИИ технической физики
им. акад. Е.И. Забабахина, Снежинск, Россия

Б.А. ГИЖЕВСКИЙ, В.Л. АРБУЗОВ, С.В. НАУМОВ,
А.П. ДРУЖКОВ, В.И. ВОРОНИН, В.Р. ГАЛАХОВ,
Н.В. КОСТРОМИТИН, К.В. ШАЛЬНОВ

Институт физики металлов УрО РАН,
Екатеринбург Россия

В.Д. ЖУРАВЛЕВ

Институт химии твердого тела УрО РАН,
Екатеринбург, Россия

Интенсивные сферически сходящиеся [1] или расходящиеся [2] ударные волны способны создавать в порошковых материалах необходимую микро- и наноструктуру, приводить к структурным и фазовым переходам материала внутри зерен, генерировать различного рода дефекты. Научный и практический интерес представляют сферические взрывные герметичные системы сохранения, поскольку они дают возможность получать высокоплотные компакты при полном сохранении образцов, исключать внешние загрязнения синтезируемых керамик и проводить эксперименты с реализацией в слоях вдоль радиуса широкого диапазона параметров нагружения [1—3]. С целью изучения эффектов воздействия сферически сходящихся ударных волн на оксидные материалы проведена серия экспериментов по ударно-волновому нагружению CuO , Mn_3O_4 , LaMnO_3 и $\text{La}_{0.7}\text{Ca}_{0.3}\text{MnO}_3$. В экспериментах использовались сферические гермочехлы с внутренним диаметром 49 мм. Изменение вида ВВ, его толщины и направления инициирования (наружное, внутреннее, встречное) позволяло варьировать параметры нагружения в широком диапазоне. Исходные образцы представляли собой шары из оксида с плотностью 70—80 % от теоретически возможной и зерном 3—30 мкм. Обжатые образцы исследовались методами рентгеновской дифрактометрии, сканирующей туннельной и электронной микроскопии. В ряде случаев использовались нейтронографические измерения. Дефектность образцов изучалась также с помощью рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФС) и методом угловой корреляции аннигиляционного излучения позитронов (УКАИ).

В подавляющем большинстве случаев произошло уплотнение материала и образование мелкодисперсной микро- или наноструктуры. Полученные способами [1—2] материалы следует рассматривать как плотную нанокерамику [3]. Изменение состава исходного соединения в слоях на глубоком радиусе произошло при нагружении CuO и $\text{La}_{0.7}\text{Ca}_{0.3}\text{MnO}_3$ по способу [1]. В случае CuO обнаружена фаза Cu_2O в глубоких слоях обжаренного шара. $\text{La}_{0.7}\text{Ca}_{0.3}\text{MnO}_3$ представляет собой твердый раствор, который частично распался по всему объему шара с выделением CaO . В тоже время чистый манганит LaMnO_3 сохранил свой номинальный состав, но претерпел структурный переход из ромбоэдрической решетки в кубическую. Mn_3O_4 подвергался более слабым воздействиям и сохранил свой состав и тетрагональную структуру с несколько измененными параметрами. Некоторое изменение параметров моноклинной решетки отмечено и для CuO . Интенсивные волны напряжений приводят к возникновению высокой концентрации точечных дефектов. Характер дефектности исследовался на примере оксида меди CuO , нагруженном по способу [1]. Методом УКАИ показано, что дефектность нанокерамики CuO определяется высокой концентрацией кислородных вакансий, сосредоточенных на границах кристаллитов [4]. Эти результаты согласуются с данными РФС, согласно которым нанокерамика CuO содержит высокую концентрацию ионов Cu^+ [5]. Нейтронографические исследования Mn_3O_4 также свидетельствуют о высокой дефектности по кислородной подрешетке и увеличении концентрации ионов Mn^{2+} с пониженной валентностью. Такие же тенденции отмечаются и для LaMnO_3 . Характерная дефектность нанокристаллических оксидов, полученных методами ударно-волнового нагружения, определяет изменение их оптических, электронных и магнитных свойств, что открывает возможности их функционального применения.

Таким образом, воздействие сферическими ударными волнами на оксиды может служить не только для компактирования материалов, но и для целенаправленного изменения их дефектности с целью модификации их физико-химических свойств и создания новых функциональных материалов.

Работа поддержана РФФИ, гранты 01-02-96403, 02-02-16429, и Отделением общей физики и астрономии РАН, проект «Оптические и магнитотранспортные явления в манганитах с колоссальным магнитосопротивлением».

Ссылки

1. Патент РФ №2124716 / Козлов Е.А., Абакшин Е.В., Таржанов В.И.
2. Патент РФ № 2192333 / Козлов Е.А., Андрушин В.И.
3. Козлов Е.А., Гижевский Б.А., Галахов В.Р. и др. Тезисы «VI Забавихинские научные чтения», сентябрь 2001 г. — Изд-во РФЯЦ — ВНИИТФ, Снежинск. — С. 156—157.
4. Druzhkov A.P., Gizhevskii B.A., V.L.Arbuzov, E.A. Kozlov et al. / J.Phys.: Condens.Matter. — 2002, **14**, 7981—7990.
5. Б.А.Гижевский, В.Р.Галахов, Д.А.Зацепин и др. / ФТТ. — 2002, **44**. — С. 1318—1325.

EFFECT OF SPHERICAL SHOCK WAVES ON CRYSTAL STRUCTURE, PHASE COMPOSITION AND DEFECTIVENESS OF COPPER AND MANGANESE OXIDES

E.A. KOZLOV

Russian Federal Nuclear Center — Zababakhin Institute of Technical Physics, Snezhinsk, Russia

B.A. GIZHEVSKY, V.L. ARBUZOV, S.V. NAUMOV, A.P. DRUZHKOVA, V.I. VORONIN, V.P. GALAKHOV, N.V. KOSTROMITINA, K.V. SHALNOV

Institute of Metal Physics, Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, Russia

V.D. ZHURAVLEV

Institute of Solid State Chemistry, Ural Branch of RAS, Yekaterinburg, Russia

Intensive spherically converging [1] or diverging [2] shock waves can create the required micro-, and nanostructure in powder materials, cause structural and phase transitions of a material inside grains, generate various defects. Spherical hermetically-sealed recovery systems are of scientific and practical interest, since they allow to obtain the high-density compacts of large scale, to eliminate of external pollution in ceramics, as well as to realize a wide range of loading parameters in layers along the radius [1—3]. A series of recovery experiments with shock-wave loading of CuO , Mn_3O_4 , LaMnO_3 and $\text{La}_{0.7}\text{Ca}_{0.3}\text{MnO}_3$ was carried out to study how spherically-converging shock-waves effect oxide materials. Spherical hermetically sealed shells with 49-mm internal diameter was used in these experiments. Changes in the kind of HE, its thickness and initiation direction (external, internal, oncoming) allowed wide-range variation of load parameters. Initial samples were oxide spheres with 70—80 % density of theoretically possible and 3—30 μm grain. The X-ray diffracto-

metry, scanning electron and tunnel microscopies were used to study compressed and recovered samples. The neutron diffraction analysis was used in some cases. Defectiveness of samples was also studied with the help of the X-ray photoelectron spectroscopy (XRPES) and the method of angular correlation of the positron annihilation radiation (ACPAR).

In the majority of cases, a material was compacted and the fine-dispersed micro-, and nanostructures were formed. Materials obtained by methods [1, 2] are to be considered as a dense nanoceramics [3]. Composition of the initial compound in layers with a deep radius changed when CuO and $\text{La}_{0.7}\text{Ca}_{0.3}\text{MnO}_3$ were loaded by method [1]. In the case with CuO, the Cu_2O phase was detected in deep layers of the compressed and recovered sphere. $\text{La}_{0.7}\text{Ca}_{0.3}\text{MnO}_3$ is a solid solution, which partially decomposed over the entire sphere with the precipitation of CaO. At the same time, pure manganite LaMnO_3 preserved its nominal composition, but its lattice changed from a rhombohedral to a cubic one. Mn_3O_4 suffered weaker impacts and preserved its composition, as well as the tetragonal structure with slightly changed parameters. Certain changes in parameters of the monoclinic lattice are noted for CuO also. Intensive stress waves cause high concentration of point defects. Defectiveness character was studied in copper oxide, CuO, loaded by method [1]. The method of angular correlation of the positron annihilation radiation demonstrated that defectiveness of CuO nanoceramics is conditioned by high concentration of oxygen vacancies at the crystallites boundaries [4]. These results agree with the data of the X-ray photoelectron spectroscopy. These data indicate that CuO — nanoceramics has high concentration of ions Cu^+ [5]. Neutron diffraction analysis of Mn_3O_4 also shows high defectiveness over the oxygen sublattice and increased concentration of ions Mn^{2+} having smaller valency. Similar tendencies are also noted for LaMnO_3 . Characteristic defectiveness of nanocrystal oxides, synthesized by the shock-wave loading method, conditions their optical, electronic, and magnetic properties. This opens possibilities for their functional application.

So, the action of spherical shock waves on oxides can be used both for compaction of materials, and for changes in their defectiveness in order to modify their physical and chemical properties and to create new functional materials.

This work is supported by RFBR, grants 01-02-96403, 02-02-16429, and General Physics and Astronomy Division of RAS, Project «Optical and Magnetotransport Phenomena in Manganites with Huge Magnetoresistance».

References

1. RF Patent #2124716 of December 24, 1997 / E.A. Kozlov, E.V. Abakshin, V.I. Tarzhanov.
2. Patent # 2192333 of January 17, 2000 / E.A. Kozlov, V.I. Andryushin.

3. E.A. Kozlov, B.A. Gizhevsky, V.P. Galakhov, et. al. Abstracts of «VI Zababakhin Scientific Talks», September 2001. — Snezhinsk. — P. 156—157.
4. Druzhkov A.P., Gizhevskii B.A., Arbuzov V.L., Kozlov E.A., Shalnov K.V., Naumov S.V. and Perminov D.A. / J.Phys.: Condens.Matter. — 2002. — V. 14. — P. 7981—7990.
5. Gizhevsky B.A., Galakhov V.P., Z atsepin D.A., Elokina L.V., Belykh T.A., Kozlov E.A., Naumov S.V., Arbuzov V.L., Shalnov K.V. and Neumann M., Russ. / J. Physics of Solid State. — 2002. — V. 44. — P. 1318—1325.



ВЫСОКОСКОРОСТНАЯ ДЕФОРМАЦИЯ МОНОКРИСТАЛЛА МЕДИ ПРИ НАГРУЖЕНИИ СФЕРИЧЕСКИ СХОДЯЩИМИСЯ УДАРНЫМИ ВОЛНАМИ

А.В. ДОБРОМЫСЛОВ, Н.И. ТАЛУЦ, К.А. ЩЕТКОВ

Институт физики металлов УрО РАН,
Екатеринбург, Россия

Е.А. КОЗЛОВ

Российский федеральный ядерный центр —
Всероссийский НИИ технической физики
им. акад. Е.И. Забабахина, Снежинск, Россия

Ю.И. ЧУМЛЯКОВ

Сибирский физико-технический институт, Томск, Россия

В дополнение к [1] проведено изучение высокоскоростной пластической деформации монокристалла меди диаметром 34 мм, подвергнутого воздействию сферически сходящимися ударными волнами. Исследование проводили методами рентгеноструктурного анализа, оптической металлографии, просвечивающей электронной микроскопии и измерением микротвердости вдоль радиуса в разных кристаллографических направлениях.

Образец после нагружения имеет форму толсто-стенной сферической оболочки с несколько увеличенным по сравнению с исходным наружным диаметром (35,9 мм). Монокристалльное строение сохраняется только в приповерхностных слоях, а вблизи полости образец приобретает поликристаллическое строение. Пластическая деформация при используемом способе нагружения осуществляется путем кристаллографического и некристаллографического скольжения, причем некристаллографическое скольжение является

преимущественным способом деформации. Кристаллографическое скольжение наблюдается вблизи направлений $\langle 100 \rangle$ и происходит по плоскостям $\{111\}$. Вблизи направлений $\langle 110 \rangle$ присутствуют следы только некристаллографического скольжения. В средних и глубоких слоях шара следы некристаллографического скольжения наблюдаются независимо от кристаллографического направления исходного монокристалла. Характерной особенностью структуры является отсутствие деформационных двойников.

Наблюдаемый характер деформации необычен для ГЦК металлов и, вероятнее всего, связан со спецификой использованного метода нагружения, при котором деформация материала происходит в стесненных условиях.

Работа выполнена по проекту, осуществляемому в рамках комплексной программы Президиума РАН на 2003 г. «Теплофизика и механика интенсивных энергетических воздействий».

Ссылки

1. Добромислов А.В., Козлов Е.А., Горшков М.М., Талуц Н.И., Долгих Г.В. Особенности пластической деформации монокристалла ниобия в условиях нагружения сферически сходящимися ударными волнами // VI Забабакхинские научные чтения, тез. докл. междунар. Конф. — Снежинск, Россия, 2001. — С.166—167.

HIGH-RATE DEFORMATION OF CU SINGLE CRYSTAL UNDER LOADING BY SPHERICAL CONVERGING SHOCK WAVES

A.V. DOBROMYSLOV, N.I. TALUTS, K.A. SCHETKOV

Institute of Metal Physics, Ural Division
of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia

E.A. KOZLOV

Russian Federal Nuclear Center — Zababakhin Institute
of Technical Physics, Snezhinsk, Russia

YU.I. CHUMLYAKOV

Siberian Physical-Technical Institute, Tomsk, Russia

In addition to [1], we studied high-rate plastic deformation of Cu single crystal of 34 mm in diameter loaded by spherical converging shock waves. X-ray diffraction, optical metallography, transmission electron microscopy, and hardness measurements along radii in

different crystallographic directions were used in this investigation.

The specimen, which was saved unbroken after the shock loading, has the shape of a thick-wall spherical shell with an outer diameter somewhat increased compared to that of the initial unloaded ball (35,9 mm). It was established that single crystal structure is retained only in the layers near the surface of the specimen, and the specimen has polycrystal structure near the inner cavity. High-rate plastic deformation occurs by crystallographic and non-crystallographic slip, non-crystallographic slip being the primary mode of deformation. Crystallographic slip is observed near $\langle 100 \rangle$ directions and the $\{111\}$ planes are the active slip planes. Near $\langle 110 \rangle$ directions there are traces of non-crystallographic slip only. In middle and deep layers, the traces of non-crystallographic slip are observed independently of crystallographic direction. Absence of deformation twins is characteristic feature of the structure.

Observed character of deformation is unusual for FCC metals, and it is connected probable with specific of used mode of shock loading at which deformation of material occurs in straitened conditions.

Work has been done on the project fulfilled in the framework of the complex Program of Presidium RAS (2003) «Heating physics and mechanics of intensive energy influences».

References

1. Dobromyslov A.V., Kozlov E.A., Gorshkov M.M., Taluts N.I., Dolgikh G.V. Features of plastic deformation of a niobium single crystal under conditions of loading by spherically convergent shock waves // Abst. Int. Conf. VI Zababakhin Scientific Talks. — Snezhinsk, Russia, 2001. — P. 166—167.



ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ ФАЗОВОЙ ГРАНИЦЫ В КУЛОНОВСКИХ СИСТЕМАХ

И.Л. ИОСИЛЕВСКИЙ, А. ЧИГВИНЦЕВ

Московский физико-технический институт
(Гос. Университет), Долгопрудный, Россия

Отличительной чертой любой неоднородности, включая межфазные границы, в термодинамически равновесной кулоновской системе является существование стационарной разности («скачка») электростатического потенциала на этой неоднородности. Этот

скачок потенциала является чисто термодинамической величиной, определяемой равновесными свойствами в глубине сосуществующих фаз. Он зависит от термодинамических параметров и не зависит от свойств межфазной поверхности. Величина потенциала фазовой границы в пределе $T = 0$ (вдоль фазовой границы) является индивидуальной термо-электрофизической характеристикой вещества, дополняющей известный набор термохимических констант вещества, таких как энергия сублимации, потенциал ионизации и др. Межфазная разность потенциала стремится к нулю в критической точке перехода газ-жидкость. Характер этого стремления описывается отдельным критическим индексом. Обсуждаемый скачок потенциала, $\Delta\varphi(T)$ отличен от работы выхода заряженной частицы (иона, электрона и др.) из конденсированной фазы. Он характеризует степень несимметричности в свойствах заряженных компонент в каждой из сосуществующих фаз. Величина потенциала $\Delta\varphi(T)$ тождественно равна нулю в зарядово-симметричных системах, таких как электрон-позитронная плазма, т. н. «примитивная» модель электролита и др.

Особенности поведения межфазного скачка потенциала обсуждаются и иллюстрируются на примере фазовых переходов в идеализированных моделях плазмы: кристаллизации и перехода газ-жидкость в однокомпонентной модели плазмы (ОКП) на жестком и/или однородно сжимаемом компенсирующем фоне [1, 2], модели бинарной ионной смеси (БИМ) и др. Существование и свойства межфазного скачка потенциала в кулоновских моделях могут быть непосредственно изучены в прямом численном моделировании фазового равновесия в таких системах в рамках методов Монте-Карло и молекулярной динамики.

Поведение межфазного скачка потенциала обсуждается для ряда реальных кулоновских систем, таких, как граница газ-жидкость в металлах, граница неконгруэнтного испарения в ионно-молекулярной высокотемпературной химически активной системе уран-кислород [3] и др.

Ссылки

1. Iosilevski I. and Chigvintsev A. // *Physics of nonideal plasmas* /ed. by W. Ebeling, A. Foerster/ Teubner Texte, Stuttgart-Leipzig. — 1992. — P.87.
2. Iosilevski I. and A. Chigvintsev, *Journal de Physique*. — 2000. — IV **10** (Pr. 5). P. 451.
3. Iosilevski I., Gryaznov V. et al. *Journal de Physique* IV **10** (Pr. 5) 363 (2000); and I. Iosilevski, G. Hyland et al. *Int. Journ. Thermophys.* — 2001. — **22**. — 1253.

ELECTROSTATIC POTENTIAL OF PHASE BOUNDARY IN COULOMB SYSTEMS

I. IOSILEVSKIY, A. CHIGVINTSEV

Moscow Institute of Physics and Technology
(State University), Dolgoprudny, Russia

Remarkable feature of any non-uniformity in equilibrium system of Coulomb particles is the existence of finite difference at the average electrostatic potential through this non-uniformity. In particular it is true for any inter-phase boundary in such system. This inter-phase potential drop $\Delta\varphi(T)$ is a thermodynamic quantity. It depends on temperature only and does not depend on properties of inter-phase surface. The zero-temperature limit of this potential drop (along the two-phase coexistence curve) is individual thermo-electrophysical constant for every substance. The potential drop tends to zero at critical point of gas-liquid phase transition. Special critical exponent can be introduced for description of this near-critical behavior. The quantity of $\Delta\varphi$ differs fundamentally from work function. The value of inter-phase potential is a manifestation of non-symmetry in equilibrium properties of different charged species in coexisting phases. It is identically equal to zero in totally symmetrical systems like electron-positron plasma, primitive ionic model of electrolyte solution etc. Properties of the inter-phase potential drop are, first of all, discussed and illustrated on example of simplified Coulomb models: Wigner crystallization and evaporation in one-component plasma (OCP) with rigid and/or uniformly compressible compensating backgrounds [1, 2]; Model of binary ionic mixture (BIM) etc. All predicted properties of discussed potential of phase boundary in Coulomb models could be checked by direct numerical simulation of two-phase coexistence within Monte-Carlo or Molecular Dynamics techniques.

Electrostatic features of inter-phase boundary are discussed for phase transitions in some real Coulomb systems: gas-liquid interface in metals, non-congruent phase coexistence in high-temperature uranium-oxygen system [3] etc.

References

1. Iosilevski I. and Chigvintsev A. // *Physics of nonideal plasmas* /ed. by W. Ebeling, A. Foerster/ Teubner Texte, Stuttgart-Leipzig. — 1992. — P.87.
2. Iosilevski I. and A. Chigvintsev, *Journal de Physique*. — 2000. — IV **10** (Pr. 5). P. 451.
3. Iosilevski I., Gryaznov V. et al. *Journal de Physique* IV **10** (Pr. 5) 363 (2000); and I. Iosilevski, G. Hyland et al. *Int. Journ. Thermophys.* — 2001. — **22**. — 1253.

К РАСЧЕТУ БОЛЬШИХ ДЕФОРМАЦИЙ ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ

С.Н. КОСОРУКОВ, Г.В. КОВАЛЕНКО

Российский федеральный ядерный центр —
Всероссийский НИИ технической физики
им. акад. Е.И. Забабахина, Снежинск, Россия

Имеется целый ряд материалов, для которых при одноосном сжатии зависимость плотности ρ_1 от давления p_1 близка к гиперболической и может быть выражена как

$$\rho_1 = A - \frac{B}{\rho_1 - \rho_{1k}},$$

или

$$p_1 = C_{10} \frac{\rho_1 - \rho_{10}^0}{\rho_{1k} - \rho_1} = C_{20} \frac{v_{10}^0 - v_1}{v_1 - v_{1k}},$$

Здесь ρ_{10}^0 — максимальная плотность, при которой сопротивление сжатию равно нулю; ρ_{1k} — плотность сплошного материала; C_{10} , C_{20} — константы материала; v_1 , v_{10} , v_{1k} — соответствующие удельные объемы.

Такая характеристика свойственна в основном материалам, имеющим поры: песок, щебень, стружка, порошки и т. п. Зачастую начальная плотность ρ_{10}^0 на порядок — полтора меньше плотности сплошного материала. Экспериментальное определение зависимости $p(\rho)$ в статике для сливной полиэтиленовой стружки при начальной плотности $\rho_{10} = 65 \text{ кг/м}^3$ показало практически полное совпадение с вышеприведенной формулой в интервале давлений от нуля до 15 МПа. Аналогичный результат был получен для гранитного щебня при всестороннем сжатии до 100 МПа.

Значительный интерес представляет поведение смеси такой среды (основной компоненты) с воздухом в быстрых процессах объемного сжатия, когда сопротивление воздуха составляет заметную, иногда большую часть общего сопротивления. В реальных ситуациях участвует чаще всего именно такая смесь. Рассматривается случай одноосной деформации смеси. При этом среда считается односкоростной, сжатие воздуха изотермическим за счет большой теплоемкости основной компоненты, среднее напряжение p вдоль оси сжатия равно сумме давления в воздухе и напряжения в основной компоненте. Напряжение p

может быть выражено через характеристики основной компоненты и начальное давление воздуха p_{20} :

$$p = p_1 + p_2 - p_{20} = (C_2 + p_{20}) \frac{v_{10} - v_1}{v_1 - v_{1k}}.$$

При этом в основной компоненте может возникать поперечное напряжение, величина которого пропорциональна продольному напряжению в ней.

Получены выражения для скорости звука в смеси. Решена задача о движении массивного поршня с заданной начальной скоростью в трубе, наполненной смесью. Для поршня бесконечной массы получено аналитическое решение. Отмечено, что при наличии трения основной компоненты о стенки трубы может возникать на поршне давление, существенно большее давления на ударной волне. Для поршня конечной массы задача решалась с помощью комплекса программ «Волна». Расчет с учетом трения среды о стенки трубы также показал заметное увеличение давления на поршне по сравнению с расчетом без трения. Сравнение результатов счета с экспериментальными показало их удовлетворительное соответствие.



ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ КОНВЕРСИИ ГРАФИТА В АЛМАЗ НА КРУПНОМАСШТАБНОЙ БАЛЛИСТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКЕ ЦНИИМАШ

П.В. КРЮКОВ, А.И. ЧИРКОВ

Центральный научно-исследовательский институт
машиностроения, Королев, Россия

В вакуумированном баллистическом канале установки длиной 200 м под действием расширяющихся продуктов взрыва газовой смеси производится метание стальных гиростабилизированных дисков диаметром 0,5 м,двигающихся в канале на магнитном подвесе без касания со стенками. В январе и апреле 1997 г. было осуществлено соответственно два эксперимента по демонстрации возможности реализации кристаллической конверсии графита в алмаз в условиях динамического нагружения со сдвигом. В этих экспериментах были получены выходные скорости метания 1,4 км/с и 1,6 км/с для дисков весом 30 кг. Высокоскоростной удар диском по мишени с образцами графита демпфировался газообразным водородом, заполняющим разгонный участок трубы, что обеспечивало профилированную во времени нагрузку

кристаллов графита до 26 ГПа в течение 12 мкс без ударно-волнового разогрева и механического разрушения при разгрузке. Скорость сдвигового деформирования достигала 350 м/с. При ориентированном сдвиговом деформировании сжатого монокристалла графита строго вдоль атомных плоскостей возможна реализация когерентной перестройки кристаллической решетки графита. При этом быстрое относительное скольжение атомных слоев стимулирует практически одновременный переход атомов углерода в новое электронное состояние с образованием прочных межслойных ковалентных связей, что обеспечивает перестройку кристаллической структуры графита.

Материаловедческие исследования графитовых образцов до и после нагружения показали, что из-за высокой угловой разориентации ($\sim 1^\circ$) монокристаллических доменов в исходных графитовых образцах прямой переход в алмаз в макроскопическом объеме совершался некогерентным образом в диффузионном режиме, а не в волновом, как предполагалось априори, что обусловило ограниченную (не более 0,3 мм) глубину проникновения алмазной фазы в образцы с поперечным размером 20×20 мм. Когерентная перестройка кристаллической решетки графита в алмаз наблюдалась только в пределах отдельных монокристаллических доменов размером ~ 10 мкм. На основании проведенных исследований сделан вывод, что для осуществления когерентной перестройки кристаллической решетки графита в алмаз в волновом режиме во всем объеме графитового образца толщиной до 5 мм с сохранением исходного кристаллического качества динамическому нагружению со сдвигом необходимо подвергать кристаллы графита, имеющие практически идеальную структуру.

were obtained for 30-kg plates. The high-velocity impact by the plate on a target inclusive of graphite samples was damped with gaseous hydrogen filling the gun's acceleration section to assure time-distributed loading of graphite crystals up to 26 GPa within 12 μ m with no shock-wave heating and mechanical breakdown during relief. The shear deformation velocity ran up to 350 m/s. For a compressed graphite single crystal subject to directed shear deformation definitely along atomic planes, a coherent rearrangement of the graphite's lattice is feasible. In this case, the atomic layers quick relative slip induces virtually concurrent transition of the carbon atoms to a new electronic state to produce strong interlayer covalent bonds thus providing graphite crystal structure rearrangement.

Before- and after-loading material study of the graphite samples showed that due to high angular off-orientation ($\sim 1^\circ$) of single-crystal domains in the initial graphite samples, direct transition to diamond in macro volumes took place non-coherently in a diffusive mode, rather than in a wave mode, as was expected a priori, which conditioned limited (less than 0.3 mm) penetration of diamond phase to the samples 20×20 mm cross size. The graphite lattice coherent rearrangement was observed only within separate single-crystal domains ~ 10 μ m size. Based on the analysis performed, conclusion has been made that to realize wave-mode graphite-to-diamond coherent rearrangement in the whole volume of a graphite sample 5 mm thick with all the initial crystal quality conserved, graphite crystals of practically perfect structure should be taken to be subject to shear dynamic loading.



EXPERIMENTS ON GRAPHITE-TO-DIAMOND CRYSTAL CONVERSION IN THE TSNIIMASH LARGE-SCALE BALLISTIC FACILITY

P.V. KRYUKOV, A.I. CHIRKOV

The Central Research Institute of Machine Building,
Korolev, Russia

In the evacuated ballistic channel of the facility 200 m long, gyro-stabilized steel plates 0.5 m diameter are cast under the action of expanding gas mixture explosion products. In the process, the plates move along the channel on a magnetic suspension without contact with the wall. Two experiments (January 1997, April 1997) were performed to demonstrate feasibility of graphite-to-diamond crystal conversion under shear dynamic loading. In those experiments, output velocities of 1.4 and 1.6 km/s

ПЕРВОПРИНЦИПНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОННОЙ И МАГНИТНОЙ СТРУКТУРЫ АЛЬФА-PU, ДЕЛЬТА-PU, АМЕРИЦИЯ И КЮРИЯ

А.Л. КУТЕПОВ, С.Г. КУТЕПОВА

Российский федеральный ядерный центр —
Всероссийский НИИ технической физики
им. акад. Е.И. Забабахина, Снежинск, Россия

В докладе будут представлены результаты перво-принципного изучения электронной структуры и магнитных свойств для альфа-Pu, дельта-Pu, Am и Cm. Расчеты были выполнены с использованием полностью релятивистского, полнопотенциального, спин-поляризованного линейного метода присоединенных плоских волн (RSPFLAPW). Все изученные металлы

имеют некоторую магнитную структуру. Вычисленные спиновые и орбитальные магнитные моменты на атомах в вышеупомянутых актинидах имеют противоположное направление. Они в значительной степени сокращаются в случае альфа-Pu. Это сокращение уменьшается в дельта-Pu и оно почти полностью отсутствует в Am и Cm. Полный магнитный момент увеличивается в данной последовательности. Сокращение спинового и орбитального магнитных моментов в альфа-Pu может служить объяснением температурно-независимой магнитной восприимчивости, как это наблюдалось в эксперименте [1]. В докладе будет представлен также эффект учета наличия магнитной структуры на вычисленные свойства основного состояния для данных актиноидов.

Ссылки

1. S. Meot-Reymond, J.M. Fournier *Journal of Alloys and Compounds*. — 1996, (232). — P. 119—125.

FIRST-PRINCIPLES STUDY OF ELECTRONIC AND MAGNETIC STRUCTURE OF ALPHA-Pu, DELTA-Pu, AMERICIUM, AND CURIUM

A.L. KUTEROV, S.G. KUTEROVA

Russian Federal Nuclear Center — Zababakhin Institute of Technical Physics, Snezhinsk, Russia

The ab-initio investigation of electronic structure and magnetic properties for alpha-Pu, delta-Pu, Am, and Cm will be presented. The calculations have been performed by the new full-relativistic full-potential spin-polarized linearized-augmented-plane-wave method (RSPFLAPW). All studied metals have some magnetic structure. The calculated spin and orbital magnetic moments in the above mentioned actinides have opposite directions. Spin and orbital magnetic moments are almost cancelled in alpha-Pu. This cancellation decreases in delta-Pu and it is almost absent in Am and Cm. Total magnetic moment grows up in this sequence. The cancellation of spin and orbital magnetic moments in alpha-Pu may be serve as an explanation for temperature independent magnetic susceptibility as was observed in experiment [1]. The effect of taking the magnetic structure into consideration on calculated ground state properties of the above actinides will be presented.

References

1. S. Meot-Reymond, J.M. Fournier *Journal of Alloys and Compounds*. — 1996, (232). — P. 119—125.

УДАРНАЯ АДИАБАТА ФУЛЛЕРЕНА C⁶⁰

В.В. МИЛЯВСКИЙ, А.В. УТКИН,
А.З. ЖУК, В.Е. ФОРТОВ

Институт теплофизики экстремальных состояний РАН, Москва, Россия

Е.Б. ЗАРЕЦКИЙ

Университет «Бен-Гурион», Израиль

Впервые выполнено экспериментальное определение ударной сжимаемости фуллера C⁶⁰ и скорости звука в ударно-сжатом фуллере C⁶⁰ в диапазоне давлений 0,3—48 ГПа.

В наших экспериментах мы использовали образцы с плотностью 1.64 г/см³, спрессованные из поликристаллического фуллера C⁶⁰. Образцы нагружались ударом металлических пластин, ускоренных при помощи пневматической ствольной метательной установки (скорость метания до 0,53 км/с) или взрывных метательных устройств (скорость метания до 5,2 км/с). Регистрация профилей скорости задней поверхности образца выполнялась через оконный материал (ПММА или воду) при помощи лазерного интерферометра VISAR. Дополнительно для измерений использовались контактные или пьезоэлектрические датчики.

Установлено, что ударная адиабата фуллера C⁶⁰ имеет ряд особенностей, связанных с серией полиморфных фазовых превращений. Давление ~15 ГПа является пределом стабильности структуры C⁶⁰ при адиабатическом ударно-волновом сжатии и соответствует началу фазового превращения фуллера в более плотную аллотропную модификацию углерода. При давлении за фронтом ударной волны выше 33 ГПа ход ударной адиабаты фуллера C⁶⁰ определяется свойствами алмазоподобной фазы высокого давления.

Работа выполнена при поддержке Президиума РАН и РФФИ (02-02-16582).

HUGONIOT OF C⁶⁰ FULLERITEV.V. MILYAVSKIY, A.V. UTKIN,
A.Z. ZHUK, V.E. FORTOV

Institute for High Energy Densities RAS, Russia

E.B. ZARETSKY

Ben-Gurion University of the Negev, Israel

Hugoniot of C⁶⁰ fullerite and sound velocity in shock-compressed fullerite were experimentally studied at the pressures range from 0.3 to 48 GPa.

In our experiments we used polycrystalline C⁶⁰ samples with a density 1.64 g/cm. The samples were loaded by impact of metal plates accelerated by gas gun (projectile velocities up to 0.53 km/s) or by preliminary calibrated explosive projectile systems (projectile velocities up to 5.3 km/s). The continuous monitoring of rear surface velocity of the samples was performed using laser interferometer VISAR through PMMA (low-pressure region) or water (high-pressure region) windows. To determine velocities of impactors and (or) shock velocities, contact gages or piezoelectric gages were used.

The Hugoniot of fullerite has a set of peculiarities, which are connected with a series of polymorphic phase transitions. For C⁶⁰ fullerite a transformation to a dense carbon phase is observed with a transition onset pressure 15 GPa, the stability limit of the fullerite structure under single-step shock compression. The two-wave structure of the transition is overdriven to a single wave above 33 GPa.

The work was supported by Russian Academy of Sciences and RFBR (02-02-16582).

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ЛОКАЛИЗАЦИИ ПЛАСТИЧЕСКОГО ТЕЧЕНИЯ
ПРИ ПРОСТОМ СДВИГЕ**

В.М. Елькин, В.Н. Михайлов, Т.Ю. Михайлова

Российский федеральный ядерный центр —
Всероссийский НИИ технической физики
им. акад. Е.И. Забахина, Снежинск, Россия

Разработан алгоритм численного моделирования локализации пластического течения при нагружении по схеме простого сдвига термо-вязко-пластического материала. Программа реализует решение связанной системы уравнений в частных производных, описывающих течение сплошной среды. В качестве уравне-

ния, замыкающего уравнения сплошной среды было использовано определяющее соотношение, известное в литературе как «степенной закон», которое связывает скорость пластической деформации с напряжением течения, температурой и накопленной пластической деформацией. Определяющее соотношение в достаточно простом виде учитывает зависимость напряжения течения от скорости деформации, а также деформационное упрочнение и термическое разупрочнение материала. При численном решении системы уравнений, описывающих течение сплошной среды при простом сдвиге, частные производные по пространственной координате вычислялись с помощью интерполяционных кубических сплай-функций. Для интегрирования функций по времени использовалась явная расчетная схема.

В результате численного моделирования экспериментов по динамическому ($\dot{\epsilon} \sim 10^3 \text{ c}^{-1}$) кручению тонкостенных трубчатых стальных образцов [1, 2] на установке Кольского, получена полная картина развития локализации пластического течения. Расчетные зависимости эволюции во времени ширины полосы сдвига и локализованных в ней температуры и пластической деформации хорошо согласуются с экспериментальными. Хорошее совпадение с экспериментом получено также и для распределения температуры по образцу на развитой стадии процесса локализации.

Ссылки

1. A. Marchand, J. Duffy. An experimental study of the formation process of adiabatic shear bands in a structural steel // *J. Mech. Phys. Solids*. — 1987. — V. 36. — № 3. — P. 251—283.
2. K.A. Hartley, J. Duffy, R.H. Hewley. Measurement of the temperature profile during shear band formation in steel deforming at high strain rates // *J. Mech. Phys. Solids*. — 1987. — V. 35. — № 3. — P. 283—301.

**NUMERICAL SIMULATION OF PLASTIC FLOW
LOCALIZATION UNDER SIMPLE SHEAR**

V.M. YELKIN, V.N. MIKHAILOV, T.YU. MIKHAILOVA

Russian Federal Nuclear Center — Zababakhin Institute
of Technical Physics, Snezhinsk, Russia

The numerical simulation algorithm for plastic flow localization in the case of thermal-viscoplastic material loading by simple shear is developed. The program solves the connected system of equations in partial derivatives describing the continuous medium flow. The constitutive relation, known in publications as the «power law»,

which connects plastic–strain rate with the flow stress, temperature and accumulated plastic strain was used as an equation closing the equation of continuous medium. In a simple way, the constitutive relation takes into account the material strain rate sensitivity relationship, as well as strain hardening, and thermal softening of material. If the system of equations describing continuous medium flow under simple shear was solved numerically, partial derivatives with respect to the spatial coordinate were calculated with the help of interpolation cubic spline-functions. The explicit computation scheme was used to integrate functions with respect to time.

Numerical simulation of experiments on dynamic ($\dot{\varepsilon} \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$) torsional loading of thin-walled tubular steel samples [1, 2] at Kolsky bar gave a full picture of plastic–flow localization development. Estimated dependencies of shear bandwidth evolution in time, as well as temperature and plastic strain localized in this bandwidth, well agree with experimental ones. Good agreement with the experiment was also observed for temperature distribution through the sample at the developed stage of the localization process.

References

1. A. Marchand, J. Duffy. An experimental study of the formation process of adiabatic shear bands in a structural steel // *J. Mech. Phys. Solids*. — 1987. — V. 36. — № 3. — P. 251–283.
2. K.A. Hartley, J. Duffy, R.H. Hewley. Measurement of the temperature profile during shear band formation in steel deforming at high strain rates // *J. Mech. Phys. Solids*. — 1987. — V. 35. — № 3. — P. 283–301.



МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗРУШЕНИЯ СПОДУМОНОВОЙ СТЕКЛОКЕРАМИКИ ПРИ УДАРНО–ВОЛНОВОМ НАГРУЖЕНИИ

Т.А. ПАНЬКОВА, С.А. ЗЕЛЕПУГИН

Отдел структурной макрокинетики
Томского научного центра СО РАН, г. Томск, Россия

В.Ф. ТОЛКАЧЕВ

Томский государственный университет,
Томск, Россия

А. ДОРФМАН, А. РАЙХЕЛЬ

Achidatex Ltd, GlassCeraх Ltd, Израиль

При конструировании бронезилетов широко используются высокопрочные керамические материалы на основе Al_2O_3 , B_4C , AlN , TiB_2 и так далее. Однако одни из них обладают довольно большим удельным весом, другие требуют дорогостоящей технологии для изготовления. Материалы на основе стеклообразующих окислов, в связи со сложившимися стереотипами в данной области материаловедения, в производстве бронезащитных элементов до настоящего времени серьезно не рассматривались.

На основе проведенных исследований в системе $\text{LiO}_2\text{–Al}_2\text{O}_3\text{–SiO}_2\text{–TiO}_2$ разработана стеклокерамика, по своим характеристикам удовлетворяющая возможности использования ее при проектировании элементов бронезилетов [1]. Стеклокерамика устойчива к воздействию факторов внешней среды (перепады температур, влажность, солнечная радиация, микроорганизмы и т. д.) и к ударным воздействиям, не требует особых условий хранения и транспортировки, поддается высокоточной механической обработке с использованием алмазного инструмента. Для получения высокопрочных свойств стеклокерамики разработаны уникальные методы упрочнения химико–термической обработкой. Измеренные некоторые характеристики стеклокерамики следующие: плотность 2,5–2,6 г/см³, пористость и водопоглощение 0%, модуль упругости 100 ГПа, удельная ударная вязкость до упрочнения 4,5–5,0 кДж/м², после упрочнения 35,0–40,0 кДж/м².

Разработана комбинированная панель для индивидуальных средств защиты, состоящая из стеклокерамики и кевларовой подложки. Для тестирования была собрана плата размером 250×300 мм из стеклокерамических элементов размерами 50×50 мм, толщиной 9,4 мм. Общий вес платы 2,58 кг, приведенный вес 34,4 кг/м², толщина 21 мм. Расстояние при тестировании составило 20 м. При нагружении пулей SS109 со скоростью порядка 920 м/с пробития нет, травма примерно 5 мм. При нагружении пулей 7.62×51 НАТО со скоростью порядка 840 м/с пробития нет, величина травмы примерно 10–15 мм.

На основе проведенных экспериментальных исследований подобраны константы численной модели, описывающей поведение сподуменовой стеклокерамики при скоростях удара 700–1000 м/с. Модель включает кинетическую модель разрушения активного типа, использует степенную зависимость прочностных характеристик стеклокерамики от достигнутого уровня поврежденности, описывающую падение прочностных свойств (динамического предела текучести, модуля сдвига) при заданных значениях удельного объема трещин.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 03–01–00122).

Ссылки

1. Зелепугин С.А., Дорфман А., Райхель А. Комбинированный элемент бронезилета на основе кордиритовой и сподуменовой стеклокерамики // Межд. конф. V Харитоновские тематические научные чтения «Вещества, материалы и конструкции при интенсивных динамических воздействиях». — Саров: Изд-во РФЯЦ—ВНИИЭФ, 2003. — С. 260—261.



ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ В МЕТАЛЛАХ В ЯВЛЕНИИ ДИНАМИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ

В.Т. ПУНИН, А.Я. УЧАЕВ, Н.И. ЗАВАДА,
Е.В. КОШЕЛЕВА, С.А. НОВИКОВ, Л.А. ПЛАТОНОВА,
Н.И. СЕЛЬЧЕНКОВА, Н.А. ЮКИНА

Российский федеральный ядерный центр —
Всероссийский НИИ экспериментальной физики,
Саров, Россия

Работа посвящена определению количественных характеристик диссипативных структур (каскада центров разрушения) в металлах, подвергнутых воздействию проникающих излучений (диапазон долговечности $t \sim 10^{-6} \div 10^{-10}$ с, диапазон начальных температур $T_0 \sim 4\text{К} \div T_{\text{пл}}$, темп ввода энергии $dT/dt \sim 10^6 \div 10^{12}$ К/с) [1—3].

Рассмотрены временные закономерности накопления повреждаемости в металлах и переход процесса разрушения с одного масштабного уровня на другой (процесс накопления и укрупнения центров разрушения).

Методами количественной фрактографии показано, что число центров разрушения предыдущего размера $N(D_i)$ влияет на число центров последующего размера $N(D_{i+1})$, где N — число центров разрушения, D_i — размер i -го центра разрушения. Переход процесса разрушения с одного масштабного уровня на другой указывает на определенную зависимость процесса разрушения от предыстории. Процесс дина-

мического разрушения является процессом преобразования структур, опирающимся на предысторию, который может служить примером немарковского процесса [1, 2, 5].

В результате проведенных исследований получено рекуррентное выражение, позволяющее оценить повреждаемость нагруженного твердого тела на любой стадии процесса динамического разрушения. Это позволяет прогнозировать накопление повреждаемости, обрабатывая меньшее число контрольных образцов с целью проведения и согласования тестовых расчетов.

Предложенный многоуровневый подход исследования облученных металлов позволяет установить количественные характеристики диссипативных структур (каскада центров разрушения) и процесс укрупнения центров разрушения. Знание количественных характеристик перехода процесса динамического разрушения с одного масштабного уровня на другой, которые являются универсальными для широкого класса материалов, позволяет прогнозировать поведение твердого тела при одно- и многократном воздействии, что является актуальным для прогнозирования поведения новых элементов, узлов, конструкций, изделий Минатома.

Ссылки

1. Бонюшкин Е.К., Завада Н.И., Новиков С.А., Учаев А.Я. Кинетика динамического разрушения металлов в режиме импульсного объемного разогрева. — Саров, РФЯЦ—ВНИИЭФ, 1998. — 275 с.
2. Ильяев Р.И., Учаев А.Я., Новиков С.А., Завада Н.И., Платонова Л.А., Сельченкова Н.И. Универсальные свойства металлов в явлении динамического разрушения // ДАН. — 2002. — Т. 384. — № 3. — С. 328—333.
3. Павловский А.И., Бонюшкин Е.К., Учаев А.Я. и др. Особенности температурно-временных закономерностей процесса динамического разрушения некоторых металлов в режиме быстрого объемного разогрева // Докл. АН. — 1991. — Т. 317. — № 6. — С. 1376—1379.
4. Попов В.Л., Панин В.Е. Фрактальный характер и масштабная инвариантность дисклинационной структуры деформированного твердого тела // ДАН. — 1997. — Т. 352. — №1. — С. 51—53.
5. Харитонов А.С., Шелепин Л.А. Равновесные распределения в теории немарковских процессов. Краткие сообщения по физике ФИАН. — 1996. — № 7—8. — С. 21—26.

**FORECASTING OF IMPERFECTION
ACCUMULATION IN METALLS
N THE DYNAMIC FAILURE PHENOMENON**

V.T. PUNIN, A.YA. UCHAEV, N.I. ZAVADA,
YE.V. KOSHELEVA, S.A. NOVIKOV, L.A. PLATONOVA,
N.I. SEL'CHENKOVA, N.A. YUKINA

Российский федеральный ядерный центр —
Всероссийский НИИ экспериментальной физики,
Саров, Россия

The work is devoted to determination of quantitative characteristics of dissipative structures (failure center cascades) in metals subjected to penetrating radiation action (longevity range $t \sim 10^{-6} \div 10^{-10}$ sec, range of initial temperatures $T_0 \sim 4\text{K} \div T_{melt}$, energy input rate $dT/dt \sim 10^6 \div 10^{12}$ K/sec) [1—3].

Time regulations of imperfection accumulation in metals and the failure process transition from one scale level to another one (process of accumulation and amalgamation of failure centers) were studied. Methods of quantitative fractography show that the number of failure centers of the previous size $N(D_i)$ affects the number of centers of the next size $N(D_{i+1})$, where N — is a number of failure centers, D_i —size of the i -th failure center. The failure process transition from one scale level to another one points out to the definite dependency of the failure process on pre-history. The dynamic failure is a process of structures conversion basing upon prehistory and may serve as an example of non-Markov process [1, 2, 5].

As a result of conducted studies, there was obtained a recurrent expression allowing evaluation of imperfection of a loaded solid body at any dynamic failure stage. This allows forecasting of imperfection accumulation by processing a less number of control samples in order to conduct and agree test calculations.

The proposed multi-layer approach to a study of irradiated metals allows determination of qualitative characteristics of dissipative structures (failure centers cascade) and the process of failure centers amalgamation. Knowledge of qualitative characteristics of dynamic failure process transition from one scale level to another one, which are universal for a wide category of materials, permits to forecast behavior of solid body under single and multiple action. This is acute to predict behavior of new elements, units, structures, items of Minatom.

References

1. Zavada N.I., Novikov S.A., Uchaev A.Ya. Kinetics of dynamic metals failure in the mode of pulse volume

heating up / E.K. Bon'ushkin. — Sarov, RFNC—VNIIEF, 1998. — P. 275.

2. Il'kaev R.I., Uchaev A.Ya., Novikov S.A., Zavada N.I., Platonova L.I., Sel'chenkova N.I. Universal metal properties in dynamic failure phenomenon // Reports of the Academy of Science. — 2002. — V. 384. — № 3. — P. 328—333.
3. A.I. Pavlovski, E.K. Bon'ushkin, A.Ya. Uchaev et al. Specific features of time-temperature regularities of some metals dynamic failure in the mode of fast volume heating up// Reports of Academy of Science. — 1991. — V. 317. — № 6. — P. 1376—1379.
4. V.L. Popov, V.E. Panin Fractal character and scale invariance of disclination structure of deformed solid body // Reports of Academy of Science. — 1997. — V. 352. — № 1. — P. 51—53.
5. A.S. Kharitonov, L.A. Shelepin. Equilibrium distributions in the theory of non-Markov processes. Brief reports on physics of P.N.Lebedev Physical Institute. — 1996. — № 7—8. — P. 21—26.



**ДИНАМИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ
НА МАТЕРИАЛЫ В ТЕОРИИ ПЛАСТИЧНОСТИ
ПОРИСТЫХ ТЕЛ**

Л.А. РЯБИЧЕВА, Ю.В. КРАВЦОВА

Восточнoукраинский национальный университет имени
Владимира Даля, Луганск, Украина

Деформирование пористых тел с необратимой сжимаемостью, как правило, описывают моделями, которые постулируют инвариантность процесса изменения пористости относительно скорости деформации. При этом, как известно, наиболее существенным отличием статического деформирования от динамического является возникновение ударных волн. Данное явление тесно связано с видом зависимостей напряжение — деформация и плотность (пористость) — деформация.

В данной работе предложен вариант теории пластичности пористых тел, изменение объема которых обусловлено изменением объема пор, в предположении чувствительности данного процесса к скорости деформации и режиму приложения нагрузки. Также учитывается, что процесс деформирования сопровождается упрочнением твердой фазы, которое зависит от величины эквивалентной деформации пористого тела ω , являющейся мерой накопленных в материале матрицы деформаций.

Во всех рассмотренных случаях исходим из существующей теории пластичности пористых тел. Скалярные свойства уплотняемого пористого тела, могут быть охарактеризованы как уравнениями, которые выражают зависимости гидростатического давления p и интенсивности касательных напряжений τ от отношения скорости изменения объема e к скорости формоизменения γ , пористости θ и параметров, характеризующих состояние пористого тела (функции пористости), так и уравнением поверхности нагружения.

При формулировке определяющих соотношений полагаем, что вид функций пористости φ и ψ определяется пористой структурой (взаимным расположением пор, их формой и распределением по размерам), а также чувствительностью пористого тела к скорости деформации. Для этого моделируем их вид таким образом, что при $\theta \rightarrow 0$, $\varphi \rightarrow 1, \psi \rightarrow \infty$, они также содержат некоторые параметры k_1 и k_2 , которые являются мерой чувствительности пористого тела к скорости деформации. При этом, k_1 характеризует скоростную чувствительность процесса уплотнения, а k_2 учитывает влияние скорости деформации на упрочнение твердой фазы пористого тела и зависит как от вида зависимости эквивалентной деформации от пористости, так и от ее величины.

Таким образом, предлагаемый в данной работе вариант теории пластичности пористых тел, базирующийся на существующих постулатах, учитывает не только механизм деформации твердой фазы и структуру порового пространства, но и чувствительность деформируемого пористого тела к скорости деформации. Чувствительность сжимаемого пористого тела к скорости деформации учитываем как влияние последней на величину достигаемой пористости с одной стороны и на интенсивность роста упрочнения твердой фазы с другой.

Данная методика может оказаться полезной для прогнозирования деформационных характеристик спеченных металлов с учетом информации об упрочнении твердой фазы и ее поведении при динамическом воздействии по различным траекториям нагружения.

DYNAMIC EFFECT ON MATERIALS IN PLASTICITY THEORY OF POROUS BODIES

L.A. RYABICHEVA, J.V. KRAVTSOVA

East Ukrainian National University named after Vladimir Dahl,
Lugansk, Russia

The deformation of porous compressible bodies is described by models, which postulate the invariance of porosity decreasing process with respect to strain rate. Thus, as is known, the most essential difference of static defor-

mation from dynamic is occurrence of shock waves. The given phenomenon is closely connected to a form of dependences pressure — deformation and density (porosity) - deformation.

In this work the variant of plasticity theory of porous bodies, which can change its volume at the cost of change in the volume of certain pores, in the assumption of sensitivity of the given process to strain rate and to loading condition is offered. Also it is taken into account, that process of deformation is accompanied by hardening of solid phase which depends on value of equivalent deformation of porous body. The equivalent deformation is a measure of deformations saved up in a matrix phase.

In all considerations we proceed from the existing plasticity theory of the porous bodies. Scalar properties of a compressed porous body can be characterized as the equations describing dependences of the hydrostatic pressure p and the tangential stress intensity τ on the relation of the volume variation rate e to the forming rate γ , porosity θ and parameters influencing the state of the porous body (function of porosity), so the equation of a yield surface.

At the formulation of the constitutive equations we believe, that the form of functions of porosity φ and ψ is determined by porous structure (a relative positioning of pores, their form and distribution in the sizes), and also sensitivity of the porous body to strain rate. For this purpose the kind of this function is modeled in such a manner that $\theta \rightarrow 0$, $\varphi \rightarrow 1, \psi \rightarrow \infty$. Their also contain some parameters k_1 and k_2 which are measure of sensitivity of the porous body to strain rate. Thus, the parameter k_1 characterizes the sensitivity of densification process to strain rate, and the parameter k_2 takes into account the influence of strain rate on solid phase hardening and depends as on form of expression of equivalent deformation from porosity, so from its value.

Thus, the variant of plasticity theory of porous bodies suggested in this work, basing on existing postulates, takes into account not only the mechanism of solid phase deformation and structure of porous spaces, but also the sensitivity of compressed porous body to strain rate. Sensitivity of compressed porous body to strain rate is taken into account as influence of last one on value of porosity on the one hand and on intensity of solid phase hardening growth with another.

The given procedure can be useful for forecasting of deformation characteristics of sintered metals in view of the information of a solid phase hardening and its behavior at dynamic effect on various loadings paths. In contrast to other models, the suggested one takes into account not only the materials properties, but also their sensitivity to the strain rate.



**МОЛЕКУЛЯРНО–ДИНАМИЧЕСКОЕ
МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАТИЧЕСКОГО
И УДАРНО–ВОЛНОВОГО СЖАТИЯ
МЕТАЛЛОВ С ГРАНЕЦЕНТРИРОВАННОЙ
КУБИЧЕСКОЙ РЕШЕТКОЙ**

В.К. ГОЛУБЕВ, А.А. СЕЛЕЗЕНЕВ

Открытый вычислительный центр, Саров, Россия

С использованием метода классической молекулярной динамики проведен расчет статического (изотермического и адиабатического) и ударно–волнового сжатия металлов, имеющих наиболее симметричную из плотноупакованных кристаллических структур — гранецентрированную кубическую. Эти металлы — алюминий, никель, медь, родий, палладий, серебро, иридий, платина, золото, свинец — занимают в периодической системе элементов места от 13 до 82. Рассмотрение процессов сжатия проводилось в диапазоне сжатий до предельного значения $\sigma = \rho/\rho_0 = 2$. В предварительных расчетах использовались несколько типов потенциалов межатомного взаимодействия. Для окончательных расчетов был выбран пятипараметрический потенциал общего вида, представляемый совокупностью экспоненциальной и степенных функций. Подгонка параметров потенциала осуществлялась как с использованием программы GULP, так и аналитическими методами.

Молекулярно–динамическое моделирование статического сжатия осуществлялось с использованием программ GULP и SageMD. Образцы кубической формы содержали около 4000 атомов. На всех гранях образцов задавались периодические граничные условия. Использовались также граничные условия на жестких подвижных стенках. Молекулярно–динамическое моделирование ударно–волнового сжатия осуществлялось с использованием программы SageMD. В этом случае использовались образцы в форме параллелепипедов, содержащие около 20000 атомов. На боковых гранях образцов задавались периодические граничные условия. Ударная волна создавалась путем задания необходимой массовой скорости прилежащему к одной из торцевых поверхностей образца слою атомов. Массовые скорости варьировались для построения ударных адиабат и изучения сопутствующих физических явлений в указанном диапазоне сжатий. Начальные температуры образцов также варьировались в широких пределах. Структурный анализ ударно сжатых металлов осуществлялся с использованием вычисляемых функций радиального распределения. В результате были построены ударные адиабаты и функции Грюнайзена рассмотренных металлов, определены условия их плавления при ударно–волновом сжатии. Проведено сопоставление полученных результатов с расчетно–теоретическими результатами других авторов и с известными экспериментальными данными.

**MOLECULAR–DYNAMIC SIMULATION
OF STATIC AND SHOCK–WAVE COMPRESSION
OF METALS WITH FACE–CENTRED
CUBIC LATTICE**

V.K. GOLUBEV, A.A. SELEZENEV

Open Computer Center, Sarov, Russia

Calculations of static (isothermal and adiabatic) and shock–wave compression of metals having the most symmetric of close–packed structures — face–centered structure — were performed with the use of the method of classical molecular dynamics. These metals — aluminum, nickel, copper, rhodium, palladium, silver, iridium, platinum, gold, lead — occupy places from 13 to 82 in the periodic system of elements. Examination of the compression processes was conducted in the range of compaction up to the maximum value of $\sigma = \rho/\rho_0 = 2$. In the preliminary calculations several types of interatomic interaction potentials were utilized. For the definitive calculations the five–parameter general form potential represented as an aggregate of exponential and power functions was selected. The fitting of potential parameters was realized using as the GULP program so analytical methods.

Molecular–dynamic simulation of static compression was performed using the GULP and SageMD programs. The specimens in the cubic form contained about 4000 atoms. The periodic boundary conditions were set on all the sides of the specimens. The boundary conditions on the hard mobile walls were used too. Molecular–dynamic simulation of shock–wave compression was performed using the SageMD code. The specimens in the form of a parallelepiped containing about 20000 atoms were used in this case. The periodic boundary conditions were set on the lateral sides of the specimens. A shock wave was created by means of assignment of a necessary mass velocity to the layer of atoms adjoining to one of the specimen frontal surfaces. The mass velocities varied with intent to build shock adiabats and to investigate concomitant physical phenomena in the mentioned range of compaction. The initial temperatures of the specimens also varied in a wide range. Structural analysis of shock–compressed metals was realized with the use of calculated functions of radial distribution. As a result the shock adiabats and Grüneisen functions of the examined metals were constructed, conditions of their melting during shock–wave compression were determined. Comparison of obtained results with calculation and theoretical results of other scientists and with known experimental data was made.



**ВРЕМЕННЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ
ПРОЦЕССА ДИНАМИЧЕСКОГО
РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛОВ,
ОБУСЛОВЛЕННЫЕ ИЕРАРХИЧЕСКИМИ
СВОЙСТВАМИ ДИССИПАТИВНЫХ
СТРУКТУР — КАСКАДА ЦЕНТРОВ
РАЗРУШЕНИЯ**

А.Я. УЧАЕВ, В.Т. ПУНИН, С.А. НОВИКОВ,
Е.В. КОШЕЛЕВА, Л.А. ПЛАТОНОВА, Н.И. СЕЛЬЧЕНКОВА

Российский федеральный ядерный центр —
Всероссийский НИИ экспериментальной физики,
Саров, Россия

В работе рассматривается механизм динамического разрушения металлов, вызываемый сильнооточными пучками релятивистских электронов в диапазоне долговечности $t \sim 10^{-6} \div 10^{-10}$ с, темпе ввода энергии $dT/dt \sim 10^6 \div 10^{12}$ К/с, при амплитуде импульсного воздействия единицы–сотни килобар.

Известно, что металлы, как в квазистатическом (долговечность $t > 10^{-3}$ с), так и в динамическом ($t < 10^{-8}$ с) диапазонах долговечности, при разрушении испытывают пластическую деформацию. До недавнего времени процессы пластической деформации связывали с эволюцией различного рода дефектов кристаллической структуры, которые, взаимодействуя между собой и испытывая внешнее воздействие, оставались самостоятельными структурными единицами, обладающими присущими им свойствами. В рамках этой концепции процесс пластической деформации представлялся как результат эргодического поведения системы дефектов, траектории которых заполняли с течением времени все фазовое пространство. Такой классической системой является идеальный газ. Фазовые траектории атомов газа неустойчивы [1]. Если объем газа ограничен, то неустойчивость движения и упругие столкновения приводят к перемешиванию фазовых состояний атомов. Это перемешивание наблюдается как эволюция идеального газа к первоначальному состоянию. Также предполагается отсутствие иерархической соподчиненности и в поведении дефектов кристаллической решетки. Поведение задается внешними силовыми полями и действием термостата. В такой постановке зависимости термодинамического потенциала системы дефектов в конфигурационном пространстве имеют вид «регулярного» распределения минимумов, наименьший из которых соответствует устойчивому состоянию системы дефектов, а остальные метастабильным состояниям. В результате эволюция системы дефектов кристаллической решетки в процессе пластической деформации представляется как цепочка термофлуктуационных

дебаевских процессов преодоления энергетических барьеров, а времена релаксации определяются соотношениями типа Аррениуса. Такая картина реализуется при малых степенях пластической деформации.

При больших степенях пластической деформации плотность различных дефектов кристаллической структуры достигает критических значений. Начинают проявляться другие эффекты в поведении дефектов [2]. Это означает установление определенных связей в ансамбле дефектов, что обуславливает протекания, например, фазовых, кинетических превращений. Установление определенной связи в ансамбле одного структурного уровня дает предпосылку для автолокализованного образования другого структурного уровня, который играет роль исходного структурного уровня для более высокого. Неравновесные, иерархические соподчиненные системы, когда достижение верхнего состояния возможно лишь после достижения нижних состояний, являются неэргодичными. Такое отличие, в коллективном поведении ансамбля дефектов от обычного процесса фазовых превращений обусловлено неравновесностью ансамбля дефектов, возникающей в процессе динамического разрушения при наличии развитой пластической деформации.

В результате проведенных исследований было показано, что плотность поглощенной энергии, приводящей к разрушению сравнима с энергетическими параметрами кристаллической решетки [3].

Автолокализованный характер поведения дефектов (а далее «супердефектов», в нашем случае поведение каскада центров разрушения) является следствием потери эргодичности в поведении ансамбля дефектов, который, в свою очередь, связан с иерархической соподчиненностью.

Ссылки

1. Хорстхемке В., Лефевр Р. Индуцированные шумом переходы: Теория и применение в физике, химии и биологии: Пер. с англ. — М.: Мир, 1987. — 400 с.
2. Колбасников Н.Г., Фомин С.Г. Методика определения энтропии деформированного металла // Письма в ЖТФ. Т. 15. — Вып. 9. — С. 33—36.
3. Ильяев Р.И., Учаев А.Я., Новиков С.А., Завада Н.И., Платонова Л.А., Сельченкова Н.И. Универсальные свойства металлов в явлении динамического разрушения // ДАН. — 2002. Т. 384. — № 3. — С. 328—333.

TIME REGULATIONS OF METALS DYNAMIC FAILURE CONDITIONED BY HIERARCHIC

PROPERTIES OF DISSIPATIVE STRUCTURES — FAILURE CENTERS CASCADE

A.YA. UCHAEV, V.T. PUNIN, S.A. NOVIKOV,
E.V. KOSHELEVA, L.A. PLATONOVA,
N.I. SEL'CHENKOVA

Российский федеральный ядерный центр —
Всероссийский НИИ экспериментальной физики,
Саров, Россия

In the work there is studied a mechanism of metals dynamic failure caused by high-current beams of relativistic electrons in the longevity range $t \sim 10^{-6} \div 10^{-10}$ sec, energy input rate $dT/dt \sim 10^6 \div 10^{12}$ K/sec, at the amplitude of unit impulse action amplitude equaling to hundreds of kilobars.

It is well-known that under failure metals undergo plastic deformation in both quasi-static (longevity $t > 10^{-3}$ sec) and dynamic ($t < 10^{-8}$ sec) longevity ranges. Up to now the processes of plastic deformation have been connected to evolution of different kind defects of crystal structure which interacting between each other and undergoing external action remained independent structure units possessing distinctive properties. Under this concept the process of plastic deformation seems to be a result of ergodic behavior of the system of defects whose trajectories filled the whole phase space in process of time. Such a classic system is ideal gas. Phase gas atom trajectories are not steady [1]. If the gas volume is limited, the motion instability and elastic scattering lead to phase atom states mixing. This mixing is observed as ideal gas evolution toward the initial state. Absence of hierarchic co-subordination in crystal lattice defects behavior is also expected. The behavior is set by external force fields and thermostat action. In this case dependencies of thermodynamic potential of the system of defects in the configuration space have a type of «regular» distribution of minimums, the least among which corresponds to the defect system steady state, and the rest of them — to metastable states. As a result, the evolution of the crystal lattice defect system in the course of plastic deformation is represented as a chain of thermofluctuation processes of energy barriers overcoming, and times of relaxation are determined by relations of Arrhenius type. Such a picture is realized at small degrees of plastic deformation.

At large degrees of plastic deformation the density of different defects of crystal structure reaches critical values. Other effects in defects behavior begin to appear [2]. This means establishment of definite connections in the defect ensemble what conditions the flow, for example, of phase kinetics transformations. Establishment of definite connection in the ensemble of one structure level provides a premise for autolocalized formation of another structure level, that plays the role of initial structure level for the higher one. Non-equilibrium, hierarchic co-subordinated systems, when the top state can be reached only

after low states are reached, are non-ergodic ones. Such a difference in the collective behavior of defect ensemble from the common process of phase transformations is conditioned by non-equilibrium of defect ensemble arising in the course of dynamic failure under developed plastic deformation. As a result of conducted studies it was shown that the density of absorbed energy leading to the failure is comparable to the energy parameters of crystal lattice [3]. Autolocalized character of defects behavior (and further «super-defects», in our case — behavior of failure centers cascade) is a consequence of ergodicity loss by the defect ensemble behavior that, in its turn, is related to hierarchic co-subordination.

References

1. Khorstkhemke V., Lefevr R. Transitions induced by noise: Theory and application in physics, chemistry and biology: Transl. from Engl. — M.: Mir, 1987. — 400 p.
2. Kolbasnikov N.G., Fomin S.G. A method of determining of deformed metal entropy// Letters to ZhTF, V. 15. — issue 9. — P. 33—36.
3. Il'kaev R.I., Uchaev A.Ya., Novikov S.A., Zavada N.I., Platonova L.A., Sel'chenkova N.I.. Universal metal properties in the dynamic failure phenomenon // Reports of Academy for Science. — 2002. V. 384. — № 3. — P. 328—333.



ШИРОКОДИАПАЗОННОЕ УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ВОДЫ С УЧЕТОМ ДИССОЦИАЦИИ, ИСПАРЕНИЯ И ИОНИЗАЦИИ (ГЛОБУС-3)

М.С. СМЕРНОВА, В.В. ДРЕМОВ,
А.Т. САПОЖНИКОВ

Российский федеральный ядерный центр —
Всероссийский НИИ технической физики
им. акад. Е.И. Забабахина, Снежинск, Россия

В данном сообщении изложены результаты построения нового широкодиапазонного уравнения состояния (УРС) воды с учетом диссоциации, испарения и ионизации. Для построения этого уравнения состояния использованы несколько локальных моделей и УРС, с хорошей точностью описывающие вещество в разных областях фазовой диаграммы.

УРС ГЛОБУС и УРС Менжулина — полуэмпирические уравнения состояния описывающие воду с высокой точностью при температурах вплоть до

диссоциации и плотностях, близких к нормальной, включая область испарения.

Вариационная теория возмущений используется в области, где вода может быть представлена в виде смеси молекулярных жидкостей, в которой кинетическая энергия движения молекул сравнима с потенциальной энергией взаимодействия. В этой области учтена и диссоциация.

При плотностях выше нормальной вещество рассматривалось как однородная смесь атомов кислорода и водорода по модели Томаса–Ферми с квантовыми и обменными поправками с учетом вклада движения ядер по модели Копышева.

При плотностях ниже нормальной вещество описывает модель равновесной диссоциации слабо–неидеального газа (используется разложение до второго вириального коэффициента), при высоких температурах — модель Саха для равновесной ионизация идеального газа.

УРС представлен в табличной форме для экономичного вычисления термодинамических свойств вещества в широком диапазоне плотностей и температур.

WIDE RANGE EQUATION OF STATE FOR WATER TAKING INTO ACCOUNT EVAPORATION, DISSOCIATION AND IONIZATION

M.S. SMIRNOVA, V.V. DREMOV, A.T. SAPOZHNIKOV

Russian Federal Nuclear Center — Zababakhin Institute of Technical Physics, Snezhinsk, Russia

Here we present new wide range equation of state for water. It has been constructed by sewing together a number of local models describing the matter with good accuracy in different regions of the phase diagram.

EOS GLOBUS and EOS Menzhulin are semiempirical equations of state describing water with high accuracy at temperatures under dissociation, moderate densities and taking evaporation into account.

Variational perturbation theory is applied in the region where water can be considered as a mixture of molecular fluids that is the kinetic energy of molecular motion is comparable to potential energy of molecular interaction. Dissociation is also taken into account in this region.

At high densities the matter is considered as homogeneous mixture of atoms and Thomas–Fermi model with quantum corrections and nuclei treatment by Kopyshv is applied.

At low densities and high temperatures the model of weakly non–perfect dissociating gas (virial expansion up

to second coefficient is used) and Saha model of ionized gas have been used.

The EOS has been converted in tabular form to be efficient when using in hydrodynamic codes.



СЖАТИЕ ТВЕРДОГО ДЕЙТЕРИЯ МЕГАБАРНЫМИ ДАВЛЕНИЯМИ УДАРНЫХ ВОЛН

А.И. БЕЛОВ, Р.И. ИЛЬКАЕВ, В.Д. СЕЛЕМИР,
Г.В. СИМАКОВ, Р.Ф. ТРУНИН, В.Д. УРЛИН,
В.Е. ФОРТОВ, А.Н. ШУЙКИН

Российский федеральный ядерный центр —
Всероссийский НИИ экспериментальной физики,
Саров, Россия

Приведены данные по ударному сжатию твердого дейтерия при давлениях 120 Гпа.

В экспериментах не наблюдается аномального увеличения плотности дейтерия по типу того, что зафиксировано в исследованиях американских ученых на лазерной установке NOVA.



ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА ДИНАМИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ТЕПЛООВОГО УДАРА И МОЩНЫХ ИМПУЛЬСОВ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В.Т. ПУНИН, А.Я. УЧАЕВ, В.В. ЖМАЙЛО, А.С. КОНКИН,
Н.И. СЕЛЬЧЕНКОВА, И.К. РОЗГАЧЕВА, Е.В. КОШЕЛЕВА,
Л.А. ПЛАТОНОВА, Н.А. ЮКИНА

Российский федеральный ядерный центр —
Всероссийский НИИ экспериментальной физики,
Саров, Россия

В результате проведенных ранее исследований было показано, что металлы в явлении динамического разрушения обнаруживают универсальные свойства поведения, которые обусловлены самоорганизацией и неустойчивостями в диссипативных структурах (каскадах центров разрушения), лежащих в основе сопротивления тела внешнему воздействию. При ам

плитудах импульсного давления единицы–сотни килобар в диапазоне долговечности $t \sim 10^{-6} \div 10^{-10}$ с эволюция микро– и мезоскопических дефектов каскадов центров разрушения в явлении динамического разрушения является определяющей в общих закономерностях инвариантного поведения твердых тел при воздействии теплового удара, вызываемого мощными импульсами проникающих излучений с темпом ввода энергии $dT/dt \sim 10^6 \div 10^{12}$ К/с, диапазон начальных температур $T_0 \sim 4 K \div T_{пл}$ [1–3].

Универсальные свойства поведения твердого тела на макроуровне определены процессами самоорганизации диссипативных структур на мезоуровне.

В данной работе показана возможность протекания процесса динамического разрушения по описанному выше механизму в пикосекундном диапазоне действия отрицательных давлений.

Для создания неравновесных условий использовалась лазерная установка с параметрами нагружения: мощность потока лазерного излучения $J > 10^{13}$ Вт/см², длительность импульса $\tau < 10^{-10}$ с [4]. В области воздействия лазерного излучения на металл кристаллическая решетка испытывает двойное воздействие: воздействие термолизованных электронов на ионную систему с яркостной температурой — T_v , что приводит к локальному явлению теплового удара. Также эта область испытывает действие импульсного давления вследствие испарения части металла. После окончания воздействия импульса лазерного излучения возникает отрицательное давление вследствие разгрузки в неравновесной области, что может привести к возникновению каскада центров разрушения, обладающего фрактальной размерностью в пикосекундной области долговечности. Методами количественной фрактографии с применением вычислительных средств установлено возникновение диссипативных структур – каскада центров разрушения, что показывает возможность протекания процесса динамического разрушения в пикосекундной области долговечности.

Таким образом, применение лазеров с пикосекундной и, особенно, с фемтосекундной длительностью импульса открывает новые возможности исследования процесса динамического разрушения в пикосекундном диапазоне действия отрицательного давления, что существенно расширяет исследуемую область неравновесных состояний.

Ссылки

1. Бонюшкин Е.К., Завада Н.И., Новиков С.А., Учаев А.Я. Кинетика динамического разрушения металлов в режиме импульсного объемного разогрева // Научное издание. Под ред. Р.И. Ильяева — Саров, 1998. — 275 с.
2. Ильяев Р.И., Учаев А.Я., Новиков С.А., Завада Н.И., Платонова Л.А., Сельченкова Н.И. Уни-

версальные свойства металлов в явлении динамического разрушения // ДАН. — 2002. — Т. 384. — № 3. — С. 328—333.

3. Павловский А.И., Бонюшкин Е.К., Учаев А.Я. и др. Особенности температурно–временных закономерностей процесса динамического разрушения некоторых металлов в режиме быстрого объемного разогрева // Докл. АН. — 1991. — Т. 317. — № 6. — С. 1376—1379.
4. Жмайло В.В., Васин М.Г., Игнатъев Ю.В., Морозов А.П., Токарев В.А. Методика регистрации спектральных и временных характеристик импульсного рентгеновского излучения. // Тезисы докладов 9–го Совещания по диагностике высокотемпературной плазмы. — Москва: ЦНИИатоминформ, 1997. — С. 78.

SPECIFIC FEATURES OF METALS DYNAMIC FAILURE UNDER ACTION OF THERMAL SHOCK AND POWERFUL PULSES OF LASER RADIATION

V.T. PUNIN, A.YA. UCHAEV, V.V. ZHMAYLO, A.S. KONKIN, N.I. SEL'CHENKOVA, I.K. ROZGACHEVA, YE.V. KOSHELEVA, L.A. PLATONOVA, N.A. YUKINA

Russian Federal Nuclear Center — All-Russian Scientific Research Institute of Experimental Physics, Sarov, Russia

As a result of studies conducted earlier, it was demonstrated that metals in the phenomenon of dynamic failure showed behavior universal properties conditioned by self-organization and instabilities in dissipative structures (failure center cascades) forming the basis of the body's resistance to the external action. At the amplitudes of pulse pressure units—hundreds of kilobars in the longevity range $t \sim 10^{-6} \div 10^{-10}$ sec evolution of micro– and mesoscopic defects of failure center cascades in the phenomenon of dynamic failure is determinant in the common regularities of invariant behavior of solid bodies under the effect of thermal shock caused by powerful penetrating radiation pulses with the rate of energy input $dT/dt \sim 10^6 \div 10^{12}$ K/sec, the range of initial temperatures $T_0 \sim 4K \div T_{melt}$ [1–3].

Universal properties of solid body behavior on the macro–level are determined by processes of dissipative structures self-organization on the mesolevel. In the given paper there is described a possible way of dynamic failure progressing according to the mechanism described above in the picosecond range of negative pressures action.

In order to create non-equilibrium conditions, there was used a laser facility with loading parameters: laser radiation flux power $J > 10^{13}$ W/cm², pulse length $\tau < 10^{-10}$ sec [4]. In the region of laser radiation action to the metal the crystal lattice undergoes double action: action of thermalized electrons to the ion system with brightness temperature — T_v , what leads to the local phenomenon of thermal shock. Also this region endures the action of the pulse pressure due to vaporization of a part of metal. After the end of laser radiation pulse action there appears negative pressure due to off-loading in the non-equilibrium region, what can lead to appearance of failure centers cascade possessing fractal dimension in the picosecond longevity region. Methods of quantitative fractography with application of computational means established appearance of dissipative structures – failure centers cascade what demonstrates the possibility of dynamic failure progress in the picosecond longevity region. Thus, employment of lasers with picosecond and, especially, with femtosecond pulse length opens new capabilities for studying of the dynamic failure process in the picosecond range of negative pressure action what significantly extends the non-equilibrium state region under study.

References

1. Bon'ushkin E.K., Zavada N.I., Novikov S.A., Uchaev A.Ya. Kinetics of metals dynamic failure in the mode of pulse volume heating up // Scientific publication edited by R.I.I'kaev — Sarov, 1998. — 275 p.
2. I'kaev R.I., Uchaev A.Ya., Novikov S.A., Zavada N.I., Platonova L.A., Sel'chenkova N.I. Universal metals properties in the dynamic failure phenomenon // Reports of Academy of Science. — 2002. — V. 384. — № 3. — P. 328—333.
3. Pavlovski A.I., Bon'ushkin E.K., Uchaev A.Ya. et al. Specific features of time-temperature regularities of some metals dynamic failure in the mode of fast volume heating up // Reports of Academy of Science. — 1991. — V. 317. — № 6. — P. 1376—1379.
4. Zhmaylo V.V., Vasin M.G., Ignatyev Yu.V., Morovov A.P., Tokarev V.A. Technique of registering of spectral and time characteristics of pulse x-ray characteristics. // Abstracts of reports of the 9-th Conference on diagnostics of high-temperature plasma. — Moscow.: TsNIAtominform, 1997. — P. 78.



ОБРАЗОВАНИЕ РИНГВУДИТА ПРИ УДАРНО-ВОЛНОВОМ НАГРУЖЕНИИ ДВУСЛЮДЯНО-КВАРЦЕВОГО СЛАНЦА (ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ)

Е.А. КОЗЛОВ

Российский федеральный ядерный центр —
Всероссийский НИИ технической физики
им. акад. Е.И. Забабахина, Снежинск, Россия

Л.В. САЗОНОВА В.И. ФЕЛЬДМАН

Геологический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова,
Москва, Россия

Н.А. ДУБРОВИНСКАЯ, Л.С.ДУБРОВИНСКИЙ

Баварский геологический институт, г. Байройт, Германия

Эксперимент проводился по методике РФЯЦ — ВНИИТФ в г. Снежинске. Шар породы имел начальный диаметр 49 мм и был герметично заварен в чехол из аустенитной нержавеющей стали 12X18H10T. Обжатие загерметизированного шара осуществлялось сферически сходящейся детонационной волной, инициированной в слое октоген-содержащего взрывчатого состава (HMX-based composition) с наружным радиусом слоя ВВ $R_{ВВ} = 40$ мм при толщине слоя $h_{ВВ} = 10$ мм. Ударные напряжения в породе составляли около 30 ГПа на радиусе 24,5 мм и достигали 300 ГПа во фронте сходящейся волны на радиусе 1 мм.

Рингвудит (кубическая полиморфная модификация оливина – так называемый гамма-оливин) впервые был получен при ударно-волновом нагружении горной породы. При этом биотит в двуслюдяно-кварцевом сланце претерпел ударно-термическое разложение при напряжениях в интервале 20—50 ГПа. Иногда вместе с рингвудитом в аморфизованном остатке биотита наблюдается шпинель, близкая по составу к герциниту.

Рингвудит образует вытянутые и таблитчатые кристаллы до 20 мкм длиной при ширине до 7 мкм. На концах кристаллов иногда намечаются признаки футляровидного строения. Состав рингвудита (в весовых %): SiO₂ = 29,13—32,84; TiO₂ = 0,27—0,91; Al₂O₃ = 0,94—14,17; FeO = 28,78—47,54; MgO = 17,44—28,97; CaO = 0,00—0,14; K₂O = 0,09—0,31. Он хорошо соответствует стандартной формуле Si^{iv}(Mg, Fe)₂O₄.

Диагностика рингвудита осуществлена с использованием растрового электронного микроскопа Camscan 4DV с энергодисперсионным анализатором Link

AN10000 (МГУ) и лабораторного рамановского спектрометра LabRam (Баварский геологический институт). В последнем случае выявлены типичные для рингвудита диагностические дублеты в области $780\text{--}900\text{ см}^{-1}$.

В земных импактиках рингвудит обнаружен пока только в одном случае — в импактных пемзах Эстремадуры в Испании, где его кристаллы росли в быстро остывающем расплаве. Обнаруженный в природном метеоритном кратере в Испании в 2001 году и впервые синтезированный во взрывных экспериментах лабораторного масштаба ($R_{\text{ВВ}} = 40\text{ мм}$) рингвудит образовался на твердофазной стадии преобразования пород. В природе выявление такого рингвудита возможно только в выбросах из астроблем, так как только здесь можно рассчитывать найти закалённые высокотемпературные минеральные фазы в обломках пород, испытавших высокопараметрический ударный метаморфизм, но не прошедших стадии плавления.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ, грант 00-05-64102.



**К ВОПРОСУ О МЕТАСТАБИЛЬНОСТИ,
НЕПОЛНОТЕ ПРОТЕКАНИЯ $\alpha\text{--}\varepsilon$ -ФАЗОВОГО
ПРЕВРАЩЕНИЯ В НЕЛЕГИРОВАННОМ
ЖЕЛЕЗЕ ПРИ ПОРОГОВЫХ ИМПУЛЬСАХ
НАГРУЗКИ. ОСОБЕННОСТИ
ДЕФОРМАЦИОННОГО ПОВЕДЕНИЯ
И СТРУКТУРЫ АРМКО-ЖЕЛЕЗА**

Е.А. КОЗЛОВ, И.В. ТЕЛИЧКО,
Д.М. ГОРБАЧЕВ, Д.Г. ПАНКРАТОВ

Российский федеральный ядерный центр —
Всероссийский НИИ технической физики
им. акад. Е.И. Забабахина, Снежинск, Россия

А.В. ДОБРОМЫСЛОВ, Н.И. ТАЛУЦ
Институт физики металлов УрО РАН,
Екатеринбург, Россия

Получены новые данные по кинетике релаксации напряжений на фронтах упругого и фазового предвестников при взрывном нагружении армко-железа.

Проведено сопоставление результатов, полученных непосредственно в процессе взрывного нагружения образцов, с данными последующих металлографических исследований сохраненного вещества. Выявлено протекание $\alpha\text{--}\varepsilon$ -фазового превращения в уз-

ком слое у поверхности нагружения при нагружении образцов армко-железа скользящей детонацией тонких (1; 1,5 и 2 мм) слоев пластичного ВВ на основе ТЭНа (PETN-based composition). Отмечено хорошее соответствие глубины перехода от трех- к двухволновой конфигурации при нагружении армко-железа скользящей детонацией слоя ВВ на основе октогена (HMX-based composition) при толщине слоя ВВ $h_{\text{ВВ}} = 15$ и 20 мм с величиной $x^{\alpha\text{--}\varepsilon}$, соответствующей скачкообразному изменению по толщине сохраненного образца микротвердости $H_{\mu}(x)$.

Получена количественная информация по распределению по толщине образцов микро- и макротвердости, плотности двойников и дислокаций, необходимая для проверки и аттестации физических моделей и расчетных программ нового поколения.

**TO THE QUESTION ON METASTABILITY
AND INCOMPLETENESS OF $\alpha\text{--}\varepsilon$ -PHASE
TRANSFORMATION IN UNALLOYED IRON
UNDER THRESHOLD LOADING
PULSEFEATURES OF DEFORMATION
BEHAVIOUR AND STRUCTURE
OF ARMCO IRON**

E.A. KOZLOV, I.V. TELICHKO,
D.M. GORBACHOV, D.G. PANKRATOV

Russian Federal Nuclear Center — Zababakhin Institute
of Technical Physics, Snezhinsk, Russia

A.V. DOBROMYSLOV, N.I. TALUTS

Institute of Metal Physics, Ural Division of Russian Academy
of Sciences, Ekaterinburg, Russia

New data are obtained on the kinetics of stress relaxation at the fronts of the elastic and phase precursors under explosion loading of armco iron.

Results of time-resolved diagnostics and data of metallographic study of recovered specimens were compared. The $\alpha\text{--}\varepsilon$ phase transformation in a narrow layer near the loading surface was revealed in the case of loading armco iron samples by sliding detonation of thin (1; 1,5 and 2 mm) layers of the PETN-based composition. Depth of transition from the three- to two-wave configuration when armco iron is loaded by sliding detonation of the HMX-based composition layers (HE layer thickness $h_{\text{HE}} = 15$ and 20 мм) is noted to be in good agreement with $x^{\alpha\text{--}\varepsilon}$, which corresponds to the jump-wise change of microhardness $H_{\mu}(x)$ throughout thickness of the recovered sample.

Quantitative data on the distribution of micro- and macrohardness, density of twins and dislocations throughout the sample thickness are obtained. These data are necessary for verification and validation of new-generation physical models and numerical codes.



СТРУКТУРНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ В ШАРОВОМ ОБРАЗЦЕ ИЗ СТАЛИ 40Х ПРИ КВАЗИСФЕРИЧЕСКОМ ВЗРЫВНОМ НАГРУЖЕНИИ

Н.Ю. ФРОЛОВА, А.Э. ХЕЙФЕЦ, В.И. ЗЕЛЬДОВИЧ

Институт физики металлов Уральского отделения РАН,
Екатеринбург, Россия

Б.В. ЛИТВИНОВ, Н.П. ПУРЫГИН, В.И. БУЗАНОВ

Российский федеральный ядерный центр —
Всероссийский НИИ технической физики
им. акад. Е.И. Забабахина, Снежинск, Россия

Методами просвечивающей электронной микроскопии и металлографии исследованы изменения структуры шарового образца из стали 40Х, диаметром 40 мм, после квазисферического взрывного нагружения. Структурные изменения связаны с геометрией нагружения и сопоставлены с ранее рассчитанными ударно-волновыми параметрами воздействия.

В каждой точке столкновения ударных волн на шаровой поверхности возникают по две полосы адиабатического сдвига, распространяющиеся в объеме шара и направленные в противоположные стороны от точки столкновения.

Начиная от поверхности шара, до середины радиуса, сходящаяся ударная волна вызывает деформационные изменения феррито-перлитной структуры. Наблюдаются следы $\alpha \rightarrow \epsilon \rightarrow \alpha$ превращения, полосы сдвига в перлитных колониях, дробление и развороты пластин цементита в перлите. Неравномерные смещения раздробленных цементитных пластин указывают на наличие локальных флуктуаций давления и массовой скорости в ударной волне. Характерный размер флуктуаций составляет десятые доли микрона. Локализованная сфероидизация цементита свидетельствует о локальном повышении температуры. Локализация температуры связана с ориентацией перлитных колоний относительно ударно-волнового фронта и объясняется особенностями поглощения энергии волны пластинчатой структурой перлита.

При схождении ударных волн к центру, приблизительно на половине радиуса, начальные условия опы-

та «забываются», и фронт волны становится сферическим. Величина давления в центре образца достигает 300 ГПа, остаточная температура превышает температуру плавления стали. Поэтому в центре шара возникает правильная сферическая полость с областью направленной кристаллизации, полосы сильно локализованного течения с измененной феррито-перлитной структурой. На расстояниях приблизительно 4–6 мм от центра в структуре образца наблюдаются области $\alpha \rightarrow \gamma \rightarrow \alpha$ превращения, рекристаллизации избыточного феррита и феррита перлитных колоний, дробление и сфероидизация цементита.

Исследование выполнено в рамках комплексной программы Президиума РАН «Теплофизика и механика интенсивных энергетических воздействий»

STRUCTURAL CHANGES IN SPHERICAL SAMPLE OF STEEL 40KH AT QUASISPHERICAL EXPLOSIVE LOADING

N.YU. FROLOVA, A.E. KHEIFETS, V.I. ZEL'DOVICH

Institute of Metal Physics, Ural Division
of Russian Academy of Science, Yekaterinburg, Russia

B.V. LITVINOV, N. P. PURIGIN, V.I. BUZANOV

Russian Federal Nuclear Center — All-Russian Scientific
Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk, Russia

By methods of transmission electron microscope and metallography the changes of structure of the spherical sample of steel 40 Kh (0,4 wt %C; 1,1 Cr) with the diameter equal 40 mm were investigated after the quasi-spherical explosive loading. The structural changes accorded with the geometry of loading were compared to the earlier computed shock wave parameters of the action.

In each point of collision of shock waves on the spherical surface, two strips of adiabatic shift, directed to the opposite sites from the point of the collision, have arisen in volume of the ball.

Near the surface of the ball sample, on distance up to 10 mm from the surface of the ball to the centre the converging shock wave causes the deformation change of the ferritic-pearlitic structure. The traces of $\alpha \rightarrow \epsilon \rightarrow \alpha$ transformation, strip of shift in pearlite, splitting and rotations of plates of cementite in pearlite were observed. The non-uniform displacement of the shattered cementitic plates specify the presence of local fluctuations of pressure and mass velocity in the shock wave. The characteristic size of the fluctuations is the tenth shares of micron. Located spheroidization of cementite testifies to local increase of temperature. The localization of temperature is connected to orientation of the pearlitic fields concerning shock

wave front and is explained by features of dissipation of energy of the wave by the place structure of pearlite.

For motion of the shock waves to the centre, approximately at half of radius the initial conditions of experience are «forgotten» and the front of the wave becomes spherical. The value of pressure in the centre of the sample achieves 300 GPa, the residual temperature exceeds the temperature of steel melting. Therefore in the centre of the sphere the correct spherical cavity with area of directed crystallization and the strips of a strongly located flows of the changed ferritic-pearlitic structure were observed. At distances approximately 4,5—6,0 mm from the centre in structure of the sample the areas of $\alpha \rightarrow \gamma \rightarrow \alpha$ transformation, recrystallization of ferrite, shattering and spheroidization of cementite were observed.

The investigation was carried out within bounds of Presidium of the Russian Academy of Sciences program «Thermal physics and mechanics of intensive energy influence».



ФИЗИКО–МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ РАЗРУШЕНИЯ ПРЕГРАД И КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ОДИНОЧНОМ И ГРУППОВОМ УДАРЕ ТЕХНОГЕННЫХ ОСКОЛКОВ

Г.А. ЕРОХИН, В.С. КОЗЛОВ, И.Е. ХОРЕВ

Томский государственный университет систем управления
и радиоэлектроники (ТУСУР), Томск, Россия

Обсуждаются результаты комплексного исследования особенностей разрушения различных мишеней (пластин и разнесенных конструкций) в сложной проблеме высокоскоростного соударения последних с техногенными осколками. С целью получения недостающей информации непосредственно из зоны больших деформаций и разрушения контактирующих тел используется оптимальное сочетание физического, численного и компьютерного экспериментов. Физическое моделирование высокоскоростного соударения техногенных осколков различного веса и формы с преградами и конструкциями осуществлялось на специальных экспериментальных стендах. Они включали баллистические установки (пороховые и легкогазовые), трассу с регистрирующей аппаратурой и мишенную обстановку с системой регистрации поведения осколка у преграды, а так же систему улавливания сохраненных образцов. Численное моделирование ударного взаимодействия деформируемых твердых тел проводилось модифицированным методом конечных элементов. В общем случае используется модель динамического контакта различных

ударников с конструкционными материалами описывается сжимаемой прочной средой. Ее поведение при ударных нагрузках характеризуется широкодиапазонным уравнением состояния, модулем сдвига, динамическим пределом текучести и константами кинетической модели динамического разрушения активного типа. Последняя описывает зарождение, рост и эволюцию микроповреждений, которые непрерывно изменяют локальные свойства материала и вызывают релаксацию напряжений. Показано согласованными совместными компьютерными расчетами и экспериментами, что используемая кинетическая модель динамического разрушения твердых тел в экстремальных условиях, качественно и количественно описывает особенности развития лицевого, тыльного разрушения, взаимовлияния откольного и сдвигового повреждений и множественный откол при ударе одного и группы осколков. Согласованными физическими и численными экспериментами показано, что время развития тыльного откольного повреждения преграды конечной толщины (пластины) может быть сравнимым с временем проникания осколка (компактного и удлиненного) через мишень, в результате чего происходит непосредственное взаимодействие формирующейся откольной тарелочки с бойком, что необходимо учитывать при расчете взаимодействия осколков со сложными конструкциями. Проанализированы наиболее эффективные (моноконтные и разнесенные) конструкции в плане защиты от пробивного действия высокопрочных и деформирующихся техногенных осколков различного удлинения и особенности пробивания ими различных мишеней.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (код проекта 03-01-00386).

THE PHYSICAL AND MATHEMATICAL ANALYSIS OF FEATURES OF DESTRUCTION OF OBEXES AND DESIGNS AT SINGLE AND FORMATION IMPACT OF TECHNOGENIC DEBRIS

G.A. EROKHIN, V.S. KOZLOV, I.E. KHOREV

Tomsk state university of control systems
and Radioelectronics (TUCSR), Tomsk, Russia

The outcomes of complex research of features of destruction of different targets (laminas and diverse designs) in a composite problem of high-velocity impact last with technogenic debris are discussed. With the purpose of obtaining the missing information directly from

a zone of large deformations and destruction of contacting bodies the optimum combination of physical, numerical and computer experiments will be used. The

physical simulation of high-velocity impact of technogenic debris of different weight both forms with obexes and designs implemented on special experimental benches. They actuated ballistic ranges (powder and mild gas), line with recording equipment and the targets conditions with the recording system of behavior of a debris for an obex, and as a system of catching saved is model. The numerical modeling of impact interplay of deformed solids was conducted by a modified finite element method. The generally used model of a dynamic contact of different strikers with structural materials is described by compressed strong medium. Its behavior at impact loads is characterized by a wide-range equation of state, shear modulus, dynamic yield strength and constants of kinetic model of dynamic destruction of a fissile type. Last describes a germing, growth and changes of aircraft attitude of microdamages, which one continuously change local properties of a stuff and invoke a stress relaxation. Is rotined matched joint computer calculations and experiments, that the used kinetic model of dynamic destruction of solids in extreme conditions, qualitatively and quantitatively describes features of development of facing, back destruction, intercoupling chip and shift damages and multiple chip at impact one and group of debris. Matched physical and numerical experiments is rotined, that the time of development back chip of damage of an obex of final depth can be comparable with time of an insinuating of a debris (compact and elongated) through the target, as a result of which there is a direct interplay reshaped chip plate with brisk, that it is necessary to allow at calculation of interplay of debris with composite designs. Most effective are parsed (monolithic and diverse) design by way of protection against breaking operating of high-strength and warped technogenic debris of different lengthening and feature of punching by them of different targets.

The activity is executed at financial support of the Russian fund of basic researches (code of the project 03-01-00386).



МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛИМОРФНОГО α - ϵ ПРЕВРАЩЕНИЯ В ЖЕЛЕЗЕ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ СОСТОЯНИЙ

Г.А. ЗАДОРЖНЫЙ, Г.В. КОВАЛЕНКО, А.В. ПЕТРОВЦЕВ

Российский федеральный ядерный центр —
Всероссийский НИИ технической физики
им. акад. Е.И. Забабахина, Снежинск, Россия

Представлена модель полиморфного α - ϵ превращения в железе, основанная на использовании кинетического уравнения релаксационного типа. На основе

анализа имеющейся информации по профилям волн напряжений построена зависимость времени релаксации превращения от степени неравновесности термодинамического состояния. Модель применяется для численного моделирования экспериментов, в которых существенным образом изменяются характеристики высокоскоростной деформации частиц материала (амплитуда волны, начальная температура образцов и др.). Представлены данные по влиянию упруго-пластических свойств на выбор параметров кинетики превращения по экспериментальной информации о структуре волн напряжений в исследуемом материале.



ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННОГО ПОВЕДЕНИЯ И ТЕПЛОВЫХ ЭФФЕКТОВ В СПЛАВАХ МЕДИ И ТИТАНА ПРИ НАГРУЖЕНИИ СХОДЯЩИМИСЯ УДАРНЫМИ ВОЛНАМИ

И.В. ХОМСКАЯ, В.И. ЗЕЛЬДОВИЧ

Институт физики металлов Уральского отделения РАН,
Екатеринбург, Россия

Б.В. ЛИТВИНОВ, Н.П. ПУРЫГИН,
В.И. БУЗАНОВ, Н.Д. МАТУШКИН

Российский федеральный ядерный центр —
Всероссийский НИИ технической физики
им. акад. Е.И. Забабахина, Снежинск, Россия

Методами металлографии и дифракционной электронной микроскопии исследовали локализацию деформации, полосы адиабатического сдвига (ПАС) и фазовые превращения в латуни Си-37 % Zn, бронзе Си-12,5 % Al и титановом сплаве ВТЗ-1 на основе системы Ti-Al-Mo при нагружении сходящимися ударными волнами. Шаровые образцы из латуни диаметром 40 и 60 мм подвергали квазисферическому импульсному нагружению с давлением в центре шаров 200—300 ГПа. Цилиндрические образцы из титанового сплава и бронзы диаметром 60 мм и 20 мм, соответственно, и высотой 30 мм подвергали нагружению плоскими сходящимися ударными волнами с давлением в центре цилиндров ~110 ГПа. Во всех случаях для сохранения образцов система помещалась в массивный корпус.

Деформационное воздействие ударных волн проявляется в образовании систем микродвойников и слож-

ных дислокационных структур во всем объеме образцов, и отдельных участков сильного локализованного течения. На основании наших исследований и анализа литературных данных типы локализованного течения разделили на три группы: сдвиговое, если течение обусловлено деформацией сдвига одной области образца относительно другой; струйное (кумулятивное), если течение обусловлено переносом частиц вещества внутри некоторой полосы или трубки; и турбулентное, если вектор скорости частиц вещества непрерывно изменяется. Образование участков сильного локализованного течения предшествует зарождению трещин в образцах. В образце титанового сплава трещины распространяются в ПАС. ПАС имеют вид протяженных, чаще прямолинейных, иногда извилистых не травящихся тонких полос шириной до 10—15 мкм. Происхождение ПАС не связано с особенностями микроструктуры, но обусловлено геометрией ударноволнового нагружения. При давлениях 100 ГПа и выше существенное влияние на формирование структуры сплавов оказывает остаточная температура.

Показано, что структура исследованных сплавов изменяется вследствие деформационных явлений и фазовых превращений: происходит образование систем микродвойников во всем объеме образцов, возникновение трещин, образование пор, полос адиабатического сдвига, продольных каналов деформации, $\beta \rightarrow \alpha \rightarrow \beta$ и $\beta_1' \rightarrow \alpha + \gamma \rightarrow \beta_1'$ превращения, плавление и кристаллизация.

Исследование выполнено в рамках комплексной программы Президиума РАН «Теплофизика и механика интенсивных энергетических воздействий».

STUDY OF DEFORMATION BEHAVIOUR AND HEAT EFFECTS IN COPPER AND TITANIUM ALLOYS AT CONVERGENT SHOCK WAVES LOADING

V.I. KHOMSKAYA, V.I. ZEL'DOVICH

Institute of Metal Physics, Ural Division of Russian Academy
of Science, Yekaterinburg, Russia

B.V. LITVINOV, N. P. PURIGIN,
V.I. BUZANOV, N.D. MATUSHKIN

Russian Federal Nuclear Center — Zababakhin Institute
of Technical Physics, Snezhinsk, Russia

The effects localization of deformation, adiabatic shear bands and phase transformation occurring in brass

Сп-37 % Zn, bronze Сп-12,5 % Al and titanium alloys on basis of Ti-Al-Mo system under the loading by convergent shock waves were investigated by optical microscopy and electron microscopy methods. The ball samples of brass with diameters 40 and 60 mm were subjected to quasi-spherical impulsive loading. The pressure in the center sample reached 200—300 GPa. The cylindrical samples of titanium alloy and bronze of 60 and 20 mm diameter, correspondingly, and of 30 mm high were exposed to a plane shock waves loading. The pressure in the center samples reached ~110 GPa. In all cases to preserve samples the whole system was inside a massive casing.

The deformation action of shock waves developed in forming of microtwinning system and complex configuration dislocations in the whole volume of the sample and in particular areas strong localized flow. On the base of the results of our investigation and literature data analysis the localized stream types were divided into three groups: flow of shear if the flow is caused by shear deformation of one part of the sample relatively another part; jet or cumulative one if the flow is caused by transfer of material part inside any land (or tube); and turbulent flow if vector of speed of material particles flow continuously changes. Their areas of intensive localized flow often forms the basis of crack generation nucleation cracks samples. In the titanium alloy sample cracks spread in adiabatic shear bands (ASB). The ASB appear as extended, oftenly rectilinear but sometimes twisty non-etching thin bands up to 10—15 μm in width. The bands do not depend on microstructure peculiarities, but it's led by geometric of shock waves loading. Under the pressure of 100 GPa and more residual temperature exerts substantially influential on formation of alloy structure.

It is shown, that the structure of investigated alloys changed because of deformation phenomena and phase transformation: the forming of microtwins systems occurs; formation of cracks, pores, adiabatic shear bands, longitudinal deformation channels; the forming of $\beta \rightarrow \alpha \rightarrow \beta$ and $\beta_1' \rightarrow \alpha + \gamma \rightarrow \beta_1'$ transformation, melting and crystallization.

The investigation was carried out within bounds of Presidium of the Russian Academy of Sciences program «Thermal physics and mechanics of intensive energy influence».



**МЕТОДИКА ТВЕРДОТЕЛЬНОГО
КАЛОРИМЕТРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ
ОСТАТОЧНОЙ ЭНЕРГИИ ПРИТЕРПЕВШИХ
ВЗРЫВНОЕ ОБЖАТИЕ ШАРОВ И ОБОЛОЧЕК**

В.Г. Вильданов, М.М. Горшков, Е.А. Козлов,
О.В. Ткачев, Д.Т. Юсупов

Российский федеральный ядерный центр —
Всероссийский НИИ технической физики
им. акад. Е.И. Забабахина, Снежинск, Россия

Разработана и экспериментально опробована методика твердотельного калориметра.

Методика позволяет выполнять измерения остаточной тепловой энергии сохранённых сферических образцов после их сферического взрывного обжатия.

Разработана полуэмпирическая расчетная модель твердотельного калориметра, удовлетворительно описывающая эксперимент.

Проведена калибровка калориметра в статических условиях.

Приведены экспериментальные результаты взрывных экспериментов по определению остаточной энергии шаров из сталей 30ХГСА, 12Х18Н10Т и меди М1.

**TECHNIQUE OF SOLID-STATE CALORIMETER
FOR MEASURING OF RESIDUAL ENERGY
OF BALLS AND SHELLS WHICH HAVE BEEN
UNDERGONE TO SHOCK COMPRESSION**

V.G.VIL'DANOV, E.A.KOZLOV,
O.V.TKACHEV, D.T.YUSUPOV

Russian Federal Nuclear Center — Zababakhin Institute
of Technical Physics, Snezhinsk, Russia

Technique of solid-state calorimeter was developed and tested.

The technique allows measure residual thermal energy of recovered ball samples after spherical shock loading.

Semi-empirical calculation model of solid-state calorimeter was developed, which satisfactorily describes the experimental data.

Calorimeter static calibration was carried out.

Shock experiments data on determination of residual energy of balls, made of steels 30ХГСА, 12Х18Н10Т and copper М1, are given.

**МОДЕЛЬ УПРУГО–ВЯЗКО–ПЛАСТИЧЕСКИХ
СВОЙСТВ ЖЕЛЕЗА, ОПИСЫВАЮЩАЯ
СДВИГОВЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ В ШИРОКОМ
ДИАПАЗОНЕ СКОРОСТЕЙ ДЕФОРМАЦИИ**

М.Ю. САХАРОВ, Г.В. КОВАЛЕНКО,
А.В. ПЕТРОВЦЕВ, Д.А. ШАПОРОВ

Российский федеральный ядерный центр —
Всероссийский НИИ технической физики
им. акад. Е.И. Забабахина, Снежинск, Россия

Представлены результаты анализа данных по характеристикам сильных ударных волн в железе на основе технологии, предложенной Wallace–1982 и рассматривающей диссипацию энергии во фронте волны вследствие пластического течения и теплопроводности. Учитывается изменение свойств железа, связанное с полиморфным α – ϵ превращением. Полученная информация сопоставляется с другими данными по величинам сдвиговых напряжений в этом материале (квазистатические испытания, динамические испытания по методу Кольского, данные анализа профилей относительно слабых ударных волн для упругого предвестника и фронта пластической волны). На основе всей информации построена модель упруго–вязко–пластических свойств железа, которая используется для моделирования ударно–волновых экспериментов.



**ПОВЕДЕНИЕ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ
МАТЕРИАЛОВ С БЛОЧНОЙ
МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ МАТРИЦЕЙ
ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ УДАРЕ**

И.Ю. ПАШКЕЕВ

Южно–Уральский государственный университет,
Челябинск, Россия

В докладе излагаются результаты исследований поведения металлокерамических материалов с блочной металлической матрицей при высокоскоростном ударе и воздействии на них кумулятивной струи. Исследованы композиционные материалы в металлической оболочке, полученные в процессе самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС–процесс). Доклад является продолжением цикла работ, включающих прогнозирование и исследование разрушения материалов при высокоскоростном ударе



и воздействии кумулятивной струи, представленных на ЗНЧ-5 и ЗНЧ-6. В настоящем докладе приведены результаты испытания образцов от 40 кг до 6 т в диапазоне скоростей удара от 1500 до 8000 м/с.



ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРА ЗЕРНА И ТИПА НАГРУЖЕНИЯ НА СДВИГОВУЮ И ОТКОЛЬНУЮ ПРОЧНОСТЬ В МЕДИ

М.А. ZOCNER

Los Alamos National Laboratory

С.А. Новиков, Б.Л. Глушак,
Ю.В. Батьков, В.А. Скоков, А.Н. Мальшев,
И.В. Шиберин, О.А. Тюпанова, А.П. Большаков,
О.Н. Игнатова, Е.В. Кашатова, В.А. Раевский,
И.Р. Трунин, И.А. Терешкина, С.В. Ерунов,
В.А. Огородников, В.П. Соловьев, П.Н. Низовцев,
С.А. Надежин, Н.А. Юкина

Российский федеральный ядерный центр —
Всероссийский НИИ экспериментальной физики,
Саров, Россия

А.М. БРАГОВ

НИИ Механики Нижегородского госуниверситета,
Нижний Новгород, Россия

Как известно, высокоскоростное деформирование металлов ($\dot{\epsilon} > 10^6 \text{ с}^{-1}$) сопровождается необратимыми изменениями — образованием периодических областей с повышенной пластической деформацией [1, 2]. Внутри зерен области ориентированы в одной плоскости, возможно совпадающей с плоскостью скольжения кристалла. Характерный масштаб гетерогенности составляет для меди ~5—10 мкм и слабо зависит от интенсивности нагружения.

Появление полос локализованной деформации зависит как от типа так и уровня нагружения, то есть существует некая пороговая величина интенсивности ударной волны по достижению которой в материале происходят необратимые изменения — образование полос локализованной пластической деформации. Оценки, подтвержденные экспериментальными исследованиями, показывают, что в меди полосы сдвига

начинают образовываться при достижении ударной волной напряжений ~27 Гпа.

Полосы сдвига изменяют структуру вещества — увеличивается количество границ, препятствующих движению дислокаций, и материал становится более мелкозернистым. Это может влиять как на сдвиговую, так и на откольную прочность.

Целью данной работы является изучение влияния типа и уровня нагружения, а также исходной структуры вещества на его сдвиговую и откольную прочность.

Известно, что в статических условиях металлы (алюминий, медь и др.) с уменьшением размера зерна меняют свои свойства [4]. Но как ультрадисперсные материалы ведут себя при динамических нагрузках ($\dot{\epsilon} \approx 10^3$ — 10^5 с^{-1} и выше и при различных уровнях давлений) из литературы не известно.

Исследования свойств меди с зерном менее 1 мкм при динамическом деформировании проводились двумя методами: составного стержня Гопкинсона ($\dot{\epsilon} \sim 10^2$ — $3 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$, $\epsilon \leq 0,2$) и цилиндров Тейлора ($\dot{\epsilon} \sim 10^5 \text{ с}^{-1}$, $\epsilon \leq 2$). Полученные экспериментальные данные сравниваются с аналогичными данными для меди, имеющей обычный размер зерна.

Исследования влияния типа и уровня нагружения на сдвиговую и откольную прочность проводилось следующим образом. Образцы из меди подвергались воздействию ударных и квазиизэнтропических волн до давления $P \sim 27$ — 30 Гпа. Далее нагруженные образцы исследовались методом составного стержня Гопкинсона ($\dot{\epsilon} \sim 10^3 \text{ с}^{-1}$, $\epsilon \sim 0,2$, $T \sim 293\text{K}$) и проводилось образование растягивающих напряжений с помощью баллистической установки БУТ-76. Схема сборки выбиралась таким образом, что в образце реализовывалась поврежденность $\omega \sim 0$ — $0,08$.

Результаты сравниваются с данными, полученными для меди в исходном состоянии.

Ссылки

1. Chhabildas L.C., Asay J.R. Dynamic yield strength and spall strength measurement under quasi-isentropic loading. Conf. Shock Wave and High Strain Phenomena in Materials. New York, 1992. — P. 947.
2. Grady D., Asay J. Calculation of thermal trapping in shock deformation of aluminum // J.App.Phys. — 1982. — V. 153. — № 11. — P. 7350—7354.
3. Пышминцев И.Ю., Валиев Р.З., Александров И.В., Хотинин В.А., Кильмаметов А.Р., Попов А.А. Особенности механического поведения меди с субмикроструктурной структурой // ФММ. — 2001. — Т.92. — № 1. — С. 99—106.



МОДЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ВЯЗКОСТИ ПРОДУКТОВ ВЗРЫВА КОНДЕНСИРОВАННЫХ ВВ

В.П. КОПЫШЕВ В.П., А.Б. МЕДВЕДЕВ, В.В. ХРУСТАЛЕВ

Российский федеральный ядерный центр —
Всероссийский НИИ экспериментальной физики,
Саров, Россия

Предложена модель вязкости для смесевых жидкостей и плотных газов, подчиняющихся модифицированному уравнению состояния Ван-дер-Ваальса. Для основных компонентов продуктов взрыва и их смесей проведено ее тестирование при относительно низких давлениях и температурах, где имеются надежные экспериментальные данные. Без специальной подгонки модель согласуется с экспериментом с точностью ≈ 2 при изменении вязкости на несколько порядков. Приблизительно той же точности прогноза следует ожидать и при более высоких давлениях и температурах, где применима модель уравнения состояния смеси. Приводится оценка вязкости продуктов взрыва гексогена, ТЭНа и нитрометана в состояниях, реализующихся в детонационных процессах. Вдоль адиабаты расширения продуктов взрыва модельная вязкость изменяется приблизительно на 2 порядка (от $\approx 1 \div 2 \cdot 10^{-3}$ Па·с до $\approx 2 \cdot 10^{-5}$ Па·с) при снижении давления от детонационного до атмосферного.

MODEL VISCOSITY ESTIMATION OF CONDENSED HE EXPLOSION PRODUCTS

V.P. KOPYSHEV, A.B. MEDVEDEV, V.V. KHRUSTALYOV

Russian Federal Nuclear Center —
All-Russian Scientific Research Institute
of Experimental Physics, Sarov, Russia

The model of viscosity for fluid mixtures based on modified Van der Waals equation of state is proposed. For the basic components of explosion products and their mixes the model testing was carried out at rather low pressure and temperatures, where there are reliable experimental data. Without special adjustment the model is coordinated with experiment with accuracy ≈ 2 . Approximately the same accuracy of forecast should be expected and at higher pressures and temperatures, where the equation of state of a mixture is applicable. The estimation of explosion products viscosity for hexogen, TEN and nitromethane in conditions, realized in detonation processes, is presented. Along the expansion adiabat

of explosion products the model viscosity changed on ≈ 2 order (from $\approx 1 \div 2 \cdot 10^{-3}$ Pa·s до $\approx 2 \cdot 10^{-5}$ Pa·s) at decrease from detonation pressure to atmospheric.



ANALYTIC MODEL OF THE SHEAR MODULUS AT ALL DENSITIES AND TEMPERATURES

D.L. PRESTON, L. BURAKOVSKY

Los Alamos National Laboratory,
Los Alamos, NM 87545, USA

We present an analytic model of the shear modulus — a fundamental property of solid matter — that is applicable at all densities greater than or of order ambient, and at all temperatures up to melt. It is based in part on a melting relation obtained from our theory of melting as a dislocation-mediated phase transition. This relation between the density, the melting temperature as a function of density, and the shear modulus along the solidus has been verified through comparisons to high-pressure data on several metals, argon, and hydrogen; the data and the melting relation agree to 1% for argon and hydrogen.

We construct our analytic model of the shear modulus by combining the melting relation with three additional ingredients. First is the Preston-Wallace model for the temperature dependence of the shear modulus. Second is an analytic model of the Grüneisen parameter that is used in conjunction with the third ingredient, the Lindemann criterion, to generate an analytic expression for the density dependence of the melting temperature. The model involves seven parameters, all of which can be determined from zero-pressure experimental data. Electronic structure calculations of the shear moduli of copper and gold to compressions of two agree with the model to within uncertainties, and our model for tantalum is in excellent agreement with measured shear moduli along the Hugoniot of tantalum [R.S. Hixson et al.]. Use of the model for numerical simulations of the plastic deformation of metals at high compressions is briefly discussed.



MOLECULAR DYNAMICS INVESTIGATIONS INTO ELASTIC-PLASTIC PROPERTIES OF SOLIDS

V.V. DREMOV, F.A. SAPOZHNIKOV, M.S. SMIRNOVA

Russian Federal Nuclear Center — Zababakhin Institute
of Technical Physics, Snezhinsk, Russia

Large-scale classical molecular dynamics has been applied to investigations into elastic-plastic properties of solids. Investigations include behaviour of monocrystalline and polycrystalline samples under shock loading and fracture mechanisms when stretching in rarefaction waves.

To investigate the processes we used samples constructed of up to $2 \cdot 10^7$ atoms arranged initially in fcc and bcc lattice having the form of parallelepiped $n_1 a \times n_2 a \times n_3 a$, where a — lattice constant. Various types of boundary conditions were used. The well-known Verlet leap-frog algorithm was used for numerical integration of the motion equations. Embedded Atom Model (EAM) and Lennard-Jones potential have been used to describes interaction between atoms.

Dependence of microstructure response upon copper monocrystalline sample orientation relatively to shock front have been of our initial concern. It was also shown that initial temperature of the sample has strong effect upon character of microstructure behaviour.

Investigations into polycrystalline samples behaviour concern dependence of dynamic yield stress upon average grain size, initial temperature and strain rate.

Simulation of shock compression of bcc iron monocrystalline samples revealed structural changes that may be characterized as polymorphous transition corresponding to bcc → close-packed structure transition. Such transition indeed takes place in shocked iron at ~12 GPa and is known as $\alpha(\text{bcc}) \rightarrow \epsilon(\text{hcp})$ transition. The pressure of the transition obtained in our calculations (~30 GPa) is higher than experimental one and here we face the problem of proper interatomic potential capable to describe equally well more than one phase.

The next series of calculations refers to an investigation into a material behaviour under stretching strain. We have carried out a series of calculations of the model set-up consisted of two fcc samples of different length colliding with given velocity. Boundary conditions were chosen periodic or mirror in transverse to the motion directions and free in parallel direction. As a result of interaction of two release waves formed after shock waves reached free surfaces the region of negative pressure is created in the longer sample. This stretching force may lead to fracture.

We found that initial stage of the fracture is the nucleation of vacancies in the form of spherical voids despite of one-dimensional character of the motion.

Fusion of the voids results in formation of a crack. In the case of polycrystalline samples the centers of the nucleation lay on grain boundaries whereas in the case of monocrystalline sample the centers are stacking faults created by shock waves.



КУМУЛЯТИВНЫЙ СИНТЕЗ ВЫСОКОТВЕРДЫХ ФАЗ

С.А. КИНЕЛОВСКИЙ, Ю.А. ТРИШИН

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН,
Новосибирск, Россия

С.А. ГРОМИЛОВ

Институт неорганической химии СО РАН,
Новосибирск, Россия

При изготовлении облицовки кумулятивного заряда из пористого материала при определенных условиях вместо компактной кумулятивной струи образуется разуплотненный поток частиц материала облицовки, который вместо пробивания преграды может быть использован для нанесения покрытия на преграду-подложку. При этом реализуемые в кумулятивных течениях уровни давлений и температуры позволяют проводить синтез карбидов, нитридов и более сложных соединений из механических смесей порошков металла и соответствующих неметаллических веществ.

Предложены два способа синтеза, приводящих к образованию высокотемпературных сверхтвердых фаз.

В первом случае «кумулятивную струю» улавливают на металлическую мишень (сталь, титан, медь и др.) или в специальную ловушку, заполненную водой и/или льдом. В проведенной серии опытов были использованы облицовки, изготовленные из механических смесей порошков вольфрама, графита и аммиачной селитры, взятых в разных соотношениях. Установлено, что использование разных способов закаливания заметно не сказывается на относительных количествах и кристаллографических характеристиках образующихся высокотемпературных фаз.

Сопоставление результатов экспериментов с результатами анализа фазовой диаграммы системы W-C, позволило получить оценку температурной области, эквивалентной статическим условиям. На основании такой оценки было установлено, что умень-

шение угла раствора кумулятивной облицовки сопровождается ростом температуры и, возможно, давления в кумулятивном процессе.

Во втором способе синтеза новые фазы образуются при взаимодействии кумулятивной струи с поверхностью мишени. В ряде проведенных опытов были использованы кумулятивные устройства, включающие титановую мишень и облицовки, изготовленные из механических смесей порошков графита и аммиачной селитры. В результате были получены покрытия, содержащие карбонитриды титана.

При использовании конической облицовки с углом раствора 30° , изготовленной из смеси мелкодисперсных порошков бора и аммиачной селитры, на титановых мишенях получены покрытия, содержащие карбиды титана — кубической и гексагональной модификаций. Значение параметров элементарных ячеек свидетельствуют об образовании сложных по составу фаз. Микротвердость в некоторых участках мишени достигает 3800 кг/мм^2 .

Полученные результаты показывают, что варьирование условий синтеза путем целенаправленного изменения характеристик кумулятивного устройства является перспективным с точки зрения осуществления поиска новых фаз с уникальными свойствами.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 03–03–32328, 01–03–32873).

SHAPED CHARGE SYNTHESIS OF EXTRA-HARD PHASES

S.A. KINELOVSKY, JU.A. TRISHIN

Lavrent'ev Institute of Hydrodynamics of SD RAS,
Novosibirsk, Russia

S.A. GROMILOV

Institute of Inorganic Chemistry of SD RAS
Novosibirsk, Russia

Under certain conditions a dispersed stream of liner particles is formed rather than a compact shaped charge jet upon the production of a shaped charge liner from porous materials. The stream may be used to cover a barrier-base instead of penetration of target. In this case pressure and temperature points realized in cumulative flows make it possible to synthesize carbides, nitrides and more complex compounds from mechanical mixtures of metal powders and nonmetallic substances. Two ways of the synthesis were suggested to form high-temperature superhard phases.

In the first case, the cumulative stream was caught with a metal target (steel, titanium, copper, etc) or into a peculiar trap filled with water and/or ice. In the series of the experiments we have used the coats produced of the mechanical mixtures of tungsten, graphite, and ammonium nitrate powders which were taken in various ratios. The different annealing techniques have no noticeable influence on the relative amounts and crystallographic characteristics of the high-temperature phases produced. The comparison between experimental results and data on the phase diagram analysis of the W–C system allowed us to estimate a temperature range equivalent to static conditions. Decreasing the aperture angle of shaped charge liner was found to be accompanied by a rise in temperature, and possibly, pressure in cumulative process.

The second synthesis technique provides the formation of new phases upon the interaction of the cumulative stream with the target surface. In some experiments we have applied the cumulative devices that involve the titanium target and the coats prepared from the mechanical mixtures of the graphite and ammonium nitrate powders. This results in the coats containing the titanium carbonitrides.

With conical liner with angle of a cone of 30 deg. , manufactured from mixture of finely divided powders of boron and ammoniac niter, on titanium targets the coverage's containing carbides of titanium — cubic and hexagonal modifications are obtained. Value of parameters of unit cells testify to formation composite on composition of phases. The microhardness in some sites of a target reaches (achieves) $3800 \text{ kg / square millimeter}$.

The results obtained show that a variation of the synthesis conditions by means of purposeful change in characteristics of the cumulative device is promising in a search for new phases with unique properties.



УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ АЛЮМИНИЯ С УЧЕТОМ ИСПАРЕНИЯ И ИОНИЗАЦИИ

А.Т. САПОЖНИКОВ, Е.Е. МИРОНОВА

Российский федеральный ядерный центр —
Всероссийский НИИ технической физики
им. акад. Е.И. Забабахина, Снежинск, Россия

Алюминий широко применяется в технике и научных исследованиях механических и теплофизических свойств веществ. Для математического моделирования процессов при высокой концентрации энергии требуются уравнения состояния в широком диапазоне плотностей и температур.

В докладе излагаются способ и результаты построения широкодиапазонного уравнения состояния

(УРС) алюминия с учетом испарения и ионизации. Для описания ионизации при малых плотностях использовались результаты расчетов по модифицированной модели ионизационного равновесия в газах Саха, а при плотностях выше нормальной — по квантово-статистической модели Томаса–Ферми с квантовыми и обменными поправками (модель ТФП). Вклад теплового движения ядер в этом диапазоне плотностей описывался по модели Копышева (модель ТФПК). Для описания области при нормальном давлении и области, исследованной в ударно-волновых опытах, применялось полуэмпирическое уравнение состояния.

Уравнение состояния алюминия построено путем «сшивки» полуэмпирического УРС металлов с теоретическими моделями САХА и ТФПК и удовлетворительно описывает имеющиеся экспериментальные данные о термодинамических свойствах в нормальных условиях и испарении, а также экспериментальные данные об ударном сжатии сплошного и пористого алюминия. При высоких давлениях или температурах УРС с высокой точностью аппроксимирует расчетные данные по теоретическим моделям САХА и ТФПК.

Для экономичности расчетов на ЭВМ УРС представлен в табличной форме «ГЛОБУС» и может применяться в программах расчета динамики сред при высокой концентрации энергии.

EQUATION OF STATE OF ALUMINUM TAKING INTO ACCOUNT EVAPORATION AND IONIZATION

A.T. SAPOZHNIKOV, E.E. MIRONOVA

Russian Federal Nuclear Center — Zababakhin Institute
of Technical Physics, Snezhinsk, Russia

Aluminum is widely used in technics and scientific investigations into mechanical and thermophysical properties of the matter. Mathematical simulation of the processes at high energy concentration requires the equation of state in the wide range of densities and temperatures.

In this report the technique and the results of the construction of aluminum wide range equation of state taking into account evaporation and ionization. To describe ionization at low densities the results of calculation by modified Saha model of ionization equilibrium have been used, but at the densities higher than normal density Thomas–Fermi model with quantum and exchange corrections and nuclei treatment by Kopyshchev has been applied. To describe the region at normal pressure and the region studied in shock experiments the semiempirical equation of state has been applied.

This equation of state has been constructed by sewing together the semiempirical EOS and theoretical models by

Saha and Thomas–Fermi and has good accuracy when describing available experimental data on thermodynamic properties at ambient conditions and evaporation and experimental data on shock compression of solid and porous aluminum. At high pressures or temperatures the EOS provides for high accuracy approximation of the data obtained with Saha and Thomas–Fermi theoretical models.

The EOS has been converted in the tabular form «GLOBUS» to be efficient when using in hydrodynamic codes.



ИССЛЕДОВАНИЕ УДАРНО–ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В МАТЕРИАЛАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Л.А. МЕРЖИЕВСКИЙ, П.И. ЗУБКОВ,
Л.А. ЛУКЬЯНЧИКОВ, К.А. ТЕН, В.М. ТИТОВ

Институт гидродинамики им. Лаврентьева СО РАН,
Новосибирск, Россия

Г.Н. КУЛИПАНОВ, М.Г. ФЕДОТОВ,
М.А. ШЕРОМОВ

Институт ядерной физики им. Будкера СО РАН,
Новосибирск, Россия

Б.П. ТОЛОЧКО, М.Р. ШАРАФУТДИНОВ

Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН,
Новосибирск, Россия

Использовать рентгеновское синхротронное излучение (СИ) для исследования ударно–волновых и детонационных процессов впервые предложено в [1]. Там же приведены первые результаты изучения детонационных процессов, показавшие уникальные диагностические возможности предлагаемой методики. В данной работе СИ применяется для исследования деформирования и разрушения ряда материалов. В качестве основы метода используется эффект поглощения излучения преградой, с помощью которого осуществляется измерение изменения плотности материала в процессе деформирования и разрушения, и дифракция на малые углы (малоугловое рассеяние), возникающее на микроскопических флуктуациях плотности, что позволяет получать информацию о начале и кинетике деструкции материала и эволюции возникающих или схлопывающихся микропор. Дан анализ особенностей применения указанных эффектов для диагностики в условиях проведенных экспериментов. Исследованы процессы ударного сжатия и разру-

шения кварцевого стекла, канифоли, полиметилметакрилата и сферопластика. Получены данные о динамике распространения ударных волн и волн разрушения в хрупких материалах, структуре волн сжатия в пористом материале. Результаты сравниваются с данными, полученными другими методами. Предложены модели для описания наблюдавшихся процессов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 02-02-16799), программы ведущих научных школ (грант НШ-2073.2003.1) и интеграционного гранта СО РАН № 120.

Ссылки

1. Алешаев А.Н., Зубков П.И., Кулипанов Г.Н. и др. Применение синхротронного излучения для исследования детонационных и ударно-волновых процессов // ФГВ. — 2001. — Т. 37, № 5. — С. 104—113.



НЕКОНГРУЭНТНОЕ ФАЗОВОЕ РАВНОВЕСИЕ В ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ХИМИЧЕСКИ РЕАГИРУЮЩИХ СРЕДАХ

И.Л. ИОСИЛЕВСКИЙ

Московский физико-технический институт
(Гос. Университет), Долгопрудный, Россия

В.К. ГРЯЗНОВ, В.Е. ФОРТОВ

Институт проблем химической физики РАН,
Черноголовка, Россия

Е.С. ЯКУБ, С. RONCHI

European Commission, JRC, Inst.
for Transuranium Elements, Karlsruhe (Germany)

Принципиальной особенностью термодинамики фазовых превращений в высокотемпературной химически реагирующей среде является их неконгруэнтный характер, выражающийся в возможности сосуществования фаз с разной стехиометрией при сохранении фиксированного брутто-состава всей системы. Важным следствием неконгруэнтности в динамике фазового превращения является явная зависимость параметров перехода от скорости превращения. В термодинамике неконгруэнтность фазового превращения приводит: (А) к изменению топологии фазовых границ; и (Б) к изменению характера и параметров особых то-

чек, прежде всего критической точки перехода газ-жидкость.

В настоящей работе проблема неконгруэнтности изучается на примере процесса испарения в высокотемпературной системе уран-кислород. Знание уравнения состояния продуктов нагрева $UO_{2\pm x}$ необходимо при анализе возможных последствий гипотетической крупномасштабной ядерной аварии на существующих и перспективных типах ядерных реакторов, когда в процессе импульсного нагрева ядерного горючего могут быть достигнуты температуры во многие тысячи градусов и давления в сотни и тысячи атмосфер. В работе развита термодинамическая модель плотной и высоко нагретой многофазной системы уран-кислород для описания жидкого и газообразного диоксида урана ($UO_{2\pm x}$) [1, 2]. Главным в модели является выбор единого теоретического описания в рамках так наз. «химической модели плазмы» [3]. Обе сосуществующие фазы, газовая и жидкая, описываются, как многокомпонентная сильно взаимодействующая («неидеальная») смесь химически реагирующих атомов, молекул, атомных и молекулярных ионов и электронов. Это позволило термодинамически самосогласованно рассчитывать границу равновесия газ-жидкость во всем диапазоне параметров ($T \leq 10 \div 20$ kK, $P \leq 1 \div 2$ GPa), включая окрестность критической точки неконгруэнтного испарения [1,2]. Расчет химического, ионизационного и фазового равновесия реализован с помощью кода SANA-VI (развитие линии кодов «SANA», успешно используемых в расчетах термодинамики неидеальных сред, включая объекты ядерной энергетики [3]). В расчете используются термохимические данные банка ИВТАНТЕРМО и комплекс модельных «поправок на неидеальность», учитывающих «внехимическое» короткодействующее притяжение и отталкивание частиц, а также кулоновское взаимодействие зарядов. Параметры межчастичного взаимодействия, предварительно оцененные теоретически [1, 2], окончательно выбираются из условия правильного описания свойств жидкого диоксида урана в точке плавления ($T_m \approx 3120$ K). Дальнейший расчет по «откалиброванной» модели позволяет достичь удовлетворительного согласия со всеми экспериментально известными свойствами жидкого диоксида урана.

Окончательные результаты расчета параметров неконгруэнтного фазового равновесия в системе уран-кислород (включая положение и свойства критической точки) демонстрируют объект принципиально отличный по своей структуре от «обычного» перехода газ-жидкость. Это дает основание обсуждать возможность реализации такого же типа фазового равновесия и для других химически реагирующих систем, включая гипотетическую неконгруэнтность т. наз. «плазменного» фазового перехода в плотной высокотемпературной гелий-водородной смеси в недрах планет гигантов (Сатурн и Юпитер) и других астрофизических объектов.

Ссылки

1. Грязнов В., Иосилевский И., Фортов В. и др. // Известия РАН. — Серия физическая, **63**(11) 2258 (1999); I. Iosilevski, G. Hyland, et al. *Trans. Am. Nucl. Soc.* **81** 122 (1999); *Int. Journ. Thermophys.* **22** 1253 (2001); I. Iosilevski, V. Gryaznov et al. *Journal de Physique IV* 10 (Pr. 5) 363 (2000).
2. INTAS-93-66 Final Reports, European Commission, JRC-ITU (Karlsruhe) 1997, 1999.
3. Теплофизика рабочих сред газозофазного ядерного реактора, Ред. В.М. Иевлев, М. Атомиздат, 1980.

**NON-CONGRUENT PHASE COEXISTENCE
IN HIGH-TEMPERATURE CHEMICALLY
REACTIVE MIXTURES**

I. IOSILEVSKIY

Moscow Institute of Physics and Technology (State University),
Moscow, Russia

V. GRYAZNOV, V. FORTOV

Institute of Chemical Physics Problems, RAS,
Chernogolovka, Russia

E. YAKUB, C. RONCHI

European Commission, JRC, Inst.
for Transuranium Elements, Karlsruhe, Germany

Phase equilibrium in high-temperature chemically reactive mixture principally differs from that in «ordinary» substances with fixed stoichiometry. The basic feature of such two-phase systems is their ability to vary stoichiometries of coexisting phases with no violation of the total «bulk-stoichiometry» («non-congruency»). The *phase transformation dynamics* is defined as the (strong) dependence of phase transition parameters on the rapidity of the transition. On the other hand, the *phase transition thermodynamics* is the essential change of topology of all two-phase boundaries and nature and properties of singular points (first of all, the gas-liquid critical point). In this contribution results of a multi-annual theoretical study [1,2] of the non-congruency problem are reported. The main subject is the high-temperature equation of state (EOS) of the uranium-oxygen system, a system where large-scale non-congruency effects are experimentally observed. From the technological viewpoint, the physics of phase transformations of uranium oxides ($\text{UO}_{2\pm x}$) is of primary importance in calculations of the behaviour of nuclear

calculations of the behaviour of nuclear reactors during hypothetical severe accidents [1], where temperatures of thousands of Kelvins and pressure peaks of several kilobars may be expected, conditions under which the molten reactor core undergoes rapid disassembly.

A thermodynamic model of non-congruent evaporation in fluid uranium dioxide has been developed. Adequate numerical algorithms and an effective numerical code (SAHA-VI) were constructed on the base of the «SAHA» code-line [3]. The model was developed with the basic attempt of describing both coexisting fluid phases (liquid and vapour) in a uniform manner, as multi-component strongly interacting (non-ideal) mixtures of atoms, molecules, molecular and atomic ions, electrons, etc., with a formalism, which is commonly referred to as a «chemical picture» [3]. Chemical reactions, including ionisation, and phase equilibrium have been calculated self-consistently by taking into account all important non-ideality corrections. Parameters of major inter-particle interactions (short-range and Coulomb repulsion and attraction) were evaluated theoretically [1-3]. The EOS was «calibrated» from known thermodynamic properties of liquid UO_2 at the melting point, $T_m = 3120$ K. Finally the fluid model (unique for liquid and vapour phases) have been used for self-consistent calculations of non-congruent phase coexistence in whole useful range of temperature and pressure ($T \leq 10 \div 20$ kK, $P \leq 1 \div 2$ GPa) including the vicinity of the real critical point [1,2].

Calculated phase coexistence in high-temperature U-O system differs fundamentally from an «ordinary» gas-liquid phase transition. Hypothetical effect of non-congruency on phase transitions in other strongly coupled mixtures is also discussed. In particular, it is predicted for so-called 'plasma phase transition' in the H:He mixture in the interiors of giant planets (Saturn and Jupiter) as well as in other astrophysical objects.

References

1. Gryaznov V., Iosilevski I. et al. *Bulletin of Russ. Acad. Sci. (Izvestia RAS)*, 63 (11) 2258 (1999); and I. Iosilevski, G. Hyland et al. *Trans. Am. Nucl. Soc.* 81 122 (1999); *Int. Journ. Thermophys.* 22 1253 (2001); and I. Iosilevski, V. Gryaznov et al. *Journal de Physique IV* 10 (Pr. 5) 363 (2000)
2. INTAS-93-66 Final Reports, European Commission, JRC-ITU (Karlsruhe) 1997, 1999.
3. *Thermophysics of Gas-Core Nuclear Engine* / Ed. by V. Ievlev, Moscow, Atomizdat, 1980.



РАДИАЛЬНОЕ РАЗРУШЕНИЕ И ПЛАСТИЧНОСТЬ СТАЛЬНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК ПРИ ВЗРЫВНОМ НАГРУЖЕНИИ

Е.Ф. Грязнов, М.М. Бойко, В.Н. Охитин

Московский Государственный
Технический Университет им. Н.Э. Баумана,
Москва, Россия

Цилиндрические оболочки, нагруженные изнутри взрывом заряда ВВ, являются инструментом для изучения пластических свойств материалов в широком диапазоне скоростей деформаций (до 10^6 с^{-1}). Однако, оценки деформации разрушения, получаемые, с одной стороны, в процессе нагружения с помощью высокоскоростной оптической или рентгеноимпульсной съемки, и, с другой стороны, путем измерений на фрагментах оболочек после их улавливания в мягкой тормозящей среде, дают заметно различные результаты. В частности, для оболочек из стали 20 в первом случае деформация разрушения достигает 70 %, а во втором — не превышает 35—40%. Одна из основных причин данного противоречия связана с неоднородностью распределения деформаций в стенке расширяющейся оболочки.

Металлографический анализ позволяет выявить в поперечных сечениях фрагментов оболочек, изготовленных, как из малоуглеродистых (ст.20) так и среднеуглеродистых (ст.60) сталей, несколько характерных зон. Микроструктура во внешней и срединной зонах фрагментов незначительно отличается от исходной, здесь можно отметить появление преимущественной (тангенциальной) ориентации зерна. Внутренняя зона фрагментов (начиная с глубины ~0,5мм от внутренней поверхности оболочки) представляет собой зону интенсивного пластического течения — зерна сильно вытянуты в тангенциальном направлении. Количественная оценка деформаций, накопленных к моменту разрушения, проведенная микроструктурным методом Г.А. Смирнова–Аляева, показала, что в оболочке из ст.20 деформация разрушения внешней зоны фрагментов составляет 40—45 %; во внутренней зоне достигает 60 %; минимальный уровень деформации разрушения наблюдается в срединной зоне стенки — 35 %. Измерение микротвердости в поперечном сечении фрагментов показало, что распределение микротвердости как в ст.20, так и в ст.60 аналогично распределению деформаций.

Данные факты подтверждают волновую природу зарождения очагов трещин в срединной зоне стенки оболочки. Последующее развитие первичных очагов происходит в направлении наружной поверхности оболочки. Заключительный этап разрушения связан с

локализованным сдвигом внутренней зоны стенки оболочки. Деформация именно данной зоны стенки оболочки и определяет высокие значения радиусов разрушения наблюдаемых при высокоскоростной оптической и рентгеноимпульсной съемке. Внутренняя зона стенки оболочки является зоной образования своеобразной «шейки», аналогичной той, которая наблюдается при статических испытаниях стандартных образцов на растяжение.

RADIAL FRACTURE AND PLASTICITY OF STEEL CYLINDRICAL SHELL OF EXPLOSIVE LOADING

E.F. GRIYAZNOV, M.M. BOIKO, V.N. OKHITIN

Bauman Moscow State Technical University,
Moscow, Russia

The cylindrical shells, loading internal explosion, are the specimens for study of material plastic properties in broad range of strain rate (about 10^6 s^{-1}). However, estimations of failure strain, got, on the one hand, in process of loading by means of high-speed optical or radiography registrations, and, on the other hand, way of measurements of fragments of shells after there recovery in soft damping environment, give noticeably different results. In particular, for shells, made from steel 20, in first event the failure strain obtain 70 %, but in second — does not exceed 35—40 %. One of the main reasons of given contradiction is connected with spottiness of sharing of strain in wall of expanding shell.

Metallographic analysis allow to several in cross-section of shell fragments, made as from low-carbon (steel 20) so and medium-carbon (steel 60) steels, several typical zones. Microstructure in external and middle fragment zones is small differs from source, here possible note, the appearance preferred (tangential) grain orientation. The internal zone of fragments (as from depth ~ 0,5 mm at inner shell surface) presents itself zone of intensive plastic current — grains are to a marked degree extended in tangential direction. The quantitative estimation of strain value, smoked to moment of failure, at by microstructure G.A. Smirnov–Alaev method, has shown, that in shell from steel 20 failure strain of external zone of fragments forms 40—45 %; in internal reaches 60 %; the minimum level of failure strain exists in a middle zone of wall — 35%. The microhardness measurement in fragments cross-section has shown that both in steel 20 and in steel 60 microhardness distribution similarly distribution of failure strain.

These facts confirm the wave nature of crack nucleation in middle zone of shell wall. The following evolutions of primary centers occur toward external surface of shell. The finale stage of failure is connected with localized shear of internal zone of shell wall. Failure exactly this zone of shell wall defined high value of failure radiuses observed under high-speed optical or rentgenography registrations. The internal zone of shell wall is a zone of formation a distinctive «neck», is similar that, which exists under static tests the standard samples of tensile.



ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ФРОНТА ВЫСОКОСКОРСТНОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ БИНАРНОГО СПЛАВА НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ ФАЗОВОГО ПОЛЯ

А.М. ЛАШИН

ООО «Растр–технология», Москва, Россия

В условиях высокоскоростной кристаллизации бинарных металлических сплавов, когда скорость фронта кристаллизации близка к пределу абсолютной устойчивости, наблюдается возникновение новых механизмов роста кристаллической фазы, образование мелкодисперсной микроструктуры (наноструктуры), а так же зарождение разнообразных метастабильных фаз, таких, например, как аморфные фазы, чей состав и структура не могут быть получены с использованием технологических процессов традиционной металлургии. Подобные условия высокоскоростного охлаждения характерны для передовых технологических процессов получения новых материалов.

Одним из наиболее интересных эффектов при кристаллизации металлических сплавов в условиях высокой скорости охлаждения является образование так называемой зонной или «полосатой» структуры. Такая структура наблюдается, например, при кристаллизации сплавов на основе алюминия и состоит из чередующихся светлых и темных зон, расположенных параллельно фронту кристаллизации. Темные зоны имеют ячеисто-дендритную или эвтектико-ламельную микроструктуру, а светлые полосы соответствуют твердой фазе с однородным композиционным составом без микросегрегации примеси. При высокоскоростной кристаллизации бинарных сплавов, величина концентрации примеси в твердой фазе за фронтом кристаллизации может значительно

превышать значения предсказываемые равновесной фазовой диаграммой. Это явление, известное как «захват» примеси, приводит к уменьшению величины разрыва («скачка») концентрации примеси на фронте кристаллизации с увеличением скорости движения. С увеличением величины скорости движения, плоский фронт направленной кристаллизации теряет свою устойчивость и его динамика носит колебательный (или автоколебательный) характер. Периодическое изменение скорости фронта приводит к периодическому изменению концентрации примеси в растущей твердой фазе, т. е. к наблюдаемой зонной структуре.

В традиционных теоретических исследованиях процесса кристаллизации сплавов используется макроскопическая модель Стефановского типа. Процессы тепло — и массопереноса в этой модели описываются уравнениями диффузии тепла и массы в каждой фазе независимо. Фазовый переход (фронт кристаллизации) представляет собой подвижную поверхность (модель Гиббса), динамика которой определяется решением сопряженной термодиффузионной задачи.

Модели Стефановского типа можно достаточно успешно использовать для расчетов процесса кристаллизации металлических сплавов при скорости движения фронта $\sim 1\text{m/s}$. При более высокой скорости кристаллизации, характерный масштаб изменения распределения концентрации примеси (т.е. диффузионная длина) для типичных металлов становится сравним с шириной фронта кристаллизации и модель межфазной подвижной поверхности не пригодна для описания фазового перехода.

В данном докладе представлена модель (фазового поля) неизотермической кристаллизации идеального бинарного раствора. Термодинамически-согласованные уравнения модели получены на основе законов сохранения (массы и энергии) неравновесной термодинамики и временного уравнения Ландау–Гинзбурга для скалярного параметра порядка. Модель формулируется в виде системы трех нелинейных параболических дифференциальных уравнения для температуры, концентрации примеси и параметра порядка. В докладе представлены некоторые результаты численного исследования направленной кристаллизации переохлажденного (метастабильного) расплава чистого металла, выполненного на основе модели фазового поля. В частности, показана возможность существования квазистационарного режима кристаллизации переохлажденного расплава с образованием твердой фазы в перегретом (метастабильном) состоянии.

NUMERICAL SIMULATION OF AN INTERFACE DYNAMICS DURING THE RAPID SOLIDIFICATION OF BINARY ALLOYS ON THE BASE OF THE PHASE-FIELD MODEL

A.M. LASHIN

«Raster-technology» Ltd., Moscow, Russia

In rapidly solidified alloys, at growth rates close to the absolute stability limit, a different metastable phases and unexpected microstructures have been observed. One of the most interesting effects is the formation of the so-called «banded structures». These structures, observed in various aluminum-based alloys obtained using different techniques, consist of alternating light and dark bands lying parallel to the solidification front. The dark bands exhibit a cellular-dendritic or eutectic-lamellar structure, while the light bands correspond to microsegregation-free solid phase with uniform composition. During rapid solidification of binary alloys, solute may be incorporated into the solid phase at a concentration significantly different from that predicted by equilibrium phase diagram. This process, known as solute trapping, leads to a progressive reduction in the concentration change across the interface as the velocity of the solidification front increases. The banded structures originate from an oscillatory dynamics of the solidification front, driven by loss of interfacial equilibrium. The oscillations of interface velocity result in the periodic variations of solute concentration (solute bands) in the growing solid.

The previous theoretical studies treated the solidification process using the sharp-interface classical model. Sharp-interface (or Stefan-type) macroscopic models of alloy solidification employ the solution to the conventional diffusion equations for heat and solute in each phase independently. The interface between regions of different phase is represented by a zero-thickness-moving surface, which must be found, as part of the solution. The velocity dependence of the jump in solute concentration across the interface («solute trapping») via a velocity-dependent partition (segregation) coefficient, defined as the ratio of the solute concentration in growing solid to that in the liquid at the interface, provides a mechanism whereby the jump vanishes at high rates of solidification in a manner consistent with experimental observations (partitionless or microsegregation-free solidification). While this modeling approach has met with considerable success at low solidification rates, it is clear that at high rates of solidification, the diffusion length is comparable to the interface thickness for metals. At such length scales diffuse interface theories by Cahn-Hilliard are often found to provide more reasonable description of the diffusion process in and around interfacial region.

The paper presents the model of the non-isothermal solidification process of binary alloys based on time-dependent Landau-Ginzburg equations for order parameters and the equations of energy and mass conservation (the phase-field model). The thermodynamical consistence of the model and its applicability to describe the solidification process are discussed. The phase-field model will be utilized to investigate the full time-dependent interface dynamics, which underlies the band formation.



SOME RECENT WORK PREDICTING DUCTILE FAILURE

M.A. ZOCHER

Los Alamos National Laboratory, X-7, MS F699,
Los Alamos, NM 87545, USA

When ductile metals are loaded to capacity, the following sequence of events is often observed. Localized regions of large deformation and plastic flow begin to form on a microscopic level. Then as the deformation proceeds, these localized deformation regions spawn damage in the form of voids, which with further loading grow and coalesce to produce cracks and ultimate failure. The formation of these localized regions of deformation and damage formation introduces a physical length scale to the problem within which localized material softening occurs. The presence of this localized softening phenomenon has important ramifications for the analyst who wishes to predict the deformation and damage evolution process. In dynamic loading problems, the impact is manifested in an ill-posedness of the initial boundary value problem as the governing equation becomes elliptic. Classical rate-independent material models applied to this problem are inadequate in that the numerical results exhibit an unacceptable mesh sensitivity.

To adequately model the above described processes, a material model must introduce an appropriate characteristic length scale to the mathematical formulation which will remove the potential numerical ill-posedness. This might be accomplished through the use of higher order temporal derivatives which are associated with rate-dependent methods, or through non-local schemes which introduce higher order spatial derivatives. A rate-dependent material model has been proposed by Addessio and Johnson to address this issue [1]. This model successfully removed the ill-posedness and exhibited reasonable predictive capability, but because of the explicit nature of the numerical integration algorithm, required a time step so small as to render the model

impractical for some applications. This model has been recently reformulated employing a semi-implicit numerical scheme which allows for a much larger time step. The present work is directed at an evaluation of the predictive capability of the semi-implicit reformulation. The predominant tool to be utilized in this evaluation is a comparison between predicted behavior and observed behavior in experimental tests involving flyer plate impact. Comparisons will be made concerning pressure profiles, free-surface velocity profiles, as well as damage morphology.

References

1. F.L. Addessio, and J.N. Johnson. Rate-dependent Ductile Failure Model // *J. of App. Phys.*, 74, (1993), 1640—1648.



УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛОВ В ТАБЛИЧНОЙ ФОРМЕ С УЧЕТОМ ФАЗОВЫХ ГРАНИЦ И МЕТАСТАБИЛЬНЫХ ОБЛАСТЕЙ

П.Р. ЛЕВАШОВ, К.В. ХИЩЕНКО, И.В. ЛОМОНОСОВ

Институт теплофизики экстремальных состояний
Объединенного института высоких температур РАН,
Москва, Россия

Широкодиапазонные многофазные уравнения состояния веществ необходимы для решения многих задач физики высоких плотностей энергии. Однако расчет термодинамических свойств по аналитическим зависимостям многофазных уравнений состояния занимает достаточно большое время, что приводит к необходимости использования различных методов интерполяции. В данной работе предлагается новый способ представления многофазных уравнений состояния [1] в виде таблиц термодинамических функций и их производных на специально сконструированных сетках, адаптированных к границам фаз и метастабильных областей.

При интерполяции используются двумерные таблицы термодинамических функций и их производных в зависимости от удельного объема и температуры. Для каждой области стабильности одного и того же фазового состояния прямоугольная сетка конструируется таким образом, чтобы фазовая граница проходила через ее узлы [2]. Для областей метастабильных состояний перегретой жидкости и переохлажденного пара при положительном давлении, а также твердого тела, зоны плавления и жидкости при отрицательном давлении также формируется отдельная сетка. Значения параметров в произвольной точке фазовой диа-

граммы находятся в результате билинейной интерполяции по четырем точкам, а вблизи фазовых границ — линейной интерполяцией по трем точкам, две из которых находятся непосредственно на границе. Значения термодинамических функций на кривых плавления, испарения, сублимации и границах метастабильных областей определяются линейной интерполяцией по двум точкам. В качестве входных параметров можно также использовать удельный объем

и давление или удельный объем и внутреннюю энергию. Описанный способ интерполяции обеспечивает монотонность поведения термодинамических функций, в частности, удельных изобарной и изохорной теплоемкостей и адиабатической скорости звука, позволяет существенно повысить точность их расчета вблизи фазовых границ [2], а также существенно увеличивает скорость вычислений по сравнению с методами интерполяции высокого порядка.

Ссылки

1. Бушман А.В., Канель Г.И., Ни А.Л., Фортов В.Е. Теплофизика и динамика интенсивных импульсных воздействий. — Черногоровка: ИХФ АН СССР, 1998.
2. Левашов П.Р., Ломоносов И.В., Фортов В.Е., Хищенко К.В. // *Физика экстремальных состояний вещества* — 2002 / Под ред. Фортова В.Е. и др. — Черногоровка: ИПХФ РАН, 2002. — С. 70—72.

EQUATIONS OF STATE FOR METALS IN TABULAR FORM TAKING INTO ACCOUNT PHASE BOUNDARIES AND METASTABLE REGIONS

P.R. LEVASHOV, K.V. KHISHCHENKO,
I.V. LOMONOSOV

Institute for High Energy Densities of Associated Institute
for High Temperatures, RAS, Russia

Wide-range multiphase equations of state are necessary for the solution of many problems of high energy densities physics. But the calculation of thermodynamic properties using analytical dependencies of multiphase equations of state takes rather long time. Therefore it is essential to use different interpolation methods. In this work we propose the new way of multiphase equations of state [1] representation as the tables of thermodynamic functions and their derivatives on specially constructed meshes adapted to the phase and metastable regions boundaries.

In the interpolation procedure it is used two-dimensional tables of thermodynamic functions and their

derivatives depending on specific volume and temperature. For every region of stability of every phase state the rectangular mesh is constructed so that a phase boundary passes through the nodes of the mesh [2]. For the regions of metastable states of superheated liquid and supercooled vapor at positive pressure as well as for the regions of solid state, melting zone and liquid state at negative pressure the separate mesh is generated. The values of parameters in the auxiliary point of phase diagram are found as a result of 4-point bilinear interpolation. In the vicinity of phase boundaries we use 3-point linear interpolation, two of these 3 points lie immediately on the boundary. The values of thermodynamic functions on melting, evaporation and sublimation curves and boundaries of metastable regions are calculated by the 2-point linear interpolation. One can also use specific volume–pressure or specific–volume–internal energy as input parameters. The described way of interpolation guarantees the monotonous behavior of thermodynamic functions, in particular, specific constant pressure and constant volume heat capacities and adiabatic sound velocity. This technique allows one to increase the accuracy of their calculations near phase boundaries [2] as well as speeds up the computations in comparison with the interpolation methods of high order.

References

1. Bushman A.V., Kanel G.I., Ni A.L., Fortov V.E. *Термофизика и динамика интенсивных импульсных воздействий* (Thermal physics and dynamics of intense pulsed simulations). — Chernogolovka: ICP USSR AS, 1988.
2. Levashov P.R., Lomonosov I.V., Fortov V.E., Khishchenko K.V. // *Fizika ekstremal'nykh sostoyaniy veshchestva* (Physics of extreme states of matter) — 2002 / Eds. Fortov V. E. et al. — Chernogolovka: ICP RAS, 2002. P. 70—72.



ЭЛЕКТРОННЫЕ И АТОМНЫЕ СВОЙСТВА ЖИДКОГО ЦЕЗИЯ ВБЛИЗИ КРИТИЧЕСКОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ: КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДААННЫЕ

Б.Р. ГЕЛЬЧИНСКИЙ

Челябинский научный центр УрО РАН,
Челябинск, Россия



УДАРНАЯ СЖИМАЕМОСТЬ, ИЗОЭНТРОПЫ РАЗГРУЗКИ И УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ХРОМА ПРИ ВЫСОКИХ ПЛОТНОСТЯХ ЭНЕРГИИ

К. В. ХИЩЕНКО, С. И. КИРШАНОВ,
И. В. ЛОМОНОСОВ, В.Е. ФОРТОВ

Институт теплофизики экстремальных состояний
Объединенного института высоких температур РАН,
Москва, Россия

М.В. ЖЕРНОКЛЕТОВ, А.Е. КОВАЛЕВ, А.Б. МЕЖЕВОВ,
М.А. МОЧАЛОВ, И.П. ТРУСОВ, А.Н. ШУЙКИН

Российский федеральный ядерный центр —
Всероссийский НИИ экспериментальной физики,
Саров, Россия

Представлены результаты экспериментального исследования пористых образцов хрома с начальной плотностью $4,22 \text{ г/см}^3$ в волнах адиабатической разгрузки при отражении проходящих ударных волн с интенсивностью 0,9 и 1,1 Мбар от преград различной динамической жесткости (плексиглас, пенополистирол различной начальной плотности, ксенон, криптон, аргон и воздух). Разработано полуэмпирическое уравнение состояния металла с учетом плавления и испарения, проведены расчеты параметров фазовой диаграммы в широком диапазоне давлений и температур. Выполнено критическое сопоставление расчетных результатов с совокупностью новых и имевшихся ранее данных экспериментов при высоких плотностях энергии.

SHOCK COMPRESSIBILITY, RELEASE ISENTROPES, AND EQUATION OF STATE OF CHROMIUM AT HIGH ENERGY DENSITIES

K.V. KHISHCHENKO, I.V. LOMONOSOV,
V.E. FORTOV

Institute for High Energy Densities, RAS, Moscow, Russia

M.V. ZHERNOKLETOV, S.I. KIRSHANOV,
A.E. KOVALEV, A.B. MEZHEVOV, M.A. MOCHALOV,
I.P. TRUSOV, A.N. SHUIKIN

Russian Federal Nuclear Center — All-Russian Scientific Research Institute of Experimental Physics, Sarov, Russia

In the present study we have measured states of chromium samples with initial density 4.22 g/cm^3 in adiabatic release waves originated from Hugoniot pressures of 0.9 and 1.1 Mbar using barrier technique (barriers were polymethylmethacrylate, foamed polystyrene with various initial densities, xenon, krypton, argon, and air). We propose the semiempirical equation of state for chromium, which takes into account melting and evaporation effects. The critical analysis of calculated results in comparison with the newly acquired and available at high energy densities experimental data is made.



ПРОЦЕССЫ НА НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ ЭЛЕКТРОВЗРЫВА ПРОВОЛОЧЕК В МОДЕЛЯХ С РАЗНЫМИ КРИВЫМИ ПЛАВЛЕНИЯ

С.И. ТКАЧЕНКО, К.В. ХИЩЕНКО, П.Р. ЛЕВАШОВ

Институт теплофизики экстремальных состояний
Объединенного института высоких температур РАН,
Москва, Россия

При анализе процессов, происходящих в сплошной среде при высокой концентрации энергии, большое значение имеет корректность описания теплофизических свойств вещества. В данной работе проводится сопоставление результатов моделирования электрического взрыва вольфрамового проводника с использованием двух разных полуэмпирических уравнений состояния, основное различие которых состоит в точности описания характеристик твердой фазы металла и кривой плавления.

PROCESSES ON INITIAL STAGE OF WIRE ELECTRICAL EXPLOSION IN MODELS WITH DIFFERENT MELTING CURVES

S.I. TKACHENKO, K.V. KHISHCHENKO, P.R. LEVASHOV

Institute for High Energy Densities, RAS, Moscow, Russia

It is very important for numerical simulation to include correctly thermophysical properties of substance at high energy densities. We present results of modeling of tungsten wire electrical explosion. We compare results obtained using two semiempirical equations of state with different quality of description of solid phase properties and melting curve of metal.

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НЕКОТОРЫХ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ВЫСОКИХ СКОРОСТЯХ ДЕФОРМАЦИИ

А.М. БРАГОВ, А.К. ЛОМУНОВ, И.В. СЕРГЕИЧЕВ

НИИ механики ННГУ, Нижний Новгород, Россия

В докладе представлены результаты исследования поведения некоторых горных пород. Исследовались статические и динамические свойства двух сортов мрамора уральских месторождений (Коелга и Первоуральский) и один сорт карельского гранита (габбро-диабаз). Программой испытаний предусматривалось получение статических и динамических диаграмм горных пород при сжатии и определение разрушающих напряжений при растяжении методом раскалывания при сжатии.

Образцы для испытаний в виде прямоугольных параллелепипедов были выпилены алмазным отрезным кругом из плоских плит толщиной 20 мм и имели размеры $20 \times 20 \times 10$ мм, $20 \times 20 \times 20$ мм, $20 \times 20 \times 30$ мм и $30 \times 30 \times 20$ мм.

С помощью методики Кольского с использованием разрезного стержня Гопкинсона диаметром 20 мм, проведены динамические испытания при простом сжатии. Испытывались образцы сечением 20×20 мм и длиной 10, 20 и 30 мм, что позволило, с одной стороны, оценить масштабный фактор, а с другой — определить скорость распространения упругих волн в материале. Приведены полученные динамические диаграммы деформирования и определенные по ним некоторые характерные параметры: модули нагрузочных ветвей, прочность при сжатии, время до разрушения. Обнаружена зависимость свойств от скорости нагружения и геометрии образцов: с увеличением скорости деформации прочность всех испытанных типов горных пород увеличилась, при увеличении длины образца крутизна нагрузочной ветви также увеличивается.

Статические испытания при сжатии выполнялись на установках УРС 20/2000 и УМЭ-10Т с тиристорным приводом. Образцы габбро-диабазы при достижении предельной прочности разрушались очень

резко на мелкие куски, а образцы мраморов при достижении предельной прочности разрушались достаточно плавно, с постепенным выкрашиванием материала на боковых поверхностях. По сравнению с габбро-диабазом для обоих сортов мрамора можно отметить больший разброс значений прочности и крутизны нагружающей ветви, что может быть вызвано, с одной стороны, меньшей прочностью мрамора и возможностью его внутренних повреждений при выпиливании образцов, а с другой стороны — возможной анизотропией материала и неконтролируемостью ориентации вырезки образцов из массива материала.

Динамические испытания на раскалывание проводились по типу «бразильского теста», но образцы имели форму прямоугольных параллелепипедов сечением 20×20 мм и 30×30 мм при толщине обоих вариантов 20 мм. Аналогичная методика определения прочности при раскалывании применялась и при статических испытаниях.

Проведено сравнение значений прочности, как при сжатии, так и при растяжении, полученных при статических и динамических испытаниях. При растяжении прочность горных пород меньше, чем при сжатии, приблизительно на порядок, что хорошо согласуется с общепринятыми представлениями о прочности хрупких материалов типа бетонов и камней.

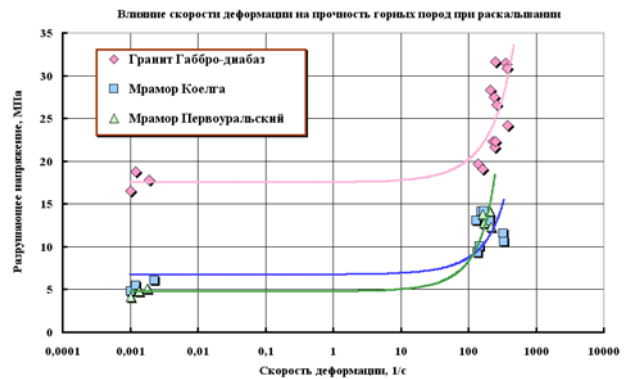
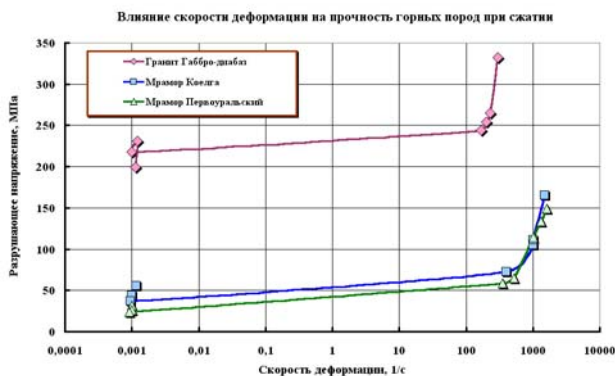


Рис.1. Зависимость прочностных свойств горных пород от скорости деформации

Наблюдается известная тенденция: слабое изменение прочности горных пород, как при сжатии, так и при раскалывании, до скоростей деформации $\sim 10^2 \text{ с}^{-1}$.



СИНТЕЗ И СПЕКАНИЕ АЛМАЗА ВЗРЫВОМ

В.В. ДАНИЛЕНКО

Энергоатомиздат, Москва, Россия

В книге рассматриваются вопросы, связанные с взрывными технологиями синтеза и спекания алмаза: основные свойства алмаза, ударно-волновой и детонационный синтез алмаза, условия образования ультрадисперсных алмазов, их свойства и применение, проектирование взрывных камер, спекание алмазных порошков в статических и динамических условиях, компьютерное моделирование некоторых процессов ударно-волнового спекания. Книга предназначена для научных работников, инженеров, технологов, ас

пирантов, специализирующихся в области синтеза алмаза, взрывных технологий и материаловедения.

SYNTHESIZING AND SINTERING OF DIAMOND BY EXPLOSION

V.V. DANILENKO

Energoatomizdat, Moscow, Russia

In the book the problems, bound with explosive know-hows of synthesizing and sintering of diamond are esteemed: main properties of diamond, shock-wave and detonation synthesizing of diamond, condition of formation of ultra-dispersed diamonds, their properties and applying, designing of explosive cameras, sintering of diamond powders in static and dynamic conditions, computer simulation of some shock-wave sintering processes. The book is intended for the scientists, engineers, technologists, post-graduates specializing in the area of synthesizing of diamond, explosive and materials technologies.



ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ АЛЮМИНИЯ ПРИ НЕПРЕРЫВНОМ ПЕРЕХОДЕ ИЗ КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ В ГАЗООБРАЗНОЕ

В.Н. КОРОБЕНКО, А.Д. РАХЕЛЬ,
А.И. САВВАТИМСКИЙ, В.Е. ФОРТОВ

Институт теплофизики экстремальных состояний,
Москва Россия

Методика импульсного джоулевого нагрева [1] позволяет исследовать переход металла из конденсированного состояния в газообразное поддерживая при этом почти однородное состояние вещества в образце. При помощи этой техники было измерено электрическое сопротивление алюминиевого образца в процессе, при котором динамическое давление поддерживалось на уровне 20—45 кбар, а плотность металла уменьшалась от нормальной плотности твердого тела до значений примерно в 15—30 раз меньших. Поскольку отмеченный уровень давлений гораздо выше критического давления (по разным оценкам,

критическое давление алюминия составляет 3—5 кбар), переход из конденсированного состояния в газообразное был непрерывным. Результаты, полученные в настоящей работе, показали, что для процесса с характерным давлением 20—25 кбар плотностная зависимость проводимости алюминия радикально меняет свой характер при определенном значении плотности (при этой плотности на соответствующей зависимости формируется «колени»). Плотность, соответствующая этому «колени», примерно в 8—10 раз меньше, чем нормальная плотность твердого тела, а внутренняя энергия образца в этом состоянии в несколько раз превышает теплоту сублимации алюминия. При повышении давления от 20 до 40 кбар, плотностная зависимость проводимости в области «колени» становится гораздо более пологой и плавной.

Ссылки

1. Korobenko V.N., Rakhel A.D. // Int. J. Thermophys. — 1999. — V. 20. — P. 1259.